

Actes du 3^{ème} colloque sur,
Histoire de l'Informatique
Sophia-Antipolis, 13-15 octobre 1993,

Actes édités par l'I NRIA à Sophia-Antipolis.

L'article est :

Les idées, toujours d'actualité, de l'inventeur du premier ordinateur, le Dr.-Ing. Konrad Zuse,
pages 64-85

Cet article, a été écrit en français par :

-Daniel M. Dubois, Ingénieur Civil Physicien et Docteur en Sciences Appliquées de l'Université de Liège.

Le présent fichier PDF inclut la page de couverture des Actes du Colloque et fournit un scan des 22 pages de l'article.

Le lecteur est invité à regarder particulièrement :

- (page 66, 67, 71) Konrad Zuse, après avoir travaillé dans l'Allemagne hitlérienne, a travaillé au Centre de Calcul de Zurich ; il est intervenu à Liège en 1981,
- (page 68) Konrad Zuse dit avoir commencé ses recherches en 1935, en ne connaissant rien sur les idées des chercheurs antérieurs, et il ne mentionne pas avoir connu les idées de Alan Turing dont la publication clef date de 1936. Pourtant les idées dites par Zuse dans son annexe (page 80) comme datées de 1945 ont de nombreux points communs avec les idées de Turing, mais la page 69 montre que son « Plan Calcul » (page 72) date de l'Après-guerre
- (page 69) les idées de circuits logiques utilisant des tubes électroniques viennent de Helmut Schreyer,
- (pages 69, 70) Konrad Zuse est parti à la guerre dans les armées d'Hitler, et il revient à la vie civile malgré la guerre qui continue, cela grâce à l'intervention de personnes de l'industrie aéronautique allemande très demandée par l'armée de l'Air allemande,
- (page 69) la machine Z4 de Konrad Zuse date d'après la guerre, et il semble alors avoir connu les idées de Turing, au moins à travers la réalisation de l'ENIAC (1944) par Eckert et Mauchly, et les travaux d'Aïken ; il parle aussi de John von Neumann (page 71), et en ce qui concerne l'algèbre de Boole (page 71) il ne dit pas à quelle époque il en a eu connaissance,
- (page 70) les machines de l'Après-guerre et le rôle du constructeur Siemens,
- (page 73) le regard de Konrad Zuse sur le futur,
- (pages 74 à 79) sur les automates cellulaires irréguliers, un concept qui daterait de 1973 (page 75),
- (pages 80 à 83) l'émancipation du traitement des données, avec un langage orienté objet,
- (page 82) les méthodes de gestion de production, les automatisations et les réseaux de Petri,

Pour utiliser ce document, mentionnez l'auteur Daniel Dubois, les Actes du 3ème colloque sur l'Histoire de l'Informatique, 1993, ainsi que la Base de Données ACONIT n° 20538-36.

Il est rappelé que la loi sur les droits d'auteur n'autorise que les reproductions partielles de documents à titre individuel et pour des motifs de recherche.



3ème COLLOQUE
HISTOIRE DE L'INFORMATIQUE

13 - 15 Octobre 1993

Sophia Antipolis
FRANCE

**LES IDEES, TOUJOURS D'ACTUALITE, DE L'INVENTEUR
DU PREMIER ORDINATEUR, LE DR. ING. K. ZUSE**

Daniel M. DUBOIS

UNIVERSITE DE LIEGE
Institut de Mathématique (D1)
Av. des Tilleuls, 15
B-4000 LIEGE, BELGIQUE

TEL: 32-41-669496 FAX: 32-41-669547

Résumé

Cet article a pour objectif de montrer la richesse et l'originalité de toutes les idées du Prof. K. ZUSE, l'inventeur du premier ordinateur. Certaines de ces idées sont réalisées, mais la plupart sont encore des questions ouvertes aujourd'hui. Elles nous étonnent toujours maintenant alors que nous sommes pourtant dans un monde technologique dont l'évolution ne devrait plus nous étonner en rien. Il arrive bien souvent que des idées originales présentées par des scientifiques ou industriels peu connus sont parfois considérées sans avenir réel pour l'avancement de la connaissance. Si un de ces "outsider", comme K. Zuse, réalise une oeuvre originale qui finalement est reconnue par la communauté scientifique, alors il est des plus intéressant d'analyser l'ensemble des idées qu'il a émises, même si celles-ci ne sont pas encore réalisées. Elles ont une forte probabilité de constituer un jour de nouvelles bases pour la science.

**LES IDEES, TOUJOURS D'ACTUALITE, DE L'INVENTEUR
DU PREMIER ORDINATEUR, LE DR. ING. K. ZUSE**

Daniel M. DUBOIS

UNIVERSITE DE LIEGE
Institut de Mathématique (D1)
Av. des Tilleuls, 15
B-4000 LIEGE, BELGIQUE

TEL: 32-41-669496 FAX: 32-41-669547

INTRODUCTION

Cet article a pour objectif de montrer la richesse et l'originalité de toutes les idées du Prof. K. ZUSE. Certaines de ces idées sont réalisées, mais la plupart sont encore des questions ouvertes aujourd'hui. Elles nous étonnent toujours maintenant alors que nous sommes pourtant dans un monde technologique dont l'évolution ne devrait plus nous étonner en rien.

Pourquoi ai-je proposer un article à ce Colloque Européen sur l'histoire de l'informatique? Pour éclairer certains aspects historiques liés à un pionnier de l'informatique.

D'abord, des informations inexactes ont été publiées au sujet de K. Zuse.

Par exemple, dans "Le livre mondial 93 des inventions" dirigé par Valérie-Anne Giscard D'Estaing, il est écrit: "En 1944, Zuse travaillait sur le Z4, toujours à relais, mais toutes ses machines furent détruites lors des bombardements de Berlin."

Or, K. Zuse a raconté dans sa biographie:

"Si je voulais sauver le Z 4, il fallait quitter Berlin pour un région moins exposée. Au terme d'une odyssée pleine de périls, quelques amis et moi-même atteignirent la Haute-Bavière; un village alpestre nous accueillit, où nous allions rester un bon bout de temps, la machine et nous".

Ensuite, l'histoire de l'informatique nous montre que des idées originales inacceptées au moment de leur découvertes sont redécouvertes ou acceptées bien plus tard, mais mises en oeuvre par d'autres! Voir à ce propos, l'article "Le calculateur mécanique de Charles Babbage" de Doron Swade (in Pour la SCIENCE, avril 1993). K. Zuse, quant à lui, a réussi de son vivant à réaliser le rêve de sa vie: construire un ordinateur, depuis les concepts de base jusqu'à la commercialisation, seul et contre tous. Aujourd'hui, les scientifiques et les industriels sont financés, soutenus et encouragés par les programmes des Communautés Européennes pour atteindre des objectifs de cette ampleur.

Enfin, il arrive bien souvent que des idées originales présentées par des scientifiques ou industriels peu connus sont parfois considérées sans avenir réel pour l'avancement de la connaissance. Si un de ces "outsider", comme K. Zuse, réalise une oeuvre originale qui finalement est reconnue par la communauté scientifique, alors il est des plus intéressant d'analyser l'ensemble des idées qu'il a émises, même si celles-ci ne sont pas encore réalisées. Elles ont une forte probabilité de constituer un jour de nouvelles bases pour la science. En effet, les hommes, de tout temps, ont eu des théories bien arrêtées sur les questions fondamentales et, dès lors, ont des difficultés à accepter de nouvelles idées originales qui les ébranleraient si elles étaient prises en compte. Comme le dit K. Zuse, "Les physiciens doivent adhérer strictement aux phénomènes et théories prouvées par des expériences.". Or certains physiciens essayent parfois de valider leurs théories en leur ajoutant des prothèses ad hoc pour s'accorder avec les données expérimentales, au lieu de repenser le problème à la base. K. Zuse a eu l'audace d'esprit de reformuler fondamentalement des théories considérées comme établies, comme les extraits donnés dans cet article le démontrent bien.

K. ZUSE, HISTORIQUEMENT, L'INVENTEUR DE L'ORDINATEUR

Lors de l'Assemblée générale de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Université de Liège, A.I.Lg., du 15 mars 1981, le Président Général, Monsieur le Professeur Charles Massonnet, s'est exprimé en ces termes:

"Sur proposition de notre Comité Scientifique, notre Conseil d'Administration a décerné la Médaille Gustave TRASENSTER au Professeur Konrad ZUSE.

Je rappelle que la Médaille Gustave TRASENSTER "est destinée à honorer l'oeuvre d'un savant ou d'un inventeur dont les travaux rentrent dans le cadre des sciences pures ou appliquées enseignées à la Faculté des Sciences appliquées de l'Université de Liège".

Avant d'inviter Monsieur le Doyen CANTRAINE à donner connaissance du rapport du Comité Scientifique, je voudrais dire que je me suis personnellement joint à la proposition de M. Ribbens et M. Cantraine, parce que je connais les travaux de M. ZUSE depuis 1953 (Centre de Calcul de Zurich) et que je le considère comme le véritable inventeur des ordinateurs.

Le règlement d'attribution de la Médaille TRASENSTER stipule que cette distinction scientifique est destinée à honorer l'oeuvre d'un savant ou d'un inventeur dont les travaux ont marqué l'époque contemporaine. La personne qui, sur proposition du Comité Scientifique, a été retenue en 1981 par le Conseil d'Administration mérite à la fois ces deux titres d'inventeur et de savant." (Ch. Massonnet, 1981)

Le Dr. Ing. K. Zuse reçoit alors la Médaille Trasenster de l'A.I.Lg des mains du Doyen de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège, le Professeur G. Cantraine, qui s'exprime en ces termes:

"Monsieur Konrad ZUSE est né en 1910 et a accompli en Allemagne des études supérieures aboutissant au titre de Docteur-Ingénieur. Ces études étaient à peine achevées, il y a cinquante ans, que Monsieur ZUSE, frappé par le caractère fastidieux des calculs techniques et scientifiques, se sentit animé par la volonté qui ne le quitta plus jamais de réaliser des dispositifs matériels, qui de manière automatique, pourraient exécuter des processus de calcul numérique.

Avec des moyens très réduits et des contraintes technologiques telles que l'obligation

de réaliser par des moyens artisanaux certains composants électro-mécaniques, le jeune ingénieur Zuse parvient en deux ans à mettre au point l'appareil Z1, qui, en 1936, est une machine à calculer en avance sur son temps. D'étape en étape, l'inventeur présente en 1941, une machine à relais Z3, qui pour la première fois au monde exécute un programme séquentiel. Il s'agit bien de la naissance du tout premier ordinateur, au plein sens actuel.

Dans l'esprit de l'inventeur, l'ensemble de règles qui permettent de préparer un programme exécutable devient rapidement l'objet d'une préoccupation majeure. Ainsi, en 1943, Monsieur ZUSE achève un travail intitulé "Théorie du Calcul" qui est l'amorce d'un travail beaucoup plus ambitieux sorti cinq ans plus tard. L'objet en est la planification des algorithmes de calcul et la substance correspond à ce qu'on appelle aujourd'hui un langage de programmation.

Pendant quinze à vingt ans, la portée des travaux de ZUSE n'a pas été comprise et la renommée de l'inventeur et du penseur ne s'établit en fin de compte qu'après que l'ordinateur et le concept de langage de programmation aient été réinventés ailleurs avec plusieurs années de décalage.

Il faut dire qu'à ce moment, le Docteur ZUSE est à l'âge mûr et a devant lui une brillante carrière académique à Zürich, Berlin et Göttingen.

Les travaux les plus avancés et les plus hautes récompenses alternent.

Plus tard, la communauté scientifique allemande ponctuera avec éclat les soixantième et soixante-dixième anniversaires du Professeur ZUSE, aujourd'hui jouissant d'une heureuse retraite que chacun lui souhaite très longue.

En suggérant à leur Association d'Ecole, de décerner la médaille TRASENSTER au Professeur ZUSE, un groupe de professeurs de la Faculté des Sciences Appliquées de Liège a voulu réagir contre l'attitude fréquente des épistémologistes qui partant de BABBAGE, citent les travaux théoriques de BOOLE et TURING et arrivent à l'américain AIKEN dans l'ignorance complète du grand précurseur européen qui nous fait l'honneur d'être parmi nous aujourd'hui.

Que cette médaille représente pour Monsieur ZUSE le symbole d'un contact chaleureux avec Liège et la certitude du profond respect que son nom inspire aux générations actuelles d'étudiants, de chercheurs, d'industriels.

Que la brièveté de cette présentation soit considérée par notre hôte comme un indicible signe d'hommage. Il y a quelques dizaines d'années déjà, cette médaille TRASENSTER était attribuée au Professeur FERMI. Que dirait-on aujourd'hui de FERMI sinon de confirmer qu'il s'agit bien du grand FERMI et de ponctuer cette déclaration par un long silence?

En fin de compte, tout le texte qui précède est moins percutant que cette seule proposition: le Dr. Ing. ZUSE est historiquement l'inventeur authentique de l'ordinateur." (G. Cantraine, 1981).

L'ORDINATEUR, L'OEUVRE DE MA VIE

Lors de la séance d'ouverture du 1er PANORAMA DE L'INFORMATIQUE, à Liège, 1er-6 septembre 1981, organisé par l'auteur, le Professeur K. Zuse reçut la "Médaille d'Or" de l'Université de Liège, comme récompense de l'ensemble de son oeuvre.

La conférence "L'ordinateur, l'oeuvre de ma vie" faite par K. ZUSE à cette séance inaugurale du 1er PANORAMA DE L'INFORMATIQUE, au Palais des Congrès de Liège, le 1er septembre 1981, n'ayant jamais été publiée, je vais donc en donner le texte complet. Le texte original rédigé par K. Zuse est en allemand et on doit à mon père André Dubois, la traduction en français après une longue discussion avec K. Zuse sur la signification des

termes techniques utilisés. C'est ce texte en français que K. Zuse a présenté lors de cette manifestation.

"Mesdames et Messieurs,

C'est un grand plaisir pour moi d'avoir l'honneur de vous parler de mes travaux dans le domaine du développement des ordinateurs. Pour la première fois, je fais un exposé en français et j'espère le faire d'une manière suffisamment claire.

Je suis fier d'être un "outsider". Mon imagination vagabondait déjà au début des années trente, alors que j'étais jeune étudiant à l'Ecole Supérieure Technique de Berlin-Charlottenburg. Et Berlin était une belle ville, offrant bien des agréments durant les heures de liberté que nous laissaient nos études.

J'ai toujours été attiré par les idées nouvelles, mais mon amour de la recherche n'avait pas encore trouvé la voie définitive. Cette voie, je pense qu'elle m'a été tracée par l'horreur que me causaient les innombrables calculs compliqués auxquels j'étais astreint pendant mes études d'ingénieur civil. Le projet s'est alors imposé à moi de créer des machines calculatrices qui effectueraient toutes ces opérations fastidieuses à notre place. D'étape en étape, j'en arriverais à concevoir finalement le principe d'un matériel ayant l'ampleur et les possibilités de ce que nous appelons aujourd'hui un ordinateur.

Je ne connaissais presque rien des calculatrices fabriquées à cette époque, et ce fut sans doute un bien, car cela me permit de m'engager dès le départ dans le sens de la nouveauté, c'est-à-dire le recours à des instructions programmées, au système arithmétique binaire et à ce qu'on appelle aujourd'hui l'arithmétique flottante (système semi-logarithmique à virgule flottante).

J'ignorais alors les travaux antérieurs de l'Anglais Babbage, aussi bien que les recherches en cours aux Etats-Unis et en Angleterre.

Il était impensable pour moi de trouver des appuis financiers pour réaliser des plans qui n'étaient qu'incomplètement élaborés. J'ai commencé mes premières constructions dans un modeste atelier installé dans la maison de mes parents; ceux-ci m'aiderent dans la mesure du possible, ainsi qu'un petit groupe d'amis qui mirent à ma disposition leurs petites économies, ou travaillèrent avec moi. Ma situation était fondamentalement différentes de celle des chercheurs américains ou anglais qui bénéficiaient de moyens financiers et techniques incomparablement supérieurs.

En 1935 (mil neuf cent trente-cinq), les calculatrices étaient essentiellement mécaniques. L'électro-mécanique faisait timidement son apparition dans les machines à cartes perforées. Quand j'envisageai d'utiliser des relais pour réaliser une machine comportant à la fois un poste de calcul et un réserve de mémoire, je fus effrayé par l'idée de l'énorme place que prendraient des armoires contenant des milliers et des milliers de relais. Il fallait à tout prix en réduire le volume afin de donner à la machine des dimensions acceptables. J'y parvins en ayant recours à une technique spécialement étudiée à cette fin: celle des interrupteurs mécaniques ou mechanical switching en garnissant le bloc-mémoire de toute petites plaquettes métalliques, je résolus le problème volume et coût de construction. Encouragé par ce succès, j'étendis l'usage de cette technologie, moderne pour l'époque (1936), (mil neuf cent trente-six), aux divers composants de mon projet; et c'est ainsi que naquit en 1938 (mil neuf cent trente-huit) ma première machine, la Z 1 (Z un), entièrement mécanique, mais de fiabilité douteuse. Je compris que le réseau de connexions entre les différentes parties de l'engin et la complexité des manœuvres dépassaient les possibilités d'une construction purement mécanique, et décidai d'équiper de relais électro-mécaniques mon modèle suivant: celui-ci, le Z 2 (Z deux), fut terminé en 1939 (mil neuf cent trente-neuf), mais ne constitue qu'un

prototype d'essai. Le premier modèle, dont je puis dire qu'il répondait déjà de manière satisfaisante à ce que j'en attendais, et constituait en fait le premier ordinateur fonctionnel, sortit en 1941 (mil neuf cent quarante-et-un) de mon petit atelier de Berlin. Non seulement je pus le présenter à des personnes compétentes, mais il fut utilisé, notamment par les bureaux de l'Institut de Recherches Aéronautiques allemand. C'était le Z 3 (Z trois).

Déjà pour la construction du modèle mécanique, j'avais inventé une combinatoire conditionnelle qui permettait de relier les différentes parties susceptibles de ne prendre que deux positions. Ce système s'apparentait au calcul de la logique mathématique. Ces notions, aujourd'hui, nous paraissent naturelles; mais alors on était à l'aube de l'algèbre logique. Le succès du système à relais fut favorisé par l'invention des relais électro-mécaniques, qui constituaient l'accessoire idéal pour traduire les opérations fondamentales du calcul logique: la conjonction, la disjonction et la négation, par des commutations en série et en parallèle et des contacts statiques. Un de mes amis, Helmut Schreyer, travaillait justement en 1937 (mil neuf cent trente-sept) à la mise au point d'éléments électroniques. Schreyer avait des idées avancées qui s'accordaient bien aux miennes. Il étudiait notamment le moyen d'utiliser des tubes pour réaliser les circuits répondant aux lois du calcul logique qui me guidaient moi-même. Malheureusement, ces perspectives paraient sans doute trop sur le futur, et ne trouvaient guère d'écho autour de nous.

Les années de guerre ne nous facilitèrent pas la tâche, bien au contraire: je fus d'abord mobilisé, puis revins dans la vie civile grâce à l'intervention de la société de construction aéronautique où j'étais occupé comme ingénieur. Schreyer fut de son côté détourné en grande partie de ses travaux de recherche, de sorte qu'à la fin des hostilités, seul un petit prototype comportant une centaine de tubes était au point. Je regrette beaucoup de n'avoir pu continuer après la guerre une agréable et fructueuse collaboration avec Schreyer, mais ce dernier, ne prévoyant pas un redressement économique en Allemagne avant longtemps, préféra émigrer au Brésil.

A mesure que la guerre se prolongeait, les conditions de travail devenaient de plus en plus difficiles: malgré cela, et avec l'aide de l'autorité militaire, je pus construire et mettre à peu près au point un nouveau modèle, le Z 4 (Z quatre) qui était de même conception que le Z 3 mais d'une capacité nettement plus importante. Début 1945 (mil neuf cent quarante-cinq), la situation devint intenable à Berlin; mes modèles Z 1, 2 et 3, et une partie de mes plans disparurent dans les bombardements. Si je voulais sauver le Z 4, il fallait quitter Berlin pour un région moins exposée. Au terme d'une odyssée pleine de périls, quelques amis et moi-même atteignirent la Haute-Bavière; un village alpestre nous accueillit, où nous allions rester un bon bout de temps, la machine et nous.

Pour nous, Allemands, la fin de la guerre signifiait l'interruption temporaire de tout progrès technique dans le domaine naissant de l'informatique.

Petit à petit, des nouvelles nous parvenaient d'Outre-Atlantique, notamment au sujet des travaux d'Aiken, Stibitz et Eckert-Mauchly. Alors que le premier modèle électronique ENIAC faisait sensation dans la presse mondiale, rien n'était diffusé de ce qui avait été découvert chez nous, pas plus d'ailleurs que du très important appareil électronique mis au point en Angleterre sous le nom de Colossus.

J'avais repris entretemps, de manière quasi-artisanale, le perfectionnement de mon Z 4 (Z quatre). Son existence commençait malgré tout à être connu ici et là, et à capter l'intérêt des spécialistes malgré l'énorme publicité donnée prioritairement aux inventions américaines. Un avantage de ma machine était qu'elle fonctionnait.

C'est ainsi que, en 1948 (mil neuf cent quarante-huit), le Prof. Stiefel, de l'Ecole Technique Supérieure Confédérale de Zürich, vint voir ma machine et fut séduit par ses possibilités. Décision fut prise d'apporter encore quelques perfectionnements, puis d'utiliser

le Z 4 à l'Ecole de Zürich. En 1950 (mil neuf cent cinquante), une démonstration eut lieu à l'E.T.H. Zürich en présence d'une centaine d'industriels et de représentants du monde scientifique. En cette année-là, la Z 4 était vraiment le seul ordinateur marchant en Europe d'une manière satisfaisante.

C'est aussi à ce moment que j'eus les moyens nécessaires pour installer une usine à Neukirchen, en Hesse: avec le concours de collaborateurs dévoués et compétents, la fabrication et la vente de matériel commenceraient bientôt.

Des applications de genres très différents furent à la base de nos premiers contrats: nous eûmes à répondre aussi bien aux besoins de l'industrie optique qu'à des problèmes de topographie ou à des études entreprises par des universités. Cette variété de programmes à résoudre constituait une des difficultés majeures pour une société qui débutait commercialement. De nouveaux modèles allaient être successivement conçus et fabriqués; d'abord les Z 5 (Z cinq) et Z 11 (Z onze), encore équipés de relais, et qui rendaient pas mal de services aux clients; ensuite, passant à l'électronique, le Z 22 (Z vingt-deux), à tubes, et le Z 23 (vingt-trois) à transistors. Ces machines se caractérisaient par une grande flexibilité logique et, pour cette raison, étaient appréciées par les mathématiciens.

A côté des ordinateurs, et pour répondre aux souhaits du monde de la topographie et de la géodésie, nous avons élaboré un type ultra-moderne de machine à dessiner, le Graphomat Z 64 (Z soixante-quatre), qui au départ de données calculées par ordinateur, dessinait automatiquement et de façon très précise des plans et des cartes.

Entretemps, d'autres modèles d'ordinateurs, les Z 25 (vingt-cinq) et Z 31 (trente-et-un) étaient sortis: notre matériel, qu'il fût de petite ou de moyenne dimension, était surtout apprécié par les milieux industriels et scientifiques à cause de son efficacité et de sa grande souplesse d'utilisation.

Tous ces développements avaient eu pour contre-partie une immobilisation croissante de capitaux, et les besoins financiers m'obligèrent à chercher de solides associés. C'est ainsi que, progressivement, mon entreprise est passée sous le contrôle de la Siemens A.G.

Nous étions alors en 1969 (mil neuf cent soixante-neuf); j'avais consacré une large partie des vingt dernières années à la direction de l'affaire, qui avait pris le pas sur mon activité créatrice. Dois-je vous dire combien j'apprécie aujourd'hui la possibilité qui m'a été donnée de me tourner à nouveau vers la recherche?

On nous demande souvent, à nous, pionniers de l'ordinateur, si nous avons prévu dès le début le formidable essor que prendrait l'informatique, avec toutes les conséquences que cela comporte. On parle volontiers aujourd'hui de la responsabilité des savants, et l'on décrète que, dès les premiers pas effectués dans le sens d'une technologie nouvelle, ils devraient imaginer les conséquences sociales les plus lointaines de leurs inventions. Ma propre expérience me permet de dire que, en 1937 (mil neuf cent trente-sept), nous n'avons eu qu'une vague idée de ce qui se profilait à l'horizon, et, si même nous en avions eu conscience, on ne nous aurait pas cru. Notre but, à l'époque, était simplement de créer des machines automatiques capables de délivrer les ingénieurs et les chercheurs d'une contrainte insupportable et de leur faire gagner un temps précieux.

Même mes collègues de l'usine d'aviation qui m'employait, étaient sceptiques: ils considéraient mes projets avec un intérêt certain, mais se demandaient si la machine fonctionnerait réellement bien, et même dans ce cas, si elle constituerait jamais autre chose qu'un "ingénieux jouet".

Au début de l'électronique, lorsqu'on évoquait la perspective de multiplier par mille la rapidité des calculs, on nous prenait pour des lunatiques.

C'est seulement au sein d'un petit cercle d'"initiés" que l'on pouvait discuter utilement, avoir un dialogue constructif, échanger des idées, imaginer par exemple qu'un

ordinateur pourrait un jour jouer aux échecs.

Dans le domaine de la recherche, il existe un seuil en-deçà duquel il est impossible d'avoir une vue d'ensemble sur l'avenir. Seul le chercheur entrevoit quelque chose, et encore à court terme: il se trouve comme devant son petit enfant qui va grandir. Et quand l'invention commence à retenir l'attention de l'opinion, le petit enfant est devenu un adolescent vigoureux au caractère bien affirmé, soucieux déjà d'échapper à la tutelle de ses parents.

Je souhaite aborder maintenant l'aspect logique du développement des computers. Comme je viens de le dire, il s'agissait au départ de résoudre les calculs numériques d'une manière mécanique. Bien des étapes devraient être franchies avant de pouvoir imaginer que le processus engagé pourrait dépasser le domaine des chiffres et mener, à l'extrême, à la création d'une intelligence artificielle avec ce que cela comporte à la fois de merveilleux et de dangereux.

Je franchis néanmoins très vite la première étape, car je compris que je devais me servir de la logique mathématique, m'inspirer du langage de Boole, utiliser la technique du Oui-Non (du Bit), et élargir la notion de "donnée" afin qu'elle ne reste pas limitée à celle de "nombre". En mettant en pratique la technique des relais pour résoudre les problèmes compliqués de connexions, je m'orientai vers ce qu'on appela plus tard l'algèbre des circuits binaires.

Pour les rendre accessibles au calcul, il fallait traduire en données les chaînes de symboles et les séquences d'instructions constituant le programme. Ce programme devait, si possible, pouvoir être adapté à n'importe quelle application ou même se modifier automatiquement à cette fin.

A ce problème était liée la conversion d'adresse des registres appelée maintenant "indexing" et que je traduis d'une manière moins ésotérique par: maniabilité du répertoire des informations stockées et des instructions mémorisées. Cette possibilité de conversion est importante notamment pour l'introduction de sous-programmes et les manoeuvres de branchement (par exemple, passer d'une partie d'un programme à une autre partie, ce passage s'effectuant automatiquement par l'ordinateur en fonction du résultat de ses calculs antérieurs).

La mémorisation des programmes a constitué un grand pas en avant; elle fut réalisée en 1945 (mil neuf cent quarante-cinq) par John v. Neumann. Les conditions très difficiles dans lesquelles j'ai dû travailler pendant la guerre ne m'ont pas permis d'atteindre ce stade avant la fin des hostilités. Faute de temps et de moyens matériels, je ne pus mettre en pratique les possibilités de l'indexing et du branching.

Les blocs-mémoire n'avaient pas la capacité que j'aurais souhaitée, et, pour raison d'économie, je ne pouvais qu'utiliser des bandes perforées pour enregistrer les programmes. J'avais prévu d'équiper la machine Z 4 de plusieurs lecteurs de bandes qui auraient permis de combiner entr'eux plusieurs programmes ou de passer à volonté de l'un à l'autre; j'élaborais des plans qui, s'ils avaient pu être conduits à leur terme et réalisés, auraient permis de doter mon Z 4 d'un compilateur, c'est-à-dire d'un traducteur de programme en langage machine. Comme vous n'ignorez pas qu'en 1944 (mil neuf cent quarante-quatre), Berlin était bombardée à peu près tous les jours, vous comprendrez que ces projets n'ont pu être concrétisés à cette époque, ni pendant les premières années de l'après-guerre. La petite équipe de collaborateurs qui avait quitté Berlin avec moi en direction des Alpes bavaroises allait petit à petit se disperser. J'improvisai un petit atelier dans le village alpestre qui nous hébergeait, afin d'apporter, tant bien que mal, quelques améliorations à la machine que je venais de sauver du désastre. Après que la Z 4 eût été transférée à l'E.T.H. à Zürich en 1949 (mil neuf cent quarante-neuf), je pus encore la perfectionner avec le concours de l'équipe du

Prof. Stiefel et en me servant de plans qui avaient échappé aux destructions de la guerre.

D'aucuns se plaisent aujourd'hui à souligner que les premiers ordinateurs ne répondaient pas aux notions d'indexing et de branching, maintenant choses courantes; je leur répondrai qu'ils oublient de se replacer à l'époque et dans les conditions qui ont vu naître les ordinateurs. Les progrès se réalisent par étapes, certaines étant d'ailleurs prioritaires par rapport à d'autres. Mes propres efforts ont tendu par priorité à la conception de machines aussi universelles que possible dans le sens de la logique et convenant spécialement aux applications mathématiques.

Comme je l'ai déjà dit, il n'était pas question, durant les premières années d'après-guerre, de travailler au développement du hardware. Dans le calme de la montagne, j'en profitai pour mettre de l'ordre dans mes projets et approfondir mes idées sur ce que j'appelais le plan-calcul, qui peut être considéré comme étant le premier langage algorithmique permettant de formuler avec exactitude n'importe quelle instruction, de poser n'importe quel problème à l'ordinateur.

J'ai consacré beaucoup de temps à l'élaboration de ce plan-calcul, dont je ne crois pas surestimer la valeur et qui, aujourd'hui encore, représente l'une des conceptions qui me tiennent le plus à cœur. S'il avait pu être diffusé alors, il aurait pu avoir une importance considérable pour le développement de l'informatique. Mais, c'était matériellement impossible en Allemagne, à cette époque, où, dans ce domaine, tous les regards étaient tournés vers les Etats-Unis.

Après toutes ces évocations du passé, je désire maintenant vous parler de quelques-unes de mes idées concernant le présent.

Du côté du hardware, nous sommes passés successivement de la mécanique à l'électromécanique, puis à l'électronique, dont les progrès fantastiques nous mènent maintenant à la technique des semi-conducteurs intégrés. De ce point de vue, nous sommes en pleine évolution et devons nous attendre à des choses absolument étonnantes. Certes, l'ordinateur ne peut pas encore rivaliser, sous certains aspects, avec la prodigieuse richesse du cerveau humain. Mais il est sûr que l'ordinateur pourra résoudre automatiquement et à une rapidité étonnante des problèmes de plus en plus compliqués. Je n'évoquerai au passage que ses possibilités futures dans les domaines de la logique et de la mémoire associative.

A première vue, le matériel paraît encore coûter très cher: mais si je compare ce coût avec la valeur inestimable des résultats qu'il permet d'atteindre, si - n'ayant pas peur d'appliquer ce mot à l'ordinateur - je constate qu'il devient de plus en plus "intelligent", je crois pouvoir dire qu'il nous procure, et nous procurera de plus en plus, de l'"intelligence à bon marché".

Un autre aspect que je voudrais souligner concerne l'utilisation des ordinateurs: alors que, au début, les techniciens et les scientifiques étaient attirés par l'usage du computer, depuis dix ou vingt ans, ce sont les applications commerciales et administratives qui ont largement pris le pas sur les applications scientifiques, et représentent actuellement 80 à 90% du marché. Malgré cette évolution, je pense que les progrès futurs de l'informatique resteront essentiellement du domaine des ingénieurs et des chercheurs scientifiques, comme ce fut le cas dans le passé.

L'ordinateur prend une place grandissante dans la vie des nations. Le computer étant par essence neutre, son rôle devient considérable aussi bien dans les démocraties dites capitalistes que dans les pays dits socialistes. C'est un outil merveilleux en ces temps de planification en tous domaines. Encore faut-il l'utiliser avec prudence, car le choix des données et la manipulation des résultats, suivant qu'ils sont effectués honnêtement ou non, peuvent conduire au meilleur ou au pire. Les utilisateurs de computers doivent dès lors

prendre conscience du rôle capital qu'ils vont jouer dans la vie moderne et de l'énorme responsabilité qui, de ce fait, pèsera sur leurs épaules.

L'expérience a montré plus d'une fois qu'il vaut mieux ne pas donner une trop large publicité à des idées nouvelles, lorsque celles-ci se trouvent encore à l'état d'ébauches et que vos interlocuteurs ne sont pas prêts à les accepter. Persuadé que, sur ce dernier point, ce n'est pas le cas aujourd'hui, je vais me hasarder à soulever devant vous deux ou trois de ces questions.

Je considère comme un problème actuel l'émancipation du traitement de l'information: je veux dire par là que l'informatique devrait se dégager de ces conceptions trop souvent théoriques et prendre une tournure plus pratique, sans pour cela perdre de son exactitude. L'informatique ayant été, à l'origine, l'oeuvre de mathématiciens, ces derniers ont tendance à la conserver sous leur tutelle. Et comme ils ont leur propre langage, celui-ci n'est pas toujours compris par les utilisateurs.

L'ordinateur est d'une grande utilité pour les physiciens théoriques et pratiques. Mais tous ces travaux restent conditionnés par le cadre trop étroit des théories admises, telle la théorie des quanta et les diverses conceptions qui en découlent. Le concept du quantum tend à s'opposer victorieusement au continuum, concept classique de la continuité dimensionnelle. Toutefois, la théorie des quanta ne peut s'appliquer qu'à quelques domaines bien particuliers. On travaille comme auparavant au moyen d'équations différentielles à l'intérieur d'un espace conçu comme continu, ce qui étouffe notre capacité intuitive. Nous sommes encore très éloignés d'une digitalisation véritablement logique. Depuis longtemps, je suis obsédé par l'idée de "computing universe", mais, jusqu'à présent, je n'ai pas réussi à dépasser le cadre des grandes généralités. Je pense à la digitalisation logique de tous les phénomènes physiques, que l'on pourrait aussi appeler dans un autre langage la quantification totale. Ces travaux sont en liaison étroite avec l'idée d'automates cellulaires.

Je suis obligé de dire que, lorsque j'aborde cette question, même avec un pur physicien, la conversation ne va généralement pas très loin: nos points de vue sont encore trop éloignés l'un de l'autre.

Le computer joue également un rôle de plus en plus important dans la modernisation des techniques de fabrication. La machine-outil contrôlée par ordinateur en est un bel exemple. Mais nous sommes encore loin d'imaginer les performances fantastiques que nous pouvons attendre de l'ordinateur dans ce domaine. La nature possède encore une énorme avance sur nous. Chaque cellule organique prise séparément constitue une unité qui est capable de se reproduire elle-même. La découverte de ce principe d'auto-reproduction, aussi appelée auto-réplication, a constitué un pas décisif dans la connaissance de l'évolution de la vie organique. La nature se sert donc, pour se reproduire, de noyaux différents de ceux que nous utilisons pour fabriquer. Plusieurs savants se sont déjà penchés sur le problème de savoir jusqu'à quel point nous pourrions imiter la nature pour faire progresser nos techniques de fabrication. Le mathématicien John v. Neumann a tenté de résoudre le problème des "self-reproducing systems" dans le cadre des automates cellulaires, mais ses travaux n'ont pas dépassé le stade de la théorie. Pour ma part, je crois que l'on gagnerait beaucoup de temps si l'on abordait ces recherches sous l'angle de la pratique plutôt que de la théorie. L'ingénieur que je suis se demande s'il est possible de concevoir une machine-outil qui serait capable de se "reconstruire" automatiquement par elle-même. L'aspect technique de cette question a un caractère primordial: or, de ce point de vue, il ressort que les technologies de fabrication sont beaucoup trop complexes pour arriver maintenant à des résultats pratiques satisfaisants. Ce n'est que par étapes successives que nous pourrions réaliser un tel processus, et en partant d'engins très simples au début. Peut-être sera-t-il difficile de progresser dans ce sens, si, par ailleurs, on ne cherche pas à simplifier les techniques de construction. Mais mes réflexions

me portent à croire que la chose est fondamentalement possible.

Evidemment, penser qu'un jour, les machines pourront s'"auto-reproduire" comme la Nature le fait d'une manière si prodigieusement parfaite, peut sembler relever de la science-fiction. En y réfléchissant bien, ce n'est pas nécessairement le cas: dans un domaine connexe, ne fait-on pas déjà des études en vue de développer un organisme au départ d'une cellule artificielle; des mathématiciens ne font-ils pas des recherches analogues dans le cadre des automates cellulaires? Parce que l'auto-réplication des machines ne pourra sans doute se réaliser que dans un avenir lointain, faut-il renoncer à y penser systématiquement? L'expérience des dernières décades nous montre d'ailleurs que la notion de "lointain" est très relative, et déjà bien différente de ce qu'elle représentait au siècle dernier, et même au début de ce siècle. C'est pourquoi je pense qu'il nous faut être contamment prêts à accepter et à utiliser les progrès sensationnels que les prochaines années, les prochaines décennies nous apporteront.

L'ère de l'ordinateur est devant nous, et je ne puis m'empêcher de rêver aux immenses possibilités qu'elle est susceptible d'offrir à notre Monde.

Lorsque j'avais vingt ans, vous ai-je dit en commençant cet exposé, mon imagination vagabondait volontiers. Vous pouvez constater que, cinquante années ayant passé, je n'ai pas changé à ce point de vue.

J'espère que, malgré le caractère technique de certains passages de ma conférence, j'ai réussi à me faire comprendre assez clairement, et je tiens, pour terminer, à vous remercier, Mesdames et Messieurs, de votre aimable attention."

LES AUTOMATES CELLULAIRES IRREGULIERS DE K. ZUSE

"L'inventeur du premier ordinateur, Dr-Ing. Konrad ZUSE, avait introduit au début des années 1940 le concept de "Rechneden Raum", qu'on peut traduire par "Univers de calcul". La forme la plus simple de cet univers se présente comme une grille orthogonale d'automates cellulaires. K. Zuse pensait à cet univers de calcul comme modèle de processus physiques (Zuse, 1970). Originellement conçus par K. Zuse et S. Ulam, les automates cellulaires furent mis en pratique par J. von Neumann pour imiter le comportement de structures complexes étendues spatialement (cfr Toffoli & Margolus, 1987)." (D. Dubois, 1992).

Actuellement, les recherches sur les automates cellulaires sont de plus en plus nombreuses. Par exemple, dans l'article "L'hydrodynamique modélisée sur réseau" par Boon, Frisch et D'Humières (in La Recherche, avril 1993), il est intéressant de lire:

"nos automates construits dans un espace discret ne seront invariants que par certaines rotations de cet espace (...). Feynman, intrigué par ce problème, proposa de la résoudre en déstructurant le réseau, c'est-à-dire en reliant les noeuds au hasard. Cette solution, d'une mise en oeuvre délicate, n'a pu encore être explorée; les chercheurs se sont plutôt orientés vers une autre solution, d'inspiration cristallographique. (...). Dans l'état actuel de nos connaissances, les gaz sur réseaux, et plus généralement les automates cellulaires, n'ont pas la prétention de supplanter les méthodes classiques; ils ont plutôt vocation à se placer parallèlement à ces dernières pour certaines classes de problèmes."

Ce problème de l'anisotropie de l'espace dans les automates cellulaires est donc toujours d'actualité. Et pourtant, K. Zuse (1973), concepteur des automates cellulaires avec Ulam dans les années 1940, proposa de créer des treillis irréguliers pour éviter les problèmes d'anisotropie de l'espace.

Feynman, Prix Nobel de Physique, fit une proposition semblable.

Les idées de K. Zuse sur la possibilité de comprendre l'espace-temps de l'univers à partir d'une extension de la théorie des automates cellulaires sont toujours d'une actualité brûlante. Les extraits suivants de K. Zuse (1973), que j'ai essayés d'adapter en français, sont assez longs, car il s'est avéré que ses idées originales forment une totalité qui, en la fragmentant, conduit à une perte d'information sémantique assez surprenante.

"(...) Ce dont nous avons besoin ici est un type spécial d'automate, à savoir l'automate cellulaire. Le concept de base de l'automate cellulaire est l'arrangement de simples petits automates dans la forme d'un treillis, les noeuds voisins étant interconnectés. Nous pouvons commencer avec l'hypothèse que chacun des points de croisement du treillis contient un petit computer et qu'un échange d'information s'établit entre ces computers.

(...)

De tels automates ont déjà été construits. Comme on peut l'imaginer, ils peuvent très bien être utilisés pour calculer des équations différentielles aux dérivées partielles. Pensons seulement à la computation du temps qu'il fait, qui est réalisé comme une computation plane sur un réseau de points de croisement d'un treillis. Vous réaliserez que je pourrais calculer de telles équations différentielles aux dérivées partielles très rapidement, si je pouvais mettre un computer dans chaque point de croisement. De plus, on n'est pas limité à utiliser le système orthogonal. D'autres systèmes ont déjà été développés, par exemple des arrangements de triangles ou, pareillement, dans une configuration en nid d'abeilles. Le théoricien des automates a diverses possibilités de concevoir des automates cellulaires, et leur comportement a déjà été exploré jusqu'à un certain point.

Le problème décisif dont je voudrais vous entretenir est le suivant: Jusqu'ici le rôle de l'expert du computer était de fournir un bon outil, aussi bon et aussi précis que possible, capable de calculer des équations différentielles aux dérivées partielles. Il a essayé d'augmenter la précision aussi bien que possible pour exclure des sources d'erreurs. Néanmoins, il ne sera peut-être jamais possible de réaliser exactement, même avec un automate extrêmement bien construit, le modèle des équations de Maxwell ou n'importe quelle autre équation de la physique. Un comportement fondamentalement différent existe entre le modèle computant et le modèle mathématique.

Le mathématicien et le physicien théorique supposent que la nature correspond à leur modèle d'équations différentielles. C'est une hypothèse qui jusqu'à présent n'a pu être ni réfutée ni prouvée. Une première exigence de la computation numérique est d'assimiler aussi bien que possible le modèle à la nature dans le sens d'un continuum.

Mais on peut considérer le point de vue inverse: Je me libère de cette exigence de plus grande exactitude et ne tente pas de développer un outil pour solutionner des équations différentielles, mais à la place, je sonde le comportement d'automates cellulaires. La question se pose alors, avec quelle inexactitude puis-je construire mon computer pour le faire fonctionner suffisamment bien pour permettre l'observation d'effets qui, au moins de loin, peuvent être comparés au comportement de la nature? (...)

Si on ajoute la question: 'Comment inexactement peut-on opérer pour que tous les effets observables deviennent manifestes?', on arrive alors au comportement d'une chaîne de relais dans laquelle de simples impulsions sont propagées. On peut établir des règles et reconnaître des analogies avec les lois physiques de la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Cette investigation peut être étendue aux automates plans ou même aux systèmes à trois dimensions ou plus. En cela, nous ne sommes pas limités à un arrangement orthogonal, mais nous pouvons choisir, dans un espace à trois dimensions, un arrangement qui correspond au problème de l'empilement le plus dense de billes. (...)

On peut se poser la question supplémentaire, s'il est possible de concevoir une circuiterie

cellulaire dans laquelle des impulsions peuvent se déplacer à travers le système dans des directions aléatoires? A cet égard, le simple computer au point de croisement du treillis de l'automate cellulaire nécessite seulement la composition de quelques éléments commutants satisfaisants aux opérations logiques de base. Nous pouvons alors parler de patterns qui consistent en des combinaisons de valeurs oui/non. Un tel pattern se propage sur la base des lois du circuit. Il existe un état normal du système, qui se présente quand tous les membres sont mis à zéro.

Tout autre pattern représente une perturbation de cet état normal. De telles perturbations et leurs patterns respectifs sont d'un intérêt particulier quand ils ne se dissipent pas ni se dissolvent, mais sont conservés dans leur configuration même pendant qu'ils se propagent comme un tout. De tels patterns se propagent alors à travers l'espace, semblables à des particules de la physique, et, par conséquent, je voudrais introduire le terme de "particules digitales" pour les désigner.

On peut alors jouer avec de tels effets de multiples façons. Je dis jouer intentionnellement, pour mettre en évidence, qu'aussi longtemps que nous n'avons pas une théorie affinée, c'est un jeu qui permet d'explorer beaucoup de possibilités. Si de telles particules digitales s'approchent l'une de l'autre, que se passe-t-il alors? Théoriquement il pourrait arriver que les particules entrent en collision, mais qu'effectivement elles passent à travers l'une de l'autre sans interaction entre elles. Mais il peut très bien arriver qu'elles interagissent, ce qui constituerait évidemment un processus d'information. Le résultat serait la création d'une nouvelle particule qui s'en irait dans une autre direction.

On montrerait cet effet à un mathématicien, par exemple sur l'écran d'un terminal connecté à un ordinateur, sans lui dire qu'il regarde des processus digitaux, que pourrait-il faire? Il pourrait seulement faire des mesures et des observations! Il arriverait à la conclusion: les particules interagissent avec la probabilité d'un-demi, et elles ne le font pas avec la probabilité d'un-demi. Nous avons un résultat semblable en physique, où le fait, que deux particules interagissent ou non, est déterminé par des lois de probabilité.

En conséquence, nous opérons avec des modèles intéressants pour lesquels, néanmoins, les particules sont encore loin de représenter des modèles physiques réels. De toute façon, ils stimulent des réflexions et nous rendent curieux de savoir ce qui se passerait en allant plus loin. Cela vaudrait la peine de réaliser des investigations plus intensives et d'observer le développement futur de la théorie des automates cellulaires. Mais ça demande un investissement considérable, puisque d'assez grands computers doivent être utilisés. La recherche dans cette optique est déjà en cours aux USA. L'idée, mentionnée ci-dessus, de chercher des analogies avec la physique théorique, y a également été exprimée.

Une des réserves principales à l'encontre de l'automate cellulaire a été émise sur son anisotropie. Par conséquent, le concept d'une structure en treillis de l'espace a été désapprouvé par les physiciens pour des considérations fondamentales, et, en fait, nos modèles ont comme propriété, d'avoir des directions privilégiées. Aussi longtemps, cependant, qu'il n'existe aucune information que de telles situations se présentent réellement dans l'espace. La structure itérative d'un treillis est encore plus en contradiction avec la théorie de la courbure de l'espace comme définie par la théorie générale de la relativité.

Pour réaliser un rapprochement des points de vue, on avait à convertir des treillis construits régulièrement en treillis organisés irrégulièrement. Ceci nous ramène à la théorie d'automates variables et grandissants. Le concept de base est ici, que les irrégularités de la structure du treillis soient une fonction des patterns en mouvement, qui représentent les particules digitales. A ce moment-là, non seulement certaines valeurs sont affectées aux seuls points de croisement du treillis d'après le concept de l'automate cellulaire, qui sont en relation mutuelle et se séquent l'un l'autre, mais également les irrégularités du treillis lui-même sont des

fonctions de ces valeurs du réseau courant s'interconnectant. On peut imaginer assez aisément que de cette façon, l'interdépendance de la masse, de l'énergie et de la courbure de l'espace peut logiquement résulter du comportement de la structure du treillis.

Même s'il n'est pas encore possible d'établir de telles théories avec une exactitude suffisante, on peut déjà développer quelques idées générales.

La théorie de l'information utilise le terme (dans le sens d'une quantité) 'information', un terme qui, fréquemment utilisé erronément, devrait cependant être clairement défini avant d'être appliqué.

Nous connaissons la signification de ce terme pour un canal de communication. Dans ce cas, une certaine information est affectée au message. La théorie de l'information définit l'unité de mesure, le bit.

Est-ce que ce concept d'information existe aussi dans la nature? Si on applique le modèle de l'automate cellulaire, la question peut être solutionnée comparativement aisément. Si on approche le problème différemment, en persévérant à utiliser le modèle analogique des équations différentielles, on est confronté à une situation difficile. Pour l'automate cellulaire, cependant, ce qui suit est vrai:

D'abord, on peut affecter une quantité d'information à des structures à variabilité limitée. Prenez une carte perforée comme exemple. Si on peut perforer des trous dans des positions prédéfinies, alors une carte, avec 80 colonnes de 12 positions, a une capacité de 960 bit. Indépendamment, si la capacité de transmission de l'information est utilisée, il peut être établi que l'objet carte perforée a une variabilité dans sa structure qui correspond à 960 bit. Ceci signifie que la structure peut varier d'une quantité de 2^{960} possibilités.

Nous pouvons également appliquer le concept de la variabilité de structure à l'automate cellulaire. Pour commencer, on peut prendre une unique cellule et la considérer comme un automate qui, dans le concept de l'automate cellulaire, peut présenter un nombre discret d'états. Le logarithme à base 2 du nombre d'états serait la quantité d'information de cet unique point de croisement. Je voudrais alors avoir dans le modèle de l'automate cellulaire une information limitée, mesurée à l'intérieur d'un certain domaine. Evidemment, je n'ai pas encore examiné la situation comme un tout, puisqu'on rencontre des limitations finies, semblables à celles qui jouent un rôle important dans des modèles physiques. Naturellement, la théorie des automates cellulaires peut prendre aussi de l'importance pour ces problèmes. En principe, un automate cellulaire est supposé avoir une extension infinie. Mais les automates réalisés en pratique ont naturellement un nombre limité d'éléments. On pourrait donner aux automates cellulaires avec des treillis réguliers la forme d'un tore, et de cette façon obtenir des solutions finies. Si des treillis irréguliers sont utilisés, différentes solutions sont possibles par analogie avec les espaces courbés et finis de la physique.

L'exploration des idées suivantes semble spécialement attrayante:

Quelle est l'information contenue dans une particule dans l'espace? Peut-on parler d'une conservation d'information exactement au même titre qu'une conservation d'énergie ou une conservation de quantité de mouvement ou d'une charge, etc? Ma foi, cette question n'a pas de réponse évidente. Si nous commençons par le concept d'une équation différentielle, avec laquelle le physicien actuel opère, l'information en chaque point de l'espace devrait alors être infinie. Jusqu'à présent, je crois qu'aucune critique suffisante n'a été faite comme toujours pour explorer les conséquences qui résultent de ce concept.

Les mathématiques classiques permettent d'insérer un nombre aléatoire de valeurs intermédiaires entre deux valeurs. Ceci est le concept de l'analyse mathématique, sur lequel les équations différentielles sont basées. De telles conditions ne se rencontrent pas dans la computation digitale, à cause du nombre techniquement limité de chiffres des ordinateurs. Un automate particulier, par conséquent, a seulement un nombre limité de valeurs, i. e. des

valeurs discrètes, comme il n'est pas possible d'insérer entre deux valeurs un nombre aléatoire d'autres, d'intersecter respectivement dans le champ des quantités aléatoires. Il y a certaines valeurs maximum et des valeurs de seuil. Ce sont les limites que le scientifique actif dans la pratique doit voir, qu'il essaye d'éliminer autant que possible, mais qui considérées d'un point de vue différent, sont d'un intérêt particulier. Comment des automates se comportent-ils, si on choisit de limiter les valeurs intentionnellement dans un champ étroit borné supérieurement et inférieurement? Les effets produits nous amènent peut-être plus loin. Qu'arrive-t-il si j'affecte une équation d'onde à un tel système? Peut-être que des valeurs quantifiées et des événements se produisent qui ont une ressemblance à ceux de la physique. (...)

On pourrait appliquer le concept d'une conservation d'information également aux particules digitales. La question suivante se pose alors: La quantité d'information de deux particules qui interagissent est-elle conservée? (...)

Dans le sens de la théorie des automates, une telle particule peut être généralement vue comme étant dans un état fluide. (...)

On introduit quelque pattern dans le champ. La commutation et la structure du pattern sont maintenant telles que ce pattern, après quelques pas temporels, se reproduit lui-même. Des investigations de ce type ont été déjà faites. Si on n'empêche pas une telle particule de se propager elle-même, elle prend alors un nombre d'états, qui reviennent périodiquement ensemble, toutefois avec un changement de localisation où ces états prédominent.

Il est alors possible de concevoir des classes de particules qui représentent un certain type et qui sont discernables les unes des autres à partir de leur impulsion et vecteur de vitesse qui leurs sont respectivement affectés. Le nombre de patterns possibles donne alors une mesure de l'information de la particule. De cette façon, nous arrivons réellement à des possibilités d'appliquer le terme 'information' à de tels processus.

Dans un automate variable, avec un treillis irrégulier, les particules digitales représentent des patterns de treillis vagues qui, avec leurs distorsions à l'intérieur du treillis, se propagent eux-mêmes. De cette façon, l'anisotropie de l'espace peut être expliquée statistiquement. Des termes comme la distance temporelle et spatiale et leur quotient, la vitesse, deviennent des quantités statistiques. En transférant de telles idées à l'univers, on doit en effet considérer que l'espace est extraordinairement bien structuré, d'une manière telle que la dispersion statistique de la vitesse de la lumière, par exemple, est bien loin d'être détectable par les meilleurs instruments disponibles.

Maintenant, je voudrais ajouter quelque chose au problème de la détermination (du temps). En général, on part de l'hypothèse que l'ambivalence de la direction du temps est vraie pour les lois de la physique. Logiquement, en mécanique classique, les lois de Newton sont vraies dans les deux directions. Dans une théorie basée sur les équations différentielles, il n'y a aucune raison de donner de prime abord une préférence à une direction du temps. Par conséquent, cela allait de soi pour Laplace de faire l'hypothèse de l'ambivalence de la direction du temps dans sa célèbre thèse, puisque les lois mathématiques formant son fondement ne donnaient aucune raison de préférer une direction du temps.

Ce n'est que depuis l'introduction du terme 'entropie', qu'aujourd'hui les physiciens croient être capable de donner une préférence à la direction positive du temps en dépit de l'ambivalence de la direction du temps habituellement tenue pour établie pour les lois physiques.

Du point de vue de la théorie des automates le problème se présente différemment: Un automate est habituellement une structure déterminée, i. e. il fonctionne suivant des règles strictes. Un nombre d'états se succèdent les uns après les autres, pour lequel l'état suivant est toujours une conséquence de l'état précédent. Ceci n'est pas le cas en marche arrière. L'état

présent ne permet pas de conclure sur l'état antérieur, puisqu'ici une multiformité peut-être présente, c'est-à-dire, que plusieurs états peuvent résulter dans un état identique. Par conséquent, il est intéressant de percevoir que le comportement des automates est entièrement différent de celui des modèles de la physique qui ont été présentés depuis si longtemps.

En contraste avec un mathématicien du temps de Laplace, le théoricien de l'automate, par conviction conséquente du comportement des automates, ne voudrait même pas considérer l'hypothèse d'une ambivalence de la direction du temps. Au contraire, il devrait probablement chercher avec un effort considérable des solutions compliquées pour remplir une exigence pour l'ambivalence de la direction du temps.

Une autre considération que je voudrais mentionner ici: Si on soumet, par exemple, quelque chose au quantum d'action, qui d'une manière ou d'une autre correspond à une action de commutation, alors la conservation d'énergie apparaîtrait comme une action de commutation par unité de temps, et la conservation d'énergie deviendrait une conservation d'action de commutation. Avec un automate cellulaire, ceci signifierait qu'il changerait couramment ses états, débutant par un certain état originaire, dans lequel le degré de complexité est en train d'être conservé.

A mon avis, ce n'est pas suffisant d'identifier l'énergie et l'information.

Les automates discrets ont seulement un nombre discret d'états, et par conséquent seulement des valeurs discrètes de leurs paramètres. Ceci signifie, que toutes ses quantités étant manipulées doivent être digitalisées sous quelque forme. La possibilité la plus logique est de transformer toute l'information en bits. En concordance avec la circuiterie, les opérations de base du calcul des propositions jouent un rôle important. Ça permet encore de voir beaucoup d'effets sous de nouveaux angles. Avec les équations différentielles, il est bien connu qu'une interaction réciproque d'événements différents, par exemple des ondes, peut seulement être produite par l'introduction de superpositions non-linéaires. Avec une digitalisation logique à l'extrême, on aboutit à des additions logiques de deux bits, i. e. à la disjonction propositionnelle. De cette manière, les interactions ont aussi été réduites à un cas élémentaire. En général, le comportement d'une circuiterie est strictement déterminé. Cependant, par l'introduction de décisions oui/non (alternatives ambivalentes) on peut arriver à des cas élémentaires d'événements déterminés par hasard. Le théoricien imaginatif de l'automate a une grande variété de possibilités à sa disposition pour concevoir des modèles d'automates cellulaires. Le champ de variations des différents modèles est imprévisible. (...)

C'est ma ferme conviction que la théorie des automates apportera dans le futur d'importantes contributions à l'exploration des lois de l'univers. Il y a une nécessité pour cela, que les informaticiens soient conscients de leur propre capacité, et qu'ils soient audacieux en présentant leurs propres convictions avec l'énergie nécessaire.

Les considérations que je vous ai présentées ne reflètent cependant pas une théorie complètement établie et mûre. Mon concept s'est graduellement développé durant les 20 à 30 années passées pendant que je fus prioritairement engagé dans le développement de l'ordinateur et des problèmes directement connexes. Leurs sources furent des considérations au sujet de commutations algébriques en connexion avec le développement de circuiteries logiques complexes. Je dois avouer que ma connaissance de la physique est celle d'un ingénieur plutôt que celle d'un physicien professionnel."

L'EMANCIPATION DU TRAITEMENT DE DONNEES, SELON K. ZUSE

Le Plan-Calcul de K Zuse, en 1945, le premier langage orienté objet

"Le Plan-Calcul fut une tentative de K. Zuse dans les années 1940 pour inventer un système de notations et de concepts d'écriture de ce qui est appelé aujourd'hui un programme. (...)

Le Plan-Calcul, une remarquable première sur la voie des très hauts langages de programmation, mérite une place dans l'histoire de l'informatique. (...) A cet égard, le Plan-Calcul surpasse les potentialités des langages de programmation d'aujourd'hui, y compris l'ALGOL 68. (...) Il ne faut pas oublier que non seulement K. Zuse inventa le Plan-Calcul, mais qu'il l'utilisa pour formuler certains programmes non-triviaux de type non-numérique pour démontrer les potentialités de computation. Les programmes sont de toute manière non-triviaux pour l'année 1945 et plus ambitieux que les premières étapes du travail que von Neumann fit avec sa Gedanken machine (cf. Knuth, 1970). (...) Le Plan-Calcul se révèle tout à fait être un langage de programmation largement développé avec des objets structurés qui sont construits à partir d'une unique primitive d'objets - les deux valeurs booléennes" (Bauer & Wössner, 1972).

Dans ce premier extrait, K. Zuse (1979) explique quelques concepts relatifs à son "Plan-Calcul".

"(...) Je suggère donc de suivre la voie suivante:

La conception de données est introduite comme un élément fondamental dans la Théorie du Traitement de Données. L'élément de base est le bit. Nous faisons ainsi sans déduire le bit dans le sens de la Théorie de l'Information comme décision entre deux alternatives. Toutes les autres structures de données sont composées de bits. Ainsi nous obtenons un énoncé élémentaire:

"Le traitement de données commence avec le bit".

Les données sont des objets de computation et toutes les données ont des structures déterminées par des définitions. Elles doivent être construites de telle façon qu'elles puissent être clairement conçues comme un tout ou dans leurs composants.

Comme le bit représente la structure de données élémentaire, les opérations avec des bits sont aussi élémentaires.

Ces idées m'ont induit à développer le "Plan-Calcul". C'est le seul langage algorithmique, conçu en conséquence, correspondant à ces points de vue. Ici, je ne peux qu'illustrer ceci par quelques exemples.

Toutes les données ont une structure. Ceci permet plusieurs "valeurs". Dans des programmes elles peuvent être spécifiées par des noms. Le plus souvent l'ensemble des valeurs d'une structure est finie. Mais, en principe, nous pouvons définir des structures avec des nombres infinis de valeurs. La conception "potentiellement infinie" introduite en mathématique est aussi bonne dans ce cas.

En mathématique moderne la théorie des ensembles est généralement appliquée avec grand succès comme un instrument efficace. Un ensemble peut être défini de différentes manières, e. g. par des prédicats attachés à tous les éléments d'un ensemble. La définition directe est la liste des éléments. Toutes ces descriptions d'ensembles sont des données. Pour traiter une liste, nous avons besoin de la définition de la structure des données de l'élément individuel et celle d'une liste. Un fait caractéristique du traitement de données est: Les éléments d'une liste sont alignés dans un ordre fixé. On peut définir un ensemble par une telle liste. La conception mathématique d'ensemble, cependant, n'inclut pas un ordre des éléments, i. e.

originellement, le même ensemble peut être décrit par différentes listes. Toutes ces listes ont la même structure mais chaque arrangement des éléments représente une autre donnée. On peut maintenant définir une opération (programme). "Comparaison de deux listes" avec le résultat "les listes consistent en les mêmes éléments". Les listes sont équivalentes aux ensembles.

De cette manière, nous pouvons représenter les opérations de la théorie des ensembles par des opérations du traitement de données. Nous pouvons établir un calcul de liste auto-contenu (self-contained) correspondant au calcul ensembliste. J'ai déjà donné quelques lignes de conduite dans le Plan-Calcul. Bien qu'un ensemble n'ait normalement aucun ordre préférentiel des éléments les mathématiciens utilisent souvent le terme "ensemble ordonné". Nous pouvons considérer, par exemple, que l'ensemble des nombres naturels se trouve entre la conception "ensemble" et "groupe". La définition d'opérations avec certaines caractéristiques sur des ensembles a conduit à la Théorie des Groupes qui a prouvé être très efficace dans leurs diverses variantes. Une liste définit économiquement un ensemble et la relation d'ordre des éléments. Des listes infinies peuvent être définies récursivement comme des ensembles infinis ou par un programme générateur. En principe, il y a beaucoup de possibilités arbitraires pour représenter des nombres par des données. Une forme de base est le système binaire. Toutes les opérations avec des nombres peuvent être définies par des programmes. Le passage d'ensembles finis à infinis (à la fois pour les nombres naturels et rationnels) peut être faite encore par des définitions récursives ou programmes. Le mathématicien peut objecter que les axiomes pour des opérations numériques ne sont valables, en principe, que pour des ensembles infinis. La construction pratique des unités arithmétiques est toujours un compromis. De ce point de vue, les systèmes axiomatiques sont souvent une illusion. Ils peuvent seulement être exécutés mentalement par des passages à des données de structure infinie. Concernant les calculs arithmétiques comme traitement de données, nous avons besoin de définitions récursives pour les opérations aussi. De cette façon, le calcul du traitement de données peut être plus précis et instructif que des méthodes mathématiques traditionnelles. (...)"

La sélection naturelle avant le Big Bang: l'électron survit

Dans un article récent "Le procès du Big Bang" (in Sciences et Avenir, avril 1993), on peut lire, au sujet de la théorie du Big Bang: "(...) Afin de sauver la théorie, Alan Guth, du Massachusetts Institute of Technology, proposa en 1980 une hypothèse supplémentaire, l'hypothèse de l'inflation. Dans ce scénario entièrement ad hoc, l'explosion primordiale aurait été précédée d'une courte période d'expansion-inflation extrêmement rapide qui aurait créé la portion d'Univers observable à partir d'un volume si minuscule que tous ses points étaient déjà à la même température."

Ce second extrait de K. Zuse (1979) est assez étonnant, il imagine ce qu'il y avait avant le Big Bang? Et ce, un an avant Alan Guth!

"(...) Aujourd'hui les computers sont des instruments efficaces pour les physiciens; néanmoins, aucun des physiciens n'a à l'esprit que l'univers peut être un gigantesque système de traitement de données. Les hypothèses pour une telle vue sont encore à créer. Mes propres développements dans le domaine de l'"univers computant" vont dans cette direction. J'ai eu l'occasion de simuler quelques modèles de cette sorte représentant des automates cellulaires, sur l'ordinateur de l'Université de Braunschweig avec le Professeur Vollmar. Mais les résultats ne sont pas du tout sensationnels, ils présentent un caractère davantage ludique. Néanmoins, nous espérons qu'un jour de nouvelles découvertes résulteront de ces expériences.

Je prend la liberté d'esquisser quelques perspectives osées de cette voie. Dans la perspective d'un univers digitalisé, la théorie quantique n'est qu'une étape pour maîtriser les concepts d'espaces continus, d'équations différentielles, etc. Les physiciens doivent adhérer strictement aux phénomènes et théories prouvées par des expériences. Considérant le Big Bang, ils supposent qu'en ce moment-là nos conceptions physiques modernes avec ses quantités physiques, ses particules élémentaires, etc existaient déjà. Notre connaissance d'aujourd'hui ne permet pas une autre conclusion. Mais plus tard peut-être on considérera ce point de vue aussi naïf que l'idée des scientifiques concernant le développement des espèces avant Darwin. Peut-être qu'il sera nécessaire de supposer une théorie similaire à l'évolution pour le développement de l'univers, comme en biologie. Peut-être qu'un traitement de données compliqué dans un espace limité précéda le Big Bang dans le sens d'une énorme expansion commençant par un point distinct pour le développement. La nature fit un grand nombre d'expériences. L'électron survit. Tout cela n'est qu'imagination, mais j'espère que ces nouveaux aspects comme celui de traitement de données conduira un jour à des théories fondamentalement nouvelles."

Des systèmes auto-reproducteurs en automatisation

K. Zuse était très intéressé par les méthodes de la gestion de la production, ayant lui-même créé une entreprise, la Zuse K. G., pour la fabrication de ses ordinateurs. Il a donné deux conférences très techniques sur les réseaux de Petri (ZUSE K., Petri-Nets from the Engineer's Viewpoint, Lecture I, 14 p., Lecture II, 25 p.): il y apporte un éclairage nouveau. Rappelons que sa machine, la S 2, développée en 1942, était dédiée au contrôle de processus (K. Zuse, 1976). De plus, K. Zuse (1967) proposa des concepts révolutionnaires, toujours aujourd'hui d'ailleurs, pour une automatisation totale des systèmes de production industrielle. Ce troisième extrait de K. Zuse (1979) porte sur cette automatisation par des systèmes auto-reproducteurs.

"Le traitement de données est déjà appliqué avec succès en automatisation. Mais nous n'en sommes qu'au tout début. Il y a encore un long chemin à parcourir pour être capable de contrôler le développement d'un organisme complet débutant avec quelque sorte de cellule-germe par un programme. La nature est supérieure quant à l'information stockée dans la chaîne d'ADN. Finalement, tout cela est aussi du traitement de données.

Dans l'évolution des organismes biologiques, l'auto-réplication joue un rôle important. Dans cette direction, nos techniques et science sont seulement à leur début, aussi. Nos méthodes de production diffèrent de celle de la nature. Néanmoins, je suis convaincu qu'une étape révolutionnaire est devant nous. Les systèmes auto-reproducteurs furent investigués par moi ainsi que les aspects de construction. J'avais en tête de construire un atelier qui soit capable de répliquer ses composants. Ce concept peut être conçu plus ou moins strictement. Un objectif immédiatement réalisable serait des systèmes d'auto-maintenance, sans le besoin d'une auto-reproduction totale. Il est seulement nécessaire, semblablement à une économie auto-suffisante, qu'un ensemble de machine-outils soit construit de telle façon qu'il consiste en le même type de parties qui appartiennent aux objets produits par eux. Dans ce sens, le système est aussi homogène que possible. L'homme peut être inclu dans un tel système. Théoriquement, le problème d'auto-reproduction fut analysé par plusieurs mathématiciens, avec J. v. Neumann en tête. Des automates cellulaires servent de modèles. Les cellules individuelles peuvent muter (transfer) en différents états qui correspondent à des éléments de commutation élémentaires. On suppose qu'au début, toutes les cellules sont dans un état fondamental. Au moyens d'impulsions de l'extérieur, les cellules individuelles peuvent subir

des mutations selon un programme, de telle façon qu'elles forment un système de traitement de données, i. e. un computer. Ce computer est capable de réplique dans son champ environnant d'automates cellulaires. De plus, il est possible de former des patterns d'un diagramme calculant qui peut contrôler par pas la construction de diagrammes plus compliqués, i. e. des computers plus efficaces.

De nouveau, ces idées sont considérées actuellement plus comme des jeux intéressants. La raison est que d'extrêmement énormes automates cellulaires devraient être nécessaires pour une application pratique. Ensemble, avec le progrès en miniaturisation, de telles méthodes peuvent devenir importantes un jour. Quelques faits amènent à de telles conclusions. Des patterns pour la fabrication des circuits de commutation miniaturisés sont déjà calculés par des computers et dessinés par des plotters automatiques. L'auto-réplique de computers est déjà une réalité jusqu'à un certain point. L'idée de l'évolution de patterns élémentaires vers des systèmes de plus en plus complexes est un des aspects les plus fascinants du traitement de données futur. Ici les mathématiciens peuvent élaborer avec leur intelligence, à partir de systèmes abstraits, des systèmes applicables en pratique."

La cellule-germe, une alternative aux faiblesses des systèmes axiomatiques

Le théorème d'incomplétude de Gödel ébranla le fondement des systèmes axiomatiques. Comme alternative, K. Zuse proposa une approche inverse qu'il appela la cellule-germe. Ce quatrième extrait de K. Zuse (1979) esquisse ses idées de cellule-germe.

"Le principe d'une cellule-germe est d'une certaine manière l'inverse de l'idée des systèmes axiomatiques pour lequel nous trouvons la différence suivante:

Un système axiomatique consiste en un ensemble d'énoncés élémentaires qui sont considérés tenir sans preuve. Par un calcul, d'autres énoncés ou les énoncés d'un domaine de la science peuvent être dérivés, e. g. la géométrie euclidienne peut être réduite aux axiomes.

Le processus de ces dérivations n'est pas intégré dans le système axiomatique mais est la compétence du mathématicien qui travaille avec. De ce point de vue, un système axiomatique a un caractère statique. Les axiomes tiennent (hold). En contraste avec cela, le processus d'évolution à partir d'une cellule-germe a un caractère dynamique. Les règles pour le développement d'un relativement petit pattern à un computer efficace, à un organisme, à une théorie mathématique, à un système de production, même à l'univers sont des caractéristiques intégrées du système. C'est le contraste entre la conception statique de la civilisation antique et notre mentalité occidentale.

Je vois un travail de grande importance dans la théorie de la cellule-germe. Ainsi, le traitement de données peut se placer au même niveau scientifique que d'autres branches scientifiques. Bien plus, il peut obtenir une importance centrale et stimuler beaucoup d'autres domaines de la recherche, de la science et de la pratique. C'est ce que j'entend par émancipation du traitement de données.

Vu de cette perspective, nous réalisons que le computer et le domaine du traitement de données est encore devant nous. J'espère que ce jour ne signifie pas la fin d'une vie de travail mais le début d'une nouvelle phase de développement."

REFERENCES

- BAUER F.L. and H. WÖSSNER, (1972), The "Plankalkül" of Konrad Zuse: A Forerunner of Today's Programming Languages, copyright 1972, Association for Computing Machinery, Inc., in Communications of the ACM, July 1972, Volume 15, Number 7, pp. 678-685.
- CANTRAINED G. (1981), Présentation du Dr. Ing. K. ZUSE pour la remise de la médaille TRASENSTER 1981, texte communiqué à D. Dubois par G. Cantraine en 1981. Ce texte a été publié dans le Bulletin de l'A.I.Lg., n° 6, juin 1981, p. 129.
- DUBOIS D., (1983), La vie et les idées de l'inventeur du premier ordinateur: joies et soucis d'un pionnier de l'informatique, le docteur ingénieur E. H. Konrad Zuse, in DEMAIN, Etudes & Expansion, Liège, n° 296-297 (n° ISSN: 0700-2809), pp.77-83.
- DUBOIS D., (1990), Le labyrinthe de l'intelligence: de l'intelligence naturelle à l'intelligence fractale, 2ème édition, co-édition InterEditions, Paris - Academia, Louvain-la-Neuve, 331 p. D'autres extraits de publications de K. Zuse sont analysés dans ce livre.
- DUBOIS D. (1992), La machine fractale hyperincursive, communication présentée au Colloque: "Singularités, Imbrications et Pseudo-aléatoire", ENSTA, PARIS, 25-27 novembre 1992, à paraître dans les actes, Th. Moulin, éditeur, 1993.
- KNUTH D. E., (1970), Von Neumann's first computer program. Computing Surveys 2, pp. 247-260.
- MASSONNET Ch. (1981), Bulletin de l'A.I.Lg., n° 6, juin 1981, p. 128.
- TOFFOLI T. and N. MARGOLUS (1987) "Cellular Automata Machines" MIT Press, Cambridge, Mass.
- ZUSE K., (1967), Über selbst reproduzierende Systeme, On self-reproducing systems, Sonderdruck aus "Elektronische Rechenanlagen" (9, Jahrgang 1967), Heft 2, Seite 57-64.
- ZUSE K., (1970), Der Computer mein Lebenswerk, Verlag Moderne Industrie, 221 p.
- ZUSE K., (1973), Space and the Theory of Automata, Paper delivered by Prof. Konrad Zuse on the séminaire interdisciplinaire in Venice 'La théorie de l'information' from May 28 to June 1, 1973, 14 p. This lecture was published in the Italian language:
- K. ZUSE (1974), Spazio e Teoria degli Automi, in Teoria dell Informazione, Seminari interdisciplinari di Venezia, Verlag: Società editrice il Mulino Bologna, S. 97-108, Discussion: S. 109-117.
- ZUSE K., (1976), Some Remarks on the History of Computing in Germany, Lecture at the International Research Conference on the History of Computing, University of California, Los Alamos, 10-15, 1976, 33 p.
- K. ZUSE (1979), Emancipation of Data Processing, Speech on the Occasion of the Award of the Honorary Doctor by the University Hamburg, October 10, 1979, 10p.

NOTICE BIOGRAPHIQUE DE DANIEL DUBOIS

Daniel M. DUBOIS est Ingénieur Civil Physicien et Docteur en Sciences Appliquées de l'Université de Liège. Il est Professeur d'Informatique et de Systèmes Experts à HEC-Liège depuis 1977, et a été nommé Maître de Conférences à l'Université de Liège en 1979. Il a été Directeur Général adjoint de l'ORI, Centre d'Informatique de la Région wallonne et de la Communauté française de Belgique de 1982 à 1989. Il fut élu Membre de l'Académie des Sciences de New-York en 1982. Il reçut le Prix International et la Médaille de la Fondation de la Recherche des Systèmes, à Baden-Baden le 17 août 1988, pour "ses recherches sur l'auto-apprentissage des systèmes intelligents naturels et artificiels". Il est l'auteur de 70 publications scientifiques et des livres: "Le labyrinthe de l'intelligence: de l'intelligence naturelle à l'intelligence fractale", InterEditions, Paris, 1990, "The Fractal Machine", Presses Universitaires de Liège, 1992, et "HYPERINCURSIVITY: a new mathematical theory", avec G. Resconi, Presses Universitaires de Liège, 1992.