

simulations. C'est pour cette raison que Matra a choisi un calculateur analogique, où tous les éléments de calcul travaillent en parallèle, et dont le fonctionnement était celui du monde continu que l'on cherchait à simuler. Un calculateur « temps réel » par nature, en somme.

Le calculateur EAI 8800 a été connecté à différentes générations de calculateurs numériques. Leur rôle était notamment de gérer les interfaces avec les éléments réels, qui comportaient de plus en plus d'éléments numériques. Les calculs les plus rapides (dynamiques notamment), eux, restaient l'apanage des calculateurs analogiques.

L'EAI 8800 a permis le développement du missile Super 530 D, le premier missile hybride, avec calculateur embarqué numérique et analogique, et participé au début de celui du missile Mica. Dans les années 1990, les calculateurs numériques n'étaient toujours pas suffisants pour la simulation du dernier modèle, le Mistral. Par la suite, l'EAI 8800 a été associé à une autre génération de calculateur analogique, le Simstar, à câblage automatique des éléments de calculs.

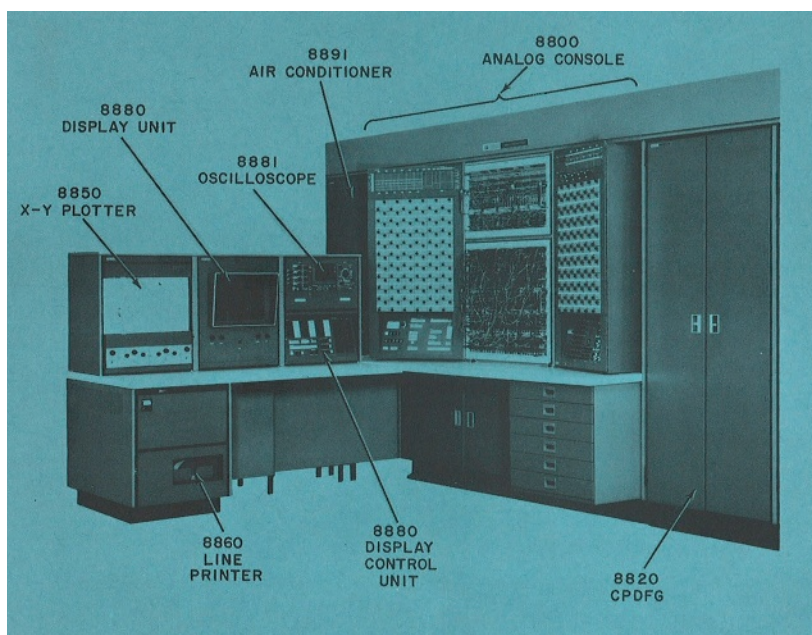
Grâce à cette approche, les missiles ont réduit drastiquement le nombre de tirs. Si dans les années 1960, 200 tirs étaient nécessaires au développement d'un missile, ils n'en réalisaient plus que 15 en 1990, et seulement quelques-uns dans les années 2000. Cette démarche était à la fois économique, car un tir coûte très cher en prototype et en moyens – et un missile ne vole qu'une fois –, et technique, car les tirs étaient devenus insuffisants à eux seuls pour mettre au point un système aussi complexe qu'un missile.

LA POUBELLE OU LE PANTHÉON ?

Pendant une dizaine d'années, l'EAI 8800 a continué à simuler les vols de missiles pour MBDA, jusqu'à ce qu'en 2006, au gré d'un déménagement du service qui l'hébergeait, il atterrisse au musée des Arts et Métiers et y entame sa troisième vie. Sauvegardé et nettoyé, il a depuis intégré les collections du musée.

Ce modèle est d'ailleurs vraisemblablement le seul rescapé au monde. En effet, l'EAI 8800 était une machine rare et chère. À son introduction sur le marché, en 1965, il était vendu entre 100 000 et 500 000 dollars ; et l'EAI 8900 (la forme hybride), entre 700 000 et 1 300 000 dollars. L'EAI 8800 a été produit à peu d'exemplaires, peut-être quelques dizaines, sans doute en raison de son coût et du type d'utilisations très spécifiques de simulation en temps réel que l'on en faisait.

À la différence de l'ordinateur numérique, qui a trouvé des applications dans la finance, la logistique, les bureaux, la communication, les réseaux..., le calculateur EAI 8800 est resté un instrument dédié au calcul scientifique et n'a jamais été utilisé dans d'autres secteurs que la simulation. C'est aussi l'une des raisons de sa



quasi-disparition. À la fin des années 1970, les ordinateurs numériques étaient capables de réaliser presque toutes les fonctions des calculateurs analogiques, mais ils pouvaient en réaliser bien d'autres encore.

Pour autant, le cadavre n'est peut-être pas encore complètement froid. Ce type de calculateurs pourrait connaître un renouveau en dépassant les limites de l'arithmétique binaire, à base de logique sur des 0 et des 1, sur laquelle reposent les ordinateurs actuels. Des modèles fondés sur une logique continue seraient susceptibles d'offrir des solutions plus efficaces, par exemple dans la simulation de certains systèmes biologiques, ou encore dans des modèles d'intelligence artificielle ou de réseaux de neurones.

C'est la voie qu'explorent des chercheurs comme Olivier Bournez, à l'école Polytechnique, à Palaiseau, ou Rahul Sarpeshkar, à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Le premier a montré en 2017, avec ses collègues, qu'il est possible d'effectuer les mêmes calculs qu'un ordinateur actuel en utilisant seulement des réactions biochimiques, c'est-à-dire des processus analogiques continus. Les concentrations de protéines codent les quantités continues et sont modulées par des réactions chimiques bien choisies. L'équipe du second crée des ordinateurs bio-inspirés fondés sur le calcul analogique que les cellules effectuent quand, par exemple, elles régulent l'expression d'un gène.

Dans ce contexte, avoir préservé le calculateur EAI 8800 aidera peut-être à redécouvrir des démarches et des modes de raisonnement des ingénieurs de la seconde moitié du xx^e siècle, lesquels pourraient se révéler riches d'enseignements pour l'avenir. ■

À l'instar de l'EAI 231R, l'EAI 8800 était couplé à plusieurs modules complémentaires, comme l'indique ici la notice de l'instrument.

BIBLIOGRAPHIE

C. Foasso, **Atomes sous surveillance. Une histoire de la sûreté nucléaire en France**, Peter Lang, 2012.

P.-E. Mounier-Kuhn, **L'Informatique en France**, Presses de l'université Paris-Sorbonne, 2010.

J. S. Small, **The Analogue Alternative : The Electronic Analogue Computer in Britain and the USA, 1930-1975**, Routledge, 2001.

J. Ramunni, **La Physique du calcul. Histoire de l'ordinateur**, Hachette, 1988.

G. A. Korn et T. M. Korn, **Electronic analog and hybrid computers**, 2^e éd., McGraw-Hill, 1972.

R

ENDEZ-VOUS

P.82 Logique & calcul
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

DE L'HYPERCUBE À LA SENSITIVITÉ

La «conjecture de la sensibilité», qui portait sur la complexité des fonctions booléennes, importantes en informatique, résistait depuis plusieurs décennies. Un jeune mathématicien d'origine chinoise, Hao Huang, l'a prouvée en deux pages, en exploitant un détour par les hypercubes.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au
laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

La logique booléenne est celle que vous pratiquez quand vous lisez une carte de restaurant : (Œuf mayonnaise ou Carottes ou Jambon) et ((Canard et Pommes de terre) ou (Saumon et riz)) et (Tarte ou Glace). Même sans les parenthèses, vous comprenez ! Son nom évoque George Boole (1815-1864), qui proposa de calculer avec les propositions et les connecteurs logiques (NON, ET, OU, IMPLIQUE, etc.) comme on calcule avec les nombres.

Les travaux de l'ingénieur et mathématicien américain Claude Shannon (1916-2001) ont rendu essentiel ce calcul pour la conception des puces électroniques et aujourd'hui pour la cryptographie. Comme toujours en mathématiques, on y rencontre des énoncés que l'on soupçonne vrais sans réussir à les démontrer. C'était le cas de la «conjecture de la sensibilité» devenu en 2019 «théorème de la sensibilité» puisqu'elle a été démontrée. Le plus étonnant est que, après avoir résisté près de trente ans aux meilleurs spécialistes, un jeune mathématicien aux États-Unis, Hao Huang, en est venu à bout dans un article de six pages, l'argument principal de la démonstration occupant moins de deux pages.

LE GRAPHE DE L'HYPERCUBE

Pour analyser ce résultat, examinons d'abord la structure remarquable de l'hypercube de dimension n , ce qui est déjà un défi pour l'imagination que quelques dessins nous aideront à relever.

L'hypercube de dimension n , noté H_n , est un graphe qui généralise le carré et le cube

(voir l'encadré page ci-contre). En dimension 2, le carré, H_2 , possède 4 sommets et 4 arêtes. Sur le plan, on représentera les sommets du carré par les points de coordonnées A (0, 0), B (0, 1), C (1, 0) et D (1, 1). Chaque sommet de ce graphe est relié par deux arêtes à deux voisins ; par exemple, le sommet A est relié à B et à C.

En dimension 3, le cube, H_3 , a 8 sommets et 12 arêtes. Les sommets sont par exemple les points ayant pour coordonnées les 8 triplets de nombres pris parmi 0 et 1 : 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 et 111. Chaque sommet S est relié par trois arêtes à trois voisins. Les voisins de S sont les sommets S' dont les coordonnées ne diffèrent de celles de S que par une coordonnée. Par exemple, les trois voisins de 010 sont 110, 000 et 011. Les 12 arêtes du cube constituent un graphe où, pour se déplacer en n'empruntant que les arêtes, on doit passer d'un sommet à l'autre en ne changeant qu'une coordonnée à la fois. On peut parcourir tous les sommets du cube sans passer deux fois par le même sommet ; cela définit un «chemin hamiltonien», dont un exemple est le parcours :

000 - 001 - 011 - 010 - 110 - 111 - 101 - 100.

Vous l'avez deviné, l'hypercube de dimension 4, H_4 , est défini par ses 16 sommets qui sont tous les quadruplets possibles de 0 et de 1 : 0000, 0001, 0010, ..., 1111. On obtient son graphe en prenant deux copies du graphe du cube de dimension 3 et en ajoutant des 0 devant les coordonnées des sommets du premier et des 1 devant les coordonnées des sommets du second. On ajoute pour finir des arêtes pour joindre les sommets analogues des deux cubes de dimension 3 : ➤