

Marcel-Paul Schützenberger

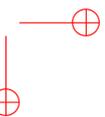
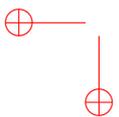
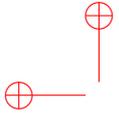
ŒUVRES COMPLÈTES

éditées par
Jean Berstel, Alain Lascoux et Dominique Perrin

*

Tome 13 : Écrits divers

**Institut Gaspard-Monge, Université Paris-Est
2009**



Introduction

Tome XIII : divers

Ce treizième et dernier tome des travaux de Marcel-Paul Schützenberger contient ses autres écrits, qui sont de nature ou de forme différente. La séparation entre ces catégories est parfois un peu difficile à faire : nous avons retenu simplement le support de la publication.

L'article *L'algèbre et les jeux* [XIII-10] est paru dans la revue *United States Lines Paris Review* en 1956. Cette revue était distribuée aux passagers des navires SS United States et SS America qui faisaient la traversée de l'Atlantique. La revue a été créée par le peintre Georges Mathieu qui est à l'époque directeur des relations publiques de la compagnie américaine United States Lines à Paris. De 1953 à 1963, il est rédacteur en chef de la revue. Elle fut diffusée aussi dans les universités françaises, européennes et américaines. Les articles sont bilingues français-anglais.

Les contributeurs sont renommés : « Le premier numéro contient des textes de I. A. Richards, de Frank Lloyd Wright, de Luigi Moretti, de Louis de Broglie, de Norbert Wiener, de George A. Plimpton, de Serge Lifar, de Thomas B. Hess, de Maurice Leroux, de René de Solier et d'une quinzaine d'écrivains, de critiques d'art, de chorégraphes, de psychiatres, de cinéastes qui encadrèrent le texte-manifeste de Lupasco dans une mise en page spectaculaire » (Georges Mathieu). Le numéro spécial de 1956 est consacré aux jeux. On y trouve aussi un article de Claude Lévi-Strauss sur les jeux de société, un autre, de Christiane Desroches-Noblecourt sur les jeux aux temps des pharaons, et un article de Claude Berge sur la théorie mathématique des jeux.

M.-P. Schützenberger a participé à deux émissions de radio coordonnées par François Le Lionnais. La première, sur la théorie de jeux *Des divertissements et des jeux aux conflits de la guerre et de la diplomatie* [XIII-11], permet à M.-P. Schützenberger et à Claude Berge d'exposer la théorie des jeux de von Neumann, déjà citée dans [XIII-10] et qui sera longuement exposée dans *Le duel mathématique* [1989-2] au tome XII. La deuxième, avec F. H. Raymond, s'intitule *La notion d'information en cybernétique* [XIII-12]. On y parle surtout de la théorie de l'information.

L'article *Les failles du darwinisme* [XIII-8], paru dans *La Recherche*, a eu un écho considérable, bien au delà de la France. Bien évidemment, la communauté du « Intelligent Design » en est ravie, comme en témoigne sa traduction en anglais *The Miracles of Darwinism* [XIII-8]. De nombreuses lettres de lecteurs et prises de position sont publiées dans le numéro suivant de *La Recherche* et dans d'autres journaux.

Références du tome XIII

- [XIII-1] Centre mondial, l'université en colère. *Temps réel, le magazine de l'informatique*, 41 :44–45, 6-19 septembre 1982. J. Arzac, M. Gross, L. Nolin, M.-P. Schützenberger, Raymond, J.-C. Simon, J. Vignes.
- [XIII-2] Vous avez dit "Intelligence artificielle"? *La Recherche*, 174 :44–45, février 1986. J. Arzac, C. Choffrut, R. Cori, M. Eden, M. Gross, A. Lentin, M. Nivat, L. Nolin, D. Perrin, M. Salkoff, M.-P. Schützenberger, J.-C. Simon.
- [XIII-3] La réforme de l'orthographe. *Pour la science*, 139 :6–8, mai 1989. Avec M. Gross et E. Laporte.
- [XIII-4] L'homéopathie, mythe ou réalité. *Dossier Familial*, pages 14–16, mai 1989. Débat avec Gérard Pacaud.
- [XIII-5] D'un horloger à l'autre. *Pour la science*, 152, juin 1990.
- [XIII-6] Marcel Schützenberger : les chantres de l'interdisciplinarité. *Dynasteurs*, pages 101–102, avril 1988. Propos recueillis par Nicolas Witkowski.
- [XIII-7] Une cellule est bien plus complexe qu'un Boeing 747. *Dynasteurs*, pages 86–92, mars 1990. Propos recueillis par Olivier Postel-Vinay.
- [XIII-8] Les failles du darwinisme. *La Recherche*, 283 :86–90, janvier 1996. Propos recueillis par Olivier Postel-Vinay.
- [XIII-9] The Miracles of Darwinism. *Origins & Design*, 17(2), 1996.
- [XIII-10] Algebra and games, l'algèbre et les jeux. *United States Lines Paris Review*, 1956. Paris.
- [XIII-11] Des divertissements et des jeux; aux conflits de la guerre et de la diplomatie. Une émission de F. Le Lionnais, avec M.-P. Schützenberger et C. Berge, diffusée le 6 mars, 1958.
- [XIII-12] La notion d'information en cybernétique. Une émission de F. Le Lionnais, avec M.-P. Schützenberger et F. H. Raymond, diffusée le 14 mai 1959, à 19h15, durée : 35 minutes, 1959.
- [XIII-13] Titres et travaux. 1956.
- [XIII-14] Titres et travaux. 1988.

CENTRE MONDIAL : L'UNIVERSITÉ EN COLÈRE

L'informatique est l'un des rares secteurs — sinon le seul — où les offres d'emploi sont moins nombreuses que les demandes. C'est donc fort logiquement que les étudiants se pressent en nombre aux portes des départements « informatique » des universités. Mais la logique s'arrête là. Faute de moyens, ces départements — d'ailleurs assez rares en France — sont incapables de satisfaire toutes les demandes d'inscription. La formation à l'informatique est un sérieux goulot d'étranglement de la filière électronique. D'où la colère qu'a provoquée parmi les universitaires la création du Centre mondial de Jean-Jacques Servan-Schreiber, doté de 65 MF de crédits publics en 1982.

JJSS est-il le Lyssenko français de l'informatique ? Sept universitaires français (*) font aujourd'hui éclater au grand jour la guerre larvée qui les oppose au Centre mondial « Informatique et ressources humaines » créé en mars dernier par François Mitterrand sur proposition de Jean-Jacques Servan-Schreiber (voir *Temps Réel* n° 25 et 33). Un article intitulé « Informatique : comment la France invente le nouveau cerveau du monde », paru le 5 juin dernier dans *Le Nouvel Observateur*, a mis en effet le feu à la poudre. N'y lisait-on pas que « L'informatique traditionnelle, institutionnelle, celle d'IBM ou du rapport Nora-Minc, prétend faire asseoir tout le monde devant les terminaux pour exécuter des programmes conçus par une secte d'initiés. L'ordinateur est un outil extraordinaire. Il est à l'image du cerveau, il peut tout faire mais, jusqu'à présent, il a été confisqué par les informaticiens. Ils l'ont entouré de crainte et de révérence, protégé par toute une liturgie de codes et de procédures qui impose à ses servants une incroyable gymnastique de l'esprit et décourage les profanes de s'en approcher. Il faut entrer en informatique comme en religion. » Il faut donc aujourd'hui « abattre le mur que l'informatique officielle a élevé

entre l'homme et la pensée ».

Le Centre mondial qui devrait regrouper une centaine d'informaticiens, sous la houlette de deux chercheurs du MIT, Nicolas Negroponte et Seymour Papert, avec un budget de 700 MF par an, prétend justement créer des outils tant logiciels que matériels pour rendre la micro-informatique accessible à tout un chacun. Les raisons qui motivèrent la création du Centre ont été réprécisées par Jean-Jac-

ques Servan Schreiber, lors d'une audition devant la commission de la science et de la technologie du Congrès des Etats-Unis, à Washington, le 19 mars dernier. Elles sont au nombre de trois :

« La première raison est la conviction qu'il doit exister un lien organique entre le progrès technologique et le progrès social... Les forces sans précédent de la révolution scientifique et

technologique n'ont pas été maîtrisées... L'ambition du Centre mondial est de contribuer à un processus, urgent, d'adaptation...

« La deuxième raison est l'incapacité évidente du système économique mondial, tout au long des années 70, à freiner l'aggravation de la crise économique et sociale... Plus d'un tiers des travailleurs d'aujourd'hui, hommes et femmes, devrait avoir changé d'emploi, avant la fin des années 80. Si nous ne savons pas mettre en œuvre, avec efficacité, les moyens technologiques nécessaires pour leur permettre d'obtenir et de maîtriser une nouvelle formation, vers de nouveaux emplois, ce serait alors des dizaines de millions d'autres chômeurs, qui iraient grossir l'armée du désespoir...

« La troisième raison est l'émergence rapide, irréversible, autour du petit univers des pays privilégiés, de l'immense population du tiers monde... Le monde industriel ensemble doit, pour sa survie, ouvrir une voie analogue [à celle du « Plan Marshall »] aux pays du tiers monde... La science de l'informatique personnelle met entre nos mains cette capacité de former les hommes à de nouveaux emplois, dans toutes les cultures et à tous les âges. »

Le parc informatique du Centre mondial

Le système informatique du Centre mondial comprend :

- un Vax, Dec 20/60 de Digital Equipment ;
 - cinquante micro-ordinateurs Apple donnés par les constructeurs ;
 - une machine Lisp de la société Symbolics ;
 - deux systèmes de reconnaissance de la parole DP 200 de NEC (tous les matériels ci-dessus donnés par les constructeurs) ;
 - un Vax 11/780 acheté ;
 - une machine de développement pour Motorola 68000 de Exormacs louée 150 000 F par mois ;
 - une seconde machine Lisp achetée à Symbolics ;
 - cinquante terminaux CCT achetées par le Centre.
- Le Centre envisage également d'acheter prochainement :
- un SU - Vax ;

- trois imprimantes à laser Alcatel Electronique ;
- quinze Micromega Thomson ;
- cinquante terminaux Matra (type Minitel).

Les ordinateurs du Centre peuvent également être connectés aux réseaux Transpac et Tymnet via le Dec 20/60 (voir schémas).

En 1982, le Centre aura bénéficié d'un budget de 65 MF, dont 35 sont d'ores et déjà acquis. Ce budget sera de 200 MF par an en 1983 : 100 MF provenant de « ressources françaises » et 100 MF de « ressources internationales ». Ce budget sera découpé en trois tiers : frais de fonctionnement, frais d'équipement, et salaires. Cinquante permanents (100 d'ici la fin de l'année) dont 35 techniciens et chercheurs sont en effet salariés du Centre, qui ont encadré en outre une vingtaine de stagiaires durant l'été.

De gauche à droite, Marco Schutzemberger, Michel Gross (professeurs à Paris VII) et Jean-Claude Simon (professeur à Paris-VI).



« DES THEORIES DELIRANTES »

« Balivernes, répondent Jean-Claude Simon et ses compères, les théories du Centre mondial sont délirantes. En 1935, l'agrobiologiste soviétique I.D. Lysenko n'en promettait pas tant au Comité central, seulement de créer à bref délai une abondance de produits agricoles, en suivant une voie "révolutionnaire" en dehors des goulags et des saboteurs de la science officielle. Lysenko eut des moyens illimités, et il ne tarda pas à annoncer des résultats stupéfiants. En 1948,

tout travail scientifique cessa en biologie. La fausse science lysenkienne, niant entre autres l'existence des gènes et la théorie mendélienne de l'hérédité, règne en maître, portant un coup fatal à la biologie et à l'agriculture soviétiques. Même démarche de JJSS avec Seymour Papert dans le rôle du bon jardinier Mitchourine : des promesses extravagantes, accompagnées d'accusations sur la science officielle. » Et Jean-Claude Simon d'ajouter : « Le goulag moderne, ce n'est plus de nous mettre en prison, c'est de nous priver d'argent. » N'est-ce pas en effet là que le bât blesse ? Pourquoi les univer-

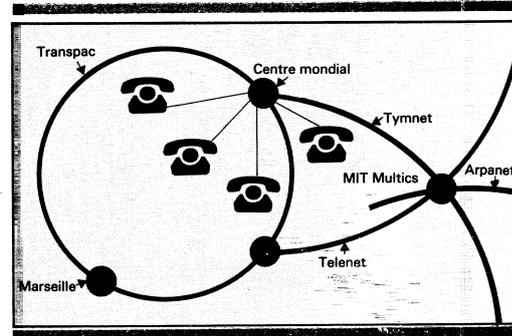
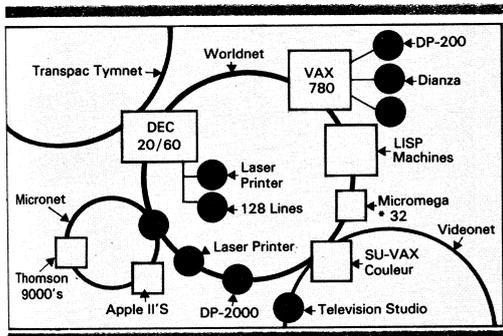
sités françaises, et l'Institut de programmation de Paris en particulier, sont-ils à tel point sous-équipés ? Manque de postes d'enseignants (alors que les candidats sont nombreux), matériels nettement insuffisants. « Le Multics de Rennes, auquel nous sommes connectés, faute d'avoir un matériel en propre, est saturé. Les étudiants vont aux consoles avec leurs sandwiches et se passent les postes de copain en copain ! Un comble : les opérateurs n'ont pas de prime ; l'ordinateur peut être ainsi arrêté tout un week-end ! On nous accuse d'être des théoriciens. Mais nous ne demanderions pas mieux que

d'avoir un Vax pour faire de la pratique ! »

UN SOUS-EQUIPEMENT ANCIEN

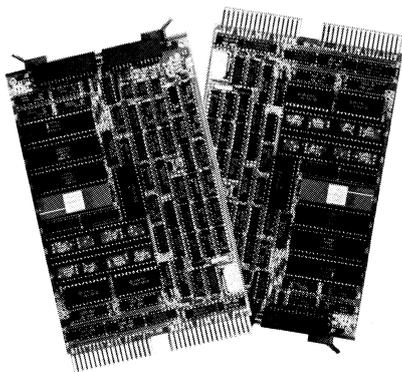
« A ce jour, affirme M. Gross, professeur à Paris-VII, nous n'avons pas reçu un centime en crédit d'équipement pour l'année 82 ». Et Marco Schutzemberger de se souvenir : « En 1966, j'ai eu des crédits d'installation qui me permettaient tout juste d'avoir un projecteur de film 8 mm ! »

Le sous-équipement des départements d'informatique des universités françaises ne date



TEMPS REEL - 6/9/1982 - 45

LSI
**L'EXPERIENCE
 EN PLUS**



DIGITAL

- 2^e fabricant mondial d'ordinateurs,
- 1^{er} fabricant mondial de cartes micro-ordinateurs 16 bits,
- une gamme complète de produits compatibles,
- un service de formations efficace,
- un réseau de maintenance national et international,
- des produits de haute fiabilité,
- des moyens de développement uniques,
- des prix très compétitifs sur le marché.

SINFODIS

- plusieurs années de collaboration avec DIGITAL,
- 1^{er} distributeur en France « micros » DIGITAL,
- plus de 750 cartes LSI 11 processeurs installées par nos soins,
- support technique matériel et logiciel,
- aide à la configuration et à la mise en route,
- maintien d'un stock important,
- organisation souple et efficace,
- prix identiques à ceux des constructeurs.

Sinfodis s.a.
 Distributeur **digital** Agréé
 MICRO ORDINATEURS

SINFODIS S.A. 64-66, bd Stalingrad
 94400 VITRY-SUR-SEINE. Tél. : (1) 658.50.55.
 SINFODIS RHONE-ALPES. Tél. : (7) 826.16.52.
 TECHNOLOGIE DIFFUSION NANTES Tél. : (40) 47.80.70
 SINFODEST NANCY Tél. : (8) 329.13.90

TEMPS REEL - 6/9/1982

SOCIETE / **L'UNIVERSITE EN COLERE**

► pas d'hier ! En comparaison, le budget, les effectifs et le matériel (voir encadré) mis à la disposition du Centre mondial, c'est un peu le Pérou. Or, J.-C. Simon aurait peut-être accepté d'y collaborer s'il lui avait semblé reposer sur des bases scientifiques solides, ce qu'il conteste violemment : « On nous a certes consultés mais on ne nous a pas écoutés », affirme-t-il. Raison pour laquelle il a refusé d'appartenir au conseil scientifique du Centre : « Je ne pouvais participer à une escroquerie pareille. Le Centre mondial est la risée de la communauté scientifique internationale. »

Marco Schutzenberger précise : « L'investissement nécessaire pour rentrer aujourd'hui dans cette course est impensable ; les compagnies américaines poursuivent le même objectif avec des moyens considérablement supérieurs. »

**HUIT GROUPES
 DE TRAVAIL**

Nonobstant ces critiques, les groupes de travail du Centre mondial se mettent en place : ils se répartissent en trois grands domaines : informatique, applications, actions sociales.

Le thème informatique comprend cinq groupes :

- « système et architecture » dirigé par Erol Gelenbe, professeur à l'université d'Orsay, venu avec sept chercheurs de son équipe ; il étudie actuellement le micro-ordinateur Thomson 9000, sa connexion au réseau, réalisation des banques de données, insertion de microprocesseur 16 bits ; des accords industriels devraient être passés en automne ;
- « communications homme-machine », sous la responsabilité de H. Gouraud (ex-CGE), Patrick Baudelaire et Bernard Montreno ; ils travaillent actuellement à la réalisation d'écrans tactiles, et de système de reconnaissance de la parole polyglotte ;

- « secteur vidéo », dirigé par Georges Broussaud détaché de la Thomson, pour étudier l'utilisation des vidéodisques sur micro-ordinateur ;

- « systèmes experts », sous la responsabilité de M. Colmerquer, professeur à l'université d'Aix-Marseille ; il devrait réaliser une machine Prolog, programmer des systèmes experts sur ordinateur personnel ;

- « nouveau langage » ; ce groupe n'est pas encore pourvu.

Le thème application comprend trois groupes de travail :

- « Informatique médicale » : l'objectif de ce groupe est de développer l'utilisation de l'informatique pour les médecins « aux pieds nus » (infirmiers, médecins de brousse). Il est dirigé par un chercheur américain, M. Goldberger, ancien psychiatre reconverti à l'informatique ; il est assisté par M. Berthet, professeur à l'université de Paris-Dauphine ;

- psychologie : l'école de Piaget, à Genève, doit envoyer douze stagiaires ; mais l'équipe n'est pas encore constituée ;

- anthropologie culturelle appliquée à l'usage de l'informatique : le groupe n'est pas encore constitué.

EXPERIMENTATIONS

Enfin, le troisième thème, « Actions sociales », réalise des expérimentations en France et dans le tiers monde. Une expérimentation est en cours à Marseille, au quartier de la Belle de Mai. L'objectif est d'y introduire des ordinateurs personnels et d'en étudier l'impact dans ce quartier populaire de 70 000 habitants, comprenant une forte proportion de chômeurs, immigrés, délinquants. 2 500 ordinateurs devraient y être installés d'ici à la fin 83, dans les centres communautaires et chez les habitants qui le demanderont. Quinze moniteurs formés à l'antenne marseillaise du Centre mondial seront encadrés par M. Chappaz, professeur en sciences de l'éducation à l'université de Marseille. Des travaux sont également menés avec l'association Abbaye pour les jeunes chômeurs. Une autre expérimentation est en cours à l'École normale de Dakar. Enfin, une transcription de Logo en français a été réalisée, une version en wolof (sénégalais) est en cours, une version arabe sera faite avec l'ATP « Arabisation du CNRS ».

Fort de cette première expérience, l'ambition de JJSS est de créer progressivement « un réseau mondial de centres analogues, consacrés au déploiement de la ressource humaine, puis à la mise en œuvre d'une politique mondiale destinée à créer une nouvelle politique forgeant de nouveaux emplois. » Encore une utopie ?

Annie KAHN

(*) Les professeurs Arsac (Ecole normale supérieure) ; Gross, Nolin, Schutzenberger (Paris-VIII) ; Raymond (Cnam) ; Simon et Vignes (Paris-VI).

Vous avez dit : « Intelligence artificielle » ?

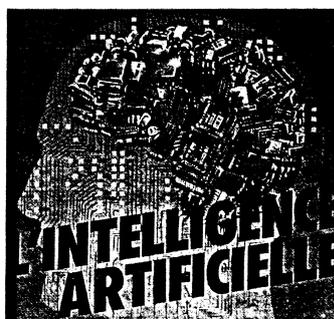
Le numéro d'octobre consacré à l'intelligence artificielle traite de la réalisation de systèmes informatiques effectuant une vaste gamme d'activités. Il semble indiquer, tacitement, qu'il existe un accord dans la communauté scientifique concernée sur la possibilité quasi imminente de voir aboutir ce projet. Ce deuxième aspect est factuellement contestable et notre lettre vise seulement à apporter un modeste contrechant aux excellents articles qu'ont rédigés les éminents spécialistes que vous avez rassemblés. Les questions que nous soulevons après et avec bien d'autres informaticiens ne sont en rien, dans notre intention, une critique de l'intelligence artificielle en tant que recherche ou application. Ceux d'entre nous qui sont les plus persuadés qu'on ne saurait réduire le sens aux signes et les intentionalités aux algorithmes ne sont pas les moins partisans de voir repoussées ou simplement mieux cernées les limites de ce qui est mécanisable. Ces interrogations sont d'ailleurs parmi les plus intéressantes que suscite l'informatique contemporaine et toute recherche sérieuse dans ce domaine ne peut qu'être encouragée.

Certes, il existe de par le monde de nombreuses équipes de recherche qui travaillent dans le domaine de l'intelligence artificielle. Celles-ci sont mieux connues depuis que l'industrie japonaise a fait le choix du terme d'intelligence artificielle pour publiciser sa 5^e génération d'ordinateurs et aussi par la commercialisation de logiciels destinés à l'élaboration des systèmes experts. Toutefois, la même configuration sociologique dans la recherche et dans les médias s'est déjà rencontrée au cours des trente dernières années avec la cybernétique, la bionique, la traduction automatique, le perceptron, etc. pour ne citer que les plus notoires parmi ces enthousiasmes collectifs qui, comme le montre si bien J. Pitrat, après une période initiale d'euphorie ont à peu près disparu des programmes de recherche. On n'en retiendra que les maigres sérendipités que provoque la mobilisation de centaines de chercheurs et de quelques centaines de millions de dollars.

Nous n'avons pas ici la place de discuter en détail les évidences simples et fortes (mais néanmoins contestables) qui illuminent l'intelligence artificielle et ses prédécesseurs. Certes, on peut penser que « tout raisonnement est un calcul » et qu'il est donc automatisable. Ceci ne fait aucun doute quand est connue la méthode pour le formaliser. (...) Nombre de situations, en particulier celle des jeux de société, requièrent apparemment une réflexion profonde mais se résolvent mécanique-

ment « dès que » l'on connaît l'objet mathématique (graphe, relation d'ordre, système d'inégalités linéaires, etc.) qui permet d'en formaliser la structure.

Il n'est pas discutable que la découverte de nouvelles activités humaines susceptibles d'être réduites de cette manière soit d'un grand intérêt et que ce soit l'un des buts des mathématiciens d'inventer les structures et les théories nécessaires pour cela. Mais, et c'est là notre propos, cette invention, cette réduction, sont l'œuvre de l'homme et point de la machine. Un utilisateur qui aurait fait l'achat d'un « moteur d'inférence » devra ensuite se munir d'un système de « règles » et d'une « base de connaissances ». Il se trouve de fait dans la situation d'un acheteur d'automobile auquel on livrerait 700 kg d'acier, 8 kg de cuivre, 15 kg de caoutchouc, etc. avec quelques bons conseils et avec, de-ci de-là, consultation d'un technicien pour bricoler le véhicule personnalisé répondant à ses besoins. Citons à ce sujet le professeur R.C. Schank : « Much research needs to be done in artificial intelligence : practical applications are just beginning to appear. Expert systems may not represent the best of those applications. Business should be careful before investing in costly projects developed by insufficiently trained personnel. »



Certes, toute activité de diagnostic consiste à chercher des « signes » et à utiliser des dichotomies. Il y a plus d'un siècle que l'on édite des flores basées sur ce principe qui font le désespoir des amateurs débutants en botanique (ces bractées sont-elles multifides ou amplexicaules ? That is the question !!!) ; du temps de nos grands-pères, les étudiants en médecine s'initiaient à la clinique avec des tables analogues. L'idée de mettre celles-ci sous une forme manipulable par machine est d'une originalité qui se renou-

velle à chaque progrès technique : à l'un des premiers congrès de cybernétique en France vers 1955, on nous présenta un beau paquet de cartes perforées qui devaient remplacer les ophtalmologistes. Inutile de gloser longuement sur ce que toutes les difficultés sont ailleurs. (...)

Reste enfin la dernière et salvatrice évidence : si un algorithme est inapte à résoudre le problème, on le change et à force de le changer on finira bien par en trouver un qui fonctionne. Pourquoi pas en effet ? Sauf si on entre dans une boucle stérile d'essais et d'erreurs ou si le nombre des algorithmes à essayer est démesuré (...). Parmi la centaine de systèmes « auto-adaptatifs » ou « à apprentissage » qui ont été réalisés sur ordinateurs, nous n'en connaissons aucun qui ait conduit à quoi que ce soit d'intéressant sauf si l'on tient à user d'un terme anthropomorphique pour désigner l'acquisition progressive des données.

J. Arzac, C. Choffrut, R. Cori, M. Eden, M. Gross, A. Lentin, M. Nivat, L. Nolin, D. Perrin, M. Salkoff, M.P. Schützenberger, J.C. Simon

Voici la réponse de Pierre Vandeginste :

Il serait tout à fait contestable, c'est certain, d'affirmer « qu'il existe un accord, dans la communauté scientifique concernée, sur la possibilité quasi imminente de voir aboutir *ce projet* », si l'on pense au projet, formulé par l'inconscient collectif plutôt que par une quelconque instance, d'une « intelligence artificielle » en tout point comparable à l'intelligence humaine. Parce que la communauté scientifique en est bien persuadée, les auteurs de notre numéro spécial n'ont en aucune manière laissé entendre que ce serait le cas, sans que nous ayons eu besoin, on s'en doute, d'attirer leur attention sur ce point.

Si nous n'avons pas cru nécessaire de consacrer un article de dix pages au chapitre des interrogations sur les « limites de ce qui est mécanisable » — et si aucun des auteurs de ce numéro spécial n'a senti le besoin de l'aborder sur plus d'un paragraphe ou deux —, c'est précisément parce que les progrès récents de la discipline intelligence artificielle n'a pas *notablement* fait avancer ce débat qui reste largement ouvert. Les « capacités encore très limitées des systèmes actuels » (Daniel Kayser, « Des machines qui comprennent notre langue », p. 1198), la « rigidité et l'indigence des réalisations actuelles » (Jean-Gabriel Ganascia, « La conception des systèmes experts », p. 1142) rendent précisément nos auteurs — et les chercheurs en général — prudents, mais non pour autant défaitistes. Qui songerait à leur demander d'attendre que la question de la possibilité théorique de l'intelligence artificielle *stricto sensu* soit tranchée pour poursuivre des recherches qui aboutissent déjà à un certain nombre de réalisations utiles et pour en tenir le public informé dans nos colonnes ?

LA RECHERCHE N° 174 FÉVRIER 1986



La réforme de l'orthographe

L'informatique linguistique teste les qualités des réformes.

Comme le Phénix (fénix?) l'idée d'une réforme de l'orthographe renaît périodiquement ; ces temps derniers elle a été suscitée par les enseignants. Aussi la controverse séculaire sur son opportunité, son sens et son étendue recommence-t-elle à occuper les esprits, controverse d'autant plus riche que les contributeurs feignent d'ignorer ce qui a été dit et redit sur le sujet dans les ouvrages fondamentaux de F. Brunot (sur les aspects philologiques) et de C. Beaulieu (sur les aspects historiques, des Capétiens à nos jours). Nous contribuerons au débat en présentant quelques-uns des faits nouveaux révélés par les progrès de la linguistique au cours des dernières décennies, et surtout en montrant comment les moyens informatiques permettent de quantifier les faits et de transformer une illustration anecdotique en une argumentation mieux fondée.

Deux thèmes dominent le débat : le thème de l'orthographe témoin de sa propre histoire, elle-même reflet déformé de celle de la langue et de la culture, et le thème de l'orthographe comme codage d'une langue parlée, avec tous les objectifs qui peuvent et doivent être invoqués, depuis l'efficacité

de la transmission des idées jusqu'à la facilité d'apprentissage de la lecture ou de la prononciation.

Examinons ces deux thèmes sur l'orthographe du mot désignant « un des cinq prolongements de la main » (Petit Robert), le mot *doigt*. Le premier explique et justifie sa graphie par la théorie qui avait cours, il y a quelques siècles, sur son origine (*digitus*) ; cette position, fréquemment invoquée pour d'autres monstres comme le mot *poids*, justifierait que l'on écrive *onvcle* avec un *v* muet pour rappeler l'affection avunculaire. Le second thème insiste, d'une part, sur l'utilité de marquer une parenté entre *doigt* et *digital* (comme dans les *empreintes digitales* et non pas comme dans le *calcul digital*, que l'Académie rejette) et d'autre part sur le besoin de distinguer *doigt* de *doit*, ce qui pourrait néanmoins être réalisé en attribuant à l'un d'eux la graphie *doua* ou *doie*.

Nous choisissons de nous limiter ici au problème de l'ambiguïté. Puissamment exploitée par les sciences de la psychanalyse et les arts de la contrepétrie, l'ambiguïté constitue cependant un obstacle pour les constructeurs futuristes de machines à écrire à commande vocale.

Précisons le problème sur des exem-

ples. La conjonction de coordination *ou* et le pronom, relatif ou interrogatif, *où*, se prononcent de la même façon et une ambiguïté existe dans la langue parlée. Des grammairiens ont décidé de la lever en distinguant les deux formes écrites. La situation est identique pour la forme *a* du verbe *avoir* et la préposition *à*. Dans la même crainte de confusion potentielle, on a voulu distinguer par un accent, circonflexe cette fois, le mot *du* – contraction de *de le* – et le mot *dû* – dérivé du verbe *devoir* ; comme il n'y a pas d'ambiguïté pour le féminin et le pluriel de *dû*, on écrit *due*, *dus*, *dues* sans accent.

Toutes les conséquences de telles décisions n'ont certainement pas été prévues par leurs auteurs :

- le *ù* est un caractère d'imprimerie supplémentaire du français (et une touche du clavier) qui ne s'emploie que dans le seul mot *où*,

- l'emploi de *à* est limité à sept mots que nous citons pour que le lecteur puisse partager l'effroi que causerait sa suppression : *à, là, déjà, déjà, delà, holà, et voilà* ! On connaît les incohérences qui opposent *cela* et *celui-là*...

- on n'a pas considéré que la forme *où* (le relatif et l'interrogatif) reste ambiguë et on n'a pas non plus distingué la forme verbale de *dû* comme dans *Jo réclame son dû* et *Jo a dû partir*. Dans ce cas on aurait pu tout aussi bien introduire, pour l'une quelconque de ces deux formes, l'orthographe *dû* – avec accent aigu – ou *dub* pour rappeler le *b* de *débiteur*. Le mot *tu* étant également ambigu, pourquoi ne le distinguerait-on pas, et n'écrirait-on pas : *tu ne t'es pas tû* ?

Si le principe de séparation orthographique des formes ambiguës avait été appliqué avec cohérence, il aurait fallu introduire un accent (lequel d'ailleurs ?) dans *car*, pour distinguer la conjonction de l'autobus, dans *or* pour distinguer la conjonction du métal précieux, ou bien écrire *aur* ou *aurre* (comme dans *Aurillac*) en souvenir de *areus*, car il n'est pas plus difficile dans une conversation de choisir la bonne signification de *ou/où, a/à* que celle de *car* ou de *or*.

Au contraire, les adverbes *dûment* et *indûment* ne sont pas ambigus, bien que leur accent soit exigible... On pourrait multiplier les exemples mais notre propos est plutôt d'examiner comment les travaux de linguistique informatique font avancer ce type d'études.

En effet les travaux sur la formalisation des structures lexicales et syntaxiques pour la reconnaissance d'unités de sens dans les textes (en vue de la traduction et de l'indexation de textes) mettent en lumière les formidables ambiguïtés des langues naturelles. Pour les

EXERCICE DE SENSIBILISATION : LE CŒUR A SES RAISONS

Dans le texte qui suit, on remplacera chaque occurrence du signe \$ par un synonyme du mot raison que l'on peut choisir ad libitum. On a, par exemple :

raison = la vérité + tête + occasion + une bénédiction + position + comprendre + la cadence + les comptes + la cadence + les comptes, etc.

Il n'y a pas de \$ pour que cela dure. \$ de plus pour ne pas lui donner \$. Pourtant il a l'âge de \$, et il a une \$ sociale. Mais il fait des mariages de \$ à \$ d'un ou deux par an, cela n'a ni rime ni \$. Pour des \$ de santé évidentes, on ne peut lui en demander \$. Il faut donc se faire une \$ et espérer qu'il aura \$ de ses problèmes et retrouvera une \$ de vivre.

linguistes, la notion d'ambiguïté constitue d'ailleurs l'un des principaux critères d'adéquation d'un modèle linguistique aux faits observés. Les mots d'un dictionnaire électronique doivent être décrits de façon entièrement explicite ; en particulier il est nécessaire de représenter toutes les structures où ils entrent ; ces structures syntaxiques constituent alors le contexte que l'ordinateur utilise pour lever l'ambiguïté du mot.

Considérons le mot *raison* : nous en présentons une trentaine de sens différents, dans leur structure de base ou dans un contexte sans aucune ambiguïté. S'il est certes possible et légitime de regrouper – de bien des manières – toutes ces constructions, il n'en reste pas moins que deux quelconques de ces acceptions, comme dans *le triomphe de la raison* ou *la raison du plus fort*, sont traduites par deux « mots » différents dans la plupart des langues étrangères.

Notre dictionnaire comprend donc une trentaine de mots *raison* ; autrement dit, une trentaine de mots de la forme *x raison y* présentent ces ambiguïtés. Plusieurs dizaines de milliers de mots du français ou de n'importe quelle autre langue sont dans cette situation et le locuteur ou le programme d'analyse automatique de texte doit explorer le contexte pour lever les ambiguïtés : les contextes sont également explorés pour les mots *car* et *or* de la même façon qu'ils le sont pour les sons des mots *a/â* et *ou/ôu*. En conclusion, il n'y avait pas de raison raisonnable de privilégier par une distinction orthographique quelques cas dans la masse immense du vocabulaire qui requière une analyse contextuelle.

Les ambiguïtés peuvent être réelles et plus ou moins difficiles à éviter, mais certaines d'entre elles sont le fait des représentations orthographiques choisies pour les langues. L'arabe et l'hébreu peuvent être écrits sans voyelles mais la lecture de textes non voyellés demande un apprentissage difficile. L'analyse du contexte permet de rétablir la plupart des voyelles : ce qui importe n'est pas tant l'ambiguïté, mais le fait qu'elle oblige une exploration plus ou moins difficile du contexte : toute modification de l'orthographe devra prendre en compte ce paramètre.

Grâce à la construction de dictionnaires électroniques, il est possible, depuis quelques années, de quantifier des effets d'ambiguïtés comme ceux que nous venons de présenter et, plus généralement, de simuler les effets d'une réforme orthographique sur la totalité du lexique, donc sur la forme des textes.

Nous avons compilé, au LADL, un dictionnaire électronique de plus de 60 000 entrées (B. Courtois, *Rapport*

technique du LADL, CNRS-Université Paris 7, 1986) ; il comporte les informations nécessaires à la flexion automatique de chaque mot (mise au féminin, au pluriel, conjugaison), et l'un de nous (E. Laporte, *Thèse de doctorat*) l'a complété en y ajoutant les éléments requis pour obtenir la transduction phonétique des mots, fléchis ou non. Ces programmes engendrent un lexique de plus de 500 000 formes qui donne l'ensemble des formes rencontrées dans les textes écrits ou oraux. Des traitements automatiques permettent alors de répondre à des questions variées sur l'ambiguïté. Voici quelques exemples de ces traitements.

C. Leclère et A. Guillet (*Rapport technique du LADL*) ont examiné par curiosité l'effet de la suppression des voyelles dans les mots français. Certains mots, dont les mots courts, sont évidem-

ment mutilés et non reconnaissables tant leur degré d'ambiguïté est élevé : *peau = api = p ; initié = aient = ont = ente = note = nt*. Mais pour les mots plus longs, il y a très souvent correspondance unique du mot et de son squelette consonantique.

Plus réaliste, B. Courtois a étudié la suppression des accents du français, autrement dit l'écriture en majuscules non accentuées. Pour 500 000 formes, 50 000 ambiguïtés nouvelles apparaissent (MANGE = mange + mangé). Comme on le sait, cet effet ne rend pas les textes illisibles, mais il est difficile d'évaluer l'accroissement de la difficulté de lecture, tant les situations sont variées. Par exemple, si l'ambiguïté de MANGE est difficile à lever, celle de MANGES = manges + mangés est plus aisée, car la forme *manges* comporte obligatoirement le pronom *tu* (ou *toi*)

LA SIGNIFICATION DES DIFFÉRENTS MOTS RAISON :

- (1) Jo a raison de partir
- (2) Jo a (une + des) raisons de partir
Jo a ses raisons de partir
Il n'y a pas de raison que Jo parte
Le départ de Max a (une + plusieurs) raisons
Le départ de Max est sans raison(s)
Une des raisons de son départ est que Max reste
Max a toutes (E + les) raisons de penser que Jo restera
- (3) Que Jo parte n'est pas une raison pour que Max reste
- (4) Jo a toute sa raison
Jo (a perdu + est revenu à) la raison
Max ramène Jo à la raison
- (5) Max s'est rendu aux raisons de Jo
- (6) Max s'est fait une raison, il ira travailler
- (7) Ce texte (n'a ni + est sans) rime ni raison
- (8) Jo a eu raison de toutes les difficultés
- (9) Max donne raison à Jo dans ce conflit
- (10) Max a demandé raison à Jo de sa conduite
Jo rendra raison
- (11) Max entendra raison
- (12) La raison de cette progression (arithmétique + géométrique) est
- (13) Max écoutera la voix de la raison
- (14) Jo a fait un mariage de raison
- (15) Jo a l'âge de raison
- (16) Jo a une raison (d'être + de vivre)
- (17) Jo a une raison sociale
- (18) La raison d'état impose cette mesure injuste
- (19) Max invoque (la raison pure + la raison du plus fort)
- (20) (partir) (à + avec + non sans) raison
- (21) (partir) à juste raison
- (22) (partir) comme de raison
- (23) (dormir) plus que de raison
- (24) (agir) à plus forte raison
- (25) (partir) pour des raisons de santé
- (26) (partir) à tort ou à raison
- (27) (partir) en raison du brouillard
- (28) (payer les gens) en raison de leurs efforts
- (29) (arriver) à raison de six à l'heure
- (30) (agir) en raison (directe + inverse) des interventions
- (31) (agir) pour la bonne raison que Jo part
- (32) (agir) raison de plus pour que Jo parte

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

<p>Orthogonal, e — or, ...ore etc tôt, taux goth n'al..., orthogone al..., goune, gau u'as le, n'al..., goth, Gowan (angl. gone).</p> <p>Orthographe, le — or tôt que raffé (raffe), rat fit, ...orte au gras fit, fils, ogre a f..., fils, affi(quet), raffi(ner), Hogue ras.</p> <p>Orthographe, lque — orthographe y est, hie, ...orte au gras fils que, fic, aux graphiques, or tôt que raffés ic..., y e..., rat, ras fier, laux, fic..., lo..., ...sure.</p> <p>Orthogte, lque — ...orte (morte, etc) au lozla, or tôt l'eau, l'oe glt, j'y, que, logi-que, tole, auge, Auge hic, ic..., lch...</p> <p>Orthopéale, lque, lste — or taupé est dit(e), tope (istérj.) est dit, toper, pale dix</p>	<p>Reforger — ...re, ...reux forger, fort j'ai, jet, geai, gé..., forge et, é..., faux rejet, Fo, Foé regé..., ceuf, orge et.</p> <p>Réforme, er, é, e, able, lste — forme E, hais, hâble, réforme (v.) é..., E..., rai- fort met, m'est, mé..., Mab le, miss (angl.) te, rets, rais etc former, forme able, fort myst(érieux), mit c'te, miss (s. v.) te, or- maie, O remet, (b)ref !, or me, (g)refe.</p> <p>Réformatio, ateur, trice — rets etc formation, formâtes eur..., trisse, forte mas- sions, ma trice, trisse, matrice (de la) ré- forme hâte eurent, or mat, format.</p> <p>Réformer — reforme etc é... ai..., ais, hale, E..., ...reux former, faux remet, fort</p>
---	---

Le *Nouveau dictionnaire français* de Baillargé, publié à Québec en 1888, montre bien les diverses ambiguïtés phoniques qui fournissent de nombreuses solutions à la représentation du thème de l'article : *La raie forme de for tôt gras feu. L'arrêt fort me de Laure Togo raffé. La raifort me deux... etc.*

dans son voisinage immédiat. En fait, on n'observe guère *manges* que dans l'une des séquences :

tu (ne) (le + la + les) (lui + leur + y) manges
tu (ne) (lui + leur + y) (en) manges
manges-tu

ou dans ses variantes en *toi*.

Enfin, pour évaluer une réforme minimaliste de l'orthographe, S. Woznika (*Rapport technique du CERIL*) a examiné la réduction des trois accents et du tréma, à un seul accent (plat ou vertical). Le nombre des ambiguïtés introduites est inférieur à 50, chiffre incluant la confusion de variantes orthographiques pour des mots comme *chénevotter-chênevotter* ou *euréka-eurêka*.

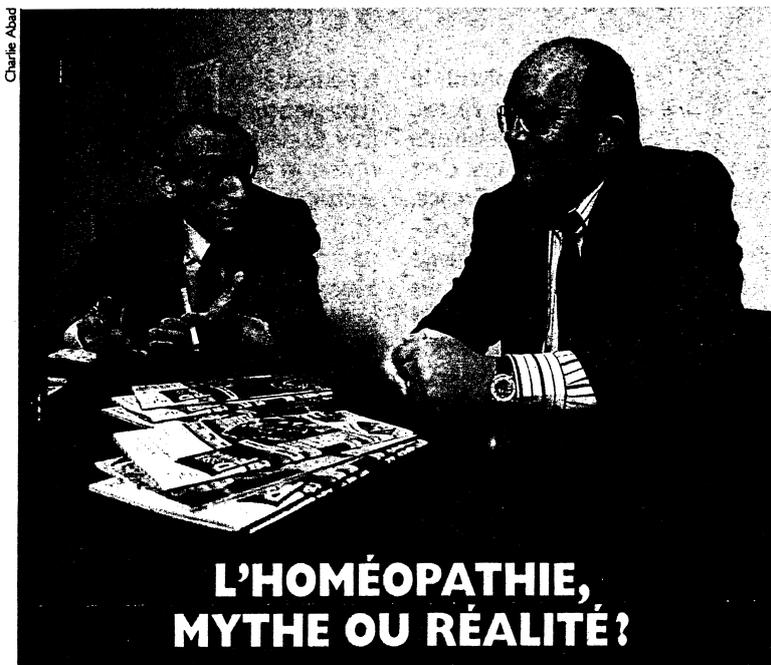
En comparaison, le dictionnaire phonétique du LADL permet d'évaluer les ambiguïtés de l'orthographe actuelle, c'est-à-dire les différences de prononciation qui existent pour une même orthographe, par exemple *ti* dans cinq verbes comme *initier* et cinq comme *châtier* ; plus généralement, il existe 44 mots comme *partie* et 57 comme *inertie*. L'un de nous (E. Laporte) a recensé 300 situations de ce type pour lesquelles il a dû marquer les mots du dictionnaire. Le programme de phonétisation consulte le système de dictionnaire orthographique pour chaque mot de texte et fournit la solution phonique correcte. Un tel outil permet de simuler à volonté les diverses réformes de l'orthographe qui ont été proposées et de les évaluer. Par exemple, les observations sur la perte d'information qu'occasionnerait la disparition de certaines lettres redondantes et de certains signes diacritiques peuvent aujourd'hui être quantifiées.

Il faut garder raison et de telles évaluations devraient contribuer à dépassionner le débat. Certes il y a longtemps que le Poète (qui ne doit sans doute qu'à son origine savante de ne pas bénéficier d'une graphie plus vernaculaire qui eût pu être *Peauhaitte*)

a dit que l'orthographe était le visage des mots. Nul(le) amant(e) n'accepte sans émoi qu'un esthète chirurgien prétende à changer celui de l'aimé(e). Mais après coup, tout le monde s'en trouve bien, et même y découvre les charmes d'un amour rénové.

M. GROSS, E. LAPORTE et
M.-P. SCHÜTZENBERGER

D É B A T



Charlie Abad

A gauche, Marcel-Paul Schützenberger, à droite Gérard Pacaud.

Certains y croient, d'autres non: l'homéopathie n'a pas fini de diviser médecins et malades

Marcel-Paul Schützenberger, membre de l'Académie des Sciences, et Gérard Pacaud, médecin homéopathe et professeur au Centre d'enseignement et de documentation sur l'homéopathie de La Pitié-Salpêtrière, élaborent, l'un sur le plan scientifique, l'autre sur celui de la pratique, deux discours qui ne se rencontrent pas, à l'image du dialogue de sourds des adversaires et des partisans de cette médecine différente.

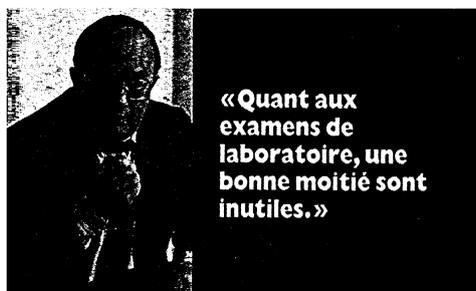
Gérard Pacaud: Il est impossible à un homéopathe de faire un diagnostic en moins d'une demi-heure. Moi, je prends mes rendez-vous tous les 3/4 d'heure. Ce

qui est spécifique à l'homéopathie, c'est la conception du diagnostic. Prenons une personne qui vient se plaindre de diarrhée... Nous passons 20 à 30 mn à lui faire préciser comment, de quel type, à quelle heure elle se déclare, quand elle s'arrête, comment sont les selles. A partir de ces modalités, nous allons déterminer quels médicaments peuvent convenir.

Marcel-Paul Schützenberger: La durée de l'examen clinique n'appartient en rien à l'une ou à l'autre médecine. D'autre part, vous ne prenez pas en compte les examens de laboratoire que requiert la médecine classique. Si l'on fait le calcul, il y a en moyenne l'équivalent de plusieurs heures de travail dans la totalité des radiographies, des analyses de laboratoire, etc., qui font partie intégrante du mécanisme du diagnostic. Donc, le clinicien

classique implique énormément plus de temps que l'homéopathe, même si cela n'apparaît pas dans la durée stricte de la consultation.

Gérard Pacaud: Disons que les homéopathes font de la bonne médecine. Quant aux examens de laboratoire, une bonne moitié sont inutiles. En évitant de les faire, on ferait économiser chaque année 8 milliards de F à la Sécurité sociale.



Marcel-Paul Schutzenberger: ... admettons... Vous affirmez donc que 30 mn de conversation dans votre cabinet peuvent remplacer la moitié des examens faits avec un matériel très perfectionné, des laborantins hautement qualifiés...

Gérard Pacaud: La médecine allopathique met en œuvre d'emblée et sans discrimination des moyens techniques énormes. En présence de cette diarrhée

dont je vous parlais, il y a peut-être des amibes, alors on fait faire des examens de selles, puis des examens de sang, puis une échographie, puis... Il y a retranchement du médecin derrière la machine. Nous, nous voulons aller progressivement.

Marcel-Paul Schutzenberger: Vous présentez l'homéopathie comme le fait de médecins honnêtes et compétents, alors que les allopathes sont moins compétents. Vous n'avez pas dit qu'ils étaient malhonnêtes, mais qu'ils... sabotaient le travail. Comment expliquez-vous que la médecine officielle n'ait pas pratiqué sur le dos de l'homéopathie la récupération des médecines indigènes? Tout ce trésor de richesses de l'homéopathie, ces questions, ces examens dont l'efficacité dépasse celle de l'instrumentation de laboratoire... pourquoi le reste des médecins ne s'en sert-il pas?

Gérard Pacaud: Vous comparez ce qui n'est pas comparable. Les méthodes utilisées par les médecines indigènes débouchent sur des produits que l'on trouve dans la nature utilisés à doses pondérables. Notre clinique débouche sur une méthode qui utilise des produits microdosés. Une «dilution» au sens homéopathique consiste à diluer au 1/100^e la substance en cause. On peut dire que 90 % des homéopathes emploient des dilutions à partir de la 4^e ou de la 5^e

DILUONS, DILUONS...

L'homéopathie, inventée au début du XIX^e siècle par Samuel Hahnemann, s'appuie sur la «loi de similitude»: un produit capable de provoquer certains symptômes est aussi capable de soigner ces mêmes symptômes, si on l'emploie à dose faible, voire infinitésimale. C'est là que se situe actuellement le cœur du débat: dès lors que des traces de substance toxique subsistent dans le médicament ingéré par le malade, la plupart admettent qu'il puisse encore faire effet. Mais, lorsque le produit toxique est tellement dilué (au-delà du

«nombre d'Avogadro», c'est-à-dire après la 11^e ou 12^e centésimales) que les molécules n'en conservent aucune trace, que se passe-t-il? Le mystère de la «mémoire de l'eau» agite la communauté scientifique.

L'autre fondement de l'homéopathie est l'examen au quel se livre le médecin, long, minutieux, destiné à cerner le malade dans sa globalité et à tracer le portrait précis et détaillé des symptômes afin de déterminer, le ou les médicaments qui provoquent les mêmes symptômes.

15

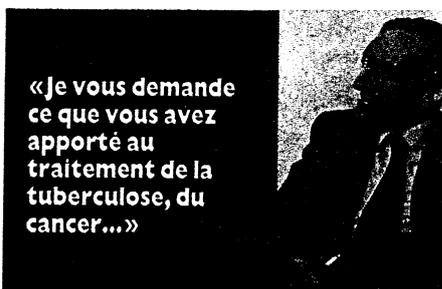
centésimale. Ce n'est plus du tout le même type de produit utilisé à dose pondérable. C'est ce que la plupart des gens ne veulent pas accepter.

L'être humain a peur de ce qu'il ne parvient pas à voir, à percevoir, à palper. Entre la onzième et la douzième centésimale (substance diluée entre 11 et 12 fois au centième), il y a encore des principes actifs dans le produit. Au-delà de la 12^e centésimale (1), le principe actif initial n'est plus présent. Or, des expériences ont montré que, même à des doses infinitésimales, un produit pouvait provoquer des réactions considérables sur un organisme sensible.

Marcel-Paul Schützenberger: Vous prétendez que la solution alcoolique de coquelicot dont vous avez fait une teinture va manifester son action après 15 ou 20 dilutions, alors que le simple fait que vous avez employé pour l'obtenir de l'alcool de raisin, de l'alcool de poire, ou de n'importe quel alcool de synthèse, a déjà introduit dans votre médicament des perturbations d'un ordre de grandeur des millions de fois supérieur à celui qu'introduiraient vos dilutions de coquelicot. Vous semblez mettre en doute la théorie atomique, mais je sais que vous ne refuserez pas la thermodynamique qui permet de chiffrer l'impossibilité physique que les dilutions homéopathiques laissent subsister le moindre effet direct ou indirect sur une soi-disant «mémoire». Ce que vous me demandez de croire est des milliards de fois plus impossible que ne le serait la prétention de se faire entendre de Paris à Marseille en prononçant ces mots d'une certaine manière, malgré tout le bruit ambiant.

Gérard Pacaud: Un autre mécanisme d'action doit être invoqué. Des expérimentations faites au niveau cellulaire nous ont permis de montrer l'activité biologique des produits à des dilutions fantastiques... Nous nous intéressons au malade avant que sa maladie ne soit arrivée à un stade très grave. La plus grande partie de notre travail, c'est de faire de la pré-

vention, puis de ramener les gens dans un bon état psychologique, leur faire retrouver leur équilibre optimal. Moi, je soigne des maladies graves, des cancers. Je le fais évidemment en collaboration avec toutes les techniques indispensables quand on arrive au stade de la tumeur. Je sais bien qu'à ce niveau, les techniques homéopathiques n'ont aucune efficacité.



Marcel-Paul Schützenberger: Vous parlez de cancer. Dites-moi quelle est la contribution que les homéopathes ont apporté à la découverte des états cancéreux? Laissez-moi être franc: vous présentez des principes thérapeutiques mettant en cause la totalité de la médecine actuelle. Je vous demande ce que vous avez apporté au traitement de la tuberculose, du cancer, de la typhoïde, du choléra, de la lèpre, de la syphilis, de toutes les grandes maladies qui ont été révélées par la médecine allopathique depuis un siècle et demi.

Gérard Pacaud: Je suis très content que les médecins allopathes aient découvert le bacille de Koch. Bien évidemment, lorsque je l'ai diagnostiqué chez un malade, j'utilise des antibiotiques. Mais en le tuant, on ne résout qu'une partie du problème. Nos traitements amènent un autre état immunitaire et permettent à l'organisme de se défendre, au malade de vivre dans le meilleur confort possible.

Table ronde animée par Jean Suyeux et la Rédaction de Dossier Familial □

(1) Une «dilution 12» est une dilution au 1/1 000 000 000 000 000 000 000 000.

TRIBUNE DES LECTEURS

D'un horloger
à l'autre

Le XXI^e siècle sera religieux ou il ne sera pas, a proclamé Malraux.

Ainsi, déjà, le Professeur André Langaney écrit, dans son *Point de vue* sur les horloges moléculaires (*Pour la Science*, référence 1) « Le fatras d'inepties dans lequel Denton montre qu'il n'a rien compris (ou voulu comprendre?) à la Théorie des horloges moléculaires ni même à l'anatomie comparée, n'est accepté que par une communauté de naïfs ». Suivent mentions du catholicisme traditionaliste, du rabbin Kahane, de Khomeiny...

Le préfacier naïf du livre condamné remercie gentiment son éminent collègue de lui offrir un prétexte à revenir sur un ouvrage (2) qui n'a pas été assez (bien) lu; il se gardera de défendre les pages où Denton a osé discuter la portée des horloges moléculaires, se bornant à en compléter la bibliographie par la référence (3) où sont illustrées quelques limites actuelles de cette technique (cf. aussi 4).

Ainsi encore (5), « Si vous doutez du pouvoir de la sélection naturelle, je vous adjure – il en va du salut de votre âme – de lire le livre de Dawkins: je pense que ce sera pour vous une révélation ». Ce livre est l'*Horloger aveugle* (6) à propos duquel d'ailleurs, les revues les plus sérieuses impriment « qu'il réduit à néant ce qui peut subsister du Lamarckisme » (7). Il expose avec une netteté cristalline la version la plus autorisée du Néo-Darwinisme orthodoxe qui est très exactement la cible exclusive des critiques de mon confrère M. Denton.

© POUR LA SCIENCE N° 152 JUIN 1990

Je n'en reprendrai ici qu'un seul point: le modèle informatique de Dawkins, favorablement commenté par F. Crick, qui illustre si bien la thèse du pouvoir apparemment créatif du tandem (mutation aléatoire × sélection naturelle).

Pour certains, dont je suis (8) ce modèle est tout au contraire mystifiant.

Le cœur de l'algorithme darwinien est une petite procédure DIST qui calcule la distance entre une chaîne cible W de 28 caractères, $W = \text{« METHINKS IT IS A WEASEL »}$ et une chaîne arbitraire U de même longueur. DIST: $DU = \phi$; DO $l = 1$ TO 28; IF $W(l) = U(l)$ THEN $DU = DU + 1$; END;

Celle-ci s'insère dans un programme effectuant les opérations suivantes: 1) À partir d'une chaîne V , la recopier une demi douzaine de fois en modifiant ou, non, au hasard, avec une probabilité de quelques pour cent chacun de ses caractères: ceci donne l'ensemble $\{V, V', \dots, V''\}$ des descendants de V .

2) Au moyen de DIST trouver celui de ces descendants, disons U , qui est le plus voisin de W .

3) Si $U = W$ (c'est-à-dire $DU = 0$) on a gagné. Sinon, recommencer en 1) avec la chaîne U en lieu et place de la chaîne V .

Le programme mène sûrement à W à partir de n'importe quelle chaîne en moins d'une centaine de cycles.

Ceci n'est pas bouleversant malgré les apparences, car la précision sur la distance entre U et W fournie par DIST fait que l'algorithme n'est guère que la simulation d'un véritable moulage des chaînes aléatoires sur la chaîne cible W et l'adéquation de ce modèle à l'évolution biologique ouvrirait la discussion sous bien des aspects. Je n'en choisirai qu'un. Dawkins développe longuement, dans d'autres chapitres, la thèse que les gènes doivent être considérés comme des recettes de fabrication (« recipes ») que comme des plans conformes (« blue prints ») (cf. p341). Il incorpore d'ailleurs cet excellent principe dans son jeu des biomorphes renouvelé de Conway (cf. [9]). Selon cette thèse, le modèle devrait donc élaborer de lui-même (selon le schéma (1), (2), (3)) la recette de son succès, c'est-à-dire une procédure jouant le même rôle que la procédure DIST en supposant fournies par un « ORACLE » externe les distances entre la cible W et les chaînes produites par l'algorithme.

Il suffit pour cela – avec toutes les variantes que l'on peut imaginer – de plonger le programme dans un « méta-programme » dans lequel 1') modifierait la procédure DIST de façon aléatoire à partir de la seule instruction DIST: $DU = 0$;

On laisse au choix des amateurs de procéder par mutations typographiques comme dans 1) ou en utilisant un jeu d'instructions élémentaires à agencer en elles. Je doute qu'ils arrivent à un résultat quelconque avant que leur micro ne soit frappé de sénescence. C'est ce hiatus entre les performances de modèles jouets de l'Évolution darwinienne et celles de modèles à peine moins irréalistes qui nous paraît poser un sérieux problème caché pudiquement par des calculs simplistes ou savants.

Le néo-darwinisme manque encore d'une synthèse autre que dialectique entre le caractère digital des processus concernant les génomes qui fournissent les plans, et celui analogique des organismes par eux produits, qui tentent d'optimiser leurs trajectoires dans l'espace-temps. Si épigénèse ou Évolution y désignent des faits, ils y demeurent, au niveau épistémologique, des mots et non des théories cohérentes.

Les mêmes remarques sataniques valent, *mutatis mutandis*, si j'ose écrire, pour les systèmes auto-adaptatifs de l'Intelligence Artificielle. On relira avec profit (10) qui parut en des temps où l'encens que l'on brûlait hier encore devant le Connectionisme fumait aux pieds des Perceptrons.

M.P. SCHUTZENBERGER

(1) A. LANGANEY, *Défense des horloges moléculaires* in *Pour la Science* n° 149, mars 1990, p. 7.

(2) M. DENTON, *L'Évolution, une Théorie en crise*, Londreys, 1988.

(3) K. G. FIELD et al., *Molecular Phylogeny of the Animal Kingdom* in *Science*, vol. 239, pp.748-753. 1988

(4) R. LEWIN, *Molecular clocks run out of time: the theory that we can date the birth of new species by charting the steady accumulation of mutations over evolutionary time isin serious troubles* in *New Scientist*, pp. 38-41, 10 février 1990.

(5) F. CRICK, *What mad pursuit*, Weidenfeld-Nicholson, 1989.

(6) R. DAWKINS, *L'Horloger aveugle*, Robert Laffont.

(7) E. BUFFETAUT, *Pour la Science* n° 147, p. 122, janvier 1990.

(8) *Biogénèse*, sous la direction d'André Thomas, Colloque CNRS sur les systèmes biologiques élémentaires et la biogénèse, pp. 45-53, Masson, 1967.

(9) Cf. pour les biologistes: Manfred EIGEN et R. WINKLER, *Das Spiel. Naturgesetze steuern den Zufall* (dont le modèle ne me conviait pas plus).

(10) M. MINSKY et O.G. SELFRIDGE, *Learning in random nets* in *Information Theory Fourth Symp. Butterworth*, London 1961.

MARCEL SCHUTZENBERGER : LES CHANTRES DE L'INTERDISCIPLINARITE

Docteur en médecine, diplômé en littérature portugaise, joueur de poker professionnel, rewriter à « France-Dimanche », professeur au Massachusetts Institute of Technology et théoricien de l'informatique de renommée internationale... Quel itinéraire ! Pour nombre de ses amis, Marco Schutzenberger incarne l'impossible : homme de la Renaissance, aujourd'hui. Il s'en défend...

Mathématicien spécialiste de statistique et d'informatique théorique, il a foulé d'autres plates-bandes, qui vont de l'anthropologie à la linguistique, en passant par la biologie. Il a travaillé avec Claude Lévi-Strauss et cosigné un livre avec Noam Chomsky.

Le résultat de ces aventures interdisciplinaires ? « Assez piteux, dit-il en souriant. Pour des tas de raisons dont certaines me sont restées mystérieuses. » Un pessimisme à tempérer du fait de la modestie du personnage. Par rapport à son ami Lichnérowicz, il se définit comme « une petite moyenne bête au zoo des mathématiques, un pécari plutôt qu'un éléphant... »

« S'il est aujourd'hui rigoureusement impossible d'appréhender la totalité d'une science donnée, c'est que le savoir a littéralement explosé. Jean Dieudonné, probablement le plus grand spécialiste contemporain des mathématiques, affirme qu'il s'est produit plus de mathématiques depuis 1940 qu'il ne s'en était produit avant. L'universalité ne peut se retrouver qu'à l'intérieur de petits sous-domaines, dont même Dieudonné n'a peut-être pas la plus petite idée...

De la même façon que les musiciens classiques ne jugent pas fondamental de connaître la musique populaire javanaise ou brésilienne, où se trouvent pourtant sans doute des choses admirables pour ceux qui en sont les spécialistes. Je ne crois pas que beaucoup puis-

sent prétendre avoir une vue d'ensemble complète de la statistique, qui n'est qu'une petite niche dans la chapelle des probabilités, elle-même logée dans la cathédrale des mathématiques.

Au lendemain de la guerre j'étais persuadé, comme certains de mes contemporains, que les mathématiques pouvaient s'appliquer à tout. Pour des gens plus ambitieux que compétents, il était assez tentant de voir si l'on pouvait refaire avec d'autres sciences ce qui avait si bien réussi avec la physique.

Car les mathématiques qui mènent aux médailles Fields et qui ne proviennent pas du mouvement propre de la tradition mathématique, tirent finalement leur source de la physique expérimentale. Pourquoi la physique est-elle en si parfaite résonance avec les mathématiques, et pas la chimie, la botanique ou la biologie ? Je n'ai toujours pas trouvé la réponse.

Avec Claude Lévi-Strauss, nous avons essayé d'appliquer la théorie des groupes aux relations de parenté chez les Indiens Bororos. Mais il faut tortiller les faits de façon extravagante pour que ça tienne debout ! A vrai dire, il faut toute la mauvaise foi des épigones pour croire que ça ne penche pas plutôt du côté trivial.

Le travail avec Chomsky a été un peu plus efficace. On enseigne tout de même aux informaticiens quelques uns des théorèmes publiés dans notre *Théorie des langages algébriques*. L'idée ini-



« Une petite moyenne bête au zoo des mathématiques, un pécari plutôt qu'un éléphant... » Marco Schutzenberger plaisante avec sa femme.

ture très spéciale, dont la compréhension permettrait d'expliquer les arrangements spatiaux qu'ils génèrent. Pour l'instant, il n'y a pas d'indication claire qu'il y ait une liaison intelligible entre le mot codé et l'objet qu'il fabrique.

Je vois tout de même quelques raisons d'être optimiste. Pour l'extension du champ des mathématiques, c'était une erreur que de chercher une source d'intuition directement dans des domaines scientifiques déjà constitués comme la linguistique ou la biologie. De telles sources existent bel et bien, mais dans des sciences « ingénieriques » nouvelles. Prenons par exemple tout ce qui touche au traitement du signal, à la compilation des langages informatiques, aux algorithmes de traitement de texte ou à la technique des codes correcteurs d'erreurs.

Entre les mains du professeur Dominique Perrin, la théorie des codes généraux a des applications qui vont de l'algèbre pure à la compression des données sur les disques de l'IBM. Quant à la théorie des codes correcteurs, elle est en rapport avec les arcanes les plus sublimes de la théorie des nombres et les théorèmes qu'elle a suscités ont été présentés au séminaire Bourbaki.

En mathématiques comme ailleurs, une partie des recherches originales vient ainsi de la mise en contact de connaissances provenant de champs apparemment disparates. C'est peut-être ce que veulent dire les chantres de l'interdisciplinarité qui devraient tous se recommander de Pico della Mirandola, même s'ils savent qu'il leur est impossible d'embrasser la totalité des sciences de leur époque. »

**Propos recueillis par
Nicolas Witkowski**

tiale de Chomsky était superbe : la grammaire (ce qui sert à produire du langage) peut être mise sous forme de grammaires génératives. A partir d'un petit nombre de règles de combinaison, qui correspondent à des objets mathématiques, il est possible d'engendrer le langage.

En fait, il n'y a pas moyen de greffer là-dessus de vraies mathématiques, mais cette façon de produire des phrases est la même que celle employée dans les langages de programmation et le fortran est construit comme une grammaire de Chomsky. Du point de vue

proprement linguistique cependant, le résultat n'est pas concluant du tout. Mon ami Maurice Gross, le grand rival de Chomsky, a démontré que le modèle génératif était vraiment trop simpliste.

A priori, une vision mathématique aurait dû mieux fonctionner dans un domaine tel que la biologie moléculaire. Après tout, le génome est codé avec seulement quatre lettres (G, T, A, C) ; il est ensuite transcodé en une protéine qui forme à son tour une structure tridimensionnelle complexe.

On pouvait donc supposer que les « mots » de départ avaient une struc-

Marcel Schützenberger

« Une cellule est bien plus complexe qu'un Boeing 747. Le soleil, lui, est simplement compliqué. »

La complexité est un thème à la mode. On voit s'y référer des scientifiques de diverses disciplines. Mais chacun y met ce qu'il veut. En quoi cette notion peut-elle intéresser le grand public ?

Je crois qu'il faut distinguer nettement entre la complexité et la complication. Certaines structures sont extrêmement compliquées à décrire. Pour autant, elles ne sont pas complexes. Je crois qu'il faut réserver le mot complexité pour décrire des processus du genre de ceux qu'on observe dans un organisme qui, à partir de l'œuf, aboutit après son existence à donner des descendants. Ce phénomène est complexe en ce sens qu'à chaque instant, il faut qu'un ensemble d'interactions s'ordonne de façon assez précise pour que le but soit atteint.

Est-ce à dire que vous réservez la notion de complexité au monde du vivant ?

Et à certains de ses prolongements. Ainsi des mécanismes conçus par l'homme. Un gros avion ou un ordinateur me paraît beaucoup plus complexe, par exemple, que des phénomènes naturels très compliqués, comme la circulation des eaux dans les océans ou encore le soleil. Je ne vois pas de principe qui permettrait de déclarer ces phénomènes complexes. Dans un avion ou un ordinateur, il faut que chacune des parties fonctionne en conformité avec le but général de la machine.

Autrement dit, la complexité intervient à partir du moment où il y a un but, organisation vers quelque chose ?

Marcel Schützenberger est mathématicien. Il a été élu à l'Académie des sciences pour ses travaux en informatique théorique. Ses recherches l'ont amené à publier divers articles en linguistique (notamment avec Noam Chomsky, Zellig Harris et Maurice Gross) et à étudier avec Pierre Gavaudan les aspects formels et statistiques du code génétique. Il fut l'un des protagonistes du débat du Wistar Institute: mathematical challenges to the neodarwinian theory of evolution.

86

Je ne suis pas absolument sûr qu'on ait besoin de la notion de but, mais on peut l'employer par commodité. Pour qu'il y ait complexité, il faut un processus, un point de départ et un point d'arrivée. Et il faut, ce qui est un peu plus difficile à faire comprendre, que ce processus soit le lieu d'une très grande richesse de perturbations spécifiques, qui doivent elles-mêmes être corrigées de façon très spécifique. Voyez le jeu d'échecs. C'est un jeu infiniment complexe en ce sens que quand un joueur développe une certaine stratégie, que son adversaire intervient pour essayer de bloquer cette stratégie, il faut que le joueur élabore une contre-attaque sans laquelle son projet s'effondrerait complètement. Or la multiplicité des attaques possibles est quasiment imprévisible. C'est cette richesse d'interactions indispensables qui me paraît être la marque de la complexité. De même un organisme vivant doit se nourrir, résister au froid, à mille agressions. Chacune de ces actions implique quantité d'interactions : éviter d'être mangé, chercher de la nourriture, sont aussi des activités qui nécessitent des détours, des sous-programmes. Survivre exige la mise en œuvre d'activités extrêmement complexes.

Si l'un des deux joueurs d'échecs est un ordinateur, est-ce que le degré de la complexité de la partie baisse ?

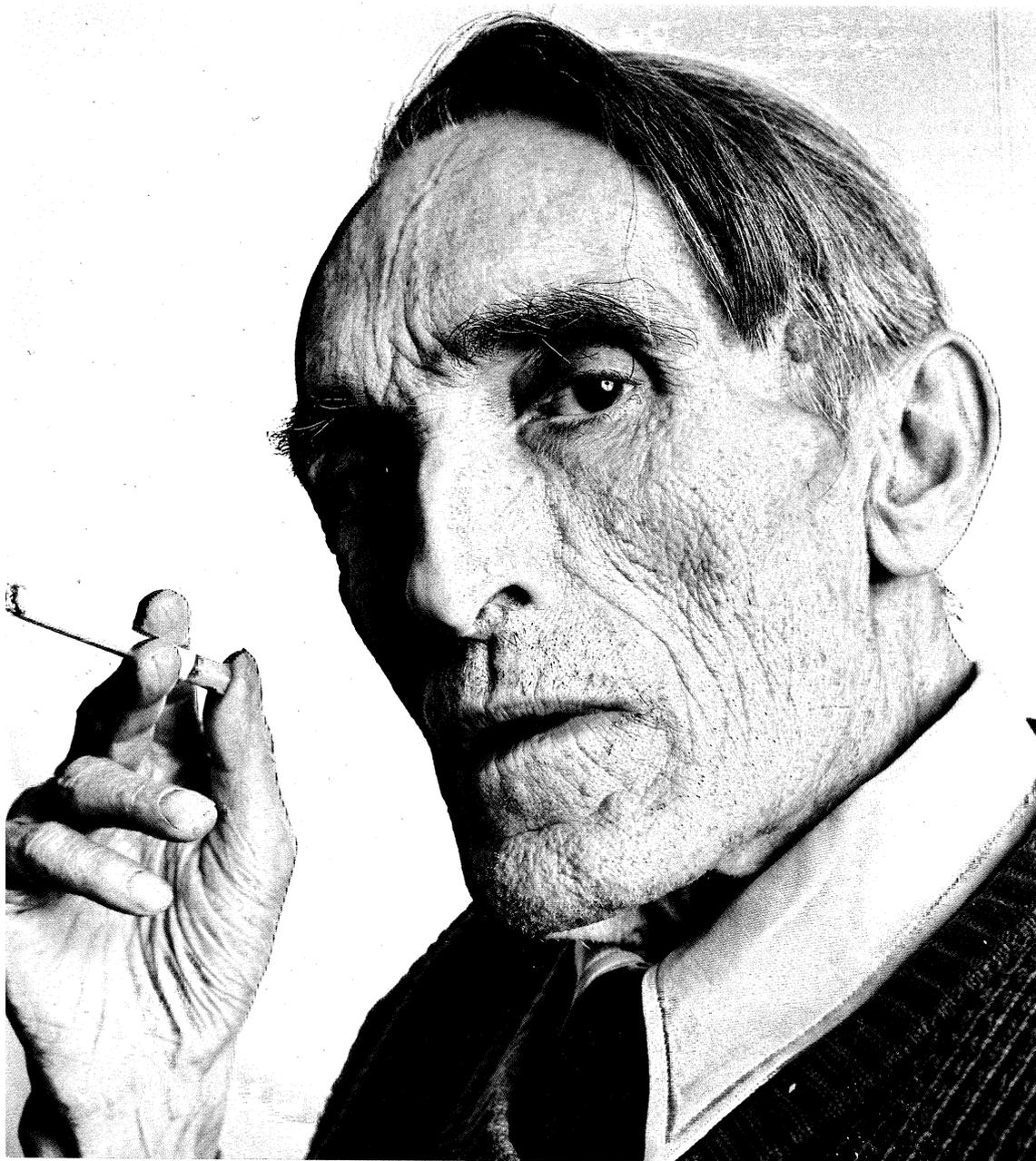
L'ordinateur est une machine complexe à laquelle on peut faire faire des choses compliquées. L'ordinateur ne fait rien de complexe. Aux échecs, il essaie de jouer au mieux par rapport à tout ce qui peut se passer cinq ou six coups à l'avance. Dans cette optique, son programme lui impose de faire tout ce qui peut lui assurer un petit gain local. Pas davantage. Il se trouve que cette stratégie suffit pour écraser la plupart des gens qui jouent aux échecs. Mais l'homme, lui, ne joue pas comme ça. Il fait des détours, emprunte des raccourcis... Et si demain le champion du monde se fait battre par un ordinateur, cela ne changera rien au problème : le jeu de l'ordinateur est compliqué, celui de l'homme est complexe.

Qu'y a-t-il de plus complexe dans l'univers ? Le cerveau de l'homme ?

0-7. Une cellule est bien plus complexe qu'un Boeing 747

Année 0

Sciences



ENTRETIEN

Je ne m'aventurerais pas sur ce terrain. Ce que je constate, c'est qu'il y a des phénomènes qui relèvent de la psychologie et qui sont d'une complexité telle qu'on ne peut pas les simuler par des mécanismes simplistes — ou, si l'on préfère, compliqués. Exemple : le fait qu'on puisse apprendre sans grande difficulté à un enfant à lire, à reconnaître les lettres. Cela semble quelque chose de très simple. Mais ce doit être un phénomène extrêmement complexe. Aucun ordinateur n'est capable de le faire. Pour les lettres écrites à la main, c'est un échec quasi total. Prenez quelque chose de sensiblement plus compliqué : reconnaître un visage. Une activité qu'un petit humain fait à un âge très précoce, de manière quasi instantanée. Il est hors de question de faire accomplir ce travail par un ordinateur.

Quand commence la complexité ? Avec les premiers êtres vivants ?

On sait seulement qu'à partir d'un certain moment sont apparues des cellules. Or une cellule est déjà un objet d'une complexité fabuleuse. Il y a une très belle page de Denton, où il essaie de rendre sensible la complexité de la cellule (1). Il dit : supposons qu'on prenne une cellule et qu'on multiplie ses dimensions de façon que son diamètre soit celui de la ville de Paris. Essayons de nous représenter la chose. Les atomes seraient gros comme des cerises ou des oranges. Ce serait une gigantesque usine chimique, d'une complexité incroyable. Avec des centaines de milliers de canaux qui se croisent et se connectent les uns les autres. On verrait se dérouler de façon interactive la synthèse d'au moins une dizaine de milliers de substances chimiques.

Une usine miniature ?

Et beaucoup plus. Nous saurions réaliser chacune de ces synthèses dans un tube à essai, mais il faut encore qu'elles ne se mélangent pas entre elles, et se fassent dans un certain ordre, comme sur une chaîne d'assemblage. Or il faut un millier de chaînes d'assemblage des produits, et en même temps un millier de chaînes d'assemblage des machines-outils qui fabriqueront les produits. Il faut aussi que l'usine travaille vite, puisque le cycle complet de la cellule,

dans de bonnes conditions, ne va pas durer plus de trente à quarante minutes. En plus, il y a des substances qui rentrent, d'autres qui sont éjectées vers l'extérieur. Il y a de gros transports de matière. Et puis, quand la cellule va se diviser, on va voir les chromosomes se réunir, se dupliquer, se séparer, partir chacun à l'un des pôles de la cellule... Donc en même temps, cette usine est en perpétuel déménagement. Et dès que vous commencez à interagir de l'extérieur avec la cellule, il se passe des choses très curieuses. Après certaines des interactions, la cellule est tuée, mais après d'autres, au contraire, l'usine se transforme, la cellule poursuit une autre activité avec un autre mode de fonctionnement. La cellule est pour moi le prototype de la complexité.

Quelle est votre conception de l'origine d'une telle complexité ?

Je n'en ai pas. Personne ne peut concevoir comment une usine automatique de ce type a pu être mise en place. On n'a pas idée des intermédiaires qui auraient pu exister entre la matière dite inerte et cette intégration de millions de réactions chimiques, dont il suffirait de bloquer une dizaine pour que rien ne fonctionne plus. Et pourtant, il y a des types de cellules extrêmement divers. Il y a certainement eu une évolution, mais comment s'est-elle produite ? Comment la transition a-t-elle pu se faire, par exemple, entre les cellules sans noyau et les cellules avec noyau ? On ne le sait pas.

La cellule ne représente pourtant, dans la nature, qu'un premier niveau de complexité. Comment passe-t-on aux autres niveaux ?

Nous ne le savons pas. Le deuxième niveau, c'est le développement de l'embryon et le passage à l'individu adulte. Supposons qu'on donne à notre énorme usine chimique un embryon à fabriquer. Alors là, nous sommes dans une ignorance totale.

L'œuf fécondé va se diviser en d'autres cellules. Certaines de ces cellules vont devenir complètement différentes des autres, elles vont migrer, des tissus vont se constituer et de nouveau il va se produire des phénomènes tout à fait extraordinaires. Dans certains cas, vous pouvez supprimer la moitié de l'embryon et puis ce qui reste va simplement se dupliquer et restituer l'original. Dans d'autres cas, au contraire, c'est fini. On ne sait pas du tout pourquoi. On sait classer les phénomènes, les décrire, on a réalisé des expériences très ingénieuses, mais chaque fois qu'on approfondit, chaque fois que de nouvelles techniques permettent d'analyser les processus plus en détail, on s'aperçoit que c'est plus complexe que ce qu'on imaginait. Cela paraît indéfiniment complexe.

Voyez-vous un troisième niveau ?

Une fois l'organisme constitué, il va falloir qu'il réagisse au monde extérieur, de manière à lui permettre de survivre. C'est le troisième niveau. Et curieusement, c'est un chapitre complètement gommé dans la théorie de l'évolution. Je m'étonne, en tout cas, qu'il soit si rarement discuté. En général, les livres sur la théorie de l'évolution le règlent en trois phrases, ils disent que progressivement, par des modifications successives, graduellement, les organismes ont enregistré dans leurs chromosomes la mémoire de l'espèce, c'est-à-dire les informations qui font que leur système nerveux aura les propriétés leur permettant d'interagir de façon adéquate avec le monde extérieur. C'est vite dit.

Donnez un exemple.

Prenez un insecte qui se métamorphose, le capricorne. Le capricorne passe les trois

*Je conçois
très difficilement
qu'un mécanisme
aussi complexe
qu'un organisme
puisse être
graduellement
sélectionné
comme
le pensent
les darwiniens
orthodoxes*

(1) *Evolution, une théorie en crise*, Michel Denton, Londreys, 1988.

quarts de sa vie à l'état de larve dans un tronc d'arbre. Il mange le bois. A un certain moment, il se prépare à sortir. Il tourne alors à 90 degrés et s'approche de la surface du tronc. Il fait un trou et le bouche avec une cloison qu'il a fabriquée avec le calcium qu'il a accumulé en mangeant du bois dans une poche de son estomac. A ce moment-là, il se retourne, et puis s'endort. Et il subit une modification complète de son anatomie. Les tissus semblent fondre. Et il devient un individu adulte, complètement différent. Il n'a pas de difficulté à percer la cloison, parce qu'il a maintenant des cornes. Il sort et va passer une saison à voltiger. Après quoi, la femelle ira pondre des œufs en faisant un trou avec une tarière dans un tronc d'arbre, les œufs se transformeront en larves, etc. Si nous croyons le schéma habituellement présenté, il faut donc que le système nerveux soit programmé pour réaliser toutes ces opérations successives qui se déclenchent les unes après les autres. Mais l'animal ne sera sélectionné que sur le résultat final, c'est-à-dire après sa transformation, qui est un remodelage complet de son système nerveux. Le programme par lequel agit la larve est conçu pour permettre aux autres programmes, ceux de l'animal adulte, de se déclencher ultérieurement. Je conçois très difficilement comment un mécanisme d'une telle complexité puisse être « graduellement » sélectionné comme le pensent les darwiniens orthodoxes.

On voit bien la complexité dans tout cela, mais moins bien en quoi c'est un argument contre l'idée que l'évolution s'est faite petit à petit, de façon graduelle.

Par complexité, nous avons défini un système intégré dans lequel chacune des parties joue un rôle souvent essentiel dans le tout. Cela signifie que vous ne pou-

vez pas modifier une partie sans en modifier beaucoup d'autres. Un exemple simple de système complexe, c'est l'horloge. Si vous modifiez un tant soit peu l'un des rouages d'une montre, vous n'avez pas une montre qui marche mal, vous n'avez plus de montre du tout. Il est à peu près impossible de passer d'un type de montre à un autre type de montre par des modifications locales. J'insiste sur le mot local. C'est l'ensemble du système qui est affecté. Si vous remplacez un pignon par un autre, il faut multiplier ou diviser le nombre des dents du pignon avec lequel il s'engrène, etc. Il y a toute une série de transformations en chaîne. Une transformation locale ne fera que détruire l'objet. De même, il suffit de supprimer quelques gènes, parfois un seul gène, pour que l'organisme cesse d'exister.

Si je veux rajouter un tuyau à mon chauffage central, il faut que je l'arrête. Il y a discontinuité qualitative. Si vous considérez l'évolution des espèces, c'est pareil



En même temps, il y a beaucoup d'espèces très voisines les unes des autres, qui ne paraissent justement séparées que par de petites différences.

Un grand chien et un petit chien d'une autre race, même s'ils paraissent très différents, ne se distinguent en effet, d'un point de vue biologique, que par de petites modifications locales. Mais si vous considérez l'ensemble des êtres vivants, ce n'est pas le cas général. Voyez le problème de l'origine des plumes. Nous sommes incapables de concevoir quelque chose de préalable à la plume et qui aurait présenté le moindre avantage, avant d'être une plume permettant de voler. Si vous prenez l'exemple des métamorphoses chez les insectes, on ne voit absolument pas quels auraient pu être les intermédiaires entre une espèce d'insecte indifférenciée et cette réalité infiniment complexe qu'est un papillon — avec cette énorme quantité de détails physiologiques qui lui sont propres, et sans lesquels il ne serait pas papillon du tout.

Ce que vous dites, c'est que la théorie darwinienne ne rend pas compte de la complexité du monde vivant.

La plupart des gens qui prêchent le « gradualisme » prennent des exemples techniques simples. Ils présentent volontiers une succession d'objets technologiques et suggèrent que par modifications insensibles on a pu passer de l'un à l'autre. C'est vrai à condition de présenter le spectacle de façon terriblement orientée. Par contre, vous ne pouvez pas passer graduellement de l'avion à l'hélicoptère. Vous ne pouvez pas faire tourner un petit peu les ailes d'un avion. Il n'y a pas d'objet commun dont on puisse graduellement dériver à la fois l'avion et l'hélicoptère. Or si l'on considère l'évolution des espèces, que nous reste-t-il des vertébrés ? Des squelettes. Il se trouve que les squelettes sont en continuité les uns avec les autres. Mais il n'en va pas de même si vous considérez la tuyauterie, qui elle n'est pas conservée. Je peux changer la disposition des pièces de mon appartement plus ou moins par continuité, en poussant les cloisons. Je ne peux pas le faire pour mon chauffage central, parce qu'il y a de la tuyauterie. A un moment donné, si je veux rajouter un tuyau, il faut que je coupe l'eau. Et mon chauffage central est arrêté. Il y a une discontinuité qualitative. Si vous considérez l'évolution des espèces, c'est pareil. Personne n'a fait l'exercice de concevoir une modification graduelle de la tuyauterie du poisson à celle, par exemple, de l'oiseau. Un bon exemple est celui du poumon. Chez les oiseaux, la circulation de l'air se fait en sens continu : c'est une tuyère. Chez nous, c'est un soufflet. Il a fallu qu'à un certain moment il y ait une inversion. Il est très difficile de concevoir comment une telle transformation a pu se faire graduellement. C'est comme passer de l'horloge à poids à l'horloge à ressort ou, sans doute, de l'économie planifiée à l'économie de marché. Comme le dit l'économiste Jacques Joffé, récemment dans *Dynasteurs*, on ne fera pas progressivement passer les Anglais à la conduite à droite.

Vous n'allez pas jusqu'à contester la notion d'évolution des espèces ?

Non, mais je pense qu'il a fallu que se pro-

ENTRETIEN MARCEL SCHÜTZENBERGER

duisent, d'une manière ou d'une autre, des naissances « monstrueuses ». Changer de tuyauterie, dans le monde vivant, c'est un saut monstrueux. Les chiens-loups et les caniches ont la même tuyauterie. Il y a une continuité, comme quand on change l'aérodynamisme d'une voiture. En revanche, il y a discontinuité entre le poisson et l'oiseau, ou entre la mouche et le papillon, comme il y a discontinuité entre une traction avant et une traction arrière.

Ces naissances monstrueuses, si elles ont eu lieu, auraient donc été des miracles biologiques...

Oui, au sens probabiliste du terme. Des événements dont la probabilité est trop faible pour qu'on puisse les introduire raisonnablement dans une théorie scientifique. Des naissances monstrueuses, il s'en produit tous les jours, mais elles ne sont pas viables. Là, il fallait qu'elles soient viables, et que les individus soient capables de se reproduire.

Et du singe à l'homme ? Voyez-vous un miracle, ou pas de miracle ?

Si l'on s'en tient à l'anatomie et à la physiologie, je ne vois pas de hiatus particulièrement flagrant entre le singe et l'homme. Je pense d'ailleurs — il me semble que c'est déjà chez Maupertuis — que l'homme procède par continuité biologique d'une espèce de singe. Mais en même temps, je vois dans le passage du singe à l'homme un saut qualitatif à côté duquel la différence entre l'épinoche et le singe me paraît subsidiaire. Le discours qui fut à la mode sur la continuité entre le singe et l'homme me paraît d'ailleurs heureusement un peu oublié aujourd'hui. Voici dix ou quinze ans, certains vulgarisateurs disaient qu'il suffisait d'apprendre à parler aux singes pour qu'ils parlent. On en est revenu. Plus personne n'y croit.

Alors, pas de miracle ?



Quand on considère la série des macro-mutations depuis le début de l'évolution, la sélection au sens où l'entendait Darwin apparaît tout à fait subalterne

Je n'en sais rien. Si l'on en croit le récit de la Genèse, ce serait en effet le cas... Il était une fois un couple singe qui eut un petit enfant homme... ou deux...

Vous n'adhérez pas au darwinisme classique, au gradualisme, mais en même temps vous n'êtes pas en mesure de prouver que cette théorie est fautive ?

Il n'existe pas actuellement de théorie scientifique alternative. Peut-être y en aura-t-il un jour. Darwin et à sa suite tous les darwiniens orthodoxes, qui encore aujourd'hui dominent la scène scientifique, affirment la nécessité du gradualisme. Or le gradualisme n'a pour lui que des

exemples relativement faibles : des exemples d'évolution où il n'y a pas de hiatus majeur entre les espèces. Il faut supposer qu'il existe une autre force qui a permis que des mutations violentes, des macro-mutations, donnent des objets viables et capables de se reproduire. Quand on considère la série des macro-mutations qui ont dû se produire depuis le début de l'évolution, quand on considère cette accumulation de miracles, la sélection naturelle au sens où l'entendent les darwiniens devient un phénomène tout à fait subalterne. S'il y a des forces qui dirigent les macro-mutations, il est clair que ce sont elles qui sont importantes du point de vue de la vie et pas les phénomènes de diversification mineure des espèces que l'on observe quelquefois dans la nature. Si ces autres forces existent, ce que raconte Darwin est complètement subsidiaire.

Vous jetez un doute sérieux sur la crédibilité du darwinisme. Vous ne démontrez pas que la théorie est fautive.

Je crois montrer qu'elle n'est ni très vraisemblable ni, à la limite, très intéressante. Cela dit, il n'est pas impossible qu'une preuve indirecte de l'impossibilité du gradualisme soit apportée par le développement des biotechnologies. Il semble en ef-

fet que les espoirs qu'on a mis dans l'ingénierie moléculaire n'aient pas répondu aux attentes. Pour l'instant, le génie génétique n'a pas provoqué de macro-mutation. Il n'a pas fait de miracle. Et la raison, c'est précisément qu'il se produit chez les êtres vivants des phénomènes d'une complexité qui semble défier notre ingénierie. Il y a là un mystère dont on peut préciser la nature. L'hérédité transmet d'un organisme à un autre une quantité d'informations dont on peut assez exactement évaluer l'ordre de grandeur et qui équivaut à une encyclopédie. Ce n'est pas beaucoup. Si l'on tient compte de tout ce qu'il faut savoir pour fabriquer un Boeing 747, cela représente beaucoup plus qu'une encyclopédie. Or une cellule est bien plus complexe qu'un Boeing 747. Comment est-il possible qu'avec si peu d'informations les chromosomes produisent un objet d'une telle complexité ?

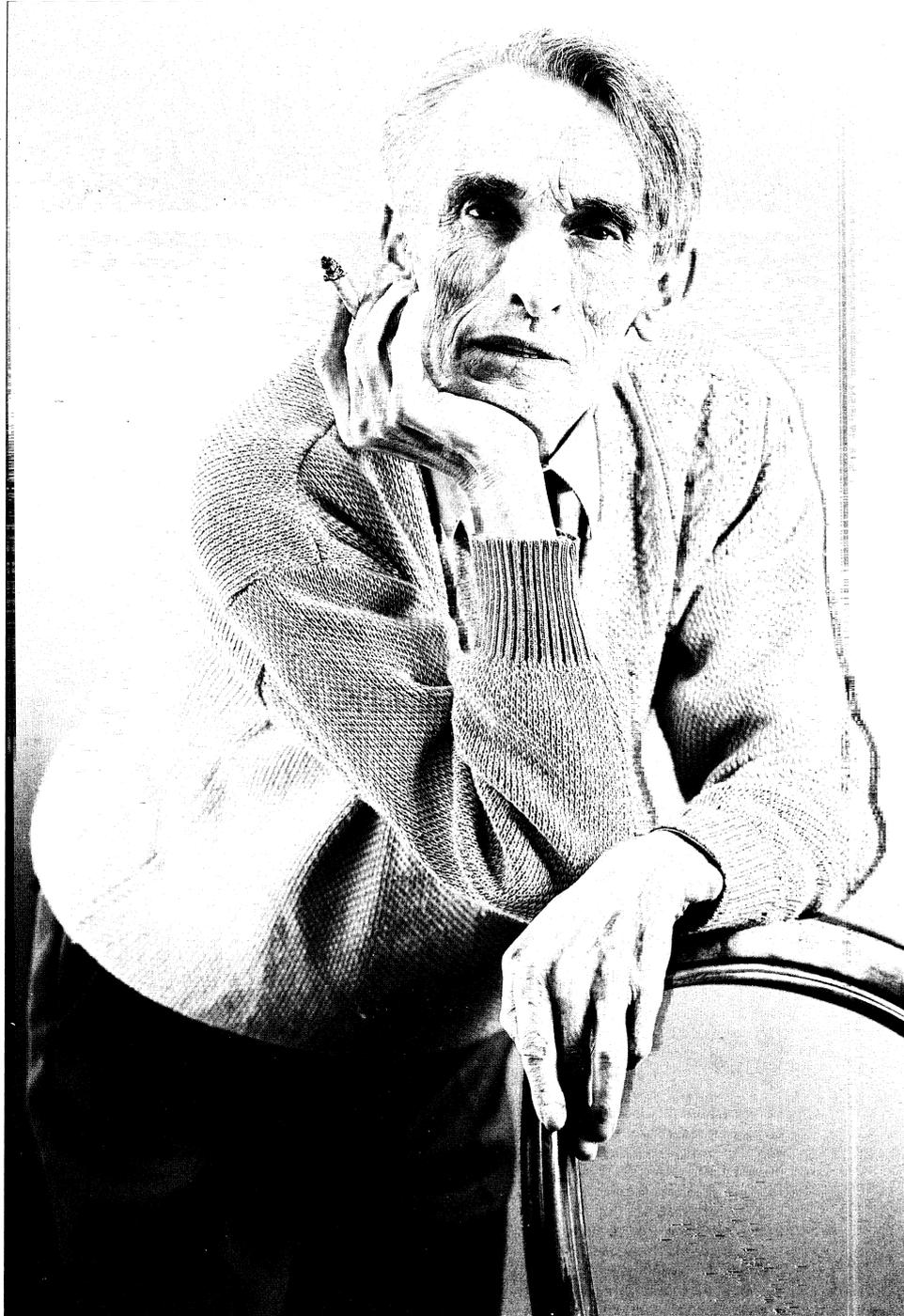
Il y aurait donc un hiatus entre le nombre d'informations contenues dans les chromosomes et celui nécessaire pour fabriquer l'être vivant correspondant ?

On peut exprimer les choses autrement. Parmi les araignées qui font leur toile, il en est une qui a la taille d'une grosse tête d'épingle. Son système nerveux n'est pas énorme. Comme ses cellules nerveuses ne sont pas moins grosses que celles des autres animaux, elles ne sont pas nombreuses. Mais il y a entre elles des connexions très riches. Pour autant qu'on puisse faire le calcul, il ne semble pas déraisonnable de dire que ces petites araignées ont un *hardware* qui est de l'ordre de celui d'un IBM PC. Essayez maintenant de programmer un IBM PC pour qu'il construise une toile d'araignée efficace. Il faut qu'elle soit installée au bon endroit, il faut qu'elle soit relativement protégée et située sur le passage potentiel des mouches... C'est bien plus difficile que de reconnaître un visage. Ce n'est simplement pas possible. La quantité d'informations nécessaire dépasse les capacités de traitement d'un IBM PC et probablement celles de tout ordinateur concevable. C'est cela la complexité... ♦

Propos recueillis par Olivier Postel-Vinay

ENTRETIEN MARCEL SCHÜTZENBERGER

ENTRETIEN



86 LA RECHERCHE 283 JANVIER 1996

M.-P. SCHÜTZENBERGER : LES FAILLES DU DARWINISME

« Les théories actuelles n'expliquent pas les miracles de l'évolution »

RICHARD DAWKINS
biologiste britannique,
est notamment l'auteur
de *L'Horloger
aveugle* (1986),
trad. Robert Laffont,
1989.

STEPHEN JAY GOULD
paléontologue américain,
est l'auteur de *Pouce du
panda* (1980), trad.
Grasset, 1982, et de
La Foire aux dinosaures
(1991), trad. Le Seuil,
1993.

RENÉ THOM
mathématicien, médaille
Fields, inventeur de la
« théorie des
catastrophes », a publié
Paraboles et catastrophes,
Flammarion, 1983 et
*Esquisse d'une
sémiophysique*,
Interéditions, 1988.

ILYA PRIGOGINE
physicien, prix Nobel de
chimie, a notamment
publié (en collaboration
avec Isabelle Stengers)
La Nouvelle Alliance,
Gallimard, 1979 et *Entre
le temps et l'éternité*,
Fayard, 1988.

STUART KAUFFMAN
est notamment l'auteur de
*Origins of order and self-
organization in Evolution*,
Oxford University Press,
1991, et *At home in the
universe : the search for
the laws of self-
organization*, Oxford
University Press, 1995.

MURRAY GELL-MANN
prix Nobel de physique,
a publié récemment
Le Quark et le jaguar,
(1994), trad. Albin Michel,
1995.

Docteur en médecine, ancien attaché de consultation en génétique humaine à l'hôpital Saint-Louis, Marcel-Paul Schützenberger a enseigné au Massachusetts Institute of Technology, dans l'équipe de Claude Shannon ainsi qu'à Harvard Medical School. Ses travaux mathématiques ont porté sur la théorie de l'information, l'algorithmique et les langages formels, dont il a initié la théorie dans une série d'articles en collaboration avec Noam Chomsky. Il est membre de l'Académie des sciences.

La Recherche : Quelle est votre définition du darwinisme ?

M.-P. Schützenberger : Je prendrai la version moderne la plus courante, dont un représentant offensif est le Britannique Richard Dawkins*. Elle consiste à considérer que l'évolution des êtres vivants peut être expliquée par le tandem sélection-mutations au hasard. A l'intérieur de cette doctrine, il faut distinguer deux écoles, mutuellement contradictoires : les gradualistes, dont Dawkins est le héros le plus radical, et les saltationnistes, dont l'Américain Stephen Jay Gould* est un héros non moins radical. Pour les gradualistes, l'évolution procède uniquement par petites touches successives. Pour les saltationnistes, qui n'ont d'ailleurs pas fourni l'effort d'une présentation aussi structurée, l'évolution procède essentiellement par sauts.

L.R. : Vous êtes plus connu comme mathématicien que comme spécialiste de l'évolution...

M.-P.S. : Bien sûr, mon métier n'est pas la biologie. Mais la légitimité des mathématiciens dans ce débat vient d'abord de ce que les plus dogmatiques des gradualistes, Dawkins en tête, font un grand usage d'arguments formulés en termes mathématiques et informatiques, qui en imposent au lecteur.

Cette légitimité vient aussi du fait que les mathématiciens sont des zélotes de l'épistémologie, dans leur propre discipline. Il est normal qu'ils portent un re-

gard critique analogue sur les fondements d'autres disciplines.

Elle vient enfin de l'irruption dans ce débat, dans le sillage du mouvement cybernétique, de mathématiciens et de physiciens, comme René Thom* ou Ilya Prigogine*, et plus récemment des chercheurs de l'institut Santa Fe, aux Etats-Unis, comme Stuart Kauffman*, un médecin épris de logique mathématique qui reçoit l'appui sonore du grand physicien Murray Gell-Mann*. Ce troisième conglomérat d'Eglises applique des concepts mathématiques au problème fondamental de l'évolution, qui est celui de complexité fonctionnelle. Ici je me trouve concerné de manière plus personnelle.

L.R. : Qu'entendez-vous par complexité fonctionnelle ?

M.-P.S. : Sans ce concept, il est impossible d'envisager les phénomènes de la vie. Les deux mots qui le composent désignent eux-mêmes deux notions essentielles.

Quand un biologiste qui travaille à la paillasse se parle à lui-même, parfois à voix basse, en termes de fonctions (la fonction d'un gène, d'une enzyme, du ribosome, des antennes de la drosophile), il pense fonctionnalité et il a bien raison de le faire. C'est un concept parfaitement adapté à la réalité. Ceux qui le perçoivent mieux que quiconque sont les physiologistes. Pour eux tout est fonctionnalité. Ils décrivent des systèmes : circulatoire, digestif, excrétoire, etc. Qu'il en aille de même en biologie moléculaire semble poser des problèmes à certains. Peut-être parce que la notion d'organe n'est plus présente à ce niveau. Mais l'absence d'organe n'interdit pas qu'on parle de fonctions ! La complexité est aussi un concept de base. Déjà chez les unicellulaires les mécanismes de séparation et de fusion des chromosomes, dans la mitose et la méiose, sont des processus incroyables de complexité, de finesse.

Or les êtres vivants se présentent comme un ensemble complexe d'interrelations fonctionnelles. Si l'on veut expliquer l'évolution des êtres vivants, il faut expliquer à la fois cette fonctionnalité et cette complexité. C'est la complexité

fonctionnelle. Et là ce n'est plus simple du tout...

L.R. : Qu'y a-t-il de si difficile à comprendre ?

M.-P.S. : C'est peut-être que l'évolution du vivant repose sur un quelque chose, un ingrédient essentiel que rien dans nos connaissances physico-chimiques actuelles ne permet d'imaginer, et sur lequel la logique formelle n'a pour l'instant aucune prise. Qu'ils soient gradualistes ou saltationnistes, les darwiniens me semblent avoir parfois une conception un peu simple de la biologie, une conception en quelque sorte clés en mains. Pour eux un gène est comme une commande sur le catalogue de La Redoute. L'article de Walter Gehring que vous avez publié sur le supergène qui déclenche la fabrication des yeux de la mouche reflète cette conception. On peut accepter que les gènes fonctionnent ainsi et ne pas se poser de question. Mais si l'on cherche à l'expliquer, alors le darwinisme n'est d'aucun secours...

L.R. : Vous soutenez qu'un gène est conçu comme une commande à La Redoute. Que voulez-vous dire exactement ?

M.-P.S. : Schématiquement un gène est assimilable à une unité d'information. Il est là ou non. Quand il est activé, c'est un ordre élémentaire du type oui-non. Mettez du persil, arrêtez la cuisson... Restons-en à l'exemple de l'œil. On dit qu'il faut mille ou deux mille gènes pour fabriquer un œil. Donc mille à deux mille unités d'information. C'est dérisoire ! Supposons qu'une firme française souhaite faire fabriquer par une usine en Asie du Sud-Est un appareil électroménager entièrement nouveau et que, pour des raisons commerciales, elle ne dise rien de la fonctionnalité de l'appareil, elle ne dise pas comment il marche ni à quoi il doit servir. Avec quelques milliers de bits le fabricant n'ira pas loin. Car c'est l'équivalent d'un paragraphe de ce texte. L'appareil (autrefois plus simple qu'un œil) ne sera convenablement construit que si le fabricant comprend la signification des opérations dont on lui demande d'assurer l'usinage ; c'est-à-dire s'il a déjà l'idée de l'objet avant de le fabriquer. Ce qui

M.-P. Schützenberger : les failles du darwinisme

... représente une masse de connaissances communes au donneur d'ordres et au fabricant autrement considérable.

L.R. : Vous voulez dire que le génome ne contient pas assez d'informations pour expliquer le vivant ?

M.-P.S. : Du moins pas d'après la connaissance que nous en avons. Les prédicats utilisés par les biologistes sont tout à fait insuffisants. Ce n'est pas parce qu'on sait qu'un gène déclenche la fabrication de telle ou telle protéine qu'on comprend comment un ou deux milliers de gènes suffisent à diriger le cours du développement embryonnaire.

L.R. : Vous allez vous faire accuser de préformisme...

M.-P.S. : Et de bien d'autres crimes. Ma position est pourtant strictement rationnelle. Je formule un problème qui me paraît majeur : comment se fait-il qu'avec aussi peu d'instructions élémentaires la matière vivante soit capable de fabriquer des objets aussi merveilleusement compliqués et efficaces ? Cette propriété dont elle est dotée, quelle est sa nature ? Rien dans nos connaissances physico-chimiques actuelles ne permet de l'imaginer. Si l'on se place du point de vue de l'évolution, il faudrait aussi admettre que d'une manière ou d'une autre les poissons de l'ère primaire contenaient en puissance les germes d'organes qu'ils n'avaient pas mais qu'auront leurs successeurs quand ils quitteront les eaux pour la terre ferme et les airs, et avec les câblages neuronaux appropriés.

L.R. : Vous affirmez qu'en fait, le darwinisme n'explique pas grand-chose.

M.-P.S. : Il me semble en effet que le couple mutations-sélection au hasard présente une certaine valeur descriptive, mais en aucun cas explicative. Le darwinisme fait des constats écologiques sur l'abondance relative des espèces et des biotopes. Et la valeur descriptive du modèle est d'ailleurs elle-même limitée. En outre, ce sur quoi insistent les saltationnistes, la thèse gradualiste semble complètement démentie par le progrès des connaissances en paléontologie. Quant aux miracles du saltationnisme, ils ne peuvent que renvoyer à la propriété mystérieuse que j'ai évoquée.

L.R. : Revenons sur la sélection naturelle. N'a-t-elle pas malgré tout une certaine valeur explicative ?

M.-P.S. : Personne ne peut refuser l'existence du phénomène. C'est tout simplement le principe que rien n'existe qui ne soit assez solide pour exister. Sa plus belle application ce sont les lois de Berthollet en chimie élémentaire*. Dans une zone qui se désertifie, les espèces qui disparaissent le plus vite sont celles qui ont le plus

besoin d'eau. Ce qui n'explique pas l'apparition chez les survivants de structures dont les propriétés fonctionnelles leur permettent de mieux résister à la sécheresse. Le concept de sélection naturelle n'est pas un concept très fort. Car, sauf dans certains cas artificiels, nos connaissances ne nous permettent pas de prédire que telle ou telle espèce, telle ou telle variété, sera favorisée ou défavorisée en fonction de l'évolution du milieu. Ce que nous pouvons faire c'est constater après coup l'effet de la sélection naturelle. Constaté, par exemple, que telle espèce d'escargots est moins mangée que d'autres par certains oiseaux, peut-être parce que leur coquille est moins visible. C'est de l'écologie, très intéressante. Autrement dit, la sélection naturelle est un faible instrument de preuve, parce que les phénomènes de sélection naturelle sont patents, mais ne prouvent rien du point de vue théorique.

L.R. : C'est le couple sélection-mutations au hasard qui compte.

N'a-t-il aucune valeur explicative ?

M.-P.S. : Avec la découverte du codage, on a appris qu'un gène est comme un mot composé dans l'alphabet de l'ADN, formant un texte qui est le génome. C'est ce mot qui va dicter à la cellule de fabriquer telle ou telle protéine. Soit une protéine de structure, soit une protéine qui elle-même va en combinaison avec d'autres signaux dire au génome de fabriquer telle autre protéine. Tous les résultats expérimentaux connus se rangent dans ce schéma.

Son application à la théorie de l'évolution donne à peu près ceci : un gène subit une mutation. Etant donné le milieu, cette mutation facilite éventuellement la reproduction des individus qui en sont porteurs, et les mutants ainsi favorisés parviennent progressivement, statistiquement, à remplacer les non-mutants. L'évolution ne serait qu'une accumulation de modifications qu'on me permettra de qualifier de typographiques. Les généticiens des populations étudient mathématiquement la vitesse avec laquelle une mutation favorable se propage dans ces conditions. Ils font ceci avec beaucoup d'habileté, mais ce sont des exercices d'école parce qu'aucun des paramètres qu'ils utilisent ne peut être déterminé empiriquement.

En plus nous retrouvons l'obstacle que j'ai déjà évoqué. Nous savons à peu près combien il y a de gènes dans un être vivant. Environ cent mille chez les vertébrés supérieurs. Ceci semble grossièrement insuffisant pour expliquer l'incroyable quantité d'informations qu'il a fallu pour que s'accomplisse l'évolution.

L.R. : Pouvez-vous donner un exemple concret ?

M.-P.S. : Les darwiniens disent que les chevaux, qui étaient des mammifères gros comme des lapins, ont augmenté leur taille pour s'enfuir plus vite et échapper aux prédateurs. Dans le modèle gradualiste, il faut admettre que l'on puisse isoler ce trait, l'augmentation de la taille, et le considérer comme résultant d'une série de mutations typographiques. Mais ce n'est qu'un effet rhétorique. On impose tacitement au lecteur l'idée que ce qui compte pour un ruminant c'est la vitesse de fuite face au prédateur. C'est peut-être vrai en partie. Mais aucune raison biologique ne permet de déterminer si c'est le critère déterminant. Rien n'interdit de penser non plus que l'augmentation de taille puisse avoir un effet négatif. Les darwiniens me semblent avoir conservé une vision mécaniste de l'évolution, selon laquelle on observerait une succession presque linéaire de causes et d'effets. L'idée aujourd'hui classique en physique que les causes puissent interagir les unes avec les autres me semble avoir une certaine difficulté à percer en biologie. Alors que dans la quasi-totalité des phénomènes observables les modifications locales interagissent de façon dramatique. Il n'y a pas un numéro de *La Recherche* où sous un prétexte ou un autre il n'y ait un article faisant allusion à l'effet papillon. Or l'informatique est précisément un domaine qui donne une intuition concrète de ces phénomènes. Une modification typographique d'un programme informatique ne change pas un peu le programme, elle l'annule purement et simplement. Il en va de même avec un numéro de téléphone. Si j'essaie d'appeler par téléphone un correspondant, il importe peu que je me trompe sur un, deux, trois ou huit chiffres de son numéro.

L.R. : Vous acceptez l'idée qu'une mutation biologique a bien un caractère typographique ?

M.-P.S. : Oui, en ce sens qu'une base est remplacée par une autre, un codon par un autre, mais au niveau de l'activité biochimique qui en résulte on ne peut plus parler de typographie. Il y a toute une grammaire de formation des protéines, en trois dimensions, que l'on connaît encore bien mal. Nous ne disposons d'aucune règle physico-chimique nous permettant de relier de manière intelligible les modifications typographiques à une structure biologiquement efficace. Pour revenir à l'exemple de l'œil, si l'on considère les quelques mille gènes nécessaires à sa fabrication, chacun pris isolément ne signifie rien. Ce qui est signifiant, c'est la combinaison de leurs interactions. Des interactions en cascade, avec des boucles de rétroaction, tout cela exprimant une complexité que nous ne savons pas analyser. Nous pouvons avoir l'espoir de l'ana-

LES LOIS DE BERTHOLLET furent énoncées en 1803 par le chimiste français. Elles permettent de prévoir les réactions de double décomposition entre sels, acides et bases.

Rendez-vous

... lyser mais nous en sommes loin. Gehring constate qu'en changeant tel gène il se produit telle transformation. Il le constate, mais il ne cherche pas à l'expliquer.

L.R. : *Mais Dawkins, par exemple, croit à la possibilité d'un processus cumulatif.*

M.-P.S. : Dawkins croit en effet à ce qu'il appelle la « sélection cumulative de mutations aléatoires ». Pour étayer sa thèse, il a recours à la métaphore imaginée par le mathématicien Émile Borel* : celle du singe tapant au hasard sur un clavier et obtenant finalement un texte littéraire. Métaphore acclamée, hélas !, par Francis Crick, le codécouvreur de la double hélice. Dawkins fait écrire par son ordinateur une suite d'une trentaine de signes, correspondant au nombre de signes contenus dans un vers de Shakespeare. Il procède ensuite à une simulation du mécanisme darwinien, sélection-mutations au hasard. Son singe fictif tape et retape ces mêmes signes, sauf que l'ordinateur choisit chaque fois la phrase qui ressemble le plus, même de très loin, au vers de Shakespeare. Par ce procédé que Dawkins appelle de « sélection cumulative », le singe parvient au but en une quarantaine ou une soixantaine de générations.

L.R. : *Or vous ne croyez pas qu'un singe tapant sur un clavier, même aidé par l'ordinateur...*

M.-P.S. : Cette démonstration est un trompe-l'œil et Dawkins ne décrit pas exactement comment il procède. Si l'on se livre à l'exercice sur un ordinateur, on constate que les phrases qu'on obtient se rapprochent en effet assez vite de la cible au début. Mais à mesure qu'on s'approche de la cible cela devient de plus en plus long. Des mutations dans la mauvaise direction nous font régresser. En fait, un raisonnement simple montre qu'à moins de choisir habilement les paramètres numériques, la progression devient horriblement lente.

L.R. : *Vous voulez dire que le modèle de sélection cumulative imaginé par Dawkins est sans rapport avec une réalité biologique palpable ?*

M.-P.S. : Exactement. Le modèle de Dawkins laisse entièrement de côté le triple problème de la complexité, de la fonctionnalité et de leur interaction.

L.R. : *Vous êtes mathématicien. Supposons que vous tentiez malgré tout de formaliser ce concept de complexité fonctionnelle...*

M.-P.S. : Je ferais sans doute appel à une notion bannie de la communauté scientifique, mais parfaitement comprise par tout un chacun : celle de but. En tant qu'informaticien, on peut la rendre triviale de la façon suivante. On construit

un espace adéquat dans lequel l'une des coordonnées va servir de fil d'Ariane pour guider la trajectoire vers le but. C'est une formalisation parfaite. Une fois cet espace construit, le système évolue de façon mécanique vers le but qu'on lui a fixé. Mais il y a une difficulté : c'est que la construction elle-même de cet espace ne peut se faire qu'après une analyse préalable de tous les trajets possibles et de l'estimation de la distance au but à laquelle se trouve la fin de chacun d'eux. Ceci est hors de portée d'une étude empirique. Elle pré-suppose — j'emploie encore le même mot — que je connaisse déjà la totalité de la situation. Et en termes de logique mathématique la constitution de cet espace est un problème d'un ordre infiniment supérieur au problème posé. Or pourtant la fonctionnalité c'est la réussite dans l'atteinte d'un but. Le truc dans l'exemple apologetique de Dawkins est d'introduire subrepticement cet espace. Son programme informatique de sélection cumulative le réalise de façon tacite en calculant la distance au but, la phrase cible, par le nombre des lettres qui ne sont pas encore en place. Ceci ne correspond en rien à une réalité biologique. La fonction qu'il emploie frappe l'imagination parce qu'elle a une propriété de simplicité qui entraîne l'adhésion naïve. Dans la réalité biologique l'espace dans lequel il faudrait se plonger pour décrire la fonctionnalité la plus simple est d'une complexité qui défie l'entendement et bien sûr tout calcul.

L.R. : *Même quand ils se disent darwiniens, les saltationnistes sont plus modestes : ils ne prétendent pas détenir la clef permettant d'expliquer l'évolution...*

M.-P.S. : Avant d'évoquer les saltationnistes, tout de même un mot sur le Japonais Mooto Kimura*. Il a montré que la plupart des mutations sont neutres, sans effet permettant une sélection. Pour la thèse centrale du darwinisme, c'est gênant...

La thèse saltationniste, renouvelée par Stephen Jay Gould, reprend l'idée de base due à R. Goldschmidt vers 1940 : il se produirait des mutations très intenses, impliquant sans doute des centaines de gènes, et se déroulant rapidement, en moins de mille générations, donc en dessous du seuil de résolution de la paléontologie. Curieusement Gould ne semble pas gêné pour conserver le tandem mutations-sélection au hasard. Le saltationnisme se heurte à deux types de critiques. D'une part les macromutations supposées sont inexplicables dans le cadre de la biologie moléculaire actuelle. D'autre part Gould passe sous silence l'existence de grandes tendances, comme la complexification croissante du système nerveux central.

Il considère que le succès d'espèces nouvelles plus sophistiquées, comme les mammifères, est un phénomène contingent. Il n'est pas en mesure de rendre compte d'un sens de l'évolution, ou du moins de l'existence de trajectoires, qui pourtant ne font aucun doute. On en est donc réduit à invoquer deux types de miracles : celui des macromutations et celui des grandes trajectoires de l'évolution...

L.R. : *En quel sens employez-vous le mot « miracle » ?*

M.-P.S. : Dans un sens purement rationnel, comme d'un événement dont la probabilité est infime à un degré si j'ose dire ultracosmologique. Parlons des macromutations. Pour devenir un bon éléphant, il ne suffit pas tout à coup d'être doté d'une grande trompe. Il faut qu'en même temps un appareil complètement différent, le cerveau, soit modifié pour mettre en place l'ensemble des câblages nécessaires pour que l'éléphant sache se servir de sa trompe. Les macromutations doivent être coordonnées par un système de gènes dès l'embryogenèse. Or si l'on regarde l'histoire de l'évolution, cela nous fait des dizaines et des dizaines de milliers de miracles, dont les saltationnistes ne savent pas mieux rendre compte que les gradualistes.

Quant à la seconde catégorie de miracles, elle tient au fait que certaines de ces macromutations (si l'on admet qu'elles ont eu lieu) se sont additionnées les unes aux autres dans une direction bien définie, pour constituer les grandes tendances de l'évolution : complication du système nerveux, mais aussi intériorisation des processus reproductifs, apparition des os, de l'oreille, enrichissement des fonctions relationnelles, etc. Toute une série de miracles dont l'accumulation a pour effet d'accroître la complexité des organismes et leur efficacité. De ce point de vue la notion de bricolage avancée par François Jacob est un constat très intéressant. C'est un joli mot d'auteur, mais il ne donne pas l'ombre d'une explication.

L.R. : *L'apparition de l'homme est-il un miracle, au sens où vous l'entendez ?*

M.-P.S. : Naturellement. Et ici il semble qu'il y ait d'autres voix que la mienne parmi les biologistes contemporains pour mettre en doute l'explication darwinienne qui était à la mode il y a une vingtaine d'années. Gradualistes ou saltationnistes sont tout à fait incapables de donner une explication convaincante de l'émergence quasi simultanée des nombreux systèmes biologiques qui distinguent l'homme des singes supérieurs : la bipédie avec les modifications concomitantes du bassin et sans doute du cerveau, une main beaucoup plus habile, avec des empreintes digitales qui lui confèrent un

ÉMILE BOREL fut l'un des grands mathématiciens français de la première moitié du siècle. Probabiliste, il jeta les bases de la théorie des jeux.

MOTOO KIMURA est l'auteur de ce qu'on appelle la théorie neutraliste de l'évolution. Il a publié *La Théorie neutraliste de l'évolution moléculaire* (1982), trad. Flammarion, 1990.

ENTRETIEN

FRANCISCO VARELA,
d'origine chilienne,
a notamment publié
*Autonomie et
connaissance*, Le Seuil,
1989 et, en
collaboration,
*L'inscription corporelle
de l'esprit*, Le Seuil,
1993.

**LE PRINCIPE
ANTHROPIQUE**
énonce que
l'Univers
s'est constitué
pour l'homme.

Rendez-vous

... tact beaucoup plus fin ; les modifications du pharynx permettant la phonation, la modification du système nerveux central notamment au niveau des lobes temporaux, permettant une reconnaissance fine de la parole. Ces appareils sont du point de vue de l'embryogenèse complètement différents les uns des autres. Chacune de ces modifications constitue l'un des dons qu'une famille de singes ayant beaucoup d'ambition pour ses descendants aurait demandé à une bonne fée de leur donner en cadeau à la naissance. Il est très singulier que ces dons se soient développés simultanément, pour le plus grand bénéfice des primates que nous sommes. Certains parlent d'une prédisposition du génome. Mais que recouvrait concrètement cette prédisposition, si elle a existé ? Était-elle déjà présente chez les poissons du précambrien ? La réalité est que nous sommes confrontés à une totale carence conceptuelle.

L.R. : Vous avez évoqué tout à l'heure un autre courant, qui va en gros des cybernéticiens à l'école de Santa Fe, qui fait appel à des notions comme le chaos...

M.-P.S. : Je faisais allusion à une succession de gens fort compétents qui ont su trouver des expressions poétiques et creuses qui n'expliquent rien. C'est l'ordre par le bruit des cybernéticiens, les structures dissipatives d'un Prigogine, le systémisme d'un Varela*, et maintenant le « bord du chaos » de Stuart Kauffman, dont l'inanité sonore va bientôt nous parvenir en France. Ces écoles mettent la complexité à toutes les sauces. Ils évoquent à l'appui de leur démarche des exemples comme certaines réactions chimiques, le dessin d'une côte maritime, les turbulences atmosphériques ou la structure d'une chaîne de montagnes, dont la complexité est certes très grande mais qui repose, au regard du monde vivant, sur un type d'organisation très pauvre, en tout cas non fonctionnelle. Aucun algorithme ne nous permet d'appréhender la complexité du vivant, qui contrairement à tous ces exemples empruntés au monde physico-chimique est de nature fonctionnelle.

L.R. : Doit-on comprendre votre position comme un constat résigné, un appel à plus de modestie ou autre chose encore ?

M.-P.S. : Disons par antiphrase qu'il ne reste plus aux optimistes qu'à entonner le grand hymne du principe anthropique*. Mais ici nous ne sommes plus dans le discours scientifique, quelques savantes que soient les équations dont les fanfares accompagnent son chant. D'autres pratiqueront la suspension du jugement.

*Propos recueillis
par Olivier Postel-Vinay*



Interview

Origins & Design 17:2

Marcel-Paul Schützenberger: The Miracles of Darwinism



Marcel-Paul Schützenberger

Introduction

Until his death, the mathematician and doctor of medicine Marcel-Paul Schützenberger (1920-1996) was Professor of the Faculty of Sciences at the University of Paris and a member of the Academy of Sciences. [See "[From the Editors](#)" for additional biographical information.] In 1966, Schützenberger participated in the Wistar Symposium on mathematical objections to neo-Darwinism. His arguments were subtle and often misunderstood by biologists. Darwin's theory, he observed, and the interpretation of biological systems as formal objects, were at odds insofar as randomness is known to degrade meaning in formal contexts. But Schützenberger also argued that Darwin's theory logically required some active principle of coordination between the typographic space of the informational macromolecules (DNA and RNA) and the organic space of living creatures themselves -- which Darwin's theory does not provide. In this January 1996 interview with the French science monthly *La Recherche*, here published in English for the first time, he pursued these themes anew, finding inspiration for his ideas both in the mathematical ideas that he had pioneered and in the speculative tradition of French biological thought that stretched from Georges Cuvier to Lucien Cuenot. M.P. Schützenberger was a man of universal curiosity and great wit; throughout his life, he was both joyful and unafraid. The culture that he so brilliantly represented disappears with him, of course. It was his finest invention and it now belongs to the inventory of remembered things.

Q: What is your definition of Darwinism?

S: The most current, of course, a position generically embodied, for example, by Richard Dawkins. The essential idea is well-known. Evolution, Darwinists argue, is explained by the double action of chance mutations and natural selection. The general doctrine embodies two mutually contradictory schools -- gradualists, on the one hand, saltationists, on the other. Gradualists insist that evolution proceeds by means of small successive changes; saltationists that it proceeds by jumps. Richard Dawkins has come to champion radical gradualism; Stephen Jay Gould, a no less radical version of saltationism.

Q: You are known as a mathematician rather than a specialist in evolutionary biology...

S: Biology is, of course, not my specialty. The participation of mathematicians in the overall assessment of evolutionary thought has been encouraged by the biologists themselves, if only because they presented such an irresistible target. Richard Dawkins, for example, has been fatally attracted to arguments that would appear to hinge on concepts drawn from mathematics and from the computer sciences, the technical stuff imposed on innocent readers with all of his comic authority. Mathematicians are, in any case, epistemological zealots. It is normal for them to bring their critical scruples to the foundations of other disciplines. And finally, it is worth observing that the great turbid wave of cybernetics has carried mathematicians from their normal mid-ocean haunts to the far shores of evolutionary biology. There up ahead, Rene Thom and Ilya Prigogine may be observed paddling sedately toward dry land, members of the Santa Fe Institute thrashing in their wake. Stuart Kauffman is among them. An interesting case, a physician half in love with mathematical logic, burdened now and forever by having received a Papal Kiss from Murray Gell-Mann. This ecumenical movement has endeavored to apply the concepts of mathematics to the fundamental problems of evolution -- the interpretation of functional complexity, for example.

Q: What do you mean by functional complexity?

S: It is impossible to grasp the phenomenon of life without that concept, the two words each expressing a crucial and essential idea. The laboratory biologists' normal and unforced vernacular is almost always couched in functional terms: the function of an eye, the function of an enzyme, or a ribosome, or the fruit fly's antennae -- their function; the concept by which such language is animated is one perfectly adapted to reality. Physiologists see this better than anyone else. Within their world, everything is a matter of function, the various systems that they study -- circulatory, digestive, excretory, and the like -- all characterized in simple, ineliminable functional terms. At the level of molecular biology, functionality may seem to pose certain conceptual problems, perhaps because the very notion of an organ has disappeared when biological relationships are specified in biochemical terms; but appearances are misleading, certain functions remaining even in the absence of an organ or organ systems. Complexity is also a crucial concept. Even among unicellular organisms, the mechanisms involved in the separation and fusion of chromosomes during mitosis and meiosis are processes of unbelievable complexity and subtlety. Organisms present themselves to us as a complex ensemble of functional interrelationships. If one is going to explain their evolution, one must at the same time explain their functionality and their complexity.

Q: What is it that makes functional complexity so difficult to comprehend?

S: The evolution of living creatures appears to require an essential ingredient, a specific form of organization. Whatever it is, it lies beyond anything that our present knowledge of physics or chemistry might suggest; it is a property upon which formal logic sheds absolutely no light. Whether gradualists or saltationists, Darwinians have too simple a conception of biology, rather like a locksmith improbably convinced that his handful of keys will open any lock. Darwinians, for example, tend to think of the gene rather as if it were the expression of a simple command: do this, get that done, drop that side chain. Walter Gehring's work on the regulatory genes controlling the development of the insect eye reflects this conception. The relevant genes may well function this way, but the story on this level is surely incomplete, and Darwinian theory is not apt to fill in the pieces.

Q: You claim that biologists think of a gene as a command. Could you be more specific?

S: Schematically, a gene is like a unit of information. It has simple binary properties. When active, it is an elementary information-theoretic unit, the cascade of gene instructions resembling the cascade involved in specifying a recipe. Now let us return to the example of the eye. Darwinists imagine that it requires what? A thousand or two thousand genes to assemble an eye, the specification of the organ thus requiring one or two

thousand units of information? This is absurd! Suppose that a European firm proposes to manufacture an entirely new household appliance in a Southeast Asian factory. And suppose that for commercial reasons, the firm does not wish to communicate to the factory any details of the appliance's function -- how it works, what purposes it will serve. With only a few thousand bits of information, the factory is not going to proceed very far or very fast. A few thousand bits of information, after all, yields only a single paragraph of text. The appliance in question is bound to be vastly simpler than the eye; charged with its manufacture, the factory will yet need to know the significance of the operations to which they have committed themselves in engaging their machinery. This can be achieved only if they already have some sense of the object's nature before they undertake to manufacture it. A considerable body of knowledge, held in common between the European firm and its Asian factory, is necessary before manufacturing instructions may be executed.

Q: Would you argue that the genome does not contain the requisite information for explaining organisms?

S: Not according to the understanding of the genome we now possess. The biological properties invoked by biologists are in this respect quite insufficient; while biologists may understand that a gene triggers the production of a particular protein, that knowledge -- that kind of knowledge -- does not allow them to comprehend how one or two thousand genes suffice to direct the course of embryonic development.

Q: You are going to be accused of preformationism...

S: And of many other crimes. My position is nevertheless strictly a rational one. I've formulated a problem that appears significant to me: how is it that with so few elementary instructions, the materials of life can fabricate objects that are so marvelously complicated and efficient? This property with which they are endowed -- just what is its nature? Nothing within our actual knowledge of physics and chemistry allows us intellectually to grasp it. If one starts from an evolutionary point of view, it must be acknowledged that in one manner or another, the earliest fish contained the capacity, and the appropriate neural wiring, to bring into existence organs which they did not possess or even need, but which would be the common property of their successors when they left the water for the firm ground, or for the air.

Q: You assert that, in fact, Darwinism doesn't explain much.

S: It seems to me that the union of chance mutation and selection has a certain descriptive value; in no case does the description count as an explanation. Darwinism relates ecological data to the relative abundance of species and environments. In any case, the descriptive value of Darwinian models is pretty limited. Besides, as saltationists have indicated, the gradualist thesis seems completely demented in light of the growth of paleontological knowledge. The miracles of saltationism, on the other hand, cannot discharge the mystery I have described.

Q: Let's return to natural selection. Isn't it the case that despite everything the idea has a certain explanatory value?

S: No one could possibly deny the general thesis that stability is a necessary condition for existence -- the real content of the doctrine of natural selection. The outstanding application of this general principle is Berthollet's laws in elementary chemistry. In a desert, the species that die rapidly are those that require water the most; yet that does not explain the appearance among the survivors of those structures whose particular features permits them to resist aridity. The thesis of natural selection is not very powerful. Except for certain artificial cases, we are yet unable to predict whether this or that species or this or that variety will be favored or not as the result of changes in the environment. What we can do is establish after the fact the effects of natural selection -- to show, for, example that certain birds are disposed to eat this species of snails less often than other species, perhaps because their shell is not as visible. That's ecology: very interesting. To put it

another way, natural selection is a weak instrument of proof because the phenomena subsumed by natural selection are obvious and yet they establish nothing from the point of view of the theory.

Q: Isn't the significant explanatory feature of Darwinian theory the connection established between chance mutations and natural selection?

S: With the discovery of coding, we have come to understand that a gene is like a word composed in the DNA alphabet; such words form the genomic text. It is that word that tells the cell to make this or that protein. Either a given protein is structural, or a protein itself works in combination with other signals given by the genome to fabricate yet another protein. All the experimental results we know fall within this scheme. The following scenario then becomes standard. A gene undergoes a mutation, one that may facilitate the reproduction of those individuals carrying it; over time, and with respect to a specific environment, mutants come to be statistically favored, replacing individuals lacking the requisite mutation. Evolution could not be an accumulation of such typographical errors. Population geneticists can study the speed with which a favorable mutation propagates itself under these circumstances. They do this with a lot of skill, but these are academic exercises if only because none of the parameters that they use can be empirically determined. In addition, there are the obstacles I have already mentioned. We know the number of genes in an organism. There are about one hundred thousand for a higher vertebrate. This we know fairly well. But this seems grossly insufficient to explain the incredible quantity of information needed to accomplish evolution within a given line of species.

Q: A concrete example?

S: Darwinists say that horses, which were once mammals as large as rabbits, increased their size to escape more quickly from predators. Within the gradualist model, one might isolate a specific trait -- increase in body size -- and consider it to be the result of a series of typographic changes. The explanatory effect achieved is rhetorical, imposed entirely by trick of insisting that what counts for a herbivore is the speed of its flight when faced by a predator. Now this may even be partially true, but there are no biological grounds that permit us to determine that this is in fact the decisive consideration. After all, increase in body size may well have a negative effect. Darwinists seem to me to have preserved a mechanic vision of evolution, one that prompts them to observe merely a linear succession of causes and effects. The idea that causes may interact with one another is now standard in mathematical physics; it is a point that has had difficulty in penetrating the carapace of biological thought. In fact, within the quasi-totality of observable phenomena, local changes interact in a dramatic fashion; after all, there is hardly an issue of *La Recherche* that does not contain an allusion to the Butterfly Effect. Information theory is precisely the domain that sharpens our intuitions about these phenomena. A typographical change in a computer program does not change it just a little. It wipes the program out, purely and simply. It is the same with a telephone number. If I intend to call a correspondent by telephone, it doesn't much matter if I am fooled by one, two, three or eight figures in his number.

Q: You accept the idea that biological mutations genuinely have the character of typographical errors?

S: Yes, in the sense that one base is a template for another, one codon for another, but at the level of biochemical activity, one is no longer able properly to speak of typography. There is an entire grammar for the formation of proteins in three dimensions, one that we understand poorly. We do not have at our disposal physical or chemical rules permitting us to construct a mapping from typographical mutations or modifications to biologically effective structures. To return to the example of the eye: a few thousand genes are needed for its fabrication, but each in isolation signifies nothing. What is significant is the combination of their interactions. These cascading interactions, with their feedback loops, express an organization whose complexity we do not know how to analyze (See [Figure 1](#)). It is possible we may be able to do so in the future, but there is no doubt that we are unable to do so now. Gehring has recently discovered a segment of DNA which is both involved in the development of the vertebrate eye and which can induce the development

of an eye in the wing of a butterfly. His work comprises a demonstration of something utterly astonishing, but not an explanation.

Q: But Dawkins, for example, believes in the possibility of a cumulative process.

S: Dawkins believes in an effect that he calls "the cumulative selection of beneficial mutations." To support his thesis, he resorts to a metaphor introduced by the mathematician Emile Borel -- that of a monkey typing by chance and in the end producing a work of literature. It is a metaphor, I regret to say, embraced by Francis Crick, the co-discoverer of the double helix. Dawkins has his computer write a series of thirty letters, these corresponding to the number of letters in a verse by Shakespeare. He then proceeds to simulate the Darwinian mechanism of chance mutations and selection. His imaginary monkey types and retypes the same letters, the computer successively choosing the phrase that most resembles the target verse. By means of cumulative selection, the monkey reaches its target in forty or sixty generations.

Q: But you don't believe that a monkey typing on a typewriter, even aided by a computer...

S: This demonstration is a *trompe-l'oeil*, and what is more, Dawkins doesn't describe precisely how it proceeds. At the beginning of the exercise, randomly generated phrases appear rapidly to approach the target; the closer the approach, the more the process begins to slow. It is the action of mutations in the wrong direction that pulls things backward. In fact, a simple argument shows that unless the numerical parameters are chosen deliberately, the progression begins to bog down completely.

Q: You would say that the model of cumulative selection, imagined by Dawkins, is out of touch with palpable biological realities?

S: Exactly. Dawkins's model lays entirely to the side the triple problems of complexity, functionality, and their interaction.

Q: You are a mathematician. Suppose that you try, despite your reservations, to formalize the concept of functional complexity...

S: I would appeal to a notion banned by the scientific community, but one understood perfectly by everyone else -- that of a goal. As a computer scientist, I could express this in the following way. One constructs a space within which one of the coordinates serves in effect as the thread of Ariane, guiding the trajectory toward the goal. Once the space is constructed, the system evolves in a mechanical way toward its goal. But look, the construction of the relevant space cannot proceed until a preliminary analysis has been carried out, one in which the set of all possible trajectories is assessed, this together with an estimation of their average distance from the specified goal. The preliminary analysis is beyond the reach of empirical study. It presupposes -- the same word that seems to recur in theoretical biology -- that the biologist (or computer scientist) know the totality of the situation, the properties of the ensemble of trajectories. In terms of mathematical logic, the nature of this space is entirely enigmatic. Nonetheless, it is important to remember that the conceptual problems we face, life has entirely solved; the systems embodied in living creatures are entirely successful in reaching their goals. The trick involved in Dawkins's somewhat sheepish example proceeds via the surreptitious introduction of a relevant space. His computer program calculates from a random phrase to a target, a calculation corresponding to nothing in biological reality. The function that he employs flatters the imagination, however, because it has that property of apparent simplicity that elicits naïve approval. In biological reality, the space of even the simplest function has a complexity that defies understanding, and indeed, defies any and all calculations.

Q: Even when they dissent from Darwin, the saltationists are more moderate: they don't pretend to hold the key that would permit them to explain evolution...

S: Before we discuss the saltationists, however, I must say a word about the Japanese biologist Mooto Kimura. He has shown that the majority of mutations are neutral, without any selective effect. For Darwinians upholding the central Darwinian thesis, this is embarrassing... The saltationist view, revived by Stephen Jay Gould, in the end represents an idea due to Richard Goldschmidt. In 1940 or so, he postulated the existence of very intense mutations, no doubt involving hundreds of genes, and taking place rapidly, in less than one thousand generations, thus below the threshold of resolution of paleontology. Curiously enough, Gould does not seem concerned to preserve the union of chance mutations and selection. The saltationists run afoul of two types of criticism. On the one hand, the functionality of their supposed macromutations is inexplicable within the framework of molecular biology. On the other hand, Gould ignores in silence the great trends in biology, such as the increasing complexity of the nervous system. He imagines that the success of new, more sophisticated species, such as the mammals, is a contingent phenomenon. He is not in a position to offer an account of the essential movement of evolution, or at the least, an account of its main trajectories. The saltationists are thus reduced to invoking two types of miracles: macromutations, and the great trajectories of evolution.

Q: In what sense are you employing the word 'miracle'?

S: A miracle is an event that should appear impossible to a Darwinian in view of its ultra-cosmological improbability within the framework of his own theory. Now speaking of macromutations, let me observe that to generate a proper elephant, it will not suffice suddenly to endow it with a full-grown trunk. As the trunk is being organized, a different but complementary system -- the cerebellum -- must be modified in order to establish a place for the ensemble of wiring that the elephant will require to use his trunk. These macromutations must be coordinated by a system of genes in embryogenesis. If one considers the history of evolution, we must postulate thousands of miracles; miracles, in fact, without end. No more than the gradualists, the saltationists are unable to provide an account of those miracles. The second category of miracles are directional, offering instruction to the great evolutionary progressions and trends -- the elaboration of the nervous system, of course, but the internalization of the reproductive process as well, and the appearance of bone, the emergence of ears, the enrichment of various functional relationships, and so on. Each is a series of miracles, whose accumulation has the effect of increasing the complexity and efficiency of various organisms. From this point of view, the notion of bricolage [tinkering], introduced by Francois Jacob, involves a fine turn of phrase, but one concealing an utter absence of explanation.

Q: The appearance of human beings -- is that a miracle, in the sense you mean?

S: Naturally. And here it does seem that there are voices among contemporary biologists -- I mean voices other than mine -- who might cast doubt on the Darwinian paradigm that has dominated discussion for the past twenty years. Gradualists and saltationists alike are completely incapable of giving a convincing explanation of the quasi-simultaneous emergence of a number of biological systems that distinguish human beings from the higher primates: bipedalism, with the concomitant modification of the pelvis, and, without a doubt, the cerebellum, a much more dexterous hand, with fingerprints conferring an especially fine tactile sense; the modifications of the pharynx which permits phonation; the modification of the central nervous system, notably at the level of the temporal lobes, permitting the specific recognition of speech. From the point of view of embryogenesis, these anatomical systems are completely different from one another. Each modification constitutes a gift, a bequest from a primate family to its descendants. It is astonishing that these gifts should have developed simultaneously. Some biologists speak of a predisposition of the genome. Can anyone actually recover the predisposition, supposing that it actually existed? Was it present in the first of the fish? The reality is that we are confronted with total conceptual bankruptcy.

Q: You mentioned the Santa Fe school earlier in our discussion. Do appeals to such notions as chaos...

S: I should have alluded to a succession of highly competent people who have discovered a number of poetic

but essentially hollow forms of expression. I am referring here to the noisy crowd collected under the rubric of cybernetics; and beyond, there lie the dissipative structures of Prigogine, or the systems of Varela, or, moving to the present, Stuart Kauffman's edge of chaos -- an organized form of inanity that is certain soon to make its way to France. The Santa Fe school takes complexity to apply to absolutely everything. They draw their representative examples from certain chemical reactions, the pattern of the sea coast, atmosphere turbulence, or the structure of a chain of mountains. The complexity of these structures is certainly considerable, but in comparison with the living world, they exhibit in every case an impoverished form of organization, one that is strictly non-functional. No algorithm allows us to understand the complexity of living creatures, this despite these examples, which owe their initial plausibility to the assumption that the physico-chemical world exhibits functional properties that in reality it does not possess.

Q: Should one take your position as a statement of resignation, an appeal to have greater modesty, or something else altogether?

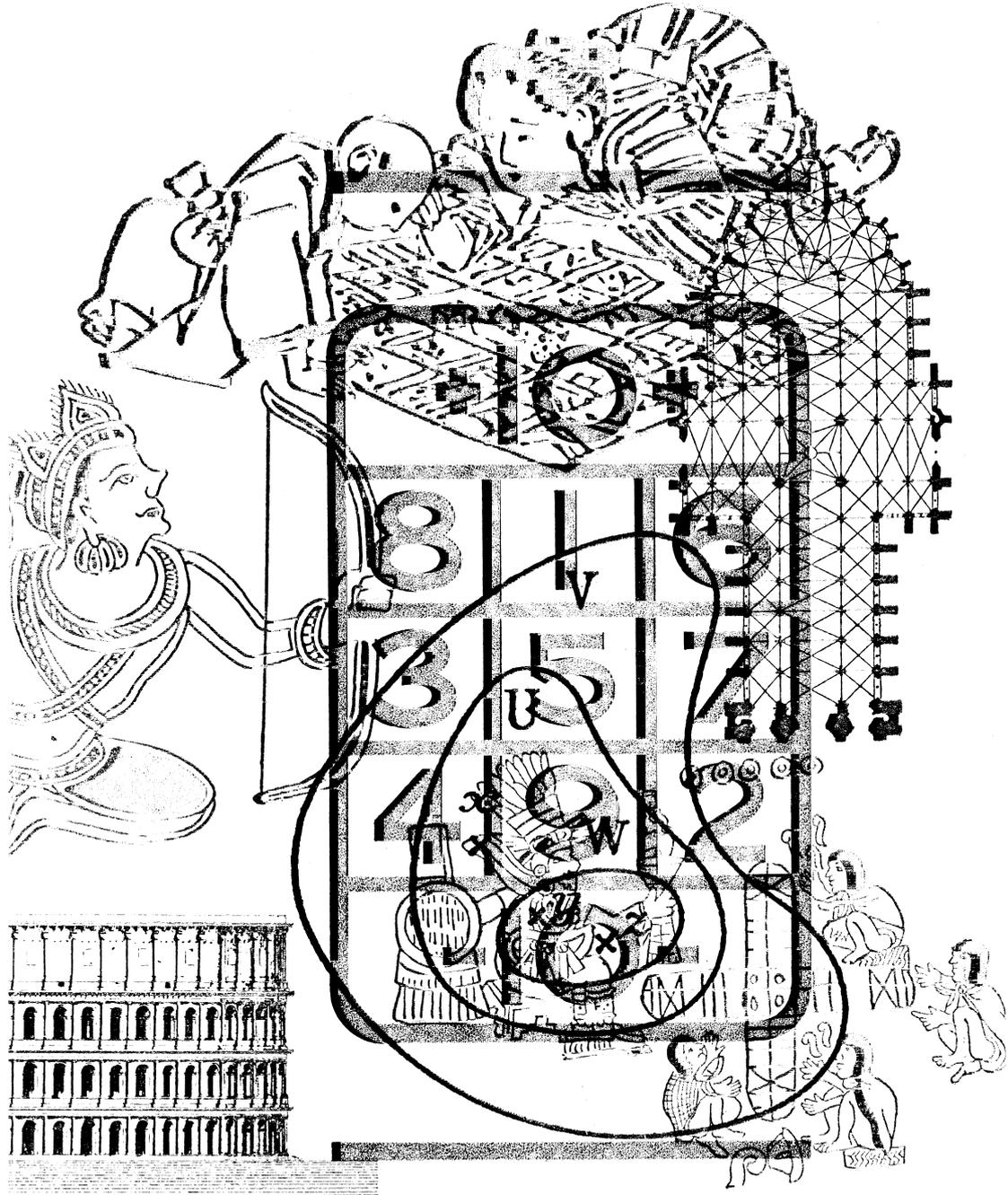
S: Speaking ironically, I might say that all we can hear at the present time is the great anthropic hymnal, with even a number of mathematically sophisticated scholars keeping time as the great hymn is intoned by tapping their feet. The rest of us should, of course, practice a certain suspension of judgment.

Copyright © 1996 Marcel-Paul Schützenberger. All rights reserved. International copyright secured.
File Date: 11.14.96

[[Previous Page](#)] [[O&D 17:2 Table of Contents](#)] [[ARN Home Page](#)]

This data file may be reproduced in its entirety for non-commercial use.
A return link to the Access Research Network web site would be appreciated.

Documents on this site which have been reproduced from a previous publication are copyrighted through the individual publication. See the body of the above document for specific copyright information.



United States Lines
Paris Review

$\prod_{i \in I} A_i \cap \left(\prod_{i \in I} B_i \right) = \prod_{i \in I} (A_i \cap B_i)$ algebra and games

By Marcel-Paul SCHUTZENBERGER

L'ALGÈBRE ET LES JEUX

Marcel Schützenberger here traces the history of mathematics as applied to games of strategy; that is to say, games in which other factors apart from chance are operative—for example, free will, choice, and even the very factor of conflict between the players. The author gives an account of the stage of advancement reached by the study of this subject, from the Theory of Groups to Von Neumann and Morgenstern's Theory of Games; the latter may be considered as one of the outstanding scientific landmarks of the present century.

Marcel Schützenberger nous retrace ici l'histoire des mathématiques appliquées aux jeux de stratégie, c'est-à-dire à ceux qui font intervenir d'autres éléments que le hasard, tels la volonté, le choix, les conflits mêmes des joueurs, et situe l'état d'avancement actuel de ces recherches depuis la théorie des groupes jusqu'à la théorie des jeux de Von Neumann et Morgenstern, que l'on peut considérer comme l'un des événements scientifiques les plus importants de ce siècle.

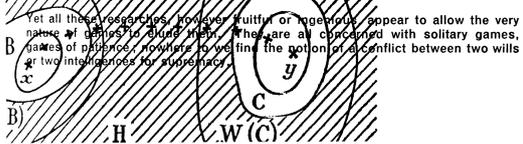
In the vast field of mathematics there has always been a little walled garden, tended by a number of great mathematicians who have considered it worth cultivating. Mathematical games and recreations have received the serious attention of Euler, Jacobi and Peirce, to cite only a few of the more illustrious names in this connection.

The Theory of Groups, which dominates a great part of modern mathematics, has provided complete solutions to games such as ring puzzles and teasers, which as early as the XVIIth. century had aroused the interest of one of the precursors of algebra, the mathematician and alchemist Jérôme Cardan.

Other problems of a familiar nature have given rise to a great deal of academic research; for example, that familiar to schoolchildren in which the various countries on a map have to be colored, using four colors only and without any two adjacent countries receiving the same color. This has become one of the most stimulating enigmas in topology. More recently there has been the problem of the "three young ladies out for a stroll", which opened the way to the extremely profound "Theory of Waben".

Not to be forgotten, either, are those puzzles involving chessboards and chessmen, the problem of the eight queens and Knight's Journey (he had to cover the whole chessboard without crossing the same square twice); and the domino game of Monge, the French Academician responsible for developing descriptive geometry, and for a frivolous subject yet the same, which arose in 1773 his "Reflections on a card trick".

Yet all these exercises, however fruitful or ingenious, appear to allow the very name of games to drop right. They are all concerned with solitary games, games of patience, nowhere to be found the notion of a conflict between two wills or two intelligences for supremacy.



DEPUIS toujours dans l'immense domaine des mathématiques, un jardin isolé a attiré l'attention des plus grands géomètres qui n'ont pas dédaigné de venir le cultiver. Les jeux et les récréations mathématiques ont ainsi été l'objet de travaux d'Euler, de Jacobi, de Peirce, pour ne citer que quelques noms illustres.

La Théorie des groupes qui règne souverainement sur la plus grande partie des mathématiques modernes a, pour sa part, permis une solution complète de jeux comme le taquin ou le baguenaudier auquel s'était déjà intéressé au XVI^e siècle l'un des précurseurs de l'algèbre, le mathématicien et alchimiste Jérôme Cardan.

D'autres problèmes aux noms poétiques ont suscité les recherches les plus académiques : celui des « quatre couleurs » a bien vite cessé d'être l'intrigante possibilité qu'a tout écolier de colorier n'importe quelle carte avec quatre couleurs seulement (sans que deux pays contigus reçoivent la même) pour devenir une des énigmes les plus stimulantes de la Topologie combinatoire. Plus récemment la « promenade des quinze demoiselles » a ouvert la route à la très sérieuse « Théorie der Waben ».

Enfin, pour n'être pas trop incomplet il faudrait citer les questions dont le point de départ est un échiquier, et ses pièces : problème des huit reines de la marche du Cavalier (qui doit parcourir tout l'échiquier sans traverser deux fois la même case) ou un jeu de domino. Monge, l'académicien français à qui est due la peu engageante géométrie descriptive, n'hésita pas d'écrire en 1773 des « Réflexions sur un Tour de cartes ».

Cependant toutes ces recherches, si ingénieuses ou si fécondes soient-elles, semblent laisser échapper la nature même du jeu : ce sont des analyses subtiles de jeux de solitaires, de patiences, et nulle part n'apparaît la notion de conflit entre deux volontés et deux intelligences en lutte pour la victoire.

Moreover it might be thought that the very concept of such a battle of wits is too human to be incorporated in an analytic symbolism; its place, perhaps, is in a domain of reasoning where mathematics has no part.

This was, indeed, the case up to the end of the first world war; the "algebra of games" until then was scarcely anything more than an algebra which found new enigmas, new sources of ideas, in games. It was in no way different from that developed from pure theory.

Since then, however—thanks largely to the impulse given by Von Neumann—things have radically changed. A whole theoretical structure has been built up on the idea of conflict; by means of suitable symbols, the most subtle implications of bluff and coalition of interests can be discussed, and at the same time specific problems of military and economic strategy can be effectively handled.

Very roughly speaking, the theory of games is divided into two two parts: in the first part, the game is considered reduced to its basic element, pure conflict, in which the two players each independently choose their respective strategies, the outcome of which involves an exchange of money between the two. The simplest example, and the most typical, is provided by "odds and evens". Peter chooses 0 or 14; Paul tries to guess the number chosen. In the most general case, the payments are different for each of the four possible cases. The theory enables us to calculate the best strategy for each player, that is to say the probabilities of his choosing or calling 0 and 14.

In this theory, whose extensions may imply the solution of the most refined analytical problems, a fundamental role is played by strictly algebraic considerations, namely the famous "Minimax" operation, the keystone of the whole edifice—so called because Peter tries to reduce his loss to a minimum, whereas Paul does his best to make it a maximum.

In the other part of the theory of games, which is of more recent development, the aim is to reduce everything to ideally simple terms at the outset of the game or in a given situation within the game. Thus for example bluff is presented as part of the normal mechanism of the player's strategy in forms of poker simplified in the extreme. The fact that this purely psychological element can apparently be subjected to mathematical rules seems to provide remarkable confirmation that the scope of the mathematician's activity is by means limited to inanimate matter!

Finally in the simplest case, that of intellectual games such as chess or draughts, in which the element of chance is totally excluded, algebra has provided a definite formula for winning strategies. Theoretically, any game can be reduced to certain combinations of the very simple and well-known game of Nim, or Fan Tan. Thus the problem is solved, apart from one simple detail—the calculations have to be worked out. So the algebraists are tending to turn to more stimulating questions, such as to what extent one can deduct from the strategy of a game, that of the corresponding "loser wins" game? How can multiplication and addition be affected between different games? And the decisive question: is it possible to determine, from the rules, if a game will end or not in a given finite time?

So far as this puzzle of their own devising is concerned, the mathematicians think the answer is in the negative.

D'ailleurs ne pouvait-on pas penser que cette notion même était par trop humaine pour être incorporée dans un symbolisme analytique: l'idée de conflit ne devait-elle pas rester l'apanage de formes de raisonnement où les mathématiciens n'auraient que faire?

Telle était, en effet, la situation jusqu'à la fin de la première guerre mondiale: une algèbre des jeux n'était guère qu'une algèbre à propos de jeux qui lui fournissaient le prétexte et le nom de nouvelles énigmes, en aucune manière différentes de celles qui se proposaient par le développement même de la théorie.

Depuis cette époque, grâce surtout à l'impulsion donnée par von Neumann, les choses ont radicalement changé: toute une théorie s'est constituée qui, à partir de l'idée de conflit, convenablement symbolisée, permet à la fois de discuter les implications les plus subtiles du concert de coalition d'intérêts ou de « bluff » et de traiter efficacement les problèmes précis de stratégie militaire ou économique.

Très schématiquement, la Théorie des Jeux se décompose en deux parties: dans l'une le jeu est supposé réduit à son élément le plus intime, au conflit à l'état pur: deux joueurs choisissent indépendamment l'un de l'autre chacun une stratégie et sur la base de ce double choix un règlement monétaire dépendant des deux stratégies intervient entre eux: l'exemple le plus simple mais parfaitement typique est à coup sûr le jeu de pair ou impair (Pierre choisit zéro ou 1, Paul essaye de deviner le nombre choisi: dans le cas le plus général les paiements sont différents pour les quatre cas possibles. La théorie permet de calculer quelle est la meilleure stratégie de chaque joueur; c'est-à-dire les probabilités avec lesquelles il doit choisir ou annoncer 0 et 1).

Dans cette théorie, dont les prolongements peuvent impliquer la solution des problèmes d'analyse les plus raffinés, un rôle fondamental est joué par des considérations strictement algébriques sur la fameuse opération Minimax, clé de voûte de tout l'édifice (Minimax parce que Pierre cherche à rendre minimum sa perte que Paul s'efforce, au contraire, d'accroître au maximum).

Dans l'autre partie de la théorie, dont le développement est plus récent, on s'efforce au contraire de ramener au schéma idéalement simple précédent des jeux ou des situations de jeux données: on a pu ainsi par exemple faire apparaître la notion de bluff comme un rouage normal de la stratégie du joueur pour des formes de Poker simplifiées à l'extrême. N'y a-t-il pas là une réponse étonnante à ce qu'il voulait interdire aux algébristes que lever les yeux plus haut que la matière inanimée puisque cet élément, proprement psychologique croirait-on, vient obéir aux règles à calcul.

Enfin, dans le cas le plus simple, celui des jeux de réflexion, comme le jeu d'échecs ou de dames, dont le hasard est exclu, l'algèbre a permis de donner une formulation définitive à la recherche des stratégies gagnantes: idéalement on sait ramener tout jeu possible à certaines combinaisons d'un jeu très simple et bien connu, le jeu de Nim (ou Fan Tan). Aussi, le problème étant résolu à l'exception de ce simple détail — que les calculs restent à faire — les algébristes tendent à se tourner vers les questions plus stimulantes: dans quelle mesure peut-on déduire de la stratégie d'un jeu celle du jeu de « Qui perd gagne » qui y correspond? Comment peut-on multiplier ou additionner entre eux des jeux? Et enfin la question décisive: peut-on déterminer d'après les règles si un jeu se terminera ou non en un temps fini?

En ce qui concerne leur propre puzzle, les mathématiciens pensent que la réponse est négative.

Année 0

0-11. Des divertissements et des jeux

F. LE LIONNAIS
28 route de la Reine
Boulogne s/ Seine
Tél. MOLitor 90.13
CCP. 5098.09 Paris

R.F.F. Franco III

Mise au point : 5 fév 1958
Enregistrement : V 21 fév 1958
Émission : J 6 mars 1958

*Tout à fait enthousiasmé
Non un diable de MS/Martinet
On mettra cela au verso*

DES DIVERTISSEMENTS ET DES JEUX

AUX CONFLITS DE LA GUERRE ET DE LA DIPLOMATIE

Une émission de F. Le Lionnaïis

avec :

P.M. SCHUTZENBERGER, Maître de Conférences à la Faculté
Poitiers,
et Claude BERGE, Maître de Recherches au C.N.R.S.

*Cher ami
Voilà le bento définitif.
J'en laisse quelques blancs (qui
sont roses) pour vous permettre
d'ajouter des mots-clés, chiffres,
dates, et... de plus
et ce sera excellent car
vous éviterez de courtes
interruptions dans les passages
de C. Berge.
Attention, sur la demande du
précédent, le rendu vous est
rapporté, le même jour, et
vendredi prochain à 10h25,
Studio 53 on 53bi, Rodeo à droite.
Centre Bourdan, 5 Ar-Rockem Kené
Mrs Randelagh.
Merci et à bientôt*

A. INTRODUCTION

F. Le Lionnaïis - Résumé : Notre époque a vu naître, sinon de nouvelles sciences, du moins des chapitres importants et originaux de la Science. L'une d'elles est appelée, d'un nom qui peut prêter, et qui prête à bien des confusions : "La Théorie des Jeux Stratégiques". Cette dénomination recouvre, en fait, une foule d'activités humaines bien différentes dans leurs contenus, et dont les jeux proprement dits font d'ailleurs partie généralement. Rien de plus amusant que les exemples que l'on peut donner de ces "Jeux Stratégiques". Leur théorie est par contre abstraite, difficile et relève des mathématiques pures. Nous n'avons pas ici la prétention d'esquisser cette théorie, mais de vous décrire quelques exemples et d'essayer de dégager quelques notions et manières de penser nouvelles. Présentation des participants : M. M. Schützenberger = Spécialiste de la Théorie de l'Information ; C. Berge = Professeur associé de l'Université de Princeton, Auteur, etc..

B. QUELQUES EXEMPLES DÉTAILLÉS

F. Le Lionnaïis - S'adresse à Schützenberger pour lui demander de choisir lui-même le premier exemple.

1°) La bataille de l'Archipel de Bismarck

P.M. Schützenberger - Février 1943. Les japonais installés au Nord de la Nouvelle Guinée, les Américains au Sud. Deux routes pour un convoi japonais partant de Rabaul (en Nouvelle Bretagne) : au Nord de l'île ou au Sud. Les américains ne pouvaient bien surveiller par aviation que l'une des deux routes. Visibilité médiocre au Nord de la Nouvelle Bretagne, bonne au Sud. Que faire ! Situation typique de jeu. Discutée par Haywood. La stratégie de l'État major américain est basée sur les possibilités de l'ennemi et, exceptionnellement seulement, sur ses intentions. Ce n'est pas le style napoléonien.

- 2 -

F. Le Lionnais - Vous avez prononcé le mot "stratégie", familier aux militaires. Est-ce dans le même sens que l'emploient les mathématiciens dans la Théorie des Jeux Stratégiques ?

P. M. Schutzenberger ou C. Berge -

2) Chi-Fou-Mi

F. Le Lionnais - Aimerais qu'on lui cite un jeu d'enfants. Et d'abord le décrire avant de l'analyser.

C. Berge - Propose Chi-Fou-Mi.

F. Le Lionnais - Signification de ces termes

C. Berge - Aucune, comme Am-stram-gram ; vague imitation du chinois. Ceci dit le jeu se joue à deux. Chacun cache une main derrière son dos et les adversaires, à un signal donné, sortent leurs mains au même moment. Chacun présente sa main de manière à symboliser, soit la pierre (poing fermé), soit le ciseau (2 doigts tendus), soit le papier (main à plat). Les adversaires faisant leurs gestes au même moment, on compare les gestes. La pierre casse le ciseau, le ciseau coupe le papier, le papier enveloppe la pierre. Celui qui a le dessus compte un point.

F. Le Lionnais - Après la description, un peu d'analyse.

C. Berge - Jeu intéressant du point de vue théorique, car il permet de dégager une ligne de conduite. La théorie recommande...

P. M. Schutzenberger - C'est ce que l'on appelle une stratégie optimale. Ce n'est pas la même stratégie que précédemment.

Edgar Poe, dans une de ses nouvelles policières, discute le cas d'un petit garçon qui gagnait toujours à pair ou impair, parce qu'il avait l'intuition exacte du degré d'analyse de la situation qu'était capable d'accomplir son adversaire. Il n'aurait jamais gagné contre un joueur qui aurait choisi pair ou impair au hasard. Mais il est difficile d'imiter le hasard sans recourir à un véritable tirage au sort mental. Ainsi chacun de nous a une idée si rudimentaire de ce que "doit" être une suite au hasard, qu'une machine assez élémentaire est capable de faire, après très peu d'essais, une analyse des régularités statistiques que nous mettons quand nous voulons fabriquer du désordre et - en conséquence - de gagner régulièrement à "pair" et "impair" contre les esprits les plus fins.

C. Berge - Placer une ou deux interventions.

3) Sherlock Holmes contre Moriarty

F. Le Lionnais - Nous pourrions peut-être étudier un troisième exemple.

C. Berge - Le cas, imaginaire c'est vrai, mais très instructif, de la lutte qui oppose deux des héros de Conan Doyle : Sherlock Holmes et le Dr Moriarty. Moriarty veut tuer Sherlock Holmes. Sherlock Holmes cherche à lui échapper en fuyant d'Angleterre et en se réfugiant sur le Continent. Deux stratégies pour Sherlock Holmes. Ou bien aller, sans s'arrêter, jusqu'à Douvres et y prendre le bateau (il sera définitivement sauvé si Moriarty n'est pas là. Ou bien descendre à mi-chemin, à Canterbury, pour dérouter Moriarty, mais où la poursuite risque de reprendre. De même deux stratégies pour Moriarty.

F. Le Lionnais - Quelle stratégie a choisie Moriarty ?

C. Berge - Réponse. Minimax. Signification de ce terme.

F. Le Lionnais - Quelle stratégie a choisie Sherlock Holmes ?

C. Berge - Réponse. Il a cherché à prévoir la décision de Moriarty. Mais il était possible de faire mieux.

F. Le Lionnais - Comment aurait-il procédé s'il avait connu des jeux ? Et pourquoi la théorie des jeux lui apporterait-elle quelque chose de meilleur que ce qu'il a fait ?

C. Berge - Réponse.

C. LISTE D'EXEMPLES AUSSI VARIEE QUE POSSIBLE

F. Le Lionnais - Les exemples qui précèdent appartiennent tous à une même catégorie que l'on appelle les "jeux à 2 joueurs et simultanés". Il existe aussi des "jeux à 2 joueurs, mais à étapes". Et aussi des jeux à plus de 2 joueurs, qui autorisent des coalitions. C'est de beaucoup le cas le plus difficile. Voici, peul-mêle, une liste d'exemples:

C. Berge - Le jeu de dames et le jeu d'Échecs
remarque : à information complète.

P.M. Schützenberger - Les jeux de carte

Remarque 1 : à information incomplète

Remarque 2 : certains à coalition, certains sans.

Remarque 3 : Le bridge. En réalité, c'est un jeu à deux. Le camp Est-Ouest ne constitue qu'un seul joueur, mais à personnalité schizophrénique. Ce peut être le cas de deux tronçons d'une même armée, qui tirent l'une sur l'autre. Le brave soldat Chveik

- 4 -

Remarque 4 : Le poker, pose le problème du bluff. Nous y reviendrons.

Remarque 5 : Le baccarat. Tirer ou ne pas tirer ? Nombreux traités consacrés à cette question. La réponse tient en 2 lignes.

P.M. Schutzenberger - Les duels à l'arme blanche

Au sabre, les coups peuvent être "courts" ou longs" et il importe de deviner ce que fera l'adversaire. Au fleuret, au contraire, les mouvements s'enchaînent de façon rigoureuse (plus facile à mécaniser). Le sabre est donc plus stratégique que l'épée.

F. Le Lionnais - rappelle que ce terme de "duel" sert maintenant à désigner, en Théorie des jeux stratégiques, les jeux à deux joueurs.

P.M. Schutzenberger - Les jeux sportifs : Le football
le tennis

F. Le Lionnais - Le flirt

Remarque :

P.M. Schutzenberger - Les raids d'avion et la défense contre ces raids

Remarque 1 :

Remarque 2 : Les duels d'avion nous ramènent à des cas analogues aux duels à l'arme blanche et au jeu de pair et impair.

F. Le Lionnais - Les jeux contre la Nature

Dans tous les exemples précédents, les adversaires étaient des hommes. Mais la Théorie des Jeux Stratégiques considère également des jeux dans lesquels l'un au moins des adversaires n'est pas un homme, mais est la Nature.

C. Berge - Effectivement. Et bien entendu, ne pas interpréter en termes anthropomorphiques. Cela veut dire...

Cela étant, il est légitime, pour l'homme, de guider son action, dans certaines circonstances, comme s'il s'agissait d'un jeu contre la Nature.

P.M. Schutzenberger -

1) Les enquêtes d'opinion

L'attitude du statisticien moderne est le pessimisme raisonné. Il s'attend au pire de la part du hasard et se préamunit au mieux contre celui-ci.

2) Les échantillonnages

Et en somme toute la statistique est un jeu stratégique.

- 5 -

C. Bergé - 3) Blé ou Maïs ?

Un cultivateur doit-il cultiver du maïs ou du blé sachant qu'une année chaude et humide est bonne pour le maïs, qu'une année froide et sèche est bonne pour le blé, que le blé rapporte plus que le maïs, qu'il n'est pas bon de mettre tous ses œufs dans le même panier, etc.. Il faut une "stratégie mixte".

Les jeux économiques

F. Le Lionnais - transition.

C. Berge - 1) Les luttes de concurrence

Producteurs en rivalité pour la conquête d'un marché. Problèmes de coalition. Mécanisme des prix.

2) Autres jeux économiques

C/.Berge - L'importation du manganèse aux Etats-Unis (l'Inde producteur, Nasser sur le passage). Travail de C. Berge aux U.S.A.

C. Berge - Les coalitions électorales

Remarque :

F. Le Lionnais - La roulette et autres jeux de pur hasard = pas stratégiques, pas de secret pour gagner.

F. Le Lionnais - Vous trouverez un certain nombre d'autres exemples humoristiques dans un livre de l'auteur américain Williams, dont la traduction vient de paraître en français. Impossible de vous expliquer ces exemples, il y en a trop, en fait il y en a 35. Citons quelques titres : les Campeurs, Cache-Cache, L'anniversaire (on peut le raconter), l'Héritage, Le rendez-vous, La voiture d'occasion, le Conseil d'Administration, Le colonel Blotto, Le labyrinthe, La dame ou le tigre, le régime alimentaire. Encore une fois, derrière cette affabulation humoristique se cache une théorie assez difficile que nous ne ferons pas. Mais quelques mots d'histoire seront les bienvenus.

D. UN PEU D'HISTOIRE

C. Berge - Quelques mots d'histoire, en citant, par exemple, Borel (intervention Schützenberger), Von Neumann (anecdotes), Morgenstern, etc..

Les développements récents. F.I.L. citera ouvrage de C.B.

E. QUELQUES REFLEXIONS FINALES

F. Le Lionnais - Est-ce qu'on peut proposer des réflexions sur tout cela ?

P.M. Schützenberger - Oui, par exemple :

1) Von Neumann : un type d'homme nouveau. A la fois grand savant et homme d'affaires.

C. Berge - 2) Des mathématiques nouvelles. Et qui ont fait avancer les math. en général.

P.M. Schützenberger -

3) Le bluff, tenu jusqu'ici, par les psychologues et par le commun des mortels, comme affaire de pure psychologie, est analysable mathématiquement et mécanisable. Une machine peut jouer contre un homme à un jeu de bluff et bluffer mieux que lui.

C. Berge - 4) La Théorie des jeux stratégiques a également attiré l'attention sur l'étude psychologique des préférences. L'utilité d'un gain évalué en une somme d'argent n'est pas proportionnelle au gain lui-même si l'individu n'est pas objectif. On a étudié de très près comment varie l'utilité en fonction des différentes attitudes : celle de l'homme riche, celle de l'homme pauvre, celle du joueur de tempérament hardi, celle du joueur timoré, celle du Monsieur auquel il manque 100 f pour prendre son billet de train, etc..

P.M. Schützenberger - Dans quelle mesure les individus concrets obéissent à la Théorie : il se trouve qu'ils le font à la fois bien et mal : il semble que la machine humaine sache mieux analyser une situation stratégique complexe de façon approchée qu'une machine. Par contre le concept de hasard objectif semble dérouter aussi bien l'homme que l'animal : si l'on explique au sujet (homme ou rat) qu'il a en face de lui un dispositif aléatoire constant dont il doit matcher les réponses, et si ce dispositif allume la lampe rouge avec une fréquence de 80 %, le sujet perçoit très vite (et inconsciemment ce chiffre et s'h adapte (stratégie qui serait optimale s'il s'agissait effectivement d'un adversaire et non d'une machine) une très forte proportion des sujets, même après plusieurs centaines de coups, ne se décide pas à choisir toujours le rouge, ce qui serait, dans les circonstances données, la meilleure chose à faire.

F. CONCLUSIONS

F. Le Lionnais - approuve la Théorie des Jeux Stratégiques.

J. Le Lionnais
23, Rte de la Reine (Res-de-chaussée)
Boulogne s/Seine
tél. MOLitor 90-13
C.C.P. 50 98-09 Paris

Mise au point : J. 16 Avril 1959
Enregistrement: V. 24 Avril 1959
à 15h 30 chez F.L.L.
Diffusion : J. 14 Mai 1959
à 19h 15 - Durée : 35 minutes.

R. T. F. France III

LA NOTION D'INFORMATION EN CYBERNETIQUE.

ou : tout autre titre que vous voudrez bien me suggérer.

Une émission de F. Le Lionnais

avec :

F.H. RAYMOND, Directeur de la S.E.A.
(Est-ce que j'indique un autre titre ?)

et Marcel Paul SCHUTZENBERGER, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Poitiers.

(A) INTRODUCTION

I. F. Le Lionnais : Jusqu'à il y a quelques années la notion d'information ne relevait que du sens commun. Les journalistes, les policiers, cherchaient des informations. De nos jours, une nouvelle notion a vu le jour. Elle n'est pas sans rapports avec la notion courante, mais a un caractère scientifique et a donné lieu à une théorie mathématique. Nous l'avons d'ailleurs rencontré dans divers entretiens précédents que nous avons consacrés aux machines à calculer électroniques, aux jeux stratégiques, à la recherche opérationnelle, etc...

L'entretien d'aujourd'hui : une vue panoramique de la Théorie de l'Information. Présentation des deux participants. Je les remercie, et je leur passe la parole.

II. M.P. Schützenberger : Cette mutation de sens pour l'Information est analogue à ce qui est arrivé pour l'Energie. Sens vague et Sens technique.

3. F.H. Raymond : C'est que nous avons maintenant des machines dans lesquelles la vedette n'est pas l'Energie, mais l'Information, notamment les machines à calculer électroniques et aussi, de façon moins évidente, l'automatique industrielle.

(B) L'INFORMATION SELECTIVE : THEORIE.

4. F. Le Lionnais : Nous y reviendrons dans quelques instants. Mais pour le moment, quelques mots d'histoire et de théorie. Et pour commencer, une définition.

5. M.P. Schützenberger : Réponse.

...../.....

6. F.H. Raymond : Eventuellement une précision à cette définition. Ou, peut être dire qu'il s'agit là du type d'Information le plus classique : l'Information dite Sélective.
7. F.Le Lionnais : Demande des exemples concrets (et éventuellement amusants).
8. F.H. Raymond : Exemple : Information quantifiée : Feux de circulation, Télégraphe.
9. M.P. Schützenberger: Exemple : Télégraphe = Code (du langage).
10. F.Le Lionnais : Quelques mots sur l'histoire de la théorie sont toujours les bienvenus dans cette série d'émission.
11. M.P.Schützenberger : Origines Shannon, Evolution du concept.
12. F.H. Raymond : Introduction explicite dans les machines (Aspect historique-Bref).
13. M.P. Schützenberger: C'est une histoire qui continue, car théorie très vivante, et en plein développement. Nombreux livres, articles, travaux, congrès, etc...
14. F.Le Lionnais : Et notamment le prochain congrès au mois de Juin, sous les auspices de l'UNSSGO.
Nous n'aurons pas la présomption de faire ici la théorie de l'Information. Mais d'évoquer quelques aspects qui pourront éclairer nos auditeurs. Quelles sont les idées-forces selon-vous ?
15. F.H. Raymond : Eléments d'un langage - codage
16. M.P. Schützenberger : Structure du langage - codage - information.
17. M.P. Schützenberger : Redondance.
18. F.H. Raymond : Bruit.
19. F.Le Lionnais : On peut mesurer. Comment ?
20. F.H. Raymond : Mesure élémentaire (Caractéristiques).
21. M.P. Schützenberger : Mesure : Notion Générale.
22. F.Le Lionnais : Autre aspect, important en liaison avec la mesure de l'information sélective, quoique l'on ait souvent dit des choses assez douteuses à ce sujet : Equivalence avec Entropie négative. Nous ne définirons pas ici l'Entropie - ce sera peut-être le thème d'un autre entretien. Supposons connue cette notion. Pourriez-vous en dire un mot ?
23. F.H. Raymond : Réponse : Information et Energie.

(B.2.) L'INFORMATION SELECTIVE : APPLICATIONS

24. F.Le Lionnais : De même que nous n'avons pu qu'effleurer la Théorie de l'Information, nous allons nous contenter de survoler à tire d'ailes ses applications. Il ne s'agit que de quelques indications. Au surplus nous

avons déjà rencontré certaines de ses applications dans des entretiens précédents et nous les retrouverons certainement souvent par la suite. Par quoi allons-nous commencer ?

25. M.P. Schützenberger : Si vous le voulez bien par les applications aux Sciences de la vie.
Génétique :

Neurophysiologie et psychophysiologie :

(F.H.R. a l'intention de placer une ou deux interventions).

26. F.Le Lionnais : Il y a aussi les Sciences Humaines :

27. M.P. Schützenberger : Effectivement :

Linguistique

28. F.Le Lionnais : Et aussi Jeux Stratégiques (rappel de notre entretien avec vous-même et Claude Berge. Et aussi Théorie de la Décision et Recherche Opérationnelle (Entretiens avec Lesourne et Ventura).

29. F.H. Raymond : Nous glissons vers les techniques. N'oublions pas que la Théorie de l'Information est née dans les milieux de téléphonistes (Shannon) et qu'elle s'est formée à propos de problèmes de télécommunication.

Quelques exemples :

Compression des signaux : télévision, voix parlée, câbles transatlantiques.

(M.P.S. a l'intention de placer quelques interventions).

30. M.P. Schützenberger : Codes correcteurs d'erreurs dans un satellite soviétique.

31. F.Le Lionnais : Enfin il y a les machines à calculer électroniques. Quoique nous leur ayons consacré déjà un entretien (avec J.Maisonrouge et Ph.Dreyfus), il vaut la peine de caractériser le rôle de la théorie de l'information dans ce domaine.

32. F.H. Raymond : Réponse : Notions d'opérateur; de mémoire.

(C) AUTRES TYPES D'INFORMATIONS.

33. F.Le Lionnais : Tout cela c'est l'information sélective. Nous savons que sa théorie entretient des rapports étroits avec la statistique. Vous paraît-il possible de nous en donner une idée ?

34. M.P. Schützenberger : S'exécute.

35. F.Le Lionnais : L'information sélective n'est pas la seule que l'on puisse mesurer, qui soit *mathématiquement*. Quoique moins connues encore du grand public que l'Information de Shannon, il y a des théories très intéressantes dues à Fischer et à Wald.

36. M.P. Schützenberger : I de Fischer et I de Wald.

(F.R.R. se réserve éventuellement une intervention).

37. F. Le Liennais : A côté de ces informations que l'on sait mesurer et qui ont acquis, de ce fait droit de cité dans les Sciences, des Spécialistes, des Sciences humaines ont proposé d'autres notions d'Informations qui se rapprochent mieux des réalités qu'ils étudient, mais qui malheureusement ne se prêtent guère à des raisonnements rationnels et des calculs.

Informations sémantiques.

Informations personnelles.

38. F.H. Raymond : Les machines ne pensent pas.

39. M.P. Schützenberger : Un grain de sel s'il le désire.

(D) CONCLUSIONS.

40. F. Le Liennais : Après ce trop rapide tour d'horizon, pouvez-vous me proposer sinon une conclusion, du moins une remarque finale ?

41. M.P. Schützenberger : L'Information est une matière que l'on gaspille beaucoup. Gachis de la paperasserie. Trop de redondance.

42. F.H. Raymond : Et pas seulement les hommes et leurs administrations, mais aussi la nature.

43. F. Le Liennais : Termine en disant le plus grand bien de l'Information.

TITRES
ET
TRAVAUX SCIENTIFIQUES

de

MARCEL-PAUL SCHÜTZENBERGER

Né à PARIS le 24 Octobre 1920

TITRES UNIVERSITAIRES

Certificat d'études physiques, chimiques et biologiques

Ecole de Médecine -Tours-Juin 1939

Certificat d'études supérieures de calcul différentiel

Faculté des Sciences-Poitiers-Juillet 1941

Certificat d'études supérieures de calcul des probabilités (option statistique)

Faculté des Sciences -Paris-Juillet 1941

Certificat d'études supérieures de mécanique rationnelle

Faculté des Sciences -Paris-Juin 1948

Doctorat en Médecine (Etat) "Contribution à l'étude statistique du sexe à la naissance"

Faculté de Médecine -Paris-Juin 1948

Certificat d'études supérieures de mathématiques générales

Faculté des Sciences -Paris-Octobre 1948

Doctorat es-Sciences mathématiques -"Contribution aux applications de la théorie de l'information"

Faculté des Sciences-Paris-Juin 1953

Inscription sur la liste d'aptitude à l'Enseignement Supérieur

Novembre 1953

F O N C T I O N S

Externe des Hôpitaux de Tours (Indre et Loire) 1939-1941

Interne à l'Hôpital psychiatrique de Blois (Loir et Cher) 1941-1943

Interne à l'Hôpital psychiatrique d'Yzeure (Allier) 1943-1944

Conseiller Technique au Ministère de l'Air-1945-1947

Attaché de recherches à l'Institut National d'Hygiène-1948-1950

Attaché de consultation au Centre de génétique de l'Hôpital
St.Louis -Paris-1948-1954

Chargé de recherches à l'Institut National d'Hygiène 1950-1953

Biostatisticien consultant à l'Organisation Mondiale de la Santé
1951-1952 et 1953-1954

Attaché de recherches au Centre National de la Recherche Scientifique 1954

Chargé de recherches au Centre National de la Recherche Scientifique 1955

Research Associate au Massachusetts Institute of Technology 1956

ENSEIGNEMENTS UNIVERSITAIRES

Cours annexe de statistique mathématique
rattaché aux chaires de biologie de la Faculté des Sciences
Poitiers 1950-1951

Cours annexe de mathématiques appliquées à la biologie
rattaché aux chaires de biologie de la Faculté des Sciences
Poitiers: 1952-1953, 1954-1955, 1955-1956

Cours de statistique mathématique
à l'intention des chercheurs du fonds d'étude de la Société Médicale
des Hôpitaux de Paris, rattaché à la chaire de thérapeutique de la
Faculté de Médecine
Paris 1952-1953

Cours de statistique mathématique
rattaché à la chaire de physiologie de la Faculté de Médecine
Nancy 1954-1955

Cours de statistique et probabilités
dans le cycle de l'enseignement technique préparatoire à la recherche,
organisé par le Centre National de la Recherche Scientifique à la
Faculté des Sciences
Paris 1955-1956

TITRES HONORIFIQUES

Lauréat de l'Académie Nationale de Médecine
Prix du Baron LARREY - 1949

Lauréat du Fonds d'Etude
de la
Société Médicale des Hôpitaux de Paris
de 1948 à 1953

o
o o

TITRES MILITAIRES

Agent P₁ du Réseau "Turma Vengeance"
durant l'occupation allemande

SOCIÉTÉS SAVANTES

Société mathématique de France	1946
Société de statistique de Paris	1947
International Biometric Society	1948
Institut international de statistique	1955
American Mathematical Society	1956
Société française de recherche opérationnelle	1956
Association internationale de cybernétique	1957

FORMATION SCIENTIFIQUE

et

ORIENTATION GENERALE DES RECHERCHES

On a souvent commenté les relations existant entre les différentes sciences de la nature et les branches de la mathématique qui leur sont plus spécialement associées. Pendant que le mathématicien "pur" s'efforce d'unifier les concepts et de dégager les principes généraux, le mathématicien "appliqué" que guide une intuition plus concrète, lui fournit comme une matière brute ou semi-ouvrée de nouveaux problèmes et de nouvelles techniques de solution. En même temps il emprunte au premier ses résultats abstraits pour les spécialiser et les approfondir.

L'exemple le plus connu de ce mouvement d'échange est sans doute celui qu'offre le calcul des probabilités. Des énoncés aussi élégants et aussi profonds que ceux qui s'ordonnent autour du théorème limite de la loi de LAPLACE GAUSS ne seraient vraisemblablement pas nés de la seule méditation sur les fonctions de variable réelle à variation bornée. A l'inverse bien peu des applications — même industrielles — des probabilités sont indépendantes des notions

analytiques complexes qu'introduit la transformation de FOURIER.

Il va sans dire que cette opposition qui est en même temps un enrichissement mutuel entre mathématiques "pures" et mathématiques "appliquées" ne se définit que de façon relative en partie historiquement contingente. Nous voudrions néanmoins en souligner ici l'importance puisqu'il faut un préambule pro domo à l'exposé d'une vocation qui nous a fait alternativement poursuivre des recherches aux deux extrêmes d'un arc sous tendu par la statistique mathématique, entre expérimentation biologique et algèbre abstraite.

Malgré des temps qui incitaient plus souvent à des activités clandestines qu'à des études académiques, j'avais en 1944 achevé pour l'essentiel mes études médicales et mathématiques élémentaires: certificat de calcul différentiel et intégral à Poitiers avec M. le Professeur Th.GOT, de probabilité à Paris avec M. le Professeur M.FRECHET, études d'algèbres abstraites avec M. le Professeur A.CHATELET mon premier Maître, qui m'initia à la théorie des treillis bien peu connus encore en France à l'époque.

Une conjonction de raisons d'ordres divers me contraignit à abandonner provisoirement ces travaux pour établir et diriger une section statistique au Ministère de l'Air auprès du service de sélection et d'orientation psychométrique que j'avais contribué à fonder. Qu'il suffise ici de dire que pendant les années suivantes j'appliquais ces "mathématiques de la psychologie" suivant le mot du Professeur G.DARMOIS sous leur forme la plus pratique: les machines à calculer étaient encore rares, la main-d'oeuvre, féminine et militaire à la fois, était arithmétiquement analphabète. J'y gagnais l'expérience de la statistique appliquée à des problèmes variés et appris à remplacer dans la mesure du possible les longs calculs par des méthodes expéditives souvent aussi efficaces quand le problème est correctement posé.

Dès 1947 commença une collaboration bien modeste pour ma part avec mon Maître et ami le Professeur P.GAVAUDAN que passionnait les rapports entre la thermodynamique et les problèmes fondamentaux de la narcose et de l'excitation cellulaire.

Depuis cette époque je fus conduit à donner des conseils de statistique dans divers domaines, en particulier en génétique des mammifères.

En mesure, enfin, d'achever formellement mes études médicales, je soutins en 1948 une thèse de Doctorat en Médecine intitulée "contribution à l'étude statistique du sexe à la naissance" dans laquelle j'envisageais le problème de la corrélation entre le sexe des enfants successifs dans les familles nombreuses. Pour ce travail, l'Académie Nationale de Médecine me décerna en 1949 le Prix du Baron LARREY.

En 1949, je fus tout à la fois nommé attaché de recherches à l'Institut National d'Hygiène (chargé de recherches en 1950) et assistant de consultation au Centre de génétique de l'Hôpital St.LOUIS à Paris où je travaillais déjà sous la direction de son chef le Professeur Raymond TURPIN. Celui-ci convaincu de l'importance et de l'avenir de l'application à la biologie des règles et méthodes de la statistique mathématique avait inspiré ma thèse dont il avait présidé la soutenance; m'avait incité à poursuivre les recherches déjà amorcées et associé à ses travaux de génétique humaine. Il me confia le soin de diriger les thèses de Doctorat en Médecine de Madame DEROCHE, Madame PRONQUELEVINET, et M.LEJEUNE, consacrées notamment au sexe des jumeaux et à l'intervalle séparant la naissance. Dès 1948 et pendant quelques années j'eus l'honneur d'être Lauréat du fonds d'études de la Société Médicale des Hôpitaux de Paris.

En 1950 le Professeur R.TURPIN me chargea dans le cadre de sa chaire de thérapeutique de la Faculté de Médecine de Paris de donner une série de cours de statistique mathématique particulièrement destinés aux chercheurs de fonds d'études de la Société Médicale des Hôpitaux de Paris, et en 1954 le Doyen Jacques PARISOT accueillit avec faveur la proposition du Professeur FRANCK de me confier semblable enseignement dans le cadre de la chaire de physiologie de la Faculté de Médecine de Nancy.

Enfin depuis 1950 et pendant quelques années le Professeur P.GAUDAUDAN me demanda d'assurer une heure annuelle de statistique mathématique appliquée à la biologie à l'intention des étudiants en sciences naturelles de la Faculté des Sciences de Poitiers.

En 1951 l'Organisation Mondiale de la Santé me chargea d'une mission en Asie du Sud Est. Il s'agissait essentiellement de mettre en ordre et d'extraire le maximum d'information des documents accumulés par plusieurs projets d'Hygiène publique dirigés par les Nations Unies: lutte contre le pian en Indonésie et Thaïlande, campagne antivénéérienne en Birmanie.

J'y retrouvais à une autre échelle des problèmes analogues à ceux du Ministère de l'Air et exigeant comme eux la combinaison de patience administrative avec l'emploi de techniques statistiques mathématiques compliquées pour remplacer les opérations élémentaires trop longues.

Depuis la parution de l'ouvrage de C.SHANNON en 1944, la théorie de l'information m'avait vivement intéressé comme offrant un nouveau type de problèmes en calcul des probabilités. J'avais obtenu divers résultats nouveaux sur ce sujet en y appliquant des méthodes algébriques et en comparant certains énoncés à d'autres relevant de la statistique mathématique.

10

De retour en France en 1952 je coordonnais ces recherches et aidé par les encouragements et les conseils du Professeur G.DARMOIS je soutins en 1953 une thèse de Doctorat es-Sciences mathématique intitulée : "Contribution aux applications statistiques de la théorie de l'information!

Rappelé dès l'automne par l'Organisation Mondiale de la Santé je passais l'année 1953-1954 en Indonésie, comme biostatisticien consultant et y organisais, je crois, la première enquête démographique par sondage de la population du centre de Java.

Admis en 1954 au Centre National de la Recherche Scientifique, je pus enfin consacrer la totalité de mon temps à la recherche mathématique.

A la demande du Professeur G.DARMOIS et dans le cadre de la chaire de probabilités j'organisais en 1954 avec B.MANDELPROT un séminaire sur la théorie de l'information et en 1955 avec C.BERGE un séminaire consacré aux méthodes algébriques de la cybernétique.

En 1956, le Massachussets Institute of Technology m'invita à séjourner comme "associé de recherches " à Cambridge.

EXPOSE DES TRAVAUX

Pour la clarté de l'exposition, je diviserai ceux ci en trois parties:

- I°) TRAVAUX MATHEMATIQUES
- II°) APPLICATIONS
- III°) TRAVAUX D'EXPOSITION ET DIVERS.

En outre pour la première partie, je mettrai à part (page 19) un ensemble de recherches en cours depuis déjà quelques années et dont la publication est encore fragmentaire; leur exposé constitue en même temps un programme de recherche.

I°) TRAVAUX MATHEMATIQUES

1°)- ALGEBRE

Mes premiers travaux, sous la direction du Professeur A. CHATELET, ont porté sur les treillis ou "structures" selon la terminologie de O.ORE. Parmi eux une classe spécialement importante -puisqu'elle contient en particulier les géométries projectives et les idéaux d'un anneau- est celle des

treillis modulaires et, plutôt que d'entrer dans le détail des publications, je résumerai ici l'essentiel d'un travail récent (82, 84) qui complète de nombreuses notes antérieures (1, 2, 3, 8, 24).

Comme il est classique, étant donnée une forme bilinéaire $f(x, y)$ hermitienne sur un espace vectoriel V , il existe une correspondance biunivoque entre certains sous espaces: V_1 et V_2 , (V_1 et V_2 sont "conjugués" ou "orthogonaux") si

$$1^\circ) \quad f(x, y) = 0 \text{ pour tout } x \text{ dans } V_1 \text{ et } y \text{ dans } V_2$$

$$2^\circ) \quad V_1 \text{ et } V_2 \text{ sont, l'un par rapport à l'autre maximum}$$

avec cette propriété.

Le problème que je me suis posé, selon une indication de G. BIRKHOFF dans son ouvrage "Lattice Theory" est de réaliser la construction inverse:

Partant d'un ensemble abstrait V , se donner une relation ϕ adéquate entre éléments de V de telle sorte que V devienne équivalent à un espace vectoriel et que l'on en puisse déduire les propriétés les plus importantes sans faire appel à celles du corps de base.

J'ai réussi à montrer que cette construction est possible si l'on postule seulement que ϕ a les propriétés suivantes:

$$1^\circ) \quad \phi \text{ est symétrique}$$

$$2^\circ) \quad \text{si } x \phi y \text{ (et } x \neq y) \text{ il existe pour tout } z \text{ dans } V$$

un et un seul t tel que d'une part $z \phi t$, d'autre part l'ensemble des conjugués de t contient tous les autres vecteurs conjugués à la fois à x et à y .

Concrètement ceci revient à exiger que x et y étant deux vecteurs conjugués, le plan $x + y$ soit coupé en un vecteur t par l'espace conjugué de z .

Je souligne le mot conjugué parce que cette restriction —si elle complique singulièrement les démonstrations— permet d'inclure dans la définition des

objets plus généraux que les espaces vectoriels classiques: Ainsi l'ensemble formé par les seuls éléments auto conjugués (tels que $f(x, x) = 0$) d'un espace vectoriel rentre dans la définition.

Le résultat le plus frappant de la théorie est que, ces seuls éléments autoconjugués étant donnés, il est possible de reconstruire tout l'espace à partir d'eux. Ceci évidemment moyennant des hypothèses d'un caractère inévitable sur les dimensions du système considéré.

Un autre aspect intéressant est que ces structures tout comme les espaces classiques ne sont des treillis modulaires que si leur dimension est finie.

Je mentionne encore parmi les publications consacrées aux treillis et d'un caractère purement algébrique:

(61) qui donne la solution (et la généralisation) du problème 29 de G. BIRKHOFF.

(80) dans lequel on fournit sous une forme explicite des conditions nécessaires et suffisantes pour qu'un treillis modulaire soit tel que toute géométrie projective en soit une image homomorphe.

(3) qui formule pour la première fois une identité de nature strictement algébrique caractérisant les treillis de géométrie projective arguesienne.

D'autres publications relatives aux treillis seront évoquées plus loin.

2°)- CALCUL DES PROBABILITES ET STATISTIQUE

La liste des travaux donnés en annexe contient les titres de publications diverses consacrées à des problèmes de statistique mathématiques plus ou moins inspirés par des recherches appliquées: (7) (14) (17) (18) (59). Je mets à part (88) qui résulte de ma collaboration avec C. BERGE lors du séminaire sur les "méthodes de la cybernétique" que M. le Professeur G. DARMOIS

nous avait demandé d'organiser, en 1955-1956. Depuis cette note, nous avons sensiblement développé la question et un article d'ensemble sur certains aspects de la théorie extensive des jeux et leur application au problème des "solutions" (au sens de Von NEUMANN) des jeux de coalition est en cours de rédaction.

Je voudrais souligner plus particulièrement les travaux (32) et (52) qui établissent curieusement un lien entre les études précédentes sur les géométries prospectives et la théorie du codage dont on parlera plus loin.

Les "block designs" introduits par R.YALE et R.A.FISHER en statistique sont comme l'on sait des schémas expérimentaux dont les propriétés combinatoires sont telles, qu'une régularité préside au choix des essais, que des comparaisons valables puissent être établies sans que l'on ait à soumettre toutes les variantes d'une série d'objets à toutes les variantes d'une série d'expériences.

Etant donnés les nombres de variantes, diverses conditions diophantiennes assez immédiates limitent les schémas possibles et le problème de construire ceux-ci est —comme l'on voit— du même ordre que les problèmes célèbres "des rondes d'enfants", des triples de STEINER, ou des géométries finies non arguesiennes.

Par une méthode très simple j'ai réussi (32) à formuler la première condition non triviale connue qui permette de prédire la non-existence d'une infinité de tels schémas qui par ailleurs étaient à priori possibles.

Dans un autre travail (52) j'ai à l'inverse, indiqué une méthode de construction pour une nouvelle série infinie de semblables schémas qui se rattachent étroitement à certaines "matrices d'HADAMARD".

Enfin (72) j'ai signalé et étudié l'application possible des blocks designs aux problèmes de communication dont il va être traité maintenant.

3°)- THEORIE DE L'INFORMATION

Depuis que les fondements en ont été assurés par les travaux de KHINTCHIN, KOLMOGOROFF et WOLFOVITZ, la théorie de l'information de SHANNON est en passe de devenir part intégrante du calcul des probabilités.

On sait que schématiquement il s'agit du problème suivant:

Etant donné un processus aléatoire S (la "source" produisant les "messages") et une famille de distributions de probabilités conditionnelles $dF(y/x)$ (la "ligne de transmission"), il faut, sous diverses contraintes, assujettir à S le paramètre x dans $dF(y/x)$ ("coder" le message) de telle sorte qu'un observateur puisse "au mieux" déduire le comportement de S à partir de la seule connaissance de y . Très concrètement : S est usager du télégraphe; ses "messages" sont codés sous forme d'une série d'impulsions électriques x et $F(y/x)$ décrit stochastiquement l'effet des diverses perturbations affectant le signal reçu y avant qu'il atteigne son destinataire.

Deux étapes de raisonnement sont donc nécessaires qu'il vaut mieux d'ailleurs énoncer dans un ordre inverse de l'ordre naturel:

Le "décodage" (le mot est d'usage courant) qui est la procédure par laquelle le message initial est estimé à partir du signal reçu y .

Le "codage" qui prépare le message de telle sorte que les perturbations infligées par les aléas de la transmission $F(y/x)$ puissent être réduits au minimum.

Il est devenu clair aujourd'hui que le "décodage" n'est rien d'autre qu'une application particulière des méthodes de la statistique mathématique ;, comme B. MANDELBROT et moi-même l'avons souligné dès 1951. Par contre le "codage" fait l'originalité de la théorie.

A vrai dire; il est légitime de considérer (non point seulement

philosophiquement mais dans la matérialité des calculs) que certains schémas expérimentaux comme ceux évoqués plus haut sont déjà un "codage"; ils préparent les réponses, que nous voulons obtenir de la nature, à franchir le plus nettement cette ligne de transmission qu'est l'échantillonnage statistique.

Cependant une nouveauté certaine existe dans les communications tant par les possibilités qui sont incomparablement plus larges que par l'accent mis sur la nature de certaines des contraintes.

C'est l'exploitation de ces analogies et de ces différences entre théorie de l'information et statistique mathématique qui est l'essentiel de ma thèse.(73)

D'une part, en théorie de l'information, nous rencontrons une quantité formellement identique à une entropie à partir de laquelle des limites peuvent être fixées a priori à l'efficacité d'un processus de communication donné.

D'autre part, en statistique mathématique, nous trouvons des expressions (Information de FISHER, Information de WALD) formellement apparentées à la précédente et qui elles aussi limitent la précision ou la sécurité d'une expérimentation statistique donnée: c'est l'objet du théorème célèbre de M.FRECHET étendu par G.DARMOIS au cas de plusieurs variables, et du "théorème fondamental" de l'analyse séquentielle de A.WALD.

J'ai réussi à montrer que toutes ces expressions pouvaient être déduites d'un principe simple commun: soit X l'objet inconnu sur lequel porte notre investigation et qui peut a priori être à l'un quelconques des "états" possibles x_1, x_2, \dots, x_n avec les probabilités p_1, p_2, \dots, p_n .

Le "diagnostic" de X selon l'expression que J.VILLE et moi avons introduite (51) consiste en une suite d'observations concernant X de plus en plus près et finalement révélant son état dans l'épreuve considérée.

Une "information" sera une fonction $H(t)$ des probabilités p_i telle qu'à

un moment t de cette suite d'observation:

$H(t)$ ne dépende exclusivement que des probabilités p_i telles qu'elles ont été altérées par la connaissance du résultat des observations déjà faites.

La différence $H(o) - H(t)$ ne dépende que des observations effectuées jusqu'à l'instant t :

$H(t)$ est ainsi une sorte de "fonction guide" qui permet de situer à chaque instant le progrès réalisé et réalisable dans la détermination de l'état de X .

Ces simples conditions—qui doivent naturellement être formulées plus rigoureusement qu'ici— impliquent que H soit une certaine "valuation généralisée" (je reviendrai sur ce point) et que son expression formelle soit:

$H =$ somme étendue à tous les états x_i de: $p_i D \text{ Log } p_i$

où D est un opérateur linéaire quelconque.

On retrouve bien ainsi les trois cas classiques:

L'entropie: c'est-à-dire l'information de HARTLEY-SHANNON quand D est une constante.

L'information de FISHER quand D est la dérivée seconde par rapport au paramètre inconnu s dont les p_i dépendent et que l'on veut estimer au moyen du diagnostic de X .

L'information de WALD quand D est l'opérateur: "valeur pour $s = s_0$ - valeur pour $s = s_1$ " et que l'expérience a pour but de choisir entre ces deux valeurs.

H ainsi défini établit donc un lien entre les trois grands chapitres:

Théories de la communication,
de l'estimation d'un paramètre,
du test d'une hypothèse.

18

Ceci permet d'énoncer simplement diverses notions fondamentales valides pour tous les cas: additivité des informations, exhaustivité au sens de G. DARMOIS, etc...

Plus important est le fait que cette approche oriente la recherche vers de nouveaux problèmes; je voudrais citer par exemple un résultat récent que j'ai présenté à la réunion annuelle de l'American Mathematical Society (Rochester, décembre 1956) : l'extension du théorème de M.FRECHET au cas de l'estimation de BAYES (c'est-à-dire au cas où la distribution a priori du paramètre à estimer est connue). Comme dans le cas usuel, la limite est atteinte si et seulement si les distributions (a priori et conditionnelles) sont des distributions de LAPLACE-GAUSS.

La notion de "valuation généralisée" évoquée plus haut est l'extension à des treillis en principe quelconques de la notion classique, qui n'a jamais encore été étudiée en dehors du cas des treillis modulaires.

Il s'agit -sommairement- d'une fonction numérique attachée aux éléments d'un treillis et dont le comportement reflète en partie la structure algébrique (par exemple la dimension ordinaire des espaces projectifs est une valuation du treillis modulaire qui leur correspond).

J'ai trouvé d'autres applications de cet outil (56, 70, 73, 2ème partie): si le treillis considéré est celui de toutes les partitions d'un ensemble on retrouve en particulier les distributions statistiques de la mécanique quantique, la fonction génératrice de certaines "statistiques d'ordre" que j'avais étudiées de par ailleurs (20) etc... Un des résultats de base est l'équivalent abstrait du principe de séparation des variables.

4°)- THEORIE DES DEMI-GROUPES ET DES EVENEMENTS RECURRENTS.

L'exposé qui précède a peut être contribué à montrer l'emploi de méthodes algébriques abstraites pour des problèmes précis de calcul des probabilités.

Depuis deux ans environ j'ai eu l'occasion de développer cette approche à propos du problème suivant qui se rencontre dans de nombreuses applications du calcul des probabilités et qui constitue la généralisation aux demi-groupes de la théorie des groupes de permutations.

Représentations transitives des demi-groupes.

Soit A un système d' "états", a_1, a_2, \dots . Son demi-groupe d'opérations s_i , chacune d'elles caractérisée par le fait qu'elle transporte en $a_y = a_x s_i$ les particules situées en a_x .

Le problème a plusieurs aspects: étant donné le système (A, S) , que peut on dire des propriétés algébriques de S ? ou bien réciproquement étant données certaines particularités de S , quelles en sont les conséquences pour l'évolution du système (A, S) .

Enfin, supposant que les opérations S sont effectuées au hasard selon une loi de probabilité donnée quels sont les liens entre les caractéristiques algébriques de S et le comportement à long terme (ergodique) de (A, S) ?.

Dans un mémoire récent (à paraître aux Transactions de l'American Mathematical Society) j'ai indiqué comment déterminer quand S a des idéaux minimaux toutes les représentations transitives (A, S) et en particulier j'ai étudié en détail les représentations complètement transitives que R.R.STOLL n'avait traitées que dans le cas où S , fini, est identique à l'ensemble de ses idéaux minimaux.

Par "complètement transitive", j'entends ici une représentation telle que

pour toute paire d'états a_1, a_2 il existe au moins un l tel que $a_1 s = a_2$. Ces représentations sont par exemple celles des opérations d'une chaîne de MARKHOFF discrète sur ce qu'on appelle une "classe minimale d'états récurrents"

Un problème intéressant que j'ai en partie résolu est de caractériser a priori les groupes S tels que ces "classes minimales" soient réduites à un état unique.

L'interprétation de cette condition et les premiers résultats que j'avais alors, ont été exposés en 1956 au séminaire du Professeur G.DARMOIS. Puis récemment (mars 1957) le Professeur HOTELLING m'a fait l'honneur de m'inviter à l'Institut de statistique de Chapel Hill pour y donner une conférence sur ce sujet que l'on pourrait appeler la théorie algébrique des événements récurrents. J'ai reçu la même invitation du Professeur J.WOLFOWITZ de Cornell University.

Un rôle important est joué dans ces questions par une nouvelle représentation des demi-groupes au moyen de certaines matrices à éléments dans un groupe que j'ai définie dans une note aux Comptes rendus (93). Je compte étudier ultérieurement les analogies qui peuvent exister entre cette représentation et la représentation dite monomiale des groupes.

Demi-groupes libres.

Le véritable problème dans certaines applications est cependant posé parfois de plus loin: les états a_i n'ont pas d'existence physique immédiate. Ils constituent seulement une description abstraite du système à un instant donné qui "résume exhaustivement", selon la notion de G.DARMOIS, tout ce qui dans le passé peut servir à prédire le futur.

Corrélativement, S peut être donné a priori comme l'ensemble de toutes les séquences possibles bâties à partir de quelques opérations élémentaires: S dans ce cas est ce que l'on appelle un demi-groupe libre. Il s'agit alors,

en fonction des contraintes physiques, de construire une image homomorphe de S qui représente réellement l'évolution du système.

J'ai donc été amené à étudier les demi-groupes libres, sujet qui n'avait jusqu'ici jamais été abordé qu'incidemment par les algébristes et le résultat de ces recherches doit paraître dans le *Canadian Journal of Mathematics*.

Au contraire des groupes libres pour lesquels le théorème fameux de NIELSEN SCHREIER affirme que tous les sous-groupes sont libres, une condition (U) doit être satisfaite par un sous demi-groupe P d'un groupe libre pour qu'il soit libre lui-même.

U est remplie en particulier par les sous demi-groupes unitaires de P . DUBREIL et plus spécialement encore le noyau de tout homomorphisme d'un demi-groupe sur un groupe est un sous demi-groupe unitaire à gauche et à droite.

J'avais indiqué mes premiers résultats dans cette direction au séminaire d'algèbre du Professeur P.DUBREIL en 1955 puis au séminaire du Professeur G. BIRKHOFF à Harvard. J'ai été invité par les Professeurs A.H. CLIFFORD et A.D. WALLACE à donner une série de conférences (février-mars 1957) sur cette question à l'Université de Tulane, dont le département de mathématique s'est fait une spécialité de la théorie des demi-groupes.

Revenons aux représentations. Il est facile de voir que le sous demi-groupe laissant fixe un état est unitaire à droite; réciproquement, un sous demi-groupe unitaire d'un demi-groupe détermine univoquement une représentation transitive de celui-ci.

Je me suis posé le problème de trouver l'interprétation correspondante pour les demi-groupes satisfaisant la condition U et celle-ci est décrite dans une note récente aux *Comptes rendus*. Plutôt que d'entrer dans les détails techniques je préfère expliciter ici la signification physique de la

représentation utilisée: les "états" décrivent comme on l'a dit, tout ce qui dans le passé permet de prévoir le futur. On peut introduire des "co-états" jouant le même rôle pour un statisticien qui par la méthode de BAYES chercherait à déterminer les probabilités à posteriori des diverses configurations passées.

Les opérations du demi-groupe, les "transitions" agissant à la fois sur les états et les co-états établissent entre eux une correspondance multiple qui devient précisément l'objet abstrait auquel se rattachent naturellement les sous demi-groupes que nous envisageons. Dans cette représentation, la théorie des treillis réapparaît et j'ai pu utiliser divers résultats antérieurs (23 notamment).

Théorie du codage.

Je conclurai cet exposé en mentionnant que les questions précédentes sont susceptibles d'applications aux problèmes de transmission de l'information.

Il existe un lien étroit entre les sous demi-groupes libres d'un demi-groupe libre et les séquences de symboles abstraits qui peuvent être choisis comme "mots" pour un code. L'étude des représentations complètement transitives est indispensable pour caractériser les "codes" dont la structure est telle qu'une faible perturbation n'altère pas irrémédiablement le décodage. J'ai donné un exposé systématique au Symposium sur la théorie de l'information en 1956 à Cambridge (Massachusetts) (96).

Plus importantes que les applications sont évidemment les méthodes générales de l'algèbre abstraite et du calcul des probabilités que je n'ai fait qu'utiliser mais dont j'espère avoir contribué dans une faible mesure personnelle, à illustrer la diversité et la fécondité.

Le Massachusetts Institute of Technology m'a demandé d'organiser un séminaire pendant le premier semestre de l'année scolaire 1956-1957 qui fournira aux participants une initiation systématique sur ces méthodes et tout particulièrement sur les demi-groupes.

II°) APPLICATIONS

Les titres des publications étant le plus souvent assez explicites par eux-mêmes, je crois pouvoir être plus bref ici.

Comme il apparaît dans la liste en annexe, la plupart de ces travaux ont été écrits en collaboration. Je me bornerai donc à classer selon les équipes, dont j'ai été le collaborateur plus ou moins permanent en laissant de côté les applications isolées.

1°) PHARMACODYNAMIE

J'ai déjà dit que le Professeur P.GAVAUDAN avait voulu m'associer à ses travaux; ses théories sur la signification thermodynamique de certains phénomènes cellulaires sont bien connues. Les publications (9, 11, 12, 15, 16, 46, 62), se rattachent à l'activité de son laboratoire de Biologie cellulaire du Ministère de la Production industrielle (Centre d'études du Bouchet), puis de sa chaire de Botanique de la Faculté des Sciences de Poitiers.

II°) GENETIQUE ET PROGENETIQUE HUMAINE

Tous ces travaux effectués au Centre de génétique de l'Hôpital St Louis dirigé par le Professeur R.TURPIN: (13, 19, 21, 28, 33, 43, 48,

49, 50, 64), traitent du sujet abordé dans ma thèse de Médecine. Peut-on déduire des documents accessibles (cette restriction est essentielle) sur la répartition du sexe des enfants d'une même famille l'existence de facteurs extra-génétiques influençant cette répartition (probablement par l'influence d'une sélection in utero) ? La réponse est oui: nous avons montré (43) que l'intervalle moyen entre enfants consécutifs de même sexe est plus court d'environ un mois que celui entre enfants de sexes différents. La différence est hautement significative et les autres recherches, sur les jumeaux notamment (48), confirment cette théorie.

(25, 29, 30, 65, 66, 75, 77) sont des applications pures et simples de méthodes statistiques classiques notamment à des problèmes de génétique humaine.

L'incontestable irrégularité de la manifestation du patrimoine héréditaire chez l'homme nous avait conduits dès 1950 à étudier systématiquement des facteurs pour lesquels le Professeur R. TURPIN a forgé le terme de "progénétique" et qui sont, par exemple l'âge de la mère, le rang de l'enfant etc.... Des travaux classiques, ceux de PENROSE au Galton Laboratory de Londres avec lequel j'avais moi-même travaillé en 1949, montrent en effet leur rôle capital dans des tares congénitales telles la sténose du pyllore, le mongolisme, ou des anomalies comme la gemmellité. (55) est une revue d'ensemble de cette question qui contient la réévaluation statistique éventuelle des travaux d'autres auteurs et des documents originaux (75).

III°) GÉNÉTIQUE

(40, 42, 44) sont des travaux en collaboration avec Mr. N. KOBOZIEFF à l'École Nationale Vétérinaire de Maisons-Alfort. Une partie de ceux-ci ont été publiés en détail par J. ADAM dans sa thèse de 1951.

IV°) CANCER

(57, 58, 69,) sont des applications des techniques statistiques à divers problèmes résultant d'une enquête permanente sur le cancer dirigée par le Professeur P.F.DENOIX, Directeur de l'Institut G.ROUSSY, sous les auspices de l'Institut National d'Hygiène.

V°) PSYCHIATRIE ET PSYCHOLOGIE

Les circonstances nées de l'occupation m'ont amené à seconder mon Père dans les Hôpitaux psychiatriques où il exerçait et à porter intérêt aux maladies mentales; ceci explique une certaine orientation de mes recherches avec mon Ami le Docteur H.DUCHENE, assistant de consultation comme moi au Centre de Génétique de l'Hôpital St.Louis; au cours de cette longue collaboration nous avons essayé d'appliquer les méthodes statistiques à l'élucidation de certains aspects sociaux de la psychiatrie (41, 67).

Une autre application encore avec H.DUCHENE a été publiée dans (35, 36, 38, 45). C'est sur elle que je voudrais conclure quoique l'objet en soit devenu heureusement bien mince. Dans ce travail nous avons employé des techniques statistiques simples mais rigoureuses pour décider de la validité d'une théorie.

Une certaine expérience m'a convaincu de la stérilité fréquente des recherches en biologie, en médecine ou dans les sciences humaines qui dépendent trop exclusivement de la statistique. En l'absence de théorie -ou tout au moins d'hypothèses- aucune enquête ni aucune expérimentation statistique ne fera apparaître le phénomène qualitatif qui le plus souvent est le seul qui importe. En revanche, et précisément parce que son caractère est ancillaire, la statistique -j'entends la théorie mathématique de la statistique telle qu'elle a été dégagée depuis ces dernières années- m'apparaît de plus en plus comme une aide indispensable dans ces mêmes recherches où l'interprétation des résultats

est obscurcie par une foule d'erreurs. Plus encore que les techniques de calcul, que l'on trouve toujours dans les manuels, l'important pour l'expérimentateur est de comprendre les démarches simples mais point évidentes par lesquelles il peut forcer la nature à communiquer avec lui.

III°) TRAVAUX D'EXPOSITION ET DIVERS

La brièveté est de mise en cette partie de mon exposé; il s'agit surtout d'articles, de communications la plupart en collaboration, de résumés de conférences traitant de sujets étudiés ailleurs et dont les titres dispensent, semble-t-il de commentaires.

TRAVAUX MATHÉMATIQUES

- 1 Sur la théorie des structures de DEDEKIND
C.R. Acad. Sci.(Paris)- 1943 -216- Pages 717-718
- 2 Sur les structures de DEDEKIND
C.R. Acad. Sci.(Paris)- 1944-218- Pages 818-819
- 3 Sur certains axiomes de la théorie des structures
C.R. Acad. Sci.(Paris)- 1945 -221- Pages 218-220
- 5 Remarques sur la notion de clivage dans les structures
algébriques et son application aux treillis.
C.R. Acad. Sci.(Paris)- 1947- 224- Pages 512-514
- 6 Sur certains treillis gauches
C.R. Acad. Sci. (Paris) -1947- 224- Pages 776-778
- 7 Remarques sur des relations d'ordre entre variables aléa-
toires indépendantes.
C.R. Acad. Sci. (Paris)- 1947 -224- Pages 878-880
- 8 Axiomatisation de la géométrie dans un complexe linéaire de
droites.
Rev. Sci.85° Année- Fasc 13 -N° 3278 -1er Août 1947
Pages 782-784.
- 0 Sur certains paramètres caractéristiques des systèmes d'événements compatibles et dépendants et leur application au calcul des cumulants de la répétition.
C.R. Acad. Sci. (Paris)- 1947 -225- Pages 277-278
- 4 Etude statistique d'un problème de sociométrie
Gallica Biologica Acta -Vol.1. Fasc.1- Mars 1948-
Pages 96-104
- 7 Remarques sur les relations aléatoires d'ordre et leur application à la psychologie.
Gallica Biologica Acta -Vol.1. Fasc.2- Avril 1948
Pages 191-204

- 28
- 18 An abac for the sample range
Psychométrica -Vol.13 -N°2- Juin 1948- Pages 95-97
- 20 Valeurs caractéristiques du coefficient de corrélation par rang
de KENDALL dans le cas général.
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1948 -226- Pages 2122-2123
- 23 Sur certaines applications remarquables des treillis dans eux mêmes
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1948 -227 -Pages 1008-1110
- 24 Sur l'extension des théorèmes de dualité aux treillis distributifs
non complémentés.
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1949 -228- Pages 33-35
- 32 A non-Existence theorem for an infinite family of symmetrical block
designs.
Ann.Eugen.(Camb.) N° 37-48 -1949- Vol.14 --Part 4-Pages
286-287
- 51 Les problèmes de diagnostic séquentiel avec Mr Jean VILLE
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1951- 232 - Pages 206-207
- 52 An extension problem in the theory of incomplete block designs.
J.Roy. statis.Soc.Séries B- (Méthodological)
Vol.XIII -N°1 -1951- Pages 120-125
- 54 Sur les rapports entre la quantité d'information au sens de FISHER
et au sens de WIENER.
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1951- 232- Pages 925 à 927
- 56 Une généralisation de la notion de valuation pour les treillis quel-
conques et son application aux distributions de la statistique quan-
tique.
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1951- 232 - Pages 1805-1807
- 59 Sur certains problèmes d'estimation dans le cas de double échantillon-
nage avec Mr LAMOTTE
Biometrics -Vol.7- N° 3 Septembre 1951- Pages 275-282
- 61 Construction du treillis modulaire engendré par deux éléments et une
chaîne finie discrète.
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1952- 235- Pages 926-928
- 70 Une interprétation de certaines solutions de l'équation fonctionnelle
 $F(X + y) = F(X)F(y)$
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1953-236- Pages 352-353
- 71 Sur l'extension d'un groupe de permutations d'un ensemble fini à l'en-
semble des parties de celui-ci
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1953-236- Pages 449-450
- 72 Remarques sur le problème du codage binaire
Publ.Inst.Statis.Univ. (Paris)- 1953- Vol.II-Fasc.1 et 2.Pages
125-128

- 73 Contribution aux applications statistiques de la théorie de l'infor- 29
mation.
Thèse de Doctorat ès-sciences mathématiques.
Faculté des Sciences (Paris) 20 Juin 1953
- 74 Le problème des mots dans les treillis modulaires libres
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1953- 237 - Pages 507-508
- 76 Remarques sur l'étude formelle de la consanguinité dans les popula-
tions monogames avec M.Raymond TURPIN.
Sem,Hôp. (Paris)-1953- N°76- Pages 3974-3978
- 79 Sur une définition combinatoire des espaces vectoriels classiques
C.R. Acad. Sci. (Paris)- 1954- 238 - Pages 2487-2488
- 80 Un treillis universel des géométries projectives.
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1954- 239 - Pages 1754-1756
- 82 Théorie combinatoire des relations bilinéaires classiques
Bulletin des Sciences Mathématiques-Deuxième série-Année 1955
Janvier-Février-Pages 12-32 et Juillet-Août-Pages 1-18
- 83 Sur les problèmes de communications métriques.
C.R. Acad.Sci. (Paris)-1955- 240 - Pages 724-726
- 84 Théorie combinatoire des relations bilinéaires classiques
Bulletin des sciences mathématiques-Année 1955-Juillet-Août
- 86 Une théorie algébrique du codage
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1956- 242 - Pages 862-864
- 87 Une théorie algébrique du codage
Séminaire P.DUBREIL et C.PISOT,Publications de l'Institut Henri
Poincaré- 27 Février 1956
- 88 Théorie du codage et des événements récurrents
Séminaire de calcul des probabilités- Publications de l'Institut
de statistique de l'Université de Paris-16 Mars 1956
- 89 Jeux de Nim et solutions avec M.Claude BERGE
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1956- 242 - Pages 1672-1674
- 93 Sur une représentation des demi-groupes
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1956- 242 - Pages 2907-2908
- 95 Sur deux représentations des demi-groupes finis
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1956- 243 - Pages 1385-1387
- 96 On some measures of Information
Third London Symposium on Information Theory
London-1956- Pages 18-25
- 97 Application of semigroup Methods to coding
IRE Transactions on Information Theory
Vol. I T 2 N° 3 -Septembre 1956- Pages 47-60

APPLICATIONS

- 9 L'excitation des chimiorécepteurs de la langue par les substances du groupe des narcotiques indifférents et la règle thermodynamique de la narcose avec Mr Pierre GAVAUDAN et Mademoiselle Hélène POUSSEL
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1947 -224- Pages 1525-1527
- 11 Le mécanisme physico-chimique de l'excitation sapide et la notion d'excitant indifférent avec Mr Pierre GAVAUDAN et Mademoiselle Hélène POUSSEL
C.R. Acad. Sci. (Paris) -1948- 226- Pages 751-
- 12 L'étude des conditions thermodynamiques de l'excitation olfactive et les théories de l'olfaction avec Mr Pierre GAVAUDAN, Mademoiselle Hélène POUSSEL et Mr Georges BREBION
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1948-226- pages 1395-1396
- 13 Recherches statistiques sur la distribution du sexe à la naissance avec Mr Raymond TURPIN
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1948-226- Pages 1845-1846
- 15 Etude pharmacodynamique des chimiorécepteurs de l'olfaction (I) Principes et méthodes d'une étude thermodynamique de l'olfaction avec Mr Pierre GAVAUDAN, Mademoiselle Hélène POUSSEL et Mr Georges BREBION
Gallica Biologica Acta -Vol.1 -Fasc.2. Avril 1948- Pages 147-166
- 16 Etude pharmacodynamique des chimiorécepteurs de l'olfaction(II) L'étude thermodynamique des séries homologues et les théories de l'olfaction avec Mr Pierre GAVAUDAN et Mademoiselle Hélène POUSSEL
Gallica Biologica Acta -Vol.1-Fasc.2. Avril 1948- Pages 167-187
- 19 Contribution à l'étude statistique du sexe à la naissance
Thèse de Doctorat. Faculté de Médecine de Paris-2 Juillet 1948
- 21 Investigation of the distribution of sexes at birth in 14000 families each having at least children avec Mr Raymond TURPIN
8ième Cong.Int.Génet.Stockholm- Juillet 1948

- 25 Sur une asymétrie latérale statistique, attribut du phénotype sexuel 31
humain avec Mr Raymond TURPIN
C.R. Acad. Sci. (Paris)-1949- 228- Pages 431-432
- 28 Sur la détermination du sexe chez l'homme avec Mr Raymond TURPIN
Sem.Hôp.Paris -1949-N°60- Pages 2544-2545
- 29 Remarque sur la statistique des becs-de-lièvre avec Mr Raymond TURPIN
et Madame TISSERAND
Sem.Hôp.Paris -1949- N°60- Pages 2545-2546
- 30 L'étude des dermatoglyphes avec Mr Raymond TURPIN
Sem.Hôp.Paris -1949-N° 60. Pages 2553-2562
- 33 Résultats d'une enquête sur la distribution du sexe dans les familles
nombreuses.
Sem;Hôp.Paris-1949-N°61. Pages 2579-2582
- 35 Etude expérimentale du test de L.SZONDI avec Madame A.E.ANCELIN et Mr
Henri DUCHENE
9ième Cong.Inter.Psychotechnique-Berne-1949-
La psychotechnique dans le monde moderne- Pages 168-179
- 36 Quelques réserves sur la méthodologie de L.SZONDI avec Mr Henri DUCHENE
Infor.Psychiat -25ième année- 4ième série,N°6-Juillet 1949
Pages 210-216
- 38 Investigaciones criticas sobre la teoria y el test de L.SZONDI avec
Madame A.E.ANCELIN et Mr.Henri DUCHENE
Rev.Psicol.gen.apl.Vol IV. N°II-Juillet-Septembre 1949-Pages
437-449
- 40 Sur une différence pondérale à la naissance entre deux lignées de souris:
Mus musculus avec Mr Nicolas KOBOZIEFF, Madame POMRIASKINSKY-KOBOZIEFF
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1949- 229- Pages 1267-1268
- 41 Considérations sur l'accroissement de la population dans les Hôpitaux
Psychiatriques avec Mr Henri DUCHENE
Sem.Hôp.Paris.1950- N°3. Pages 105-108
- 42 Sur une différence pondérale entre deux lignées consanguines de Mus mu-
culus avec Mr Nicolas KOBOZIEFF, Madame POMRIASKINSKY-KOBOZIEFF
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1950- 230- Pages 240-241
- 43 Rapport entre le sexe des nouveaux nés et l'intervalle séparant leurs
naissances avec Mr Raymond TURPIN et Mademoiselle Denise DEROCHE
C.R.Acad. Sci.(Paris)-1950- 230- Pages 335-336
- 44 Sur une différence pondérale à l'âge adulte entre deux lignées consan-
guines de Mus musculus avec Mr Nicolas KOBOZIEFF, Madame POMRIASKINSKI-
KOBOZIEFF
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1950- 230- Pages 413-414
- 45 Recherches critiques sur la théorie et le test de M.SZONDI avec Madame
A.E.ANCELIN et Mr Henri DUCHENE
Enfance 1950 -N°1- Pages 65-73

- 46 Le problème de la spécificité chimique dans les différences génétiques de sensibilité gustative avec Mr Pierre GAVAUDAN 32
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1950- 230- Pages 1622-1624
- 48 Nouvelles recherches sur la distribution du sexe à la naissance
Sem.Hôp.Paris-1950-N°88- Pages 4458-4465
- 49 Sur la détermination du sexe chez l'homme avec Mr Raymond TURPIN
Sem.Hôp.Paris-1950-N°88- Pages 4562-4563
- 50 Sur la masculinité à la naissance dans les grossesses multiples avec Mr Raymond TURPIN
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1950- 231- Pages 1098-1099
- 53 Analyse statistique du tracé électromyographique de la tétanie avec M.M. Raymond TURPIN, Jacques LEFEVRE, Jean LERIQUE
C.R. Acad. Sci.(Paris)-1951- 232- Pages 552-553
- 55 De l'influence sur les caractères physiopathologiques de l'enfant de son rang de naissance et de l'âge de ses progéniteurs avec M.M. Raymond TURPIN, Henri DUCHENE, et J.SUTTER
XIII° Cong.Pédiat.de langue française-Alger-1951- Pages 1-139
- 57 Documents pour aider à l'étude des différentes causes de cancer du sein avec M.M. P.F.DENOIX et G.VIOLLET
Bull.Asso.Franc.cancer-42ième année -Tome 38-1951- Pages 374-381
- 58 Rapports entre l'âge au 1er symptôme et certains aspects de la vie biologique de la femme dans une série de cancers de l'utérus et du sein avec M.M. P.F.DENOIX et G.VIOLLET
Bull.Inst.Nat.Hyg.-Tome 6-N° 4-1951- Pages 573-584
- 62 Possibilité d'une estimation quantitative des hétéroauxines par le test Marchantia, avec Mademoiselle Jacqueline ROUSSEAU
C.R. Soc.Biol.(Paris)- Tome CXLVI- Mars 1952- N°5 & 6- Pages 429-431
- 64 Sexe et génullité avec Mr Raymond TURPIN
Sem.Hôp. Paris -1952- N°44- Pages 1844-1848
- 65 Consanguinité et tuberculose avec M.M. Raymond TURPIN et J.SENEGAL
Sem.Hôp. Paris -1952- N° 44- Pages 1851-1854
- 66 Résultats d'une enquête sur le rôle de l'hérédité dans l'apparition des hernies inguinales et crurales avec M.M. Raymond TURPIN et J. BARBET
Sem.Hôp. Paris-1952- N°44- Pages 1854-1856
- 67 Particularités de l'écart d'âge des couples dont le mari est alcoolique avec M.M. Henri DUCHENE, J.BIRO, B.SCHMITZ
Sem.Hôp. Paris-1952- N°44- Pages 1857-1859
- 69 Contribution à l'étude du rôle des facteurs héréditaires dans le cancer avec M.M. P.F.DENOIX et G.DENOIX
Bull.Inst.Nat.Hyg.Tome 8-N°2 -1953- Pages 247-257

- 75 Résultats d'une enquête sur l'influence des facteurs progénésiques sur les malformations humaines, avec M.M. Raymond TURPIN et P.LEFEVRE
Sem.Hôp.Paris -1953- N°76- Pages 3973-3974
- 77 Analyse statistique de l'activité d'un service parisien de pédiatrie avec Mr Raymond TURPIN et Mademoiselle Gisèle NORMANT
Revue de l'Assistance Publique de Paris -1953- N°26- Pages 844-850
- 92 De l'influence relative de l'hypertension intracrânienne et de la localisation sur les troubles psychiques au cours des tumeurs cérébrales avec M.M.H.HECAEN et J.de AJURIAQUERRA
Revue neurologique -Tome 94- N°3-1956- Pages 259-263
- 98 Observations statistiques sur le rang de fratrie des alcooliques avec M.M.E.MARTIN et Ph.PAUMELLE
Revue de l'alcoolisme -Tome 4- N°4-1956- Pages 109-112

TRAVAUX D'EXPOSITION ET DIVERS

- 4 Méthodes typologiques en sélection professionnelle
Biotypologie -1946- Vol VIII N°1 et 2- Pages 106-107
- 22 Fidélité des tests
Travail et Méthode -Novembre 1948- Pages 14-16
- 26 Fondements de la statistique appliquée à la psychologie
I°-Principes des tests statistiques (résumé d'une conférence faite au
groupe d'études de psychologie de l'Université de Paris)
Bull.Groupe Etude Psychol.Univ.Paris -1949- 2ème année N° 8 & 9
Pages 73-74
- 27 Les fondements de la statistique appliquée à la psychologie
II°-Estimation d'un paramètre inconnu (résumé d'une conférence faite au
groupe d'études de psychologie de l'Université de Paris)
Bull.Groupe Etude Psychol.Univ.Paris -1949-2ème année N° 10-11-
12- Pages 111-112
- 31 Une application de l'analyse séquentielle
Sem.Hôp. Paris -1949- N°60- Pages 2562-2564
- 34 Etude de la détermination du sexe chez l'homme avec Mr Raymond TURPIN
Cong.Nat.Psiologie et 1ères journées inter-psychologiques
RAPALLO 14/16 Mai 1949
- 37 A propos de la "cybernétique"-(Mathématiques et Psychologie)
Evolut.Psychiat.-1949- Tome IV- Pages 585-607
- 39 Le Médecin devant les gènes létaux avec Mr Raymond TURPIN
Cong.Int.Path.comp.Istanbul 1949
- 47 A propos du test de L.SZONDI avec Mr Henri DUCHENE
Infir.Psychiat.26ième année- 4ième série N°6- Juillet 1950-
Pages 225-226

- 60 Bilan de la génétique vis à vis des problèmes de la stérilisation,
avec Mr Henri DUCHENE
La Raison -1951- N°3- Pages 10-22 35
- 63 Progénèse et gemellité avec Mr Raymond TURPIN
Acta géneticae medicae et gemellologiae -1952- Vol.1- N°2
Mai- Pages 159-169
- 68 Applications biométriques de la théorie de l'information
Sem.Hôp.Paris -1952- N°44- Pages 1859-1865
- 78 A tentative classification of goal- Seeking behaviours
J.Ment.Sci. Vol 100 -N°418- Janvier 1954 - Pages 97-102
- 81 La statistique en psychiatrie
Encyclopédie médico-chirurgicale- Volume "psychiatrie"-2-1955-
37060- G 10- Pages 1 à 4
- 85 Le problème de diagnostic et l'axiomatisation des informations
Revue générale des Sciences 1955
- 90 Notions élémentaires sur les fermetures de Galois et les treillis complets
Groupe de recherches en calcul des probabilités et physique ma-
thématiques -Publications de l'Institut de statistique de l'Uni-
versité de Paris -1956-
- 91 Treillis de partition
Groupe de recherches en calcul des probabilités et physique ma-
thématiques -Publications de l'Institut de statistique de l'Uni-
versité de Paris -1956-
- 94 Etude statistique de diverses expériences de radiesthésie avec Mr Georges
DARMOIS
La radiesthésie -Etudes critiques- Publications de l'Union rationa-
liste -Juin 1956-

T A B L E D E S M A T I E R E S

Titres universitaires	1
Fonctions	2
Enseignements universitaires	3
Titres honorifiques	4
Titres militaires	4
Sociétés savantes	5
Formation scientifique et orientation générale des recherches	6
Exposé des travaux	
Travaux mathématiques	
Algèbre	11
Calcul des probabilités	13
Théorie de l'information	15
Théorie des demi-groupes et des événements récurrents	19
Applications	
Pharmacodynamie	23
Génétique et progénétique humaine	23
Génétique	24
Cancer	25
Psychiatrie et psychologie	25
Travaux d'exposition et divers	26
Liste des travaux	
Travaux mathématiques	27
Applications	30
Travaux d'exposition et divers	34
Table des matières	36

**TITRES ET TRAVAUX DE
M.P. SCHÜTZENBERGER**

=====

Avril 1988

1. Statistique

En 1948 mon Maître le Professeur R. Turpin m'accueillit dans son service à l'Hôpital St. Louis et me fit obtenir le soutien généreux du Fonds d'Etude de la Société Médicale des Hôpitaux de Paris. Qu'il reçoive ici le témoignage respectueux de ma reconnaissance. J'y employais mes techniques statistiques, peu répandues à l'époque, et quelques notions de génétique apprises à Londres de J.B.S. Haldane. Mes travaux personnels portèrent sur les dermatoglyphes [15] dont R. Turpin avait su voir toute l'importance: les empreintes digitales distinguent l'homme parmi les primates et peuvent refléter des troubles de l'embryogénèse, notamment, de façon caractéristique dans ce que l'on appelle maintenant la trisomie et qui était, comme on le sait, l'un des centres principaux d'activité du Laboratoire de R. Turpin. Je n'ai pas gardé trace de toutes les recherches auxquelles j'ai été mêlé. Cependant l'une m'a beaucoup influencé. C'est la part marginale que je pris à la préparation de la très importante thèse de M. Lamotte sur la génétique des populations d'escargots. Elle me fit prendre conscience des limites inhérentes de l'usage des mathématiques dans les sciences de la vie.

Je travaillais simultanément au Laboratoire de Bouchet avec mon ami P. Gavaudan qui y développait les aspects multiples de sa théorie de la narcose indifférente. En particulier nous étudiâmes l'olfaction [8], [23] où les substances agissent à des activités thermodynamiques très inférieures au millième en contraste avec la gustation où le seuil est en règle au-dessus de quelques pour cents. Ce ne sont bien sûr là que des ordres de grandeur parce que le calcul précis de l'activité thermodynamique est impossible faute d'avoir les valeurs exactes des paramètres physico chimiques de la phase dans laquelle agissent les substances étudiées.

Ces connaissances me furent utiles quelques vingt ans plus tard quand, conseiller scientifique du Dr. Candau, Directeur Général de l'Organisation Mondiale de la Santé, je participai à l'organisation de véritables norias d'experts internationaux pour établir un rapport sur (ou mieux contre) les armes chimiques et biologiques et, au lendemain de la catastrophe de la thalidomide

afin de mettre en place un réseau mondial d'alerte sur les accidents causés par les médicaments..

A cette même époque de l'Hôpital St. Louis, une certaine intolérance (qu'on peut juger pathologique) à l'égard du charlatanisme me fit entreprendre une longue étude critique [30] d'un test psychologique qui menaçait de devenir à la mode. Aussi à abuser de la bienveillance inépuisable de mon Maître G. Darmois en lui faisant cosigner un livre aux Editions Rationalistes contre la radiesthésie. Tous ces travaux et d'autres de cette époque ne sont guère que des exercices ou des applications et je n'ose citer que celui concernant les "plans d'expérience" (ou "block designs") introduits par le grand statisticien Ronald A. Fisher. La construction de ces configurations a été une des activités favorites de certains statisticiens avant que Bose et Chaudury (deux statisticiens aussi) précédés sans le savoir par Hocquenghem, ne mènent le sujet à évoluer vers la grande théorie des codes correcteurs d'erreurs. Le problème est le suivant.

Etant donné n, m, k il s'agit de choisir n ensembles E_i de m éléments, chacun dans un ensemble ayant lui même n éléments, de telle sorte que d'une part, chacun des éléments figure dans m des E_i et d'autre part, que $k = \text{Card}(E_i \cap E_j)$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$; $i \neq j$). Une condition nécessaire immédiate est $m(m-1) = k(n-1)$. Un bel exemple que je ne peux me retenir de décrire est celui des $16 (= n)$ ellipses distinguées de la surface de Kummer. Elles contiennent chacune $6 (= m)$ points parmi 16 points remarquables et se rencontrent deux à deux en $2 (= k)$ de ces points. On a bien $6 \times 5 = 2 \times 15$. Par contre on ne peut pas trouver de configuration analogue, même abstraite, pour $n = 46, m = 10, k = 2$, bien que $10 \times 9 = 2 \times 45$. Je montrai par un argument très simple que si n est pair il n'y a de solution que si $m - k$ est le carré d'un entier [17]. C'était un premier exemple où une condition non immédiate exclut une infinité de cas. Je reçus une carte de félicitations de Sir Ronald.

2. Théorie de l'information

Dans son travail mémorable "On the mathematical theory of communications", Claude Shannon avait introduit en 1949 une

série de concepts nouveaux fournissant un modèle efficace des processus de communications et, en particulier, il avait proposé une variante de la notion d'entropie comme mesure de l'information transmise. Je notais dans [14] la parenté formelle entre la négentropie et une expression connue des statisticiens sous le même nom d'information qu'avait introduit Fisher pour évaluer le gain de précision apporté par chaque observation indépendante dans les problèmes d'estimation statistique d'un paramètre inconnu. J. Ville et moi-même découvrimus indépendamment une réinterprétation du modèle de Shannon qui rendait ces deux notions encore plus semblables [25], [29]. Encouragé par Georges Darmois, je consacrais ma thèse [40] à l'étude de ces questions. J'y montrais que la notion générale d'information que je proposais contenait outre les informations de Shannon-Wiener et de Fisher une autre expression due à A. Wald et qui joue un rôle de base dans la technique statistique connue sous le nom d'analyse séquentielle ; je trouvais même un quatrième cas intervenant dans un problème - d'ailleurs extrêmement particulier - d'observation statistique. Cette famille d'analogies se révéla assez fructueuse parce que de nombreux énoncés concernant l'une de ces "informations" suggèrent en règle des énoncés parallèles relatifs aux situations relevant d'une autre (cf. [54]). Elle me mena à analyser de façon générale les propriétés formelles de l'entropie comme fonction définie sur un certain treillis et ces treillis eux-mêmes. Dans une deuxième partie j'étudiais un modèle général où ces différents concepts s'appliquent efficacement. Les situations couvertes sont illustrées par divers problèmes d'estimation de fréquence en génétique des populations ou dans la méthode de mélange des échantillons. J'ai eu quelques très rares occasions de m'en servir pendant les quelques années où je fus épidémiologiste itinérant de l'Organisation Mondiale de la Santé de Rangoon à Surabaya. Le même modèle a été repris et analysé avec beaucoup plus de détails par Cl. Picard et ses élèves sous le nom de théorie des questionnaires.

Je dois cependant reconnaître que ma thèse n'a pas résolu le problème qu'elle posait : les diverses "informations" considérées conduisent chacune à une "inégalité fondamentale" qui exprime le

maximum de ce que peut apporter une observation élémentaire par rapport à la poursuite du but (diagnostic, précision de l'estimation, test de rejet, etc...) que schématise le modèle. Ces inégalités sont non-triviales - en ce sens que chacune d'elle requiert une preuve spéciale qui est assez délicate. Il eût été souhaitable de pouvoir unifier ces preuves, du moins en partie. Je n'y ai pas encore réussi, non plus d'ailleurs que les autres chercheurs qui depuis quarante ans s'attaquent répétitivement à ce même problème. Quoiqu'il en soit, ce travail m'a valu d'être appelé au Research Laboratory of Electronics au M.I.T. pour faire partie de l'équipe que Cl. Shannon était en train d'organiser et où je passai un an avant de venir enseigner le Calcul des Probabilités à Poitiers.

3. Théorie des codes

Le terme code a reçu de nombreuses acceptions ; je l'emploierai ici dans le premier sens qu'il avait dans la Théorie des communications : un code d'un ensemble E de messages élémentaires sur un alphabet A est l'attribution à chaque e de E d'un mot ea dans les lettres de A ; c'est le cas par exemple du code génétique universel des êtres vivants : E est l'ensemble des vingt acides aminés, A celui des quatre nucléotides Adénine, Cytosine, Guanine et Uracile, et chaque ea , chaque "codon", étant un mot de trois lettres sur ce dernier alphabet. Un autre exemple serait le codage de $E = \{0,1,\dots,9\}$ par les dix mots $0^i 1$ ($0 \leq i \leq 9$) sur l'alphabet $A = \{0,1\}$. Ce cas est plus représentatif de la théorie qui nous occupe ici parce que les mots ea sont de longueur variable. L'ensemble des mots d'un code doit alors avoir une structure très spéciale pour qu'une suite de lettres de A puisse être décodée sans ambiguïté. Par exemple les trois mots 0 , 01 , et 10 ne forment pas un code parce que la suite 010 admet deux décodages $(0)(10)$ et $(01)(0)$. Ni les problèmes, ni les méthodes ne sont les mêmes que dans la théorie des codes correcteurs d'erreurs.

Il y a une manière très simple de fabriquer des codes ; les objets obtenus sont maintenant appelés *codes préfixes* et il semblait plus ou moins implicitement admis qu'il n'en existait pas

d'autres. Cependant pour l'algébriste que j'étais le problème se posait différemment [45], [46] : un code est la base d'un sous monoïde *libre* du monoïde libre A^* ou, si l'on préfère, le codage $\alpha : E^* \rightarrow A^*$ est un morphisme injectif. La plupart des propriétés intéressantes du point de vue des communications peuvent alors être formulées en langage mathématique. Par exemple une certaine condition naturelle de complétude nécessaire pour utiliser sans perte une ligne de transmission équivaut à la condition que l'image $E^*\alpha$ rencontre tous les idéaux de A^* . Cette théorie rend possible de fabriquer des codes complets qui ne soient ni préfixe, ni suffixe. L'exemple le plus simple est {00, 010, 011, 10, 11}. Dans cette optique, j'observais que les codes préfixes complets (finis ou infinis) pouvaient être interprétés à peu près directement comme les supports de certains processus stochastiques qu'avait introduit W. Feller sous le nom *d'évènements récurrents* pour modéliser des situations telles que les files d'attente. Ceci permettait en retour d'appliquer aisément divers résultats du calcul des probabilités aux problèmes de codage.

Une autre question importante est celle de la *synchronisation*. Pour {0ⁱ1} évoqué plus haut, le décodage peut s'effectuer de façon purement locale et la perte du début d'un message n'influe pas sur le reste de la lecture. Il en va tout autrement du code génétique : une suite telle que ... GUUGUUGUUGUUGU... peut être interprétée comme codant une chaîne de Valines puisque GUU est l'un des codons de cet acide aminé ; la même suite décalée donnerait une chaîne de *Leucines* (donc un des codons est UUG) ou de *Cystéines* (UGU). Il semble même que ce phénomène de lecture multiple par simple décalage soit utilisé par certains virus. Indépendamment de ce cas particulier il y a un intérêt certain à savoir si un code possède ou non des propriétés de synchronisation et la théorie algébrique du codage que je proposais dans [45] puis [46] ramène cette question à celle de la nature de certains groupes dans un monoïde quotient associé au code considéré et que j'appelais le *monoïde syntaxique* de ce dernier.

Toute une série d'articles ont suivi ces premiers travaux. J'ai eu la chance de pouvoir intéresser à cette question des chercheurs de grande valeur et j'ai eu tout récemment l'immense joie de voir

publier un ouvrage d'ensemble sur la Théorie des Codes (Theory of Codes, Academic Press 1987) par deux amis très chers Dominique Perrin et Jean Berstel qui ont éminemment contribué à son développement.

Le sujet est d'actualité car la théorie des codes synchronisants donne des résultats puissants pour étudier certains objets de la dynamique symbolique qui servent de modèle à l'optimisation de la mise en mémoire sur disques d'après les travaux de Adler et des ergodiciens de son équipe au J. Watson Research Center de l'IBM.

Avouerais-je que ces applications et d'autres à venir ne sont pour moi que l'une des raisons de l'intérêt que je porte aux codes et dirai-je que ma conception des mathématiques appliquées est de voir dans les applications une source extérieure de théorèmes et d'intuitions de techniques de preuve pouvant être utilisées pour le progrès de la science mathématique en supplément des motivations internes que fournit la structure et le mouvement mêmes de cette science.

Dans le cas des codes les deux axes qui me semblent justifier l'intérêt de ces objets sont les suivants :

d'une part au niveau le plus élevé, l'étude des sous-structures des structures libres. En effet, les monoïdes sont les structures les plus simples pour lesquels les objets libres ont des sous-objets qui ne le sont pas nécessairement, le cas des monoïdes commutatifs ayant été réglé par S. Eilenberg et moi-même [100].

A un niveau plus précis, les semigroupes finis ont, je crois, un rôle à jouer dans la pratique et l'enseignement de demain car sans même parler de l'informatique, la technique contemporaine avec ses multiples systèmes digitaux abonde en situations où l'on a besoin de résultats assez fins concernant le semigroupe engendré par des actions opérant sur un ensemble fini. La théorie des semigroupes finis n'est ni triviale, ni formelle et ne constitue en rien une variante ou une généralisation de celles des groupes ou des anneaux. Elle est indiscutablement beaucoup moins riche que ces dernières mais ses théorèmes fondamentaux (de Suschkevitch, de Greene, de Clifford) mériteraient d'être plus largement connus. Il ne s'agit pas d'élargir ou d'approfondir des galeries dans la mine d'or de la théorie des groupes mais

d'inventer quasiment de toutes pièces des énoncés et des techniques de preuve et des objets nouveaux pour appréhender les systèmes discrets finis. La théorie des codes et celle des automates finis proposent des problèmes précis et parfois suggèrent des solutions. Au bout de nos efforts nous espérons trouver parfois quelque chose à apporter au courant principal de la Mathématique.

Par exemple les codes bipréfixes (complets finis) sont un objet remarquable. Y. Cesari a donné une méthode permettant en principe de les calculer tous. Un théorème profond de D. Perrin montre que leur monoïde syntaxique contient nécessairement un groupe *deux fois* transitif. C'est un nouveau cas où de tels groupes peuvent être produits de façon systématique.

Autre exemple : une famille particulière de codes synchronisants se trouve en bijection avec certaines bases de l'algèbre de Lie libre [55] (par effacement des crochets) ce qui ramène la preuve du théorème de Poincaré Birkhoff Witt à un résultat de factorisation des monoïdes libres et permet diverses autres applications étudiées par Viennot dans un fascicule des Lectures Notes de Springer.

La théorie des codes pose encore une énigme : est-il vrai que tout code (complet fini) X est commutativement équivalent à un code préfixe ce qui indiquerait que ces derniers sont optimaux par rapport à toute attribution d'un coût aux signaux élémentaires ? La formulation algébrique de ce résultat serait que $A^* = PX^*Q$ où X^* est le monoïde engendré par X , et P et Q deux polynômes à coefficients *non négatifs*. J'ai donné dans [81], [93] un résultat plus faible impliquant que les codes non préfixes sont des objets très très particuliers. Récemment C. Reutenauer a démontré l'existence de la factorisation voulue de A^* mais sans pouvoir établir la positivité des coefficients. La preuve est fort difficile et la question reste posée.

Je mentionne encore un résultat. Les méthodes de la théorie ergodique permettent d'étendre divers résultats probabilistes aux suites infinies. Un théorème de F. Blanchard et D. Perrin fait apparaître une complémentarité surprenante entre les incertitudes que laisse l'observation des messages reçus soit sur la distribution de probabilité à la source fournissant les messages

émis soit à cause de l'absence de synchronisation entre émetteur et récepteur sur ces messages eux-mêmes. On peut se demander s'il n'y a pas là un lien avec des problèmes propres de la théorie de l'information.

4. Langages algébriques et rationnels

De retour à Cambridge (Mass.) en 1961 je m'aperçus que le principe des grammaires génératives du linguiste Noam Chomsky recoupait certains des travaux que j'avais entrepris dans les années précédentes [63]. Chomsky proposait de réduire toute grammaire des langues naturelles à un système de règles d'un type uniforme exprimant la possibilité de remplacer un mot par une suite de mots (on dit aujourd'hui syntagme) sans altérer la grammaticalité de la phrase, par exemple un substantif par une clause relative. De tels systèmes avaient déjà été rencontrés épisodiquement par les logiciens mais c'est Chomsky qui a su en voir toute l'importance et qui a commencé à en développer les conséquences.

De mon côté, pour expliquer l'apparition de nombres algébriques (non rationnels) dans divers problèmes classiques de probabilité (retour à l'origine, loi Arcsin, etc...), j'avais été conduit à exploiter à fond l'idée de fonction génératrice de Laplace en associant à un ensemble de mots leur somme (infinie à coefficients 0 ou 1) dans l'algèbre large du monoïde libre et à examiner les cas où une telle série est solution d'une équation (ou d'un système fini) d'équations polynomiales (non commutatives). Pour prendre l'exemple le plus simple l'équation quadratique $\xi = a\xi\xi + b$ en l'inconnue ξ définit l'ensemble des mots en a et b dont tous les segments initiaux (propres) ont au moins autant de a que de b et qui ont eux-mêmes un b de plus que de a . Or cet ensemble est précisément celui produit par les deux règles de Chomsky $\xi \rightarrow a\xi\xi$ et $\xi \rightarrow b$ qui donnent par itération $b, abb, aabbb, ababb \dots$ etc. Le lien avec la syntaxe informatique se voit en interprétant a comme la parenthèse ouvrante "(" et b comme la parenthèse fermante ")", les mots obtenus devenant alors, au dernier b près, les "expressions bien parenthésées".

L'usage de telles séries algébriques non commutatives permettait de retrouver et de développer sans peine les résultats de Chomsky et de ses collaborateurs. Après avoir consigné ceci dans les très confidentiels Quaterly Progress Report du M.I.T conformément à une vieille tradition du R.L.E. [64], je proposai à Noam de rassembler dans une publication commune tout ce que nous savions sur ce sujet [78]. En cours de route se découvrit le phénomène surprenant que le groupe libre jouait pour les séries algébriques un rôle analogue à celui joué par les groupes finis pour les automates finis. Ce résultat est resté l'une des bases de la théorie. De façon équivalente il exprime que tout langage "context free" peut être obtenu par des opérations de niveau plus élémentaire à partir du noyau d'un morphisme d'un monoïde libre dans un *groupe* libre. Les premiers cas que j'avais considérés et qui apparaissent en calcul des probabilités relèvent du groupe libre à un seul générateur, c'est-à-dire du groupe \mathbb{Z} des entiers. Nous appelâmes ces ensembles de mots (ou plus précisément d'autres étroitement apparentés, "langages de Dyck" en hommage au pionnier de la théorie des groupes libres.

C'est à cette époque que débutaient indépendamment de nous les premières recherches dans ce qui devait devenir l'informatique théorique. S. Ginsburg avait fait observer que les langages de programmation tels que le Fortran ou l'Algol qui étaient alors d'origine récente pouvaient, pour l'essentiel, être commodément décrits au moyen de règles du type proposé par Chomsky. D'autres chercheurs avaient introduit pour l'analyse syntaxique et la compilation de ces langages un type d'automates infinis dits "à pile" ou "push-down". Notre technique permettait de traiter systématiquement ces questions et le théorème sur les "langages de Dyck" équivaut à l'assertion que les automates à pile sont en quelque sorte l'algorithme universel de compilation. Ces mêmes méthodes permettaient d'obtenir bien d'autres résultats nouveaux tant sur les langages algébriques ("context-free") que sur les automates à pile et apparentés et le sujet est devenu un des chapitres standard de l'enseignement de l'informatique théorique. Pour plus de détails je renvoie au livre bien connu de M. Gross et A. Lentin (Notions sur les grammaires formelles 1967) qui, en diverses langues, et pour plus de dix ans, a été le seul

manuel consacré à une question de pure informatique théorique avant d'être relayé par le livre de J. Berstel (Transductions and Context free languages).

Une autre application notable de ces séries qui a été développée par R. Cori et ses élèves est l'énumération (à vrai dire, mieux : la construction systématique) des graphes planaires. Grâce à un théorème de Lentin et de Jacques lié lui même aux équations quadratiques dans le groupe libre, chacun de ceux-ci peut être codé aussi bien par un mot que par une paire de permutations des sommets, ces objets étant soumis à des contraintes qui garantissent la planarité et en ce qui concerne les mots ces contraintes sont de nature "algébrique" au sens donné ici à ce terme.

Un des problèmes les plus importants est de retrouver la structure de la "grammaire", (c'est-à-dire du système d'équations) à partir de l'ensemble de mots qu'elle définit. La méthode la plus profonde est celle de la "double étoile" de J. Beresson. Elle caractérise facilement le cas des séries définies par un système d'équations du premier degré.

Cependant pour obtenir des séries ayant de "bonnes propriétés" les distinguant utilement du cas général il faut supposer en outre que les inconnues n'apparaissent que comme facteur initial (ou final) des mots définissant les équations. On trouve alors ce que j'ai appelé les "séries rationnelles" (non commutatives) [67]. A la différence des séries algébriques générales où il n'y a pas grand'chose à dire quand les coefficients ne sont pas positifs, le cas générique des séries rationnelles à coefficients quelconques (dans \mathbb{Z} ou dans \mathbb{Q}) offre une foule de questions mathématiques que l'on peut espérer traiter et, il se trouve de surcroît servir de modèle à des situations assez diverses ; je cite par exemple : la théorie des relations rationnelles (où l'on remplace le monoïde libre A^* par le produit direct de deux monoïdes libres) dont M. Nivat a montré toute l'importance dans la théorie des séries algébriques et dans ses applications à la compilation ; l'usage par M. Fließ de ces mêmes séries rationnelles non commutatives montrent qu'elles peuvent fournir des développements utiles dans la théorie du contrôle.

Le résultat de base est que toute série rationnelle non commutative est obtenue par projection à partir d'une représentation d'un monoïde libre par un monoïde de matrices de dimensions finies à entrées dans l'anneau de ses coefficients. Ceci équivaut à l'existence d'un système fini de récurrences linéaires entre ces coefficients et réciproquement, tout système de ce type correspond à une série rationnelle. Nombre de problèmes d'énumération se ramènent à ce modèle et plusieurs livres en France (J. Berstel et C. Reutenauer) ou à l'étranger (A. Salomaa) ont été consacrés à ce sujet et à ses diverses applications.

Un résultat utile est l'extension du produit de Hadamard. Il est naturel de faire correspondre à l'intersection de deux ensembles le produit de Hadamard de leurs séries génératrices (c'est-à-dire la série dont les coefficients sont les produits terme à terme des deux séries) et cette idée tout comme l'usage des séries formelles dans l'algèbre large d'un monoïde fait maintenant partie des techniques standard de l'analyse combinatoire. De façon analogue le produit de Hurwitz de la théorie classique des fonctions analytiques se généralise aux séries non commutatives en faisant intervenir le "shuffle" (ou "produit de mélange") des mots au lieu de leur produit de concaténation.

Une technique simple (qui est essentiellement l'usage d'un produit tensoriel) permet de montrer que dans le cas général (non commutatif) le produit de Hadamard d'une série algébrique par une série rationnelle est encore une série algébrique. En prenant une image appropriée on obtient comme corollaire un théorème ancien de Jungen qui énonce exactement la même chose pour les fonctions d'une seule variable [70]. Un énoncé semblable s'applique au produit de Hurwitz. Si l'on se borne aux séries associées à des ensembles de mots, le même résultat signifie que l'image d'une partie algébrique par une relation rationnelle est encore algébrique. Une telle image serait, par exemple, l'intersection (ou le shuffle) avec une partie du monoïde libre définie par un automate fini. Ces considérations ont été reprises en toute généralité par S. Eilenberg qui consacre plusieurs chapitres de son traité Automate, Languages and Machines aux séries formelles en général et aux séries rationnelles en particulier.

5. Automates finis et transducteurs

Pour des raisons de commodité d'exposition je n'ai pas respecté l'ordre chronologique qui eût voulu que cette section vint avant la précédente car je commençai à m'occuper des automates dès 1959 quand nous offrîmes aux étudiants du M.I.T. un cours d'été sur ce sujet tout nouveau.

Les automates finis - assez malencontreusement nommés - sont des algorithmes dont le fonctionnement, quelque soit sa durée, ne fait appel qu'à une mémoire *bornée*. Bien que leur mémoire soit fort courte, les calculettes ne sont pas considérées utilement comme des automates finis puisque leur emploi normal exige que l'on reste en deçà des limites de capacité des registres. Par contre tous les ordinateurs gros ou petits fourmillent d'automates finis qui y assurent mille fonctions ancillaires répétitives - à commencer par l'addition - et les programmes de traitement de texte ne sont guère qu'un réseau de tels algorithmes plus ou moins ingénieux.

Faisant usage de la nomenclature actuelle, nous dirons qu'une partie X d'une structure S est *reconnaisable* si et seulement si il existe un morphisme φ de S sur un objet fini tel que l'on ait $X = X\varphi\varphi^{-1}$, c'est-à-dire tel que l'appartenance à X d'un élément, w , puisse être reconnue à partir de la seule connaissance de l'image $w\varphi$.

D'autre part, un automate fini est une représentation du monoïde libre A^* par des applications d'un ensemble fini dans lui-même (dont les éléments sont les *états* du système physique qui réalise l'automate) et qui fournit donc immédiatement un algorithme de reconnaissance des mots une fois choisis des états initiaux et finaux distingués.

Le théorème fondamental de la théorie est dû au grand logicien Kleene qui l'avait formulé sans employer les monoïdes dans le langage biscornu alors fort à la mode des réseaux de neurones abstraits.

Ce théorème affirme qu'une partie X d'un monoïde libre A^* est reconnaissable si et seulement si on peut l'obtenir à partir des parties finies de A^* par une chaîne (finie) d'unions, de produits

et d'opérations : $Y \rightarrow Y^*$ consistant à prendre le sous-monoïde Y^* engendré par une partie Y déjà obtenue.

Toutes ces notions m'étaient déjà familières : dans ma terminologie X est reconnaissable si et seulement si son monoïde syntaxique, déjà mentionné plus haut à propos des codes, est fini ; d'autre part, recourant aux séries non commutatives, on peut relever l'union en somme, le produit restant le produit et l'opération $Y \rightarrow Y^*$ devenant $Y \rightarrow 1 + Y + Y^2 + \dots + Y^n + \dots = (1-Y)^{-1}$, sans qu'il y ait grande difficulté à esquiver tout problème de convergence. Le théorème de Kleene pouvait donc être présenté à nos auditeurs comme l'assertion que le monoïde syntaxique d'une partie X de A^* est fini si et seulement si X appartient à un *semi* anneau des séries rationnelles satisfaisant certaines conditions de régularité. Ces dernières sont trop lourdes pour être reproduites ici ; le terme *semi* précise que seule l'addition est autorisée, la soustraction ne figurant pas parmi les opérations de cette structure.

Ce glissement était d'autant plus justifié que la simple considération des automates montre que l'on peut associer à toute partie reconnaissable X de A^* une série dont les coefficients sont 1 ou 0 et qu'en particulier on peut limiter l'usage de l'opération infinitiste $Y \rightarrow Y^*$ au cas où Y est un code.

Un autre résultat de Kleene - assez évident d'après la définition de la reconnaissabilité - est que l'intersection de deux parties reconnaissables est encore reconnaissable. Ceci équivaut au théorème classique (étendu aux séries non commutatives) que le produit de Hadamard de deux séries rationnelles est une série rationnelle, un énoncé qui on l'a vu plus haut s'étend au cas algébrique.

La preuve du théorème de Kleene reste toujours relativement longue et délicate et ce théorème a un statut assez exceptionnel en mathématiques car malgré maints efforts il ne semble admettre aucune variante ou généralisation non triviale qui s'appliquerait à d'autres structures que les monoïdes (ou semigroupes libres). Ainsi, comme l'a observé S. Eilenberg, les parties reconnaissables des groupes ou des monoïdes commutatifs ne sont pas nécessairement rationnelles mais seulement algébriques (au sens donné à ce terme dans la section précédente).

Un autre aspect notable est que les parties reconnaissables peuvent être caractérisées par des formules appartenant à certains types de logiques restreintes, un sujet qui a suscité des travaux importants de O. Rabin, de P. Schupp et aussi les premières recherches de Conway.

Quoiqu'il en soit la théorie des automates finis est riche en problèmes : certains ont un intérêt pratique comme les problèmes de minimisation, ou de hiérarchisation précisant la nature des sous automates minimaux nécessaires pour synthétiser - par mise en série, par produit en couronne, ou autrement, un "gros" automate donné. Citons aussi les problèmes liés à l'existence de mots ayant telle ou telle action sur les états, par exemple assurant la synchronisation. D'un point de vue théorique, le problème se pose d'établir les correspondances entre les propriétés des ensembles de mots - en tant que tels - et celles des monoïdes finis qui en sont les images syntaxiques. Cette question est importante parce que la possibilité d'une telle réduction (à des propriétés d'un monoïde fini) conditionne la décidabilité de la propriété correspondante d'une famille de parties de A^* . Pour mettre en valeur ce point, je mentionne qu'en ce qui concerne les parties "algébriques", le simple problème de leur égalité éventuelle est en règle indécidable, les automates à piles sous jacents n'étant pas des automates finis.

Toutes ces recherches demandaient que l'on améliore la théorie des semigroupes finis, ce à quoi je m'employais dans une série de publications en introduisant une représentation commode (parce qu'elle livre de façon à peu près immédiate l'ensemble des morphismes) par des matrices de dimension finie à entrées dans l'union d'un groupe et d'un zéro et en précisant pour ce faire un théorème de A.H. Clifford. Ceci a donné prétexte à cet auteur à associer fort généreusement mon nom dans son traité sur les semigroupes à certains groupes liés aux classes d'éléments engendrant le même idéal.

A vrai dire la finitude n'est guère qu'une commodité d'exposition comme l'ont montré A. Wallace et son école car la condition assurant qu'un semigroupe a de bonnes propriétés algébriques est la compacité. C'est le cas par exemple de semigroupes de matrices stochastiques de dimension *finie* qui se

laissent facilement compactifier donnent ainsi des résultats intéressants pour l'étude de certains processus stochastiques (Théorème de Wolfowitz) liés à l'étude des perturbations aléatoires des automates [94], [97].

Revenant au sujet principal et à la dernière perspective évoqués plus haut, le logicien R. McNaughton, un des pionniers de l'informatique théorique à la Moore School of Electrical Engineering, avait isolé un type particulier de calcul logique et démontré qu'il correspondait très exactement aux parties du monoïde libre que l'on peut obtenir par les opérations de Kleene sans employer l'opération infinitiste $Y \rightarrow Y^*$ à condition de la remplacer par la complémentation booléenne $Y \rightarrow A^* \setminus Y$, c'est-à-dire, en termes de séries formelles, par la soustraction restreinte aux séries à coefficients 0 ou 1.

Je m'aperçus qu'une autre caractérisation (décidable, cette fois) de cette famille spéciale de parties reconnaissables est que tous les groupes contenus dans leur monoïde syntaxique sont triviaux [83]. Ou, si l'on préfère, qu'on peut les reconnaître avec des automates ne disposant d'aucune boucle de comptage modulo p . Pour cette raison ces parties sont maintenant appelées *apériodiques*. Elles se rencontrent assez souvent dans la nature, si j'ose dire, mais leur structure peut être diaboliquement compliquée et leur étude est devenue un sujet majeur par le biais de la théorie des pseudo-variétés de structure qui me force à ouvrir une parenthèse d'algèbre universelle.

Un théorème classique de Birkhoff énonce qu'une famille de structures algébriques est définie par des identités si et seulement si elle contient chaque objet quotient d'un sous objet d'un de ses objets et si elle est fermée par produit direct *infini*. On dit alors que c'est une *variété* (de structures). Un exemple type est la famille des groupes résolubles ; par contre la famille des p -groupes n'est pas une variété ce qui m'avait beaucoup contrarié quelques vingt ans plus tôt quand, débutant sans expérience, je m'essayais à étudier les treillis. Avec S. Eilenberg nous substituâmes aux variétés les "pseudo-variétés" (de structures) en exigeant seulement la fermeture par produit direct fini et en montrant que chaque pseudo variété est définie par une suite infinie d'identités et la condition que chaque objet satisfasse ces

identités sauf un nombre fini d'entre elles. Ainsi les p -groupes finis sont définis par la suite d'identités ($gP^n = 1, n \in \mathbb{N}$).

Avec cette nouvelle notion, les semigroupes finis aperiodiques forment une pseudo variété et l'on peut classer les parties reconnaissables d'après les pseudo variétés à laquelle appartient leur monoïde syntaxique. Le volume B du traité de S. Eilenberg est pour l'essentiel consacré à ces questions et il donne une foule d'exemples plus ou moins importants dûs à l'un ou à l'autre ou l'un et l'autre de nous deux ou à d'autres chercheurs et remis dans cette nouvelle perspective. Un des plus remarquables a été découvert par I. Simon. Il concerne les automates qui ne peuvent reconnaître que les sous mots d'un mot sans savoir si ils en sont ou non un facteur (aa ou bbc sont des sous mots de babca sans en être des facteurs). Les parties qu'ils reconnaissent ont pour monoïde syntaxique les monoïdes de la variété des monoïdes finis dont chaque idéal principal a un générateur unique. Ce sont donc des monoïdes aperiodiques très spéciaux et le lien qu'a trouvé I. Simon entre eux et les idéaux par rapport à l'opération de "shuffle" (ou "mélange") dans l'algèbre du monoïde libre est extrêmement surprenant.

Riche en conjectures précises, la théorie des pseudo-variétés de langages suscite des recherches actives aux Etats Unis, dans les pays de l'Est et en France où J.-E. Pin a obtenu des résultats remarquables et publié récemment un livre faisant le point des travaux en cours. ("Théorie des variétés de langages formels").

Transducteurs

La théorie des automates a une autre province qui paraît plus immédiatement pratique mais qui s'est révélée être techniquement beaucoup plus difficile. Il s'agit de dispositifs, les *transducteurs*, dont le rôle est de transformer en un mot de sortie ("output"), $w\alpha$, tout mot d'entrée ("input"), w , de leur domaine. C'est un cas particulier des relations rationnelles étudiées par M. Nivat.

Le cas le plus simple est celui des "*machines séquentielles*". Elles sont basées sur un automate fini et leur opération consiste à incrémenter successivement le mot de sortie, à chaque lettre lue,

par un mot élémentaire dépendant à la fois de cette lettre et de la transition qu'elle provoque sur les états de l'automate. L'exemple type est l'additionneur. L'alphabet d'entrée est formé des paires de chiffres de façon à représenter par un mot unique les deux termes à sommer ; le mot de sortie est la suite de chiffres figurant le résultat de la somme et l'automate fini a pour mission de veiller aux retenues et de modifier en conséquence chaque sortie élémentaire.

Le problème de la minimisation des machines séquentielles a longtemps occupé les chercheurs. Comme bien d'autres questions de l'informatique il est si bien réglé maintenant qu'on peut l'enseigner à tous les niveaux sans trop se soucier de la théorie sous-jacente. Il reste cependant bien d'autres questions ouvertes.

On observera que l'additionneur ne peut pas opérer de gauche à droite en raison de la possibilité imprévisible d'une cascade de retenues. Ce modèle est donc trop restreint et il faut passer à un niveau supérieur pour obtenir, par exemple, le décodage d'un code qui ne serait pas préfixe. Il s'agit alors d'un transducteur plus compliqué [66] qu'Eilenberg appelle une *bimachine*. Ce dispositif peut réaliser les "fonctions rationnelles" (rationnel au sens de la section précédente) les plus générales d'un monoïde libre dans un autre et on montre que ces fonctions peuvent être effectuées par deux machines séquentielles dont la première donne par lecture de gauche à droite un mot de sortie, qui, une fois cette passe achevée, sert à son tour de mot d'entrée pour une seconde machine séquentielle fonctionnant elle dans l'autre sens.

J'ai donné [22] une autre définition de ces fonctions rationnelles en utilisant une extension (non commutative) des matrices de Hankel qui fait mieux apparaître la condition de finitude sans laquelle toute la théorie ne serait que généralités formelles oiseuses. Avec mon ami Choffrut qui a lui-même beaucoup contribué à ce sujet, nous avons étudié [146] le problème que je trouve fascinant de déterminer pourquoi et comment une bimachine doit "faire comme si" elle utilisait simultanément une lecture gauche-droite et une lecture droite-gauche bien que ceci soit physiquement absurde.

Enfin C. Reutenauer et moi avons tout récemment réussi à caractériser les transductions jouissant de la propriété qu'on peut les réaliser à l'aide d'un automate fini apériodique, ce qui ouvre la voie à de nouvelles applications de la méthode des pseudo-variétés.

6. Théorie des mots

Les mots sont apparus comme la matière première des recherches évoquées dans les sections précédentes et j'ai souligné leur intérêt dans diverses techniques contemporaines, de l'informatique à la biologie moléculaire. On voit même se constituer comme une "biologie moléculaire informatique" puisque l'on dispose maintenant de méthodes automatiques qui fournissent le décodage de séquences de nucléotides si nombreuses et si longues (de l'ordre du millier de bases ou plus) que leur étude ne peut guère être faite sans l'aide d'un ordinateur et de logiciels appropriés, qu'il s'agisse de leur régularité statistique, du calcul de divers paramètres physico-chimiques et, bien sûr, a fortiori, de leur comparaison pour essayer de retracer leur évolution dans l'échelle des êtres vivants.

Du point de vue purement mathématique je suis convaincu que les meilleures preuves en théorie des automates finis reposent sur les propriétés des mots parce que celles-ci font directement intervenir la compacité du monoïde des transitions mais je n'ai pas réussi à faire partager cette opinion à S. Eilenberg qui préfère des techniques moins élémentaires mais plus générales.

Ces mêmes propriétés jouent un certain rôle en théorie du groupe libre [60], [75], [134] et interviennent aussi dans divers autres problèmes d'algèbre. J'ai évoqué à propos des codes synchronisants un théorème de factorisation et ses applications aux algèbres de Lie libre. Le même théorème a permis à C. Reutenauer et moi-même de donner une formule donnant le déterminant (ou n'importe quelle fonction symétrique des racines, d'ailleurs) d'une somme de matrices m_i à partir des mêmes fonctions calculées sur certains monômes en les m_i dont l'ensemble (fini) ne dépend que de la dimension commune des matrices considérées [149].

Certaines des propriétés fondamentales des mots pourraient par un simple effort de rhétorique être modifiées de telle sorte qu'elles apparaissent comme portant sur des fonctions de variable réelle $f : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$. C'est le cas d'un théorème profond de Cesari. Dans ce langage il donne la période de f comme le minimum du maximum des périodes (ou plus exactement d'une ingénieuse modification de cette notion) des restrictions de f aux intervalles finis. Il permet d'améliorer sensiblement des constantes dans des problèmes d'équation (ou de présentation) dans les groupes libres. Il a le même effet dans un énoncé [126] qui précise le théorème de Kleene en montrant que quand on restreint l'opération fondamentale infinitiste $Y \rightarrow Y^*$ de formation de sous monoïdes aux ensembles Y d'au plus $k-1$ mots, tous les groupes dans le monoïde syntaxique de l'ensemble obtenu sont des produits directs de groupes commutatifs et de sous groupes du groupe symétrique sur k lettres.

Bien d'autres chapitres des mathématiques font usage des propriétés des mots : par exemple les "mots sans carrés" (c'est-à-dire sans facteur de la forme ww) jouent un rôle dans la dynamique symbolique de Morse. J. Berstel a découvert un lien avec l'itération de morphismes d'un monoïde libre dans lui-même. Une autre approche est la théorie des semigroupes répétitifs de J. Justin qui donne en corollaire le théorème célèbre de Van der Waerden sur l'existence de progressions arithmétiques dans les parties de \mathbf{N} . (C'est un cas particulier d'un résultat sur le monoïde associé aux "automates à pile"). Une autre application, curieuse, des mots et des morphismes itérés est leur emploi sous le nom de "système de Lindenmeyer" comme modèle de la croissance et de la forme de certains végétaux.

Il manquait un ouvrage présentant avec des notations uniformes raisonnables tous les résultats de base concernant les mots épars dans la littérature mathématique. D. Perrin a eu le mérite insigne d'organiser l'effort collectif de plusieurs de mes amis qui a produit le volume 17 de l'Encyclopedia of Mathematics, devenu ouvrage de référence (jusqu'à la prochaine édition refondue qu'on attend).

7. Recherches en Combinatoire

A vrai dire je ne sais pas bien ce que signifie le mot "combinatoire" qui s'est si largement répandu depuis une quinzaine d'années. Quel est le dénominateur commun entre le vénérable "Combinatory Analysis" de MacMahon qui traite sans le dire toujours trop clairement de l'algèbre des fonctions symétriques, les recherches difficiles sur les géométries non arguésiennes ou les plans d'expérience, la "Kombinatorische Topologie" de Reidemeister et la belle "Combinatorial theory of free groups" de R. Lyndon, les problèmes extrémaux sur les graphes de l'école hongroise ou les mille questions d'énumération que suscite la théorie (et assez souvent la pratique) des systèmes discrets depuis les travaux de Polya sur le décompte des isomères.

J'évite en général ce terme et je l'utilise ici faute de mieux pour désigner des travaux portant sur des structures mineures ou encore mal connues au moyen de techniques qui, en première intention, ne relèvent pas des grandes méthodes de l'algèbre ou de l'analyse. Peut être est-ce aussi le sens que lui donnent les autres auteurs et je prie qu'on veuille bien y voir signe de modestie et point souci de mode.

En collaboration avec D. Foata nous entreprîmes l'étude systématique des polynômes eulériens de Frobenius et des nombreuses formules qui s'y rattachent [101]. Le but, qui fut atteint, était de démontrer que tous ces énoncés peuvent être établis sans recourir à l'analyse complexe par un petit nombre de constructions portant sur les permutations, considérées ici comme des mots dans lesquels chaque lettre n'apparaît qu'une fois. Comme nous l'expérimentons ceci permit de dégager quelques principes généraux.

L'un d'eux est la considération des séries formelles (non commutatives) dans lesquelles les coefficients sont des entiers divisés par un facteur $n!$. Dans le cas d'une seule variable ce sont les séries de Hurwitz de l'analyse classique et les fonctions génératrices de ce type (dites "exponentielles") interviennent couramment dans les problèmes d'énumération. Le passage au non-commutatif nous permet d'expliquer l'apparition des dénominateurs $n!$ par le fait que le produit sous jacent est le

produit de shuffle. Ces méthodes ont été puissamment développées par Foata. Elles sont à la source de la théorie fort générale et abstraite des "espèces de structures" de Joyal dont C. Reutenauer vient de montrer l'usage dans la représentation du groupe linéaire sur l'algèbre de Lie libre filtrée par sa suite dérivée.

Le prolongement direct de notre travail était d'appliquer des techniques analogues pour rendre compte de ce que nombre de séries classiques sont des séries de Hurwitz à coefficients positifs. Le cas le plus surprenant est celui des fonctions elliptiques sn , cn , dn de Jacobi. Il a été traité par Viennot et de façon très approfondie par D. Dumont. Plus généralement D. Foata et ses élèves ont montré l'efficacité de ces méthodes dans l'étude des séries hypergéométriques, des polynômes orthogonaux et surtout de leur q -généralisation où l'introduction d'objets combinatoires permet de s'orienter dans la multitude des identités. Dans une direction différente, la même idée de représenter par des mots et des séries les objets et les familles d'objets a permis à Flageolet de développer des techniques très utiles pour évaluer l'efficacité des algorithmes informatiques.

Tableaux de Young et monoïde plaxique

Ces objets, comme on le sait, ont été introduits au début du siècle pour étudier les représentations linéaires des groupes symétriques. Ils sont aussi connus sous le nom de "Gelfand Pattern" ou "symboles de Yamanouchi" chez les physiciens qui en font grand usage depuis Hermann Weyl. J'aurais besoin d'une définition un peu différente. Etant donné un alphabet totalement ordonné, $A = \{a_i : i=1,2,\dots,n\}$ où $A = \{a < b < \dots\}$, un tableau de forme K est un remplissage du diagramme de Ferrers de la partition K par les lettres de A tel que les lettres aillent en croissant au sens large dans chaque ligne et au sens strict dans

chaque colonne. Par exemple $\begin{array}{cccc} & & & d \\ & & b & c \\ & b & c & d \\ a & a & a & b & c \end{array}$ est un tableau de forme 245.

On l'identifie au mot $t = ddbbcdaaabc$ obtenu en lisant le diagramme de la façon habituelle. L'évaluation de t est le

monome (ici $a^3b^3c^2d^3$) qui en est l'image commutative et on dit que t est *standard* si chaque lettre n'y apparaît qu'une fois.

En 1965, C. Schensted inspiré par des problèmes informatiques de tri découvrit un algorithme remarquable associant de façon bijective à toute permutation w une paire de tableaux standards (wR, wR') de même forme. Cet article devenu depuis un classique de la combinatoire ne fut guère remarqué à l'époque. Dans [77], [105] j'établir plusieurs propriétés supplémentaires de la construction de Schensted : l'inversion $w \mapsto w^{-1}$ correspond à l'échange des deux tableaux ; le retournement $w \mapsto \omega w$ (par exemple $w = 31425 \mapsto \omega w = 52413$) a pour effet de remplacer wR par le tableau transposé et wR' par un tableau qui ne dépend que de wR' . D'autres propriétés expriment ce que A. Lascoux m'apprit plus tard être la formule de Pieri et permettent d'étendre les constructions à tous les mots.

Il existe en effet un autre usage des tableaux car D.E. Littlewood a montré que la fonction de Schur d'indice K est la somme (dans l'anneau des polynômes $Z(A)$) des évaluations de tous les tableaux de forme K . C'est à partir de cette théorie que Alain Lascoux était venu de son côté à l'étude des tableaux et nous unîmes nos forces pour une longue collaboration. Qu'il soit dit ici une fois pour toutes que nombre des articles qu'il a publiés devraient comporter des remerciements au zèle du programmeur enthousiaste qui a fourni des tables et parfois des contre exemples plutôt que ma signature à côté de la sienne. Il y a des intuitions et des techniques qui requièrent bien plus que je ne peux apporter et notamment la connaissance de la géométrie algébrique.

D'autres mathématiciens commencèrent à s'intéresser à ce problème. En particulier, D. Knuth trouva des conditions simples assurant que deux mots correspondent au même tableau et Curtis Greene, prolongeant l'idée initiale de Schensted, caractérisa la forme de wR en fonction de sous mots remarquables de w . Dans [130], je rassemblais ces résultats et quelques autres en employant une technique qui ajoute de la souplesse à ces calculs. Elle s'est répandue sous le nom de "jeu de taquin". Ce travail contient la première preuve rigoureuse de la règle de Littlewood-Richardson donnant les coefficients de structure de l'algèbre des fonctions de Schur et servant depuis cinquante ans à en établir les

tables. On y voit apparaître aussi le monoïde plaxique dont A.Lascoux et moi avons eu l'idée un peu auparavant. Il admet trois définitions équivalentes : c'est le quotient du monoïde libre A^* dont les tableaux constituent une section ; c'est le monoïde syntaxique de l'application de A^* dans l'ensemble des partitions envoyant chaque mot w sur la forme du tableau wR ; enfin et surtout, c'est un quotient de A^* extrémal par rapport à la propriété que son algèbre contienne une sous-algèbre isomorphe de façon naturelle à l'algèbre usuelle des polynômes symétriques.

J'avais quelques réticences devant ce monoïde qui, de façon quasiment paradigmatique, n'est pas compactifiable car dès le cas de deux lettres, c'est le monoïde syntaxique de l'automate à pile numérique, ou si l'on préfère, de la série y définie par l'équation $y = ayy + b$ déjà rencontrée dans la section 3. Il s'est cependant révélé très fructueux.

En effet, la décomposition en classes plaxiques du groupe symétrique est sous-jacente à la théorie de Kazhdan et Lusztig pour ce groupe. En utilisant nos techniques qui fournissent des résultats parfaitement explicites, nous avons résolu dans le cas particulier des grassmanniennes plusieurs des questions laissées ouvertes par ces auteurs [140].

D'autre part, les mêmes méthodes nous ont permis de donner une réponse positive [133] à une conjecture de Foulkes concernant les polynômes qui sont la q -généralisation des nombres de Kostka et grâce auxquels Green a donné l'expression des caractères du groupe linéaire en caractéristique q .

Dans un semi-groupe S , la relation de conjugaison est la plus petite équivalence telle que ss' et $s's$ appartiennent à la même classe. Le monoïde plaxique a la propriété remarquable que deux éléments ont la même image commutative si et seulement si ils sont conjugués et si l'on peut y orienter la relation de conjugaison de telle sorte que ses classes deviennent des ensembles ordonnés munis d'une hauteur, la cocharge. Les polynômes de Foulkes-Green sont les fonctions génératrices de la cocharge sur les classes de conjugaison. Dans le cas particulier des permutations, la cocharge n'est rien d'autre que l'index majeur de Mac Mahon de leur inverse et un théorème assez mystérieux de D.Foata la rattache au nombre des inversions.

Dans [137], nous avons étudié une représentation du groupe symétrique sur le monoïde libre A^* (par action sur les lettres) qui est compatible avec la congruence plaxique et la relation de conjugaison. Elle fournit des inégalités sur les polynômes de Foulkes-Greene et surtout une nouvelle interprétation des fonctions de Hall-Littlewood (qui sont la q -généralisation des fonctions de Schur), éclairant les calculs passablement compliqués dont elles sont l'objet : ce dernier travail est en cours de publication.

Enfin, une légère variante du monoïde plaxique, le monoïde nilplaxique, donne une structure à l'ensemble des décompositions réduites des éléments du groupe symétrique ; un corollaire immédiat est la preuve de la conjecture de R.Stanley affirmant que le nombre de décompositions réduites d'un élément est (de façon non triviale) une somme de dimensions de représentations irréductibles [142].

Polynômes de Schubert et opérateurs de symétrisation

Afin d'étendre nos recherches dans la théorie de Kazhdan et Lusztig, nous avons besoin d'autres objets que les fonctions de Schur, ce qui amena A.Lascoux à définir une famille nouvelle de polynômes qu'il appela "de Schubert". Ceux-ci forment une base de l'anneau $Z[A]$ des polynômes en tant que module libre sur l'anneau des polynômes symétriques. On les obtient à partir d'un monôme extrémal au moyen des opérateurs de différences divisées (cf [144]).

Un élève de A.Lascoux, P.Pragacz, est parvenu récemment à en donner une définition fonctorielle et, en faisant jouer à la fois les monoïdes plaxiques et nilplaxiques, nous avons trouvé leur généralisation non commutative [150]. Motivé par des considérations géométriques, A.Lascoux a étendu cette étude à la description complète de l'anneau de Grothendieck des variétés de drapeaux.

Ces calculs font intervenir les opérateurs de symétrisation δ_j et $\pi_j = a_j \delta_j$ déjà rencontrés par d'autres auteurs (Bernstein, Gelfand et Gelfand et, indépendamment, M.Demazure). Soit plus généralement D l'opérateur : $f \mapsto f^\sigma r + fr'$, où r et r' sont des

fonctions rationnelles. Dans [151] nous avons résolu l'équation de Coxeter $D_j D_{j+1} D_j = D_{j+1} D_j D_{j+1}$ et montré qu'elle entraîne que tous les D satisfassent la même équation de Hecke $DD = Dr + r'$. En modifiant un peu les hypothèses, on retrouve comme cas particulier la "Bethe Ansatz" des physiciens. Si l'on impose la condition supplémentaire que les D_j préservent l'anneau des polynômes, la solution générale est une famille à cinq paramètres contenant les opérateurs $\sigma_j, \delta_j, \pi_j, \pi_{j-1}$ et a_j, a_{j+1}, δ_j ; si on veut que de plus les D n'augmentent pas les degrés, la solution se réduit à deux familles à trois paramètres.

L'application des formules obtenues aux polynômes de Schubert non commutatifs donne la possibilité de traiter de façon unifiée diverses théories, en particulier celle des caractères de Demazure et celle des bases de Seshadri. Nous avons d'autres manuscrits en cours. Ars Longua...

LISTE DE PUBLICATIONS DE M.P. SCHÜTZENBERGER

=====

- [1] Sur la théorie des structures de Dedekind, *C.R. Acad. Sci. Paris* 216 (1943), 717-718 (MR 5, 226).
- [2] Sur les structures de Dedekind, *C.R. Acad. Sci. Paris* 218 (1944), 818-819 (MR 7, 409).
- [3] Sur certains axiomes de la théorie des structures, *C. R. Acad. Sci. Paris* 221 (1945), 218-220 (MR 7, 235).
- [4] Remarques sur la notion de clivage dans les structures algébriques et son application aux treillis, *C.R. Acad. Sci.* 224 (1947), 512-514, (MR 8, 366).
- [5] Remarques sur les relations d'ordre entre variables aléatoires indépendantes, *C.R. Acad. Sci. Paris* 224 (1947), 878-880, (Mr 8, 472)
- [6] Sur certains paramètres caractéristiques des systèmes d'évènements compatibles et dépendants et leur application au calcul des cumulants de la répétition, *C.R. Acad. Sci. Paris* 225 (1947), 277-278 (MR 9, 96)
- [7] Axiomatisation de la géométrie dans un complexe linéaire de droites, *Revue Sci.* 85 (1947), 782-784 (MR 9, 369)
- [8] Gavaudan P., Poussel H., Schützenberger M.P., L'excitation des chimio-récepteurs de la langue par les substances du groupe des narcotiques indifférents et la règle thermodynamique de la narcose, *Compt. Rend. Acad. Sc.* 224, 1525-1527, (1947)
- [9] Gavaudan P., Poussel H., Brebion G. and Schützenberger M.P., L'étude des conditions thermodynamiques de l'excitation olfactive et les théories de l'olfaction. *Compt. rend. Acad. Sc.* 226, 1395-1396, (1948)
- [10] Etude statistique d'un problème de sociométrie, *Gallica Biologica Acta* 1 (1948), 9 pp. (MR 9, 602)
- [11] Valeurs caractéristiques du coefficient de corrélation par rang de

- Kendall dans le cas général, *C.R. Acad. Sci. Paris* 226 (1948), 2122-2123 (MR 10, 134)
- [12] Sur certaines applications remarquables des treillis dans eux-mêmes, *C.R. Acad. Sci. Paris* 227 (1948), 1008-1010 (MR 10, 279)
- [13] Gavaudan P., Poussel H., Schützenberger M.P., Le mécanisme physico-chimique de l'excitation sapide et la notion d'excitant indifférent, *Compt. rend. Acad. Sc.* 226, 751-752, (1948)
- [14] Cybernétique, Mathématique et Psychologie, l'évolution psychiatrique, p. 585-607, (1949)
- [15] Turpin R., Schützenberger M.P., L'étude des dermatoglyphes, *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 25, 2558-2562, (1949)
- [16] Sur l'extension des théorèmes de dualité aux treillis distributifs non complémentés, *C.R. Acad. Sci. Paris* 228 (1949), 33-35 (MR 10, 279)
- [17] A non-existence theorem for an infinite family of symmetrical block designs, *Ann. Eugenics* 14 (1949), 286-287 (MR 11, 3)
- [18] Turpin R. and Schützenberger M.P., Sur la détermination du sexe chez l'homme, *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 25, 2550-2563, (1949)
- [19] Tisserand M., Schützenberger M.P., Remarque sur la statistique des becs-de-lièvre, *Semaine des Hôp. de Paris*, 25, 2545-2548, (1949)
- [20] Turpin R. and Schützenberger M.P., Sur la masculinité à la naissance dans les grossesses multiples, *Compt. rendu Sc.* 231, 1098-1099, (1950)
- [21] Duchene H. and Schützenberger M.P., Considérations sur l'accroissement de la population des hôpitaux psychiatriques *Semaine des Hôpitaux de Paris* 26, 106-108, (1950)
- [22] Gavaudan P., Schützenberger M.P., Le problème de la spécificité chimique dans les différences génétiques de la sensibilité gustative *Compt. rend. Acad. Sc.*, 230, 1622-1624, (1950)
- [23] (avec G. Darmois) Etude statistique de diverses expériences radiesthésiques, *Editions Rationalistes* (1951)
- [24] Lefebvre J., Schützenberger M.P., Lérique J., Analyse statistique

- du tracé electroencéphalographique dans la tétanie, *Compt. rendu Acad. Sc.* 232, 552-553, (1951)
- [25] Sur les rapports entre la quantité d'information au sens de Fisher et au sens de Wiener, *C.R. Acad. Sci. Paris* 232 (1951), 925-927 (MR 12, 623)
- [26] Une généralisation de la notion de valuation pour les treillis quelconques et son application aux distributions de la statistique quantique, *C.R. Acad. Sci. Paris* 232 (1951), 1805-1807 (MR 13, 51)
- [27] An extension problem in the theory of incomplete block designs, *J. Roy. Statist. Soc. Ser. B* 13 (1951), 120-125 (MR 13, 669)
- [28] (avec M. Lamotte) Sur certains problèmes d'estimation dans le cas de double échantillonnage, *Biometrics* 7 (1951), 275-282 (MR 13, 571)
- [29] (avec J. Ville) - Les problèmes de diagnostic séquentiel, *C.R. Acad. Sci. Paris* 232 (1951), 206-207 (MR 12, 515)
- [30] (avec H. Duchêne) Etude statistique du test Szondi, *Evolution Psych.*, (1952), p. 178-223
- [31] Turpin R., Schützenberger M.P., Sexe et gémélite, *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28, 1844-1848, (1952)
- [32] Duchene H., Schützenberger M.P., Sutter J., De l'influence sur les caractères physio-pathologiques de l'enfant de son rang de naissance et de l'âge de ses progéniteurs, *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28, 747-749, (1952)
- [33] Construction du treillis modulaire engendré par deux éléments et une chaîne finie discrète, *C.R. Acad. Sci. Paris* 235 (1952), 926-928 (MR 14, 612)
- [34] Chabbert Y., Terrial G., Schützenberger M.P., Evolution de la sensibilité aux antibiotiques des germes isolés chez les malades de la ville de 1949-1958, *Ann. Inst. Pasteur* 84, 952-955, (1953)
- [35] Remarques sur un problème de codage binaire, *Publ. Inst. Stat. Univ. Paris*, (1953), Vol. 2, 125-128
- [36] Une interprétation de certaines solutions de l'équation fonctionnelle $F(x+y) = F(x)F(y)$, *C.R. Acad. Sci. Paris* 236 (1953), 352-353

- (MR 14, 768)
- [37] Sur l'extension d'un groupe de permutations d'un ensemble fini à l'ensemble des parties de celui-ci, *C.R. Acad. Sci. Paris* 236 (1953), 449-450 (MR 14, 1058)
- [38] Sur une définition combinatoire des espaces vectoriels classiques, *C.R. Acad. Sci. Paris* 238 (1954), 2487-2488 (MR 15, 927)
- [39] A tentative classification of goal seeking behaviours, *J. Mental Sci.* 100 (1954), 97-102 (MR 17, 985)
- [40] Contribution aux applications statistiques de la théorie de l'information, *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris* 3 (1954), 3-117 (MR 17, 1099)
- [41] Un treillis universel des géométries projectives, *C.R. Acad. des Sc.*, 239, (1954) pp. 1754-1756
- [42] Théorie combinatoire des relations bilinéaires classiques, *Bull. Sci. Math.* 79 (1955), 12-32 (MR 16, 990)
- [43] Théorie combinatoire des relations bilinéaires classiques II, *Bull. Sci. Math.* 79 (1955), 111-128 (MR 17, 704)
- [44] Sur les problèmes de communications métriques, *C.R. Acad. Sci. Paris* 240 (1955), 724-726 (MR 17, 637)
- [45] Une théorie algébrique du codage, *Séminaire Dubreil-Pisot année 55-56*, exp. n° 15, Inst. Henri Poincaré, Paris *C.R. Acad. Sci. Paris* 242 (1956), 862-864 (MR 17, 702)
- [46] On the application of semigroups methods to some problems in coding *IRE Trans. Inf. Theory* IT-2 (1956) pp. 47-60
- [47] On some measures of information, *Third London Symposium on Information Theory*, London, (1956), pp. 18-25
- [48] (avec C. Berge) Jeux de Nim et solutions, *C.R. Acad. Sci. Paris* 242 (1956), 1672-1674 (MR 19, 621)
- [49] Sur une représentation des demi-groupes, *C.R. Acad. Sci. Paris* 242 (1956), 2907-2908 (MR 18, 13)

- [50] Sur deux représentations des demi-groupes finis, *C.R. Acad. Sci. 243* (1956), 1385-1387 (MR 18, 282)
- [51] \bar{D} -représentation des demi-groupes, *C.R. Acad. Sci. Paris 244* (1957), 1994-1996 (MR 19, 249)
- [52] Applications des \bar{D} -représentations à l'étude des homomorphismes des demi-groupes, *C.R. Acad. Sci. Paris 244* (1957), 2219-2221 (MR 19, 249)
- [53] Sur une propriété combinatoire des demi-groupes, *C.R. Acad. Sci. Paris 245* (1957), 16-18 (MR 19, 528)
- [54] A propos de l'inégalité de Fréchet-Cramer, *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris* (1958), 3-6 (MR 21 # 4498)
- [55] Sur une propriété combinatoire des algèbres de Lie libres pouvant être utilisée dans un problème de mathématiques appliquées, *Séminaire Dubreil-Pisot année 58-59*, Inst. Henri Poincaré, Paris, (1958)
- [56] Sur la représentation monomiale des demi-groupes, *C.R. Acad. Sci. Paris 246* (1958), 865-867 (MR 20 # 2384)
- [57] Sur les homomorphismes d'un demi-groupe sur un groupe, *C.R. Acad. Sci. Paris 246* (1958), 2442-2444 (MR 20 #1720)
- [58] On the quantization of finite dimensional messages, *Information and Control 1* (1958), 153-158 (MR 19, 1245)
- [59] A characterisation of certain polynomials of E.F. Moore & C. Shannon, *Quarterly Progress Reports of the Research Lab. of Electronics*, MIT, (1959), p. 117-118
- [60] Sur l'équation $a^{2+n} = b^{2+mc^{2+p}}$ dans un groupe libre, *C.R. Acad. Sci. Paris 248* (1959), 2435-2436 (MR 21 # 2000)
- [61] Sur certains sous-demi-groupes qui interviennent dans un problème de mathématiques appliquées, *Publ. Sci. Univ. Alger Sér. A 6* (1959), 85-90 (MR 23 # 2476)
- [62] Full decodable code-word sets, *IRE Trans. IT 5* (1959), 12-15 (MR 23 # B 3078)
- [63] Un problème de la théorie des automates, *Séminaire Dubreil-Pisot*,

- année 59-60*, Inst. Henri Poincaré, Paris, (1960)
- [64] Some Remarks on Chomsky context free languages, *Quarterly Progress Report RLE. MIT.* (1961), 68, pp. 155-170
 - [65] On a special class of recurrent events, *Ann. Math. Statist.* 32 (1961), 1201-1213 (MR 24 # A 3718)
 - [66] A remark on finite transducers, *Information and Control* 4 (1961), 185-196 (MR 26 # 1235)
 - [67] On the definition of a family of automata, *Information and Control* 4 (1961), 245-270 (MR 24 # B 1725)
 - [68] On a family of submonoids (Russian summary), *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutato Int. Közl.* 6 (1961), 381-391 (MR 26 # 3805)
 - [69] Finite counting automata, *Information and Control* 5 (1962), 91-107 (MR 27 # 4720)
 - [70] On a theorem of R. Jungen, *Proc. Amer. Math. Soc.* 13 (1962), 885-890 (MR 26 # 350)
 - [71] (avec M. Eden) Remark on a theorem of Dénes (Russian summary), *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutato Int. Közl.* 7 (1962), 353-355 (MR 30 # 1065)
 - [72] (avec R.C. Lyndon) The equation $a^M = b^Nc^P$ in a free group, *Michigan Math. J.* 9 (1962), 289-298 (MR 29 # 142)
 - [73] On probabilistic push-down storages, in *Self-Organizing Systems, Proceedings*, Spartan Books, Washington, (1962), 205-213
 - [74] (avec S. Sherman) On a formal product over the conjugate classes in a free group, *J. Math. Anal. Appl.* 7 (1963), 482-488 (MR 28 # 1230)
 - [75] Certain elementary families of automata, in *Proc. Sympos. Math. Theory of Automata*, Polytechnic Press of Polytechnic Institute of Brooklyn, Brooklyn, N.Y., (1963) (MR 29 # 5696)
 - [76] On context-free languages and push-down automata, *Information and Control* 6 (1963), 246-264 (MR 29 # 1109)

- année 59-60*, Inst. Henri Poincaré, Paris, (1960)
- [64] Some Remarks on Chomsky context free languages, *Quarterly Progress Report RLE. MIT.* (1961), 68, pp. 155-170
- [65] On a special class of recurrent events, *Ann. Math. Statist.* 32 (1961), 1201-1213 (MR 24 # A 3718)
- [66] A remark on finite transducers, *Information and Control* 4 (1961), 185-196 (MR 26 # 1235)
- [67] On the definition of a family of automata, *Information and Control* 4 (1961), 245-270 (MR 24 # B 1725)
- [68] On a family of submonoids (Russian summary), *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutato Int. Közl.* 6 (1961), 381-391 (MR 26 # 3805)
- [69] Finite counting automata, *Information and Control* 5 (1962), 91-107 (MR 27 # 4720)
- [70] On a theorem of R. Jungen, *Proc. Amer. Math. Soc.* 13 (1962), 885-890 (MR 26 # 350)
- [71] (avec M. Eden) Remark on a theorem of Dénes (Russian summary), *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutato Int. Közl.* 7 (1962), 353-355 (MR 30 # 1065)
- [72] (avec R.C. Lyndon) The equation $a^M = b^Nc^P$ in a free group, *Michigan Math. J.* 9 (1962), 289-298 (MR 29 # 142)
- [73] On probabilistic push-down storages, in *Self-Organizing Systems, Proceedings*, Spartan Books, Washington, (1962), 205-213
- [74] (avec S. Sherman) On a formal product over the conjugate classes in a free group, *J. Math. Anal. Appl.* 7 (1963), 482-488 (MR 28 # 1230)
- [75] Certain elementary families of automata, in *Proc. Sympos. Math. Theory of Automata*, Polytechnic Press of Polytechnic Institute of Brooklyn, Brooklyn, N.Y., (1963) (MR 29 # 5696)
- [76] On context-free languages and push-down automata, *Information and Control* 6 (1963), 246-264 (MR 29 # 1109)

- [77] Quelques remarques sur une construction de Schensted, *Math. Scand.* 12 (1963), 117-128 (MR 32 # 7433)
- [78] (avec N. Chomsky) The algebraic theory of context-free languages, in P. Brafford e D. Hirschberg (eds.), *Computer Programming and Formal Systems*, North Holland, Amsterdam, (1963), 118-161
- [79] On the synchronizing properties of certain prefix codes, *Information and Control* 7 (1964), 23-36 (MR 33 # 7199)
- [80] (avec J. Lariſse) Sur certaines chaînes de Markov non homogènes, *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris* 13 (1964), 57-66 (MR 31 # 198)
- [81] Sur certains sous-monoïdes libres, *Bull. Soc. Math. France* 93 (1965), 209-233 (MR 32 # 7666)
- [82] Sur une question concernant certains sous-monoïdes libres, *C.R. Acad. Sci. Paris* 261 (1965), 2419-2420 (MR 32 # 7364)
- [83] On finite monoids having only trivial subgroups, *Information and Control* 8 (1965), 190-194 (MR 31 # 1154)
- [84] A remark on incompletely specified automata, *Information and Control* 8 (1965), 373-376 (MR 32 # 3970)
- [85] On a factorisation of free monoids, *Proc. Amer. Math. Soc.* 16 (1965), 21-24 (MR 30 # 1205)
- [86] (avec J. Lariſse) Sur certaines chaînes de Markov non homogènes, in *Automata Theory*, Academic Press, New York, (1966), 239-250 (MR 36 # 7209)
- [87] Sur certaines variétés de monoïdes finis, in *Automata Theory*, Academic Press, New York, (1966), 314-319 (MR 34 # 5592)
- [88] On a family sets related to McNaughton's L-language, in *Automata Theory*, Academic Press, New York, (1966), 320-324 (MR 36 # 2448)
- [89] (avec M. Coudrain) Une condition de finitude des monoïdes finiment engendrés, *C.R. Acad. Sci. Paris Ser. A-B* 262 (1966), A1149-A1151 (MR 33 # 2742)

- [90] (avec M. Nivat) Sur les produits semi-droits de monoïdes, *C.R. Acad. Sci. paris Ser. A-B* 263 (1966), A659-A660 (MR 34 # 4395), errata em *C.R. Acad. Sci. Paris Ser. A-B* 264 (1967), A383 (MR 35 # 2983)
- [91] (avec F. Dejean) On a question of Eggan, *Information and Control* 9 (1966), 23-25 (MR 32 # 9164)
- [92] On a question concerning certain free submonoids, *J. Combinatorial Theory* 1 (1966), 437-442 (MR 36 # 1234)
- [93] Algorithms and the neo-darwinian theory of evolution, Wistar Institute Symposium, *Mathematical Challenge to the Neodarwinian theory of evolution*, (1967), pp. 73-80
- [94] On products of finite dimensional stochastic matrices, *Proc. Amer. Math. Soc.* 18 (1967), 850-853 (MR 36 # 6439)
- [95] A remark on acceptable sets of numbers, *J. Assoc. Comput. Mach.* 15 (1968), 300-303 (MR 38 # 6910)
- [96] On an enumeration problem, *J. Combinatorial Theory* 4 (1968) 219-221 (MR 36 # 1344)
- [97] Sur certains semi-groupes de matrices non negatives, *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie und Verw. Gebiete* 9 (1968), 265-269 (MR 37 # 2788)
- [98] Besson J., Gavaudan P., Schützenberger M.P., Sur l'existence d'une certaine corrélation entre le poids moléculaire des acides aminés et le nombre de triplets intervenant dans leurs codages, *Compt. rend. Acad. Sc.*, 268, (1969), 1342-1344
- [99] (avec A. Lentin) A combinatorial problem in the theory of free monoids, *Combinatorial Mathematics and its Applications*, Univ. North Carolina Press, Chapel Hill, N.C., 1969, 128-144 (MR 40 # 4389)
- [100] (avec S. Eilenberg) Rational sets in commutative monoids, *J. Algebra* 13 (1969), 173-191 (MR 40 # 254)
- [101] (avec D. Foata) *Théorie Géométrique des polynômes eulériens*, Lecture Notes in Mathematics, vol. 138, Springer-Verlag, Berlin, (1970) (MR 42 # 7523)

- [102] Une application de la théorie de la décomposition des monoïdes, in *Séminaire M.P. Schützenberger, A. Lentin et M. Nivat 1969/70 : Problèmes Mathématiques de la Théorie des Automates*, Secrétariat Mathématique, Paris, (1970) (MR 43 # 7532)
- [103] (avec D. Foata) On the rook polynomial of Ferrers relations, in *Combinatorial Theory and its Applications II*, North Holland, Amsterdam, 1970, 413-436 (MR 50 # 12738)
- [104] (avec D. Foata) On the principle of equivalence of Sparre Anderson *Math. Scand.* 28 (1971), A420-A421 (MR 46 # 7410)
- [105] Sur un théorème de G. de B. Robinson, *C.R. Acad. Sci. Paris Ser. A-B* 272 (1971), A420-A421 (MR 45 # 3595)
- [106] Sur les bases de Hall des algèbres de Lie libres, *manuscrito*, (1971)
- [107] Parties rationnelles d'un monoïde libre, *Actes Congrès. Inter. Math. Nice 1970, Vol. 3*, Gauthiers-Villars, Paris, (1971), 281-282
- [108] Promotion des morphismes d'ensembles ordonnés, *Discrete Math.* 2 (1972), 73-94 (MR 45 # 8587)
- [109] (avec D. Foata) Nombres d'Euler et permutations alternantes, in *A survey of Combinatorial Theory*, North Holland, Amsterdam, (1973), 173-187 (MR 50 # 6870)
- [110] A propos des relations rationnelles fonctionnelles, in *Automata Languages and Programming*, North Holland, Amsterdam, (1973), 103-114 (MR 52 # 7205)
- [111] Sur une construction de Gilbert de B. Robinson, in *Séminaire P. Dubreil (25^e année : 1971/72), Algèbre, Fasc. 1, Exp. N° 8*, Secrétariat Mathématique, Paris, (1973) (MR 52 # 13416)
- [112] Sur un langage équivalent au langage de Dyck, in *Logic, Methodology and Philosophy of Sciences IV*, North Holland, Amsterdam, (1973), 197-203
- [113] Une propriété des monoïdes libres, *C.R. Acad. Sci. Paris Ser. A* 278 (1974), 833-834 (MR 49 # 10801)
- [114] Sur les monoïdes finis dont les groupes sont commutatifs, *Rev. Française Automat. Informat. Recherche Opérationnelle Sér. Rouge* 8 (1974), 55-61 (MR 50 # 2382)

- [115] Sur certaines pseudo-variétés de monoïdes finis, in *Comptes Rendus des Journées Mathématiques, de la Société Mathématique de France, Cahiers Math. Montpellier, N° 3, U.E.R. de Math. Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, (1974), 317-327 (MR 51 # 10514)*
- [116] Sur une propriété syntactique des relations rationnelles, in *Automata Languages and Programming, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 14, Springer-Verlag, Berlin, (1974), 612-619.*
- [117] Sur les relations rationnelles, em *Automata Theory and Formal Languages 2nd GI Conference, Lecture Notes in Computer Science, vol. 33, Springer Verlag, Berlin, (1975), 209-213 (MR 52 # 16917)*
- [118] Sur des théorèmes de I. Simon, *manuscrit, (1975)*
- [119] Sur certaines opérations de fermeture dans les langages rationnels, *Symposia Matematica, Vol. XV, Academic Press, London, (1975), 245-253 (MR 54 # 9182)*
- [120] Evacuations, Colloquio Internazionale sulle Teorie Combinatorie, *Accademia Nazionale dei Lincei, Atti dei Convegni Lincei, 17, (1976), pp. 257-64*
- [121] (avec S. Eilenberg) On pseudovarieties, *Advances in Math. 19 (1976), 413-418 (MR 53 # 5431)*
- [122] Sur le produit de concaténation non ambigu, *Semigroup Forum 13 (1976), 47-75*
- [123] Sur une caractérisation des fonctions séquentielles, *Rapport de Recherche 176, INRIA, Paris, (1976)*
- [124] Sur les relations rationnelles entre monoïdes libres, *Theor. Comput. Sci. 3 (1976), 243-259*
- [125] Une caractérisation des parties reconnaissables, in *Formal Languages and Programming, North-Holland, Amsterdam, (1976), 77-82*
- [126] A property of finitely generated submonoids, in *Algebraic Theory of semigroups (G. Pollack ed.) North Holland (1976) 545-576*
- [127] (avec D. Perrin) Codes et sous-monoïdes possédant des mots neutres,

- Rapport de Recherche 214*, INRIA, Paris, (1977)
- [128] Une propriété de Hankel des relations fonctionnelles entre monoïdes libres, *Advances in Math.* 24 (1977), 274-280
- [129] Sur une variante des fonctions séquentielles, *Theor. Comput. Sci.* 4 (1977), 45-57
- [130] La correspondance de Robinson, in *Combinatoire et Représentation du Groupe Symétrique*, Lecture Notes in Mathematics, vol. 579, Springer Verlag, Berlin, (1977), 59-113
- [131] (avec D. Perrin) Un problème élémentaire de la théorie de l'information, *Rapport de Recherche 78-1*, L.I.T.P, Paris, (1978).
- [132] (avec D. Foata) Major index and inversion number of permutations, *Math, Nachr.*, 83 (1978) 143-159
- [133] (avec A. Lascoux) Sur une conjecture de H.O. Foulkes, *C.R. Acad. Sci. Paris* 286 (1978) 323
- [134] Sur certains sous-groupes d'un groupe libre, *Atti del Convegno del Istituto di Analisi Globale del CNR*, Firenze, (1979), pp. 1-29
- [135] (avec A. Lascoux) Croissance des polynômes de Foulkes-Green, *C.R. Acad. Sci. Paris* 288 (1979) 95
- [136] A propos du livre "On system Analysis" de D. Berlinski, *Rapport LITP 79-20* (1979)
- [137] (avec A. Lascoux) Le Monoïde Plaxique, in "Non Commutative structures " Napoli 1978 ,*Quaderni della Ricerca Sc.* 109 Roma (1981) 129-156
- [138] (avec A. Lascoux) A new statistics on words *Annals of Discr. Maths* 6 (1980) 251-255
- [139] Sur les sous-groupes de rang fini d'un groupe libre, *C.R. Acad. Sci.* 290 (1980) 207
- [140] (avec A. Lascoux) Polynômes de Kazhdan-Lusztig pour les grassmanniennes, *Astérisque n° 87-88* (1981) 249-266
- [141] (avec D. Perrin) A conjecture on sets of differences of integer pairs, *J. Comb. Th. B* 30 (1981) 91-93

- [142] (avec A. Lascoux) Structure de Hopf de l'anneau de cohomologie et de l'Anneau de Grothendieck de la variété de drapeaux, *C.R. Acad. Sci. Paris* 295 (1982) 629
- [143] La théorie de l'information, *Rapport LITP 82-17* (1982)
- [144] Schubert polynomials and the Littlewood-Richardson Rule, *Letters in Math. Physics* 10 (1985) 111-124
- [145] (avec A. Lascoux) Interpolation de Newton à plusieurs variables, in *Springer L.N. 1220* (1986)
- [146] (avec C. Choffrut) Décomposition de fonctions rationnelles, in *STACS 86, Lect. N. in Comp. Sci. 210* (1985) 213-226
- [147] (avec A. Lascoux) Formulaire raisonné de fonctions symétriques, *Publ. Univ. Paris 7* (1985)
- [148] (avec C. Choffrut) Counting with rational functions, in *Automata Languages and Programming, Lect. N. in Comp. Sc. 226*, Springer (1986) 79-88
- [149] (avec C. Reutenauer) A formula for the determinant of a sum of matrices *Letters in Math. Physics* (1987)
- [150] (avec A. Lascoux) Fonctionnalité des polynômes de Schubert *Contemporary Maths* - à paraître
- [151] (avec A. Lascoux) Symmetrization operators on polynomial rings (à paraître dans *Funct. Anal.* (en russe))

Marcel Paul Schützenberger
Né le 24 Octobre 1920 à Paris

Etats de service militaires Agent P1 du réseau Arc en Ciel (sous-réseau Turma-Vengeance) des Forces Françaises Combattantes 1.9.43 à 15.5.1944.

Diplômes obtenus

Docteur en Médecine (Paris 1948)
Docteur ès Sciences Mathématiques (Paris 1953)

Titres et fonctions occupées en France

Chargé de recherches à l'Institut National d'Hygiène 1948-1953
Maître de recherches au CNRS 1953-1957
Maître de Conférences, puis Professeur à la Faculté des Sciences de Poitiers 1957-1963
Directeur de Recherches au CNRS 1963-1964
Professeur à la Faculté des Sciences de Paris 1964-
Directeur Scientifique à l'Institut de Recherches en Informatique et Automatique 1968-1972
Membre correspondant de l'Académie des Sciences (Sc. Mécanique) 1979

Fonctions occupées à l'étranger

Professeur en visite MIT 1956-57
Etés 1959, 1961, 1970
U. of North Carolina 1960-1961
Harvard University 1961-1962
U. of Pennsylvania Printemps 1963
U. of California at Berkeley Printemps 1967
Université de Naples 1972-1973

Consultant IBM Research Center été 1962
Rand Corporation été 1966

Consultant

IBM Research Center été 1962
Rand Corporation été 1966
Direction scientifique de
l'Organisation Mondiale de la Santé
1969-1980
University of Southern California
Janvier 1988

Travaux de Marcel-Paul Schützenberger

1943

- [1943-1] Marcel-Paul Schützenberger. Sur la théorie des structures de Dedekind. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 216 :717–718, 1943. Séance du 6 janvier 1943.

1944

- [1944-1] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les structures de Dedekind. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 218 :818–819, 1944.

1945

- [1945-1] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certains axiomes de la théorie des structures. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 221 :218–220, 1945.

1946

- [1946-1] Marcel-Paul Schützenberger. Méthodes typologiques en sélection professionnelle. *Biotypologie*, 8(1–2) :106–107, juillet 1946.

1947

- [1947-1] Marcel-Paul Schützenberger. Remarques sur la notion de clivage dans les structures algébriques et son application aux treillis. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 224 :512–514, 1947. Séance du 20 janvier 1947.
- [1947-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certains treillis gauches. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 224 :776–778, 1947.
- [1947-3] Marcel-Paul Schützenberger. Remarques sur des relations d'ordre entre variables aléatoires indépendantes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 224 :878–880, 1947.
- [1947-4] Pierre Gavaudan, Hélène Poussel et Marcel-Paul Schützenberger. L'excitation des chimiorécepteurs de la langue par les substances du groupe des narcotiques indifférents et la règle thermodynamique de la narcose. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 224 :1525–1527, 1947.
- [1947-5] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certains paramètres caractéristiques des systèmes d'événements compatibles et dépendants et leur application au calcul des cumulants de la répétition. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 225 :277–278, 1947. Séance du 28 juillet 1947.
- [1947-6] Marcel-Paul Schützenberger. Axiomatisation de la géométrie dans un complexe linéaire de droites. *Revue Sci.*, 85e année (Fasc. 13) :782–784, 1er août 1947. No 3278.

1948

- [1948-1] Pierre Gavaudan, Hélène Poussel et Marcel-Paul Schützenberger. Le mécanisme physico-chimique de l'excitation sapide et la notion d'excitant indifférent. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 226 :751–752, 1948. Séance du 1er avril 1948.
- [1948-2] Pierre Gavaudan, Hélène Poussel, Georges Brebion et Marcel-Paul Schützenberger. L'étude des conditions thermodynamiques de l'excitation olfactive et les théories de l'olfaction. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 226 :1395–1396, 1948. Séance du 26 avril 1948.
- [1948-3] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Recherches statistiques sur la distribution du sexe à la naissance. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 226 :1845–1846, 1948. Séance du 31 mai 1948.
- [1948-4] Marcel-Paul Schützenberger. Valeurs caractéristiques du coefficient de corrélation par rang de Kendall dans le cas général. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 226 :2122–2123, 1948. Séance du 28 juin 1948.
- [1948-5] Marcel-Paul Schützenberger. Fidélité des tests. *Travail et Méthode*, pages 14–16, Novembre 1948.
- [1948-6] Marcel-Paul Schützenberger. Étude statistique d'un problème de sociométrie. *Gallica Biologica Acta*, 1 (Fasc. 1) :96–104, janvier - mars 1948.
- [1948-7] Pierre Gavaudan, Georges Brebion, Hélène Poussel et Marcel-Paul Schützenberger. Étude pharmacodynamique des chimiorécepteurs de l'olfaction. (1.) Principes et méthodes d'une étude thermodynamique de l'olfaction. *Gallica Biologica Acta*, 1 (Fasc. 2) :147–166, avril-juin 1948.
- [1948-8] Pierre Gavaudan, Hélène Poussel et Marcel-Paul Schützenberger. Étude pharmacodynamique des chimiorécepteurs de l'olfaction. (2.) L'étude thermodynamique des séries homologues et les théories de l'olfaction. *Gallica Biologica Acta*, 1 (Fasc. 2) :167–187, avril-juin 1948.
- [1948-9] Marcel-Paul Schützenberger. Remarques sur les relations aléatoires d'ordre et leur application à la psychologie. *Gallica Biologica Acta*, 1(Fasc. 2) :191–204, avril - juin 1948.
- [1948-10] Marcel-Paul Schützenberger. An abac for the simple range. *Psychometrika*, 13(2) :95–97, juin 1948.
- [1948-11] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certaines applications remarquables des treillis dans eux-mêmes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 227 :1008–1010, 1948. Séance du 3 novembre 1948.
- [1948-12] Marcel-Paul Schützenberger. *Contribution à l'étude statistique du sexe à la naissance*. Thèse en médecine, Faculté de Médecine de Paris, 1948. 52 pages, soutenue le 2 juillet 1948.

1949

- [1949-1] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Sur une asymétrie latérale statistique, attribut du phénotype sexuel humain. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 228 :431–432, 1949. Séance du 31 janvier 1949.
- [1949-2] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Sur la détermination du sexe chez l'homme. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 25(60) :2544–2545, 14 août 1949.
- [1949-3] Raymond Turpin, Marcel-Paul Schützenberger et M. Tisserand. Remarque sur la statistique des becs-de-lièvre. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 25(60) :2545–2546, 14 août 1949.
- [1949-4] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. L'étude des dermatoglyphes. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 25(60) :2553–2562, 14 août 1949.
- [1949-5] Marcel-Paul Schützenberger. Une application de l'analyse séquentielle. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 25(60) :2562–2564, 14 août 1949.
- [1949-6] Marcel-Paul Schützenberger. Résultats d'une enquête sur la distribution du sexe dans les familles nombreuses. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 25(61) :2579–2582, 18 août 1949.
- [1949-7] Marcel-Paul Schützenberger. Fondements de la statistique appliquée à la psychologie, I. Principes des tests statistiques. *Bull. Groupe Étude Psychol. Univ. Paris*, 2e année(Fasc. 8–9) :73–74, 11 mai 1949.

- [1949-8] Marcel-Paul Schützenberger. Fondements de la statistique appliquée à la psychologie, II. Estimation d'un paramètre inconnu. *Bull. Groupe Étude Psychol. Univ. Paris*, 2e année(Fasc. 10-11-12) :111-112, 23 mai 1949.
- [1949-9] Marcel-Paul Schützenberger. À propos de la "cybernétique" (mathématiques et psychologie). *Évolution Psychiatrique*, pages 585-607, 1949.
- [1949-10] Marcel-Paul Schützenberger. Sur l'extension des théorèmes de dualité aux treillis distributifs non complémentés. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 228 :33-35, 1949. Séance du 15 novembre 1948.
- [1949-11] Marcel-Paul Schützenberger. A non-existence theorem for an infinite family of symmetrical block designs. *Ann. Eugenics*, 14 :286-287, 1949.
- [1949-12] Henri Duchêne et Marcel-Paul Schützenberger. Quelques réserves sur la méthodologie de L. Szondi. *Inform. Psychiat.*, 25e année, 4e série(6) :210-216, juillet 1949.
- [1949-13] Anne Ancelin, Henri Duchêne et Marcel-Paul Schützenberger. Investigaciones críticas sobre la teoría y el test de L. Szondi. *Revista de Psicología General y Aplicada*, IV(11) :437-449, juillet-septembre 1949.
- [1949-14] Nicolas Kobozeff, Mme. Pomriaskinsky-Kobozeff et Marcel-Paul Schützenberger. Sur une différence pondérale à la naissance entre deux lignées de souris : *Mus musculus*. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 229 :1267-1268, 1949. Séance du 28 novembre 1949.

1950

- [1950-1] Anne Ancelin, Henri Duchêne et Marcel-Paul Schützenberger. Recherches critiques sur la théorie et le test de L. Szondi. *Enfance*, 3(1) :65-73, janvier - février 1950. A suscité une polémique reprise aux pages 484-486 du numéro 5 (nov.-déc.) du même volume.
- [1950-2] Henri Duchêne et Marcel-Paul Schützenberger. À propos du test de L. Szondi. *Inform. Psychiat.*, 26e année, 4e série(6) :225-226, 1950.
- [1950-3] Denise Deroche, Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Rapport entre le sexe des nouveaux nés et l'intervalle séparant leurs naissance. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 230 :335-336, 1950. Séance du 9 janvier 1950.
- [1950-4] Nicolas Kobozeff, Nadine Pomriaskinsky-Kobozeff et Marcel-Paul Schützenberger. Sur une différence pondérale entre deux lignées consanguines de *Mus musculus*. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 230 :240-241, 1950. Séance du 2 janvier 1950.
- [1950-5] Nicolas Kobozeff, Nathalie Pomriaskinsky-Kobozeff et Marcel-Paul Schützenberger. Sur une différence pondérale à l'âge adulte entre deux lignées consanguines de *Mus musculus*. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 230 :413-414, 1950. Séance du 16 janvier 1950.
- [1950-6] Pierre Gavaudan et Marcel-Paul Schützenberger. Le problème de la spécificité chimique dans les différences génétiques de la sensibilité gustative. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 230 :1622-1624, 1950. Séance du 3 mai 1950.
- [1950-7] Henri Duchêne et Marcel-Paul Schützenberger. Considérations sur l'accroissement de la population des hôpitaux psychiatriques. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 26(3) :105-108, 10 janvier 1950.
- [1950-8] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Sur la masculinité à la naissance dans les grossesses multiples. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 231 :1098-1099, 1950. Séance du 18 novembre 1950.
- [1950-9] Marcel-Paul Schützenberger. Nouvelles recherches sur la distribution du sexe à la naissance. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 26(86) :4458-4465, 22 novembre 1950.
- [1950-10] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Étude de la détermination du sexe chez l'homme. In *Atti del Quinto Congresso Nazionale di Nipiologia et delle Prime Giornate Internazionale Nipiologica*, Rapallo, 14-18 Maggio 1949, pages 3-8. G. B. Capelli, Varallo Sesia, 1950.
- [1950-11] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Sur la détermination du sexe chez l'homme. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 26(88) :4562-4563, 30 novembre 1950.

1951

- [1951-1] Henri Duchêne et Marcel-Paul Schützenberger. Bilan de la génétique vis-à-vis des problèmes de la stérilisation. *La Raison, Cahiers de psychopathologie scientifique*, 3 :10–22, 1951.
- [1951-2] Georges Darmois et Marcel-Paul Schützenberger. Étude statistique de diverses expériences radiesthésiques. In François Carac, Louis Barrabe, André Dognon, Georges Darmois et Marcel-Paul Schützenberger, editors, *La radiesthésie : études critiques*, pages 71–106. Publications de l'Union rationaliste, Éditions Rationalistes, Paris, Juin 1951.
- [1951-3] Raymond Turpin, Jacques Lefevre, Marcel-Paul Schützenberger et Jean Lérique. Analyse statistique du tracé électromyographique dans la tétanie. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 232 :552–553, 1951.
- [1951-4] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les rapports entre la quantité d'information au sens de Fisher et au sens de Wiener. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 232 :925–927, 1951.
- [1951-5] Marcel-Paul Schützenberger. Une généralisation de la notion de valuation pour les treillis quelconques et son application aux distributions de la statistique quantique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 232 :1805–1807, 1951.
- [1951-6] Marcel-Paul Schützenberger. An extension problem in the theory of incomplete block designs. *J. Roy. Statist. Soc. Ser. B.*, 13 :120–125, 1951.
- [1951-7] Maxime Lamotte et Marcel-Paul Schützenberger. Sur certains problèmes d'estimation dans les cas de double échantillonnage. *Biometrics*, 7 :275–282, 1951.
- [1951-8] Jean Ville et Marcel-Paul Schützenberger. Les problèmes de diagnostic séquentiel. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 232 :206–207, 1951.
- [1951-9] P. F. Denoix, Marcel-Paul Schützenberger et G. Viollet. Documents pour aider à l'étude des différentes causes du cancer du sein. *Bull. Assoc. Française Étude Cancer*, 38 :374–381, 1951.
- [1951-10] P. F. Denoix, Marcel-Paul Schützenberger et G. Viollet. Rapports entre l'âge au premier symptôme et certains aspects de la vie biologique de la femme dans une série de cancers de l'utérus et du sein. *Bull. Inst. Nat. Hyg.*, 6(4) :573–584, octobre–décembre 1951.

1952

- [1952-1] Jacqueline Rousseau et Marcel-Paul Schützenberger. Possibilité d'une estimation quantitative des hétéroauxines par le test *Marchantia*. *Comptes Rendus des Séances de la Société de Biologie et de ses filiales*, CXLVI(5–6) :429–431, mars 1952.
- [1952-2] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Sexe et gémeauté. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28(44) :1844–1848, 14 juin 1952.
- [1952-3] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Progénèse et gémeauté. *Acta geneticae medicae et gemellologiae*, 1(2) :159–169, mai 1952.
- [1952-4] Marcel-Paul Schützenberger, J. Senecal et Raymond Turpin. Consanguinité et tuberculose. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28(44) :1851–1854, 14 juin 1952.
- [1952-5] J. Barbet, Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Résultats d'une enquête sur le rôle de l'hérédité dans l'apparition des hernies inguinales et crurales. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28(44) :1854–1856, 14 juin 1952.
- [1952-6] Henri Duchêne, Marcel-Paul Schützenberger, J. Biro et B. Schmitz. Particularités de l'écart d'âge des couples dont le mari est alcoolique. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28(44) :1857–1859, 14 juin 1952.
- [1952-7] Marcel-Paul Schützenberger. Applications biométriques de la théorie de l'information. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28(44) :1859–1865, 14 juin 1952.
- [1952-8] Raymond Turpin, Henri Duchêne, Marcel-Paul Schützenberger et J. Sutter. De l'influence sur les caractères physio-pathologiques de l'enfant de son rang de naissance et de l'âge de ses progéniteurs. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 28(18) :747–749, 2 mars 1952.

- [1952-9] Marcel-Paul Schützenberger. Construction du treillis modulaire engendré par deux éléments et une chaîne finie discrète. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 235 :926–928, 1952.
- [1952-10] Anne Ancelin, Henri Duchêne et Marcel-Paul Schützenberger. Étude expérimentale du test de L. Szondi. In F. Baumgarten, editor, *La psychotechnique dans le monde moderne*, 9ième Cong. Intern. Psychotechnique, pages 168–179. Presses Universitaires de France, Berne, 1949, 1952.

1953

- [1953-1] P. F. Denoix, G. Denoix et Marcel-Paul Schützenberger. Contribution à l'étude du rôle des facteurs héréditaires dans le cancer. *Bull. Inst. Nat. Hyg.*, 8(2) :247–257, 1953.
- [1953-2] Y. Chabbert, G. Terrial et Marcel-Paul Schützenberger. Évolution de la sensibilité aux antibiotiques des germes isolés chez les malades de ville de 1949 à 1952. *Ann. Inst. Pasteur*, 84(5) :952–955, 1953.
- [1953-3] Marcel-Paul Schützenberger. Remarques sur le problème du codage binaire. *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 2 :125–128, 1953.
- [1953-4] Marcel-Paul Schützenberger. Une interprétation de certaines solutions de l'équation fonctionnelle : $F(x+y) = F(x)F(y)$. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 236 :352–353, 1953. Séance du 22 décembre 1952.
- [1953-5] Marcel-Paul Schützenberger. Sur l'extension d'un groupe de permutations d'un ensemble fini à l'ensemble des parties de celui-ci. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 236 :449–450, 1953. Séance du 26 janvier 1953.
- [1953-6] Marcel-Paul Schützenberger. Le problème des mots dans les treillis modulaires libres. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 237 :507–508, 1953. Séance du 26 janvier 1953.
- [1953-7] Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Remarques sur l'étude formelle de la consanguinité dans les populations monogames. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 29(76) :3974–3978, 14 décembre 1953.
- [1953-8] P. Lefever, Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Résultats d'une enquête sur l'influence des facteurs progénésiques sur les malformations humaines. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 29(76) :3973–3974, 14 décembre 1953.
- [1953-9] Gisèle Normant, Marcel-Paul Schützenberger et Raymond Turpin. Analyse statistique de l'activité d'un service parisien de pédiatrie. *Revue de l'Assistance Publique Paris*, 26 :844–850, 1953.

1954

- [1954-1] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une définition combinatoire des espaces vectoriels classiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 238 :2487–2488, 1954.
- [1954-2] Marcel-Paul Schützenberger. A tentative classification of goal-seeking behaviours. *J. Mental Sci.*, 100 :97–102, 1954.
- [1954-3] Marcel-Paul Schützenberger. Contribution aux applications statistiques de la théorie de l'information. *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 3(1-2) :3–117, 1954. (Thèse d'État).
- [1954-4] Marcel-Paul Schützenberger. Un treillis universel des géométries projectives. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 239 :1754–1756, 1954.

1955

- [1955-1] Marcel-Paul Schützenberger. Théorie combinatoire des relations bilinéaires classiques. *Bull. Sci. Math. (2)*, 79 :12–32, 1955.
- [1955-2] Marcel-Paul Schützenberger. Théorie combinatoire des relations bilinéaires classiques. II. *Bull. Sci. Math. (2)*, 79 :111–128, 1955.

- [1955-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les problèmes de communications métriques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 240 :724–726, 1955.
- [1955-4] Marcel-Paul Schützenberger. Les problèmes de diagnostic et l'axiomatic des informations. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 62 :222–226, 1955.
- [1955-5] Marcel-Paul Schützenberger. La statistique en psychiatrie. In *Encyclopédie médico-chirurgicale*, volume Psychiatrie-2, 37060-G10, pages 1–4. 1955.

1956

- [1956-1] M. H. Hecaen, J. de Ajuriaguerra et Marcel-Paul Schützenberger. De l'influence relative de l'hypertension intracrânienne et de la localisation sur les troubles psychiques au cours de tumeurs cérébrales. *Revue neurologique*, 94(3) :259–263, 1956. Séance du 2 février 1956.
- [1956-2] M. E. Martin, Ph. Paumelle et Marcel-Paul Schützenberger. Observation statistique sur le rang dans la fratrie des alcooliques. *Revue de l'alcoolisme*, 4(4) :109–112, 1956.
- [1956-3] Marcel-Paul Schützenberger. Une théorie algébrique du codage. In *Séminaire Dubreil-Pisot, année 1955-56*, Exposé No. 15, 27 février 1956, 24 pages. Inst. H. Poincaré, Paris, 1956.
- [1956-4] Marcel-Paul Schützenberger. Théorie du codage et des événements récurrents. In *Séminaire de calcul des probabilités*, 16 mars 1956, 11 pages. Publ. Inst. Statist. Univ. Paris, Inst. H. Poincaré, Paris, 1956.
- [1956-5] Marcel-Paul Schützenberger. Une théorie algébrique du codage. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 242 :862–864, 1956.
- [1956-6] Marcel-Paul Schützenberger. On the application of semigroup methods to some problems in coding. *IRE Trans. Inf. Theory*, IT-2 :47–60, 1956.
- [1956-7] Marcel-Paul Schützenberger. On some measures of information used in statistics. In *Third London Symposium on Information Theory, Sept. 12th to 16th, 1955*, pages 18–25. Butterworths Scientific Publications, London, 1956.
- [1956-8] Claude Berge et Marcel-Paul Schützenberger. Jeux de Nim et solutions. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 242 :1672–1674, 1956.
- [1956-9] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une représentation des demi-groupes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 242 :2907–2908, 1956.
- [1956-10] Marcel-Paul Schützenberger. Sur deux représentations des demi-groupes finis. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 243 :1385–1387, 1956.

1957

- [1957-1] Marcel-Paul Schützenberger. \overline{D} représentation des demi-groupes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 244 :1994–1996, 1957.
- [1957-2] Marcel-Paul Schützenberger. Applications des \overline{D} représentations à l'étude des homomorphismes des demi-groupes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 244 :2219–2221, 1957.
- [1957-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une propriété combinatoire des demi-groupes libres. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 245 :16–18, 1957.
- [1957-4] Marcel-Paul Schützenberger. Nouvelle démonstration du théorème de Schreier sur les sous-groupes d'un groupe libre par son extension au cas des demi-groupes. In *Séminaire Dubreil-Pisot, année 1957-58*, Exposé No. 6, 6 pages. Inst. H. Poincaré, Paris, 1957.
- [1957-5] Marcel-Paul Schützenberger. On some measure of "information" used in statistics. –, 1957. Traduit en russe.
- [1957-6] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une généralisation de l'inégalité minimax. *Cahiers du bureau universitaire de recherche opérationnelle*, Cahier No 2 :2–7, 1957. Institut de Statistique de l'Université de Paris, Inst. H. Poincaré, Paris.

- [1957-7] Marcel-Paul Schützenberger. La théorie de l'information. In *Cahiers d'actualité et de synthèse, Encyclopédie française*, pages 9–21. Société Nouvelle de l'Encyclopédie Française, Paris, 1957. (Supplément à la réédition de 1957 du tome I : "L'outillage mental" (édition originale 1937)).

1958

- [1958-1] Marcel-Paul Schützenberger. A propos de l'inégalité de Fréchet-Cramer. *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 7(3/4) :3–6, 1958.
- [1958-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une propriété combinatoire des algèbres de Lie libres pouvant être utilisée dans un problème de mathématiques appliquées. In *Séminaire Dubreil-Pisot, année 1958-59*, Exposé No. 1, 11 décembre 1958, 22 pages. Inst. H. Poincaré, Paris, 1958.
- [1958-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur la représentation monomiale des demi-groupes. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 246 :865–867, 1958.
- [1958-4] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les homomorphismes d'un demi-groupe sur un groupe. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 246 :2442–2444, 1958.
- [1958-5] Marcel-Paul Schützenberger. On the quantization of finite dimensional messages. *Information and Control*, 1 :153–158, 1958.
- [1958-6] Marcel-Paul Schützenberger. La méthode des modèles dans les sciences humaines. In *La méthode dans les sciences modernes*, Hors série de "Travail et Méthodes", pages 195–197. Éditions sciences et industries, Paris, 1958.

1959

- [1959-1] Marcel-Paul Schützenberger. A characteristic property of certain polynomials of E. F. Moore and C. Shannon. *Quarterly Progress Report of the Research Lab. of Electronics, MIT*, 66 :117–118, 1959.
- [1959-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur l'équation $a^{2+n} = b^{2+m}c^{2+p}$ dans un groupe libre. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 248 :2435–2436, 1959.
- [1959-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certains sous-demi-groupes qui interviennent dans un problème de mathématiques appliquées. *Publ. Sci. Univ. Alger Sér. A*, 6 :85–90, 1959.
- [1959-4] Marcel-Paul Schützenberger et R. S. Marcus. Full decodable code-word sets. *IRE Trans. Inf. Theory*, IT-5 :12–15, 1959.

1960

- [1960-1] Marcel-Paul Schützenberger. Un problème de la théorie des automates. In *Séminaire Dubreil-Pisot, année 1959-60*, Exposé No. 3, 6 pages. Inst. H. Poincaré, Paris, 1960.

1961

- [1961-1] Marcel-Paul Schützenberger. Some remarks on Chomsky's context-free languages. *Quarterly Progress Report of the Research Lab. of Electronics, MIT*, 68 :155–170, 1961.
- [1961-2] Marcel-Paul Schützenberger. On a special class of recurrent events. *Ann. Math. Statist.*, 32 :1201–1213, 1961.
- [1961-3] Marcel-Paul Schützenberger. A remark on finite transducers. *Information and Control*, 4 :185–196, 1961.
- [1961-4] Marcel-Paul Schützenberger. On the definition of a family of automata. *Information and Control*, 4 :245–270, 1961.

- [1961-5] Marcel-Paul Schützenberger. On a family of submonoids. *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutató Int. Közl.*, 6 :381–391, 1961.
- [1961-6] David D. Rutstein, Murray Eden et Marcel-Paul Schützenberger. Report on mathematics in the medical sciences. *New England J. Medecine*, 265 :172–176, 1961.

1962

- [1962-1] Marcel-Paul Schützenberger. Finite counting automata. *Information and Control*, 5 :91–107, 1962.
- [1962-2] Marcel-Paul Schützenberger. Certain infinite formal products and their combinatorial applications. In *Colloquium Comb. Methods Probab. Theory*, pages 58–63. Aarhus, 1962.
- [1962-3] Marcel-Paul Schützenberger. On a theorem of R. Jung. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 13 :885–890, 1962.
- [1962-4] Murray Eden et Marcel-Paul Schützenberger. Remark on a theorem of Dénes. *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutató Int. Közl.*, 7 :353–355, 1962.
- [1962-5] Roger C. Lyndon et Marcel-Paul Schützenberger. The equation $a^m = b^n c^p$ in a free group. *Michigan Math. J.*, 9 :289–298, 1962.
- [1962-6] Marcel-Paul Schützenberger. On probabilistic push-down storages. In *Self-Organizing Systems, Proceedings*, pages 205–213. Spartan Books, Washington, 1962.
- [1962-7] Marcel-Paul Schützenberger. On an abstract machine property preserved under the satisfaction relation. Technical Report NC-167, IBM Thomas Watson Research Center, 1962.
- [1962-8] Marcel-Paul Schützenberger. On the minimum number of elements in a cutting set of words. Technical Report NC-173, IBM Thomas Watson Research Center, 1962.
- [1962-9] Marcel-Paul Schützenberger. On a family of formal power series. 11 pages, manuscrit, mars 1962.

1963

- [1963-1] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les contraintes définissant certains modèles formels de langage. *Mathématiques et sciences humaines*, 4 :3–8, 1963. aussi paru dans les Cahiers mathématiques en 1970.
- [1963-2] Marcel-Paul Schützenberger et Steven Sherman. On a formal product over the conjugate classes in a free group. *J. Math. Anal. Appl.*, 7 :482–488, 1963.
- [1963-3] Marcel-Paul Schützenberger. Quelques remarques sur une construction de Schensted. In *Séminaire Dubreil-Pisot, année 1962-63*, Exposé 15, 4 mars 1963, 12 pages. Inst. H. Poincaré, Paris, 1963.
- [1963-4] Marcel-Paul Schützenberger. Certain elementary families of automata. In *Proc. Sympos. Math. Theory of Automata (New York, 1962)*, pages 139–153. Polytechnic Press of Polytechnic Inst. of Brooklyn, Brooklyn, New York, 1963.
- [1963-5] Marcel-Paul Schützenberger. On context-free languages and push-down automata. *Information and Control*, 6 :246–264, 1963.
- [1963-6] Marcel-Paul Schützenberger. Quelques remarques sur une construction de Schensted. *Math. Scand.*, 12 :117–128, 1963.
- [1963-7] Noam Chomsky et Marcel-Paul Schützenberger. The algebraic theory of context-free languages. In P. Braffort et D. Hirschberg, editors, *Computer Programming and Formal Systems*, pages 118–161. North-Holland, Amsterdam, 1963. Traduction : “Algebraische Theorie kontextfreier Sprachen”, *Kibern. Sb.*, Nov. Ser. 3, 195-242 (1966).

1964

- [1964-1] Marcel-Paul Schützenberger. On the synchronizing properties of certain prefix codes. *Information and Control*, 7 :23–36, 1964.
- [1964-2] Jean Larisse et Marcel-Paul Schützenberger. Sur certaines chaînes de Markov non homogènes. *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 13 :57–66, 1964.

1965

- [1965-1] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certains sous-monoïdes libres. *Bull. Soc. Math. France*, 93 :209–223, 1965.
- [1965-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les monoïdes finis n'ayant que des sous-groupes triviaux. In *Séminaire Dubreil-Pisot, année 1964-65*, Exposé 10, 6 pages. Inst. H. Poincaré, Paris, 1965.
- [1965-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une question concernant certains sous-monoïdes libres. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 261 :2419–2420, 1965.
- [1965-4] Marcel-Paul Schützenberger. On finite monoids having only trivial subgroups. *Information and Control*, 8 :190–194, 1965.
- [1965-5] Marcel-Paul Schützenberger. A remark on incompletely specified automata. *Information and Control*, 8 :373–376, 1965.
- [1965-6] Marcel-Paul Schützenberger. On a factorisation of free monoids. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 16 :21–24, 1965.
- [1965-7] Luigi Petrone et Marcel-Paul Schützenberger. Sur un problème de McNaughton. manuscrit, 12 pages, 1965. Euratom.
- [1965-8] Marcel-Paul Schützenberger. Codes à longueur variable, 1965. Lecture held in 1965, at a seminar in Royan, also published in *École de printemps "Théorie des codes"*, 1979, p. 247–271.
- [1965-9] Marcel-Paul Schützenberger. On the algebraic theory of automata. In Wayne A. Kalenich, editor, *Information Processing 65 : Proceedings of IFIP Congress 1965*, pages 27–29. Spartan Books, 1965.

1966

- [1966-1] Jean Larisse et Marcel-Paul Schützenberger. Sur certaines chaînes de Markov non homogènes. In *Automata Theory, Ravello 1964*, pages 239–250. Academic Press, New York, 1966.
- [1966-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certaines variétés de monoïdes finis. In *Automata Theory, Ravello 1964*, pages 314–319. Academic Press, New York, 1966.
- [1966-3] Marcel-Paul Schützenberger. On a family of sets related to McNaughton's L -language. In *Automata Theory, Ravello 1964*, pages 320–324. Academic Press, New York, 1966.
- [1966-4] Michel Coudrain et Marcel-Paul Schützenberger. Une condition de finitude des monoïdes finiment engendrés. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B*, 262 :A1149–A1151, 1966.
- [1966-5] Maurice Nivat et Marcel-Paul Schützenberger. Sur les produits semi-directs droits de monoïdes. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B*, 263 :A659–A660, 1966.
- [1966-6] Françoise Dejean et Marcel-Paul Schützenberger. On a question of Eggen. *Information and Control*, 9 :23–25, 1966.
- [1966-7] Marcel-Paul Schützenberger. On a question concerning certain free submonoids. *J. Combinatorial Theory*, 1 :437–442, 1966.
- [1966-8] Marcel-Paul Schützenberger. Le dialogue homme-machine à l'ère de l'ordinateur. *Les cahiers de l'institut de la vie*, 10 :43–44, octobre 1966.
- [1966-9] Marcel-Paul Schützenberger. Classification of Chomsky languages. In *Formal Language Description Languages for Computer Programming*, pages 100–104. North-Holland Publ. Co., 1966.

1967

- [1967-1] Maurice Nivat et Marcel-Paul Schützenberger. Errata : “Sur les produits semi-directs droits de monoïdes”. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B*, 264 :A383, 1967.
- [1967-2] Marcel-Paul Schützenberger. Algorithms and the neo-darwinian theory of evolution, preliminary working paper. In *Mathematical Challenge to the Neodarwinian Theory of Evolution, Wistar Institute Symposium*, page 121. 1967. Extended abstract.
- [1967-3] Marcel-Paul Schützenberger. Algorithms and the neo-darwinian theory of evolution. In *Mathematical Challenge to the Neodarwinian Theory of Evolution, Wistar Institute Symposium*, pages 73–80. 1967. Full paper.
- [1967-4] Marcel-Paul Schützenberger. On products of finite dimensional stochastic matrices. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 18 :850–853, 1967.
- [1967-5] Marcel-Paul Schützenberger. On synchronizing prefix codes. *Information and Control*, 11 :396–401, 1967.

1968

- [1968-1] Marcel-Paul Schützenberger. A remark on acceptable sets of numbers. *J. Assoc. Comput. Mach.*, 15 :300–303, 1968.
- [1968-2] Marcel-Paul Schützenberger. On an enumeration problem. *J. Combinatorial Theory*, 4 :219–221, 1968.
- [1968-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certains semi-groupes de matrices non négatives. *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie und Verw. Gebiete*, 9 :265–269, 1968.
- [1968-4] Noam Chomsky et Marcel-Paul Schützenberger. Théorie algébrique des langages “context-free”. In Maurice Gross, editor, *Les modèles en linguistique*, volume 9 of *Langages*, pages 77–118. Didier/Larousse, mars 1968. Traduit par G. Fauconnier.

1969

- [1969-1] Jacques Besson, Pierre Gavaudan et Marcel-Paul Schützenberger. Sur l’existence d’une certaine corrélation entre le poids moléculaire des acides aminés et le nombre de triplets intervenant dans leurs codages. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 268 :1342–1344, 1969.
- [1969-2] André Lentin et Marcel-Paul Schützenberger. A combinatorial problem in the theory of free monoids. In *Combinatorial Mathematics and its Applications (Proc. Conf., Univ. North Carolina, Chapel Hill, N.C., 1967)*, pages 128–144. Univ. North Carolina Press, Chapel Hill, N.C., 1969.
- [1969-3] Samuel Eilenberg et Marcel-Paul Schützenberger. Rational sets in commutative monoids. *J. Algebra*, 13 :173–191, 1969.
- [1969-4] Marcel-Paul Schützenberger. Langages formels et monoïdes finis. In *Séminaire Dubreil-Pisot, année 1969-70*, Exposé No. 3, 3 pages. Inst. H. Poincaré, Paris, 1969.

1970

- [1970-1] Dominique Foata et Marcel-Paul Schützenberger. *Théorie géométrique des polynômes eulériens*. Lecture Notes in Mathematics, Vol. 138. Springer-Verlag, Berlin, 1970.
- [1970-2] Marcel-Paul Schützenberger. Une application de la théorie de la décomposition des monoïdes. In *Séminaire M. P. Schützenberger, A. Lentin et M. Nivat, 1969/70 : Problèmes Mathématiques de la Théorie des Automates*, Exposé No. 5, 9 décembre 1969, 4 pages. Secrétariat mathématique, Paris, 1970.

- [1970-3] Dominique Foata et Marcel-Paul Schützenberger. On the rook polynomials of Ferrers relations. In *Combinatorial Theory and its Applications, II (Proc. Colloq., Balatonfüred, 1969)*, pages 413–436. North-Holland, Amsterdam, 1970.
- [1970-4] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les contraintes définissant certains modèles formels de langage. In *Cahiers mathématiques*, volume 3, algèbre et combinatoire, pages 41–48. Gauthier-Villars, Paris, 1970. reprise de l'article de 1963.
- [1970-5] Marcel-Paul Schützenberger. Health aspects of chemical and biological weapons. Report of a WHO group of consultants, World Health Organisation, 1970.
- [1970-6] Marcel-Paul Schützenberger. Santé publique et armes chimiques et biologiques. Rapport d'un groupe de consultants de l'OMS, Organisation Mondiale de la Santé, 1970. Version française.

1971

- [1971-1] Dominique Foata et Marcel-Paul Schützenberger. On the principle of equivalence of Sparre Anderson. *Math. Scand.*, 28 :308–316 (1972), 1971.
- [1971-2] Dominique Foata et Marcel-Paul Schützenberger. Nombres d'Euler et permutations alternantes. Technical report, University of Florida, 1971. unabridged version, 71 pages.
- [1971-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur un théorème de G. de B. Robinson. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B*, 272 :A420–A421, 1971.
- [1971-4] Marcel-Paul Schützenberger. Parties rationnelles d'un monoïde libre. In *Congrès International des Mathématiciens*, volume 3, pages 281–282. Gauthiers-Villars, Paris, 1971. Nice, septembre 1970.
- [1971-5] Marcel-Paul Schützenberger. Le théorème de Lagrange selon G. N. Raney. In *Séminaire IRIA, Automates et Langages*, pages 199–205. 1971.
- [1971-6] Marcel-Paul Schützenberger. On McNaughton's counter free languages. Technical report, Laboratorio di Cibernetica del C.N.R., Arco Felice, Napoli, 1971. 19 pages.

1972

- [1972-1] Marcel-Paul Schützenberger. Promotion des morphismes d'ensembles ordonnés. *Discrete Math.*, 2 :73–94, 1972.

1973

- [1973-1] Dominique Foata et Marcel-Paul Schützenberger. Nombres d'Euler et permutations alternantes. In *A Survey of Combinatorial Theory (Proc. Internat. Sympos., Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., 1971)*, pages 173–187. North-Holland, Amsterdam, 1973.
- [1973-2] Marcel-Paul Schützenberger. À propos du relation rationnelles fonctionnelles. In *Automata, Languages and Programming (Proc. Sympos., Rocquencourt, 1972)*, pages 103–114. North Holland, Amsterdam, 1973.
- [1973-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une construction de Gilbert de B. Robinson. In *Séminaire P. Dubreil, 25e année (1971/72), Algèbre, Fasc. 1*, Exp. No. 8, 4 pages. Secrétariat Mathématique, Paris, 1973.
- [1973-4] Marcel-Paul Schützenberger. Sur un langage équivalent au langage de Dyck. In P. Suppes et al., editor, *Logic, Methodology and Philosophy of Science, IV (Proc. Fourth Internat. Congr., Bucharest, 1971)*, pages 197–203. Studies in Logic and Foundations of Math., Vol. 74. North-Holland, Amsterdam, 1973.

1974

- [1974-1] Marcel-Paul Schützenberger. Une propriété des monoïdes libres. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A*, 278 :833–834, 1974.
- [1974-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les monoïdes finis dont les groupes sont commutatifs. *Rev. Française Automat. Informat. Recherche Opérationnelle Sér. Rouge*, 8(R-1) :55–61, 1974.
- [1974-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certaines pseudo-variétés de monoïdes finis. In *Comptes Rendus des Journées Mathématiques de la Société Mathématique de France (Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, 1974)*, pages 317–327. Cahiers Math. Montpellier, No. 3. U.E.R. de Math., Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, 1974.
- [1974-4] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une propriété syntactique des relations rationnelles. In *Automata, languages and programming (Second Colloq., Univ. Saarbrücken, Saarbrücken, 1974)*, volume 14 of *Lecture Notes in Comput. Sci.*, pages 612–619. Springer-Verlag, Berlin, 1974.

1975

- [1975-1] Marcel-Paul Schützenberger. Solution non commutative d’une équation différentielle classique. In E. R. Caianiello, editor, *New concepts and technologies in parallel information processing (Proc. NATO Adv. Study Inst., Capri, 1973)*, pages 381–401. NATO Adv. Study Inst. Ser. E : Appl. Sci., Vol. 9. Noordhoff, Leiden, 1975.
- [1975-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les relations rationnelles. In *Automata theory and formal languages (Second GI Conf., Kaiserslautern, 1975)*, pages 209–213. Lecture Notes in Comput. Sci., Vol. 33. Springer-Verlag, Berlin, 1975.
- [1975-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur certaines opérations de fermeture dans les langages rationnels. In *Symposia Mathematica, Vol. XV (Convegno di Informatica Teorica, INDAM, Roma, 1973)*, pages 245–253. Academic Press, 1975.
- [1975-4] Dominique Foata et Marcel-Paul Schützenberger. Quelques remarques sur une propriété d’équidistribution des permutations. In J. C. Bermond et R. Cori, editors, *Journées de combinatoire et informatique, 4, 5, 6 juin 1975*, pages 121–124. Université de Bordeaux 1, 1975.

1976

- [1976-1] Marcel-Paul Schützenberger. Evacuations. In *Colloquio Internazionale sulle Teorie Combinatorie (Rome, 1973), Tomo I*, pages 257–264. Atti dei Convegni Lincei, No. 17. Accad. Naz. Lincei, Rome, 1976.
- [1976-2] Samuel Eilenberg et Marcel-Paul Schützenberger. On pseudovarieties. *Adv. in Math.*, 19(3) :413–418, 1976.
- [1976-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur le produit de concaténation non ambigu. *Semigroup Forum*, 13(1) :47–75, 1976.
- [1976-4] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les relations rationnelles entre monoïdes libres. *Theoret. Comput. Sci.*, 3(2) :243–259, 1976.
- [1976-5] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une caractérisation des parties reconnaissables d’un monoïde libre. In *Journées algorithmiques (École Norm. Sup., Paris, 1975)*, pages 247–251. Astérisque, No. 38–39. Soc. Math. France, Paris, 1976.
- [1976-6] Marcel-Paul Schützenberger. Une caractérisation des parties reconnaissables. In *Formal languages and programming (Proc. Sem., UAM-IBM Sci. Center, Univ. Autónoma Madrid, Madrid, 1975)*, pages 77–82. North-Holland, Amsterdam, 1976.
- [1976-7] Marcel-Paul Schützenberger. Quelques problèmes posés par l’étude combinatoire des semi-groupes. In *Groupe d’étude d’algèbre, Marie-Paule Malliavin, année 1975-76*, Exposé No. 19, 28 mai 1976, 1 page. Inst. H. Poincaré, Paris, 1976.

1977

- [1977-1] Dominique Perrin et Marcel-Paul Schützenberger. Codes et sous-monoïdes possédant des mots neutres. In H. Tzschach, H. Waldschmidt et Hermann K.-G. Walter, editors, *Theoretical Computer Science (Third GI Conf., Darmstadt, 1977)*, volume 48 of *Lecture Notes in Comput. Sci.*, pages 270–281. Springer-Verlag, 1977.
- [1977-2] Marcel-Paul Schützenberger. Une propriété de Hankel des relations fonctionnelles entre monoïdes libres. *Adv. in Math.*, 24(3) :274–280, 1977.
- [1977-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sur une variante des fonctions séquentielles. *Theoret. Comput. Sci.*, 4(1) :47–57, 1977.
- [1977-4] Marcel-Paul Schützenberger. La correspondance de Robinson. In *Combinatoire et représentation du groupe symétrique (Actes Table Ronde CNRS, Univ. Louis-Pasteur Strasbourg, Strasbourg, 1976)*, volume 579 of *Lecture Notes in Math.*, pages 61–115. Springer-Verlag, 1977.

1978

- [1978-1] Marcel-Paul Schützenberger. Propriétés nouvelles des tableaux de Young. In *Séminaire Delange-Pisot-Poitou, 19e année : 1977/78, Théorie des nombres, Fasc. 2*, Exp. No. 26, 6 février 1978, 14 pages. Secrétariat Math., Paris, 1978.
- [1978-2] Dominique Perrin et Marcel-Paul Schützenberger. Un problème élémentaire de la théorie de l'information. In *Information theory (Proc. Internat. CNRS Colloq., Cachan, 1977) (French)*, volume 276 of *Colloq. Internat. CNRS*, pages 249–260. CNRS, Paris, 1978.
- [1978-3] Dominique Foata et Marcel-Paul Schützenberger. Major index and inversion number of permutations. *Math. Nachr.*, 83 :143–159, 1978.
- [1978-4] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Sur une conjecture de H. O. Foulkes. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B*, 286(7) :A323–A324, 1978.
- [1978-5] François Blanchard, Dominique Perrin et Marcel-Paul Schützenberger. Une application de la théorie ergodique au problème du codage. In *Mathématiques appliquées, 1er Colloque AFCET-SMF*, pages 209–223, Tome I. Palaiseau, 1978.

1979

- [1979-1] Marcel-Paul Schützenberger. A property of finitely generated submonoids of free monoids. In *Algebraic theory of semigroups (Proc. Sixth Algebraic Conf., Szeged, 1976)*, volume 20 of *Colloq. Math. Soc. János Bolyai*, pages 545–576. North-Holland, Amsterdam, 1979.
- [1979-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les sous groupes de rang fini d'un groupe libre. In G. Pirillo, editor, *Atti del Convegno su "Codage et Transductions"*, pages 1–29. Istituto di Analisi Globale del C.N.R., Firenze, 1979. 15-17 octobre.
- [1979-3] François Blanchard, Dominique Perrin et Marcel-Paul Schützenberger. On an application of ergodic theory to some problems on coding. In *Transactions Eighth Prague Conference on Information Theory*, pages 47–53. Czechoslovak Academy of Sciences, 1979.
- [1979-4] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Croissance des polynômes de Foulkes-Green. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B*, 288(2) :A95–A98, 1979.
- [1979-5] Marcel-Paul Schützenberger. À propos du livre "On system analysis" de D. Berlinski. Technical Report 79-80, LITP, 1979.
- [1979-6] Marcel-Paul Schützenberger. Mathématiques et linguistique. In *Séminaire sur les fondements des sciences*, number 92, pages 23–34. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1979.

1980

- [1980-1] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les sous-groupes de rang fini d'un groupe libre. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. A-B*, 290(5) :A207–A208, 1980.
- [1980-2] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. A new statistics on words. *Ann. Discrete Math.*, 6 :251–255, 1980. Combinatorial mathematics, optimal designs and their applications (Proc. Sympos. Combin. Math. and Optimal Design, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo., 1978).
- [1980-3] Maurice Gross et Marcel-Paul Schützenberger. On prétend que . . . In Lemoine et Gallouedec-Genuys, editors, *Les enjeux culturel de l'information*, volume 9 of *Informatisation et société*, pages 127–128. La Documentation Française, 1980.
- [1980-4] Maurice Gross et Marcel-Paul Schützenberger. Compléments sur le traitement automatique des langues naturelles. In Lemoine et Gallouedec-Genuys, editors, *Les enjeux culturel de l'information*, volume 9 of *Informatisation et société*, pages 135–142. La Documentation Française, 1980.
- [1980-5] Marcel-Paul Schützenberger. Sur l'analyse des systèmes. In Lemoine et Gallouedec-Genuys, editors, *Les enjeux culturel de l'information*, volume 9 of *Informatisation et société*, pages 205–215. La Documentation Française, 1980.

1981

- [1981-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Le monoïde plaxique. In *Noncommutative structures in algebra and geometric combinatorics (Naples, 1978)*, volume 109 of *Quad. "Ricerca Sci."*, pages 129–156. CNR, Rome, 1981.
- [1981-2] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Polynômes de Kazhdan & Lusztig pour les grassmanniennes. In *Young tableaux and Schur functors in algebra and geometry (Toruń, 1980)*, volume 87-88 of *Astérisque*, pages 249–266. Soc. Math. France, Paris, 1981.
- [1981-3] Dominique Perrin et Marcel-Paul Schützenberger. A conjecture on sets of differences of integer pairs. *J. Combin. Theory Ser. B*, 30(1) :91–93, 1981.

1982

- [1982-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Polynômes de Schubert. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. I Math.*, 294(13) :447–450, 1982.
- [1982-2] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Structure de Hopf de l'anneau de cohomologie et de l'anneau de Grothendieck d'une variété de drapeaux. *C. R. Acad. Sci. Paris Sér. I Math.*, 295(11) :629–633, 1982.

1983

- [1983-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Symmetry and flag manifolds. In *Invariant Theory (Montecatini, 1982)*, volume 996 of *Lecture Notes in Math.*, pages 118–144. Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- [1983-2] Marcel-Paul Schützenberger. The critical factorization theorem. In *Lothaire, Combinatorics on words*, volume 17 of *Encyclopedia of Math. and its Appl.*, pages 145–153. Addison-Wesley Publ. Co., Reading, Mass., 1983.
- [1983-3] Marcel-Paul Schützenberger. La théorie de l'information. In A. Lichnerowicz, F. Perroux et G. Gadoffre, editors, *Séminaire Interdisciplinaire du Collège de France*, Information et communication, pages 11–16. Maloine, Paris, 1983.

1984

- [1984-1] Marcel-Paul Schützenberger. Informatique et mathématiques. *C. R. Acad. Sci. Sér. Gén. Vie Sci.*, 1(3) :175–179, 1984.
- [1984-2] Marcel-Paul Schützenberger. Préface de “*Atomes et molécules biologiques dans l’univers des nombres*”, par Pierre Gavaudan. Sorgues, 1984.
- [1984-3] Marcel-Paul Schützenberger. Préface de “*Variétés de langages formels*” par Jean-Éric Pin. Masson, 1984.

1985

- [1985-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Interpolation de Newton à plusieurs variables. In *Séminaire d’algèbre Paul Dubreil et Marie-Paule Malliavin, 36ème année (Paris, 1983–1984)*, volume 1146 of *Lecture Notes in Math.*, pages 161–175. Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- [1985-2] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Schubert polynomials and the Littlewood-Richardson rule. *Lett. Math. Phys.*, 10(2-3) :111–124, 1985.

1986

- [1986-1] Christian Choffrut et Marcel-Paul Schützenberger. Décomposition de fonctions rationnelles. In *STACS 86 (Orsay, 1986)*, volume 210 of *Lecture Notes in Comput. Sci.*, pages 213–226. Springer-Verlag, 1986.
- [1986-2] Christian Choffrut et Marcel-Paul Schützenberger. Counting with rational functions. In *Automata, languages and programming (Rennes, 1986)*, volume 226 of *Lecture Notes in Comput. Sci.*, pages 79–88. Springer-Verlag, 1986.

1987

- [1987-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Symmetrization operators in polynomial rings. *Functional Anal. Appl.*, 21(4) :324–326, 1987. Publié dans *Funktsional. Anal. i Prilozhen.* 21 (1987), no. 4, 77–78.
- [1987-2] Christophe Reutenauer et Marcel-Paul Schützenberger. A formula for the determinant of a sum of matrices. *Lett. Math. Phys.*, 13(4) :299–302, 1987.
- [1987-3] Marcel-Paul Schützenberger. Systèmes auto-adaptatifs, théorie et pratique. In M. Delsol et M. Durchon, editors, *Évolution, histoire, philosophie*, pages 145–153. Fondation Singer-Polignac, Masson, 1987. Hommage au Professeur Pierre-Paul Grasse.

1988

- [1988-1] Christian Choffrut et Marcel-Paul Schützenberger. Counting with rational functions. *Theoret. Comput. Sci.*, 58(1-3) :81–101, 1988. Thirteenth International Colloquium on Automata, Languages and Programming (Rennes, 1986).
- [1988-2] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Arêtes et tableaux. In *20e Séminaire Lotharingien de Combinatoire*, pages 109–120. Alghero, 1988.
- [1988-3] Marcel-Paul Schützenberger. Préface de “*Evolution : une théorie en crise*”, par Michael Denton. Edition Londreys, Paris, 1988. Édition originale : *Evolution : a theory in crisis*, Burnett Books, 1985.
- [1988-4] Marcel-Paul Schützenberger. La métaphore informatique. In *Informatique et connaissance*, pages 45–63. UER de philosophie, Université Charles de Gaulle Lille III, 1988. Conférence en novembre 1983.

1989

- [1989-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Functorialité des polynômes de Schubert. In *Invariant Theory (Denton, TX, 1986)*, volume 88 of *Contemp. Math.*, pages 585–598. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 1989.
- [1989-2] Marcel-Paul Schützenberger. Le duel mathématique. In Y. Bonnefoy, A. Lichnerowicz et M. P. Schützenberger, editors, *Vérité poétique et vérité scientifique, mélanges offerts à Gilbert Gadoffre*, pages 261–268. Presses Universitaires de France, 1989.
- [1989-3] Marcel-Paul Schützenberger. Intelligence artificielle, neo-darwinisme et principe anthropique. In J. Delumeau, editor, *Le Savant et la Foi*, pages 273–283. Flammarion, 1989.
- [1989-4] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Tableaux and noncommutative Schubert polynomials. *Functional. Anal. Appl.*, 23(3) :63–64, 1989. La traduction anglaise est aux pages 223-225 de la version anglaise.
- [1989-5] Marcel-Paul Schützenberger. Décomposition polynomiale des fonctions rationnelles. In J.-E. Pin, editor, *Formal Properties of Finite Automata and Applications (Ramatuelle, 1988)*, volume 386 of *Lecture Notes in Comput. Sci.*, pages 25–33. Springer-Verlag, 1989.

1990

- [1990-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Keys & standard bases. In D. Stanton, editor, *Invariant theory and tableaux (Minneapolis, MN, 1988)*, volume 19 of *IMA Vol. Math. Appl.*, pages 125–144. Springer-Verlag, 1990.
- [1990-2] Marcel-Paul Schützenberger. Sur les modèles mathématiques. Propos d’un mathématicien philomate. In *La Société philomatique de Paris et deux siècles de science en France : Colloque du bicentenaire de la Société philomatique de Paris*, pages 83–88. Presses Universitaires de France, 1990.
- [1990-3] Marcel-Paul Schützenberger. Sens et évolution. In Jacques Arsac et Philippe Sentis, editors, *Science et sens*, pages 97–98. Vrin, 1990. Publications de l’Institut Interdisciplinaire d’Études Epistémologiques, Actes du colloque organisé dans le cadre de l’Académie Meudonaise.

1991

- [1991-1] Christophe Reutenauer et Marcel-Paul Schützenberger. Minimization of rational word functions. *SIAM J. Comput.*, 20(4) :669–685, 1991.

1992

- [1992-1] Dominique Perrin et Marcel-Paul Schützenberger. Synchronizing prefix codes and automata and the road coloring problem. In *Symbolic dynamics and its applications (New Haven, CT, 1991)*, volume 135 of *Contemp. Math.*, pages 295–318. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 1992.
- [1992-2] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Décompositions dans l’algèbre des différences divisées. *Discrete Math.*, 99(1-3) :165–179, 1992.
- [1992-3] Christophe Reutenauer et Marcel-Paul Schützenberger. Rational word functions : characterization and minimization. In *Words, Languages and Combinatorics (Kyoto, 1990)*, pages 435–443. World Sci. Publishing, River Edge, NJ, 1992.

1993

- [1993-1] Paul Moszkowski et Marcel-Paul Schützenberger. Planarity properties of the Schensted correspondence. *Adv. in Math.*, 102(1) :1–19, 1993.

- [1993-2] Marcel-Paul Schützenberger. “*Et aussi avec Charles Darwin*” Préface à “*Pour en finir avec le darwinisme, une nouvelle logique du vivant*”, par Rosine Chandebois. Editions Espaces 34, 1993.

1994

- [1994-1] Marcel-Paul Schützenberger. Une sortie au sujet de la théorie des nombres parfaits. *Conjonctures*, 20-21 :215–223, 1994. aussi dans “Acte créateur”.

1995

- [1995-1] Marcel-Paul Schützenberger. Pour en finir avec le darwinisme. *Conjonctures*, 22 :115–126, 1995.
[1995-2] Christophe Reutenauer et Marcel-Paul Schützenberger. Variétés et fonctions rationnelles. *Theoret. Comput. Sci.*, 145(1-2) :229–240, 1995.

1996+

- [1996-1] Alain Lascoux et Marcel-Paul Schützenberger. Treillis et bases des groupes de Coxeter. *Electron. J. Combin.*, 3(2) :Research paper 27, approx. 35 pp. (electronic), 1996.
[1997-2] Marcel-Paul Schützenberger. Une sortie au sujet de la théorie des nombres parfaits. In R. Ellrodt, G. Gadoffre et J.-M. Maulpoix, editors, *L’acte créateur*, Collection Écriture, pages 233–240. Presses Universitaires de France, 1997. aussi parue dans *Conjonctures*.
[1997-3] Marcel-Paul Schützenberger. Pour le monoïde plaxique. *Math. Inform. Sci. Humaines*, 140 :5–10, 1997.
[2000-4] Alain Connes, André Lichnerowicz et Marcel-Paul Schützenberger. *Triangle de pensées*. Odile Jacob, Paris, 2000.

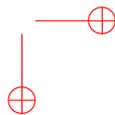
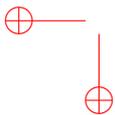
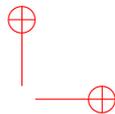
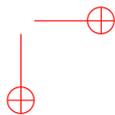
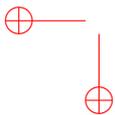
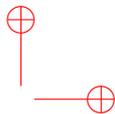
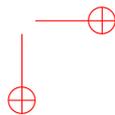
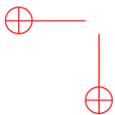
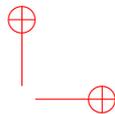


Table des matières

Tome XIII

Introduction	iii
Tribunes	1
0-1 Centre Mondial: l'Université en colère	1
0-2 Vous avez dit: "Intelligence artificielle" ?	4
0-3 La réforme de l'orthographe	6
0-4 L'homéopathie: mythe ou réalité	9
0-5 D'un horloger à l'autre	12
Entretiens	13
0-6 Marcel Schutzenberger: les chantres de l'interdisciplinarité	13
0-7 Une cellule est bien plus complexe qu'un Boeing 747	15
0-8 Les failles du darwinisme	20
0-9 The Miracles of Darwinism	25
Divers	32
0-10 L'algèbre et les jeux	32
Radios	35
0-11 Des divertissements et des jeux	35
0-12 La notion d'information en cybernétique	41
Titres et travaux	45
0-13 Titres et travaux (1956)	45
0-14 Titres et travaux (1988)	82
Liste des travaux	123
0-15 Liste des travaux	123





Marcel-Paul Schützenberger

ŒUVRES COMPLÈTES

éditées par Jean Berstel, Alain Lascoux et Dominique Perrin

Les treize tomes de cette édition contiennent l'ensemble des œuvres de Marcel-Paul Schützenberger qui ont fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique ou un livre. Ses travaux couvrent une période de plus de 50 ans, depuis sa première note aux Comptes Rendus en 1943 jusqu'à son dernier article, paru en 1997.

Les publications sont présentées dans l'ordre chronologique. Chaque tome est précédé d'une courte introduction qui essaie d'éclairer certains des travaux, tant pour leur intérêt scientifique intrinsèque que pour l'écho qu'ils ont rencontré et les développements qu'ils ont suscités.

Tome 13 : Écrits divers

Ce treizième et dernier tome contient les écrits d'une autre nature ou qui ont paru sous une forme différente.

En prise directe avec l'actualité de l'époque, la tribune contre le Centre Mondial qui a eu une existence éphémère au début des années 1980, ou aussi la prise de position sur l'intelligence artificielle, quelques années plus tard. Une série d'interviews parus dans Dynasteurs culmine avec le célèbre article sur le darwinisme, paru en 1996 dans La Recherche.

Ce volume contient aussi les canevas de deux émissions radiophoniques, sur la théorie des jeux et la théorie de l'information, réalisées par F. Le Lionnais et auxquelles a participé M.-P. Schützenberger, la première avec C. Berge. Sont inclus dans ce volume deux notices personnelles, rédigées pour sa candidature à l'Université de Poitiers en 1956, et à l'Académie des Sciences, à laquelle il a été élu en 1988.