

L'ESSENTIEL

> En 2006, le service de simulation des missiles de MBDA a proposé au musée des Arts et Métiers un énorme calculateur analogique électronique nommé EAI 8800.

> Fabriquée en 1965 aux États-Unis, cette machine a fonctionné pendant près de quarante ans, d'abord dans la conception des centrales nucléaires du CEA et d'EDF, avant de simuler des missiles chez Matra dans les années 1980.

> Son histoire est emblématique de celle des calculateurs analogiques, ces machines qui aidaient les ingénieurs à résoudre des problèmes en les transposant dans des systèmes plus simples à étudier.

> Tombées dans l'oubli avec l'avènement des ordinateurs actuels, elles pourraient connaître un renouveau inspiré du vivant.

L'AUTEUR



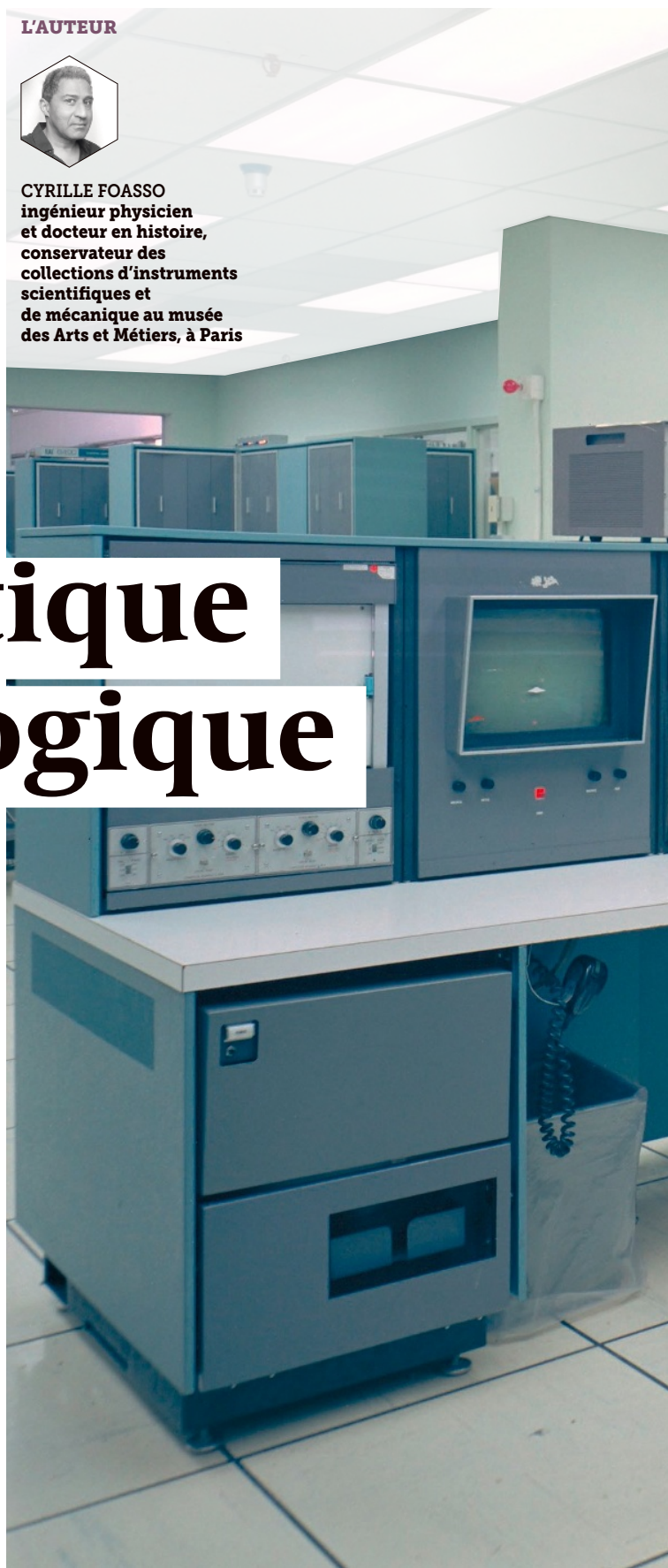
CYRILLE FOASSO
ingénieur physicien
et docteur en histoire,
conservateur des
collections d'instruments
scientifiques et
de mécanique au musée
des Arts et Métiers, à Paris

Quand l'informatique était analogique

Ou comment l'EAI 8800, une machine de 3 tonnes vieille de plus de cinquante ans accueillie il y a quelques années au musée des Arts et Métiers, à Paris, témoigne que les prédécesseurs des ordinateurs n'ont pas dit leur dernier mot.

En 2006, à l'occasion d'un déménagement, des ingénieurs du service de simulation des missiles de MBDA (Matra Bae Dynamics Alenia) prirent contact avec le musée des Arts et Métiers (Musée national des techniques) pour savoir s'il serait intéressé par un calculateur analogique des années 1960, une machine imposante de près de 3 tonnes nommée EAI 8800. Le musée reçoit très souvent de telles propositions. Des particuliers, des laboratoires ou des entreprises le joignent sur le mode : « Nous avons ce matériel ancien, est-ce que cela vous intéresse ? Si vous n'en voulez pas, je le jette ! » Ce ne fut pas le cas ici.

Le temps qui nous est accordé pour répondre est parfois très court pour une décision qui engage le futur, d'autant plus que la loi fait qu'un objet, une fois intégré dans le patrimoine d'un >



© Bernd Ulmann, analogmuseum.org



Les calculateurs analogiques EAI 8800 étaient assez imposants (ici, l'EAI 8800 est le triptyque de panneaux à droite). La forêt de fils multicolores branchés à la console servait à combiner différentes opérations préprogrammées dans la machine au moyen de circuits électroniques afin d'aboutir au calcul souhaité.

► musée de France, est inaliénable et imprescriptible. Avant le passage devant une commission collégiale qui rend un avis, il a donc fallu évaluer l'intérêt d'une telle machine pour un musée des sciences et des techniques. Un argument majeur était la tradition historique de constitution des collections du musée qui sont déjà très riches en instruments de calcul, de la première machine à calculer mécanique de Blaise Pascal, la Pascaline (1642), jusqu'au superordinateur Cray des années 1980 en passant par les machines analogiques mécaniques du XIX^e siècle telles que les intégraphes, les planimètres, le prédicteur de marée de Lord Kelvin (*voir l'encadré ci-dessous*)... L'EA1 8800 pouvait donc s'insérer harmonieusement dans une grande lignée d'inventions liées au calcul.

Mais l'intérêt majeur de cette acquisition était de sortir de l'oubli une technologie qui fut

un temps prépondérante dans l'histoire de l'informatique – le calcul analogique électronique – et dont plus personne ou presque ne se souvient, tant la victoire des ordinateurs digitaux semble aujourd'hui incontestable. Il nous a donc semblé important de conserver un exemplaire de ces dinosaures, ces grands calculateurs analogiques vedettes des années 1950 et 1960 que des générations d'ingénieurs ont utilisés et dont l'extinction fut brutale du fait des progrès fulgurants des ordinateurs numériques en matière de rapidité de calcul et de capacité de mémoire. Cette histoire ne devrait pas être seulement celle des vainqueurs, et il est trop rare qu'elle laisse une place aux vaincus. Pourtant, ceux-ci sont tout autant une source d'enseignements.

Au début des années 1950, une photographie des techniques de calcul disponibles révèle d'une part la prééminence des

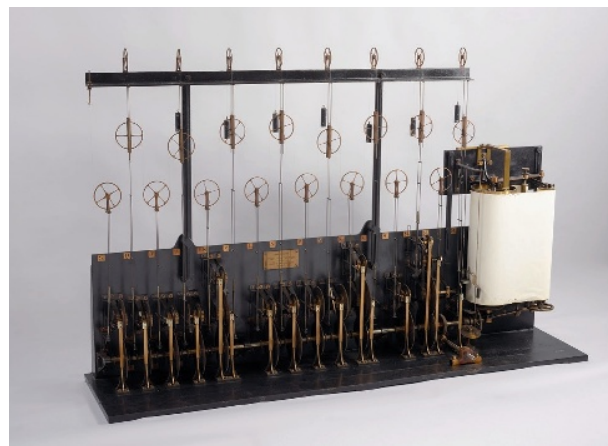
QUELQUES PRÉCURSEURS MÉCANIQUES

Les calculateurs analogiques, machines construites pour résoudre des problèmes en les transposant dans un système plus simple à étudier, ont d'abord été mécaniques. Entre le milieu du XIX^e siècle et le milieu du siècle suivant, de nombreux types de planimètres et intégraphes ont été imaginés pour effectuer des opérations spécifiques telles que le calcul de surfaces (l'intégration) sous des courbes obtenues expérimentalement et dont on ne connaît pas les équations (comme le calcul du travail d'un moteur à partir d'un diagramme montrant la pression en fonction du déplacement du piston). Le calcul s'effectuait en faisant suivre le tracé d'une courbe par le curseur de l'un des bras articulés de l'appareil. Selon les modèles, le mouvement du curseur était combiné au déplacement d'une roulette sur un cylindre, d'une sphère sur un disque, ou encore un cône, lequel, grâce à la géométrie de la machine,

calculait l'aire de la surface sous la courbe.

Conçu dans les années 1880, le prédicteur de marée de Lord Kelvin (*ci-contre*) est une machine imposante, entièrement mécanique. Il est considéré comme le premier calculateur analogique, qui aurait inspiré tous les suivants. L'appareil repose sur la théorie que le mathématicien Joseph Fourier a formulée au début du XIX^e siècle, selon laquelle un signal périodique (l'onde de marée) est une somme de fonctions sinusoïdales (des harmoniques). L'idée était d'obtenir, à partir des caractéristiques de ces fonctions sinusoïdales, les courbes des marées pour les années à venir. Avant de l'utiliser, on déterminait donc, à l'aide d'une autre machine inventée par le physicien britannique William Thomson (mieux connu aujourd'hui sous le nom de Lord Kelvin) – un analyseur de marées –, les amplitudes de chaque fonction sinusoïdale à partir d'enregistrements des courbes annuelles des marées d'un port donné. Puis on les « injectait » dans le prédicteur de marée.

L'appareil est constitué de différentes poulies reliées par un fil et fixées à un engrenage (*en bas*). Chaque poulie correspond à une fonction sinusoïdale, dont l'amplitude est indiquée par la distance de la poulie à l'engrenage. Une manivelle actionne



Un prédicteur de marée de Lord Kelvin.

l'engrenage, lequel est conçu de telle façon qu'au niveau de chaque poulie, il transforme sa rotation en un mouvement sinusoïdal vertical qui simule la fonction correspondante. Le dispositif combine ainsi toutes les fonctions sinusoïdales en les additionnant, et un curseur trace sur un rouleau, lui aussi en rotation, le signal obtenu, qui n'est autre que la courbe de marée recherchée.

Au cours des années 1920, les calculateurs analogiques mécaniques dits « analyseurs différentiels » connurent un grand succès dans le domaine militaire, en particulier dans les défenses antiaériennes pour le tir sur cibles mouvantes, avec la nécessité d'opérer en temps réel. L'entre-deux-guerres a aussi vu apparaître des « cuves rhéographiques », des

calculateurs analogiques visant à résoudre des problèmes d'hydrodynamique d'écoulement de fluides autour des turbines électriques : des électrodes judicieusement disposées dans une cuve remplie d'eau ou d'huile créaient un champ électrique selon des lois similaires à de nombreux systèmes physiques, qu'il était dès lors plus facile d'étudier à l'aide de ces cuves que sur les systèmes réels ou sur maquette.

Les calculateurs analogiques électroniques, fondés sur l'analogie entre les équations des circuits électroniques et celles des systèmes physiques étudiés, se sont imposés à la fin des années 1940, sonnant le déclin de leurs prédécesseurs mécaniques.

techniques analogiques et, d'autre part, les balbutiements des technologies numériques. C'est indiscutable: quand, au milieu des années 1950, un industriel souhaitait concrètement entrer dans le «calcul électronique», il devait s'équiper en «analogique» et non en «numérique».



Pour se lancer dans le calcul électronique, il fallait s'équiper en analogique

Il faut dire qu'à l'époque, les outils de calcul analogique des industriels étaient encore essentiellement mécaniques: il s'agissait de trouver les solutions d'un problème en construisant un système mécanique analogue, c'est-à-dire décrit par des équations similaires, et pour lequel les mesures étaient plus simples et moins coûteuses. Mais quand, au tournant des années 1950, les amplificateurs opérationnels ont été inventés et ont commencé à être produits en série, les industriels se sont massivement tournés vers le calcul électronique. De fait, constitués à l'époque de tubes électroniques (des électrodes placées dans un tube sous vide), ces dispositifs capables d'amplifier le signal électrique reçu en entrée offraient un moyen simple d'effectuer des opérations mathématiques comme l'addition, la soustraction, l'intégration et la dérivation, ce qui simplifiait considérablement les modélisations. C'est donc le choix que firent EDF et le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) en 1955, aux débuts de l'industrialisation de l'énergie atomique en France.

L'AVÈNEMENT DES CALCULATEURS ÉLECTRONIQUES

EDF passa ainsi commande à la SEA, la Société d'électronique et d'automatisme, d'un analyseur différentiel, un calculateur électronique fondé sur des amplificateurs à courant continu. C'est sur cette machine que, peu après, fut réalisée pour la première fois en France la simulation cinétique d'un réacteur nucléaire. La même année, le CEA créa à Saclay, en banlieue parisienne, un laboratoire de calcul analogique au sein de son service des constructions électriques. Le laboratoire s'équipa d'abord d'une machine comprenant trente amplificateurs – c'est ce nombre qui détermine

la puissance de calcul de ces machines –, puis de deux nouvelles, puis, en 1957, de quatre machines de type «Djinn», produites par la société française Derveaux; il acheta également des machines de la SEA. Du matériel français – on insistait sur ce point à l'époque – dont le coût s'élevait à 25 millions de francs. Ces machines permettaient de tracer plusieurs milliers de courbes, solutions des équations différentielles étudiées.

Dans le domaine nucléaire, les machines analogiques étaient utilisées pour étudier la stabilité, la régulation et la sécurité des réacteurs: les ingénieurs cherchaient à savoir quelles seraient les réponses du réacteur aux perturbations ou aux éventuels accidents. Pour cela, il leur fallait déterminer un modèle mathématique qui représente de façon convenable le fonctionnement du réacteur (équations relatives aux comportements neutroniques et thermiques) et de ses auxiliaires (échangeurs, réfrigérants, groupes tournants, organes de régulation). Chaque sous-partie était ensuite testée par des expérimentations sur machine réelle, ce qui permettait d'obtenir un modèle mathématique global de l'installation. Les ingénieurs pouvaient alors, enfin, mener des essais de sécurité sur la machine analogique, essais très spectaculaires puisqu'il était permis d'effectuer toutes les manœuvres interdites dans la réalité et de simuler tous les incidents susceptibles d'avoir lieu.

À partir de 1958, les études analogiques de Saclay furent menées sur des calculateurs américains EAI 231R, plus précis et plus fiables que les matériels français (*voir la photo pages 78 et 79*). Le laboratoire disposait alors au total de 260 amplificateurs, 450 potentiomètres manuels, 40 multiplieurs... Dès le début des années 1960, le programme du Centre de calcul analogique de Saclay fut très chargé. Un second laboratoire fut donc créé en 1962 sur le site du CEA de Cadarache, près d'Avignon, lui aussi équipé d'EAI 231R.

De fait, dans ces années, l'entreprise Electronic Associates Inc. (EAI), dans le New Jersey, qui construisait l'EAI 231R, est devenue la principale productrice de calculateurs analogiques. Fondée en 1945 par des ingénieurs du Corps des communications de l'armée américaine, EAI avait fourni à la société Westinghouse, dès 1953, un calculateur pour la conception du Nautilus, le premier sous-marin à propulsion nucléaire. Elle avait connu ensuite un succès commercial considérable avec un client très important, la Nasa, pour le développement des lanceurs spatiaux et des satellites. Son succès était tel qu'au début des années 1960, EAI installa à Bruxelles un centre européen de calcul analogique, où de nombreux ingénieurs vinrent se former au calcul analogique électronique.

Mais, concrètement, qu'est-ce qu'un calculateur analogique électronique? Le nom de ces >

► machines provient du fait qu'elles fonctionnent sur le principe d'une analogie entre les variables du problème à étudier et celles d'un système physique connu, régi par les mêmes lois. Typiquement, la dynamique des systèmes mécaniques, aérodynamiques, hydrauliques, acoustiques est régie par les mêmes équations que des systèmes électriques comportant des résistances, des capacités ou des inductances (voir le schéma page 80). Ces systèmes peuvent alors être analysés de façon plus simple en travaillant sur leur analogue électrique.

Sur le plan matériel, un calculateur analogique électronique est un ensemble d'opérateurs élémentaires (sommateurs, intégrateurs, multiplieurs, générateurs de fonctions, etc.), qu'il est possible de connecter entre eux par l'intermédiaire d'un panneau de câblage. Les connexions entre ces opérateurs constituent le système physique qui est l'analogue recherché. Les grandeurs des phénomènes physiques sont représentées par des signaux électriques continus – des tensions comprises entre ± 100 volts dans le cas de l'EAI 8800, par exemple. Ce calculateur comporte ainsi des milliers de racks de fonctions précâblées, que l'on relie entre eux sur la console de pilotage (4800 racks effectuant des fonctions analogiques et 2400 racks effectuant des opérations logiques).

UNE GRANDE RAPIDITÉ DE CALCUL

Au cours des années 1950 et 1960, les machines analogiques électroniques sont apparues comme incontournables pour les ingénieurs, car elles offraient la possibilité de simuler de nombreux systèmes physiques expérimentaux et industriels dont ils savaient décrire l'évolution au cours du temps au moyen d'équations différentielles linéaires ou non, mais pour lesquelles les mathématiques n'apportaient pas de solution analytique (c'est-à-dire exprimée sous forme compacte à l'aide de fonctions connues).

Grâce à ces calculateurs, on était capable de prévoir le comportement de ces systèmes, mais aussi de proposer des solutions optimisées: ils étaient une aide tant à la compréhension qu'à la conception. On les utilisait aussi comme simulateurs d'entraînement, en particulier lorsque la dynamique du temps réel imposait que les calculs soient exécutés à très grande vitesse. Comme ces machines effectuaient les calculs en parallèle, elles étaient capables de résoudre des systèmes de plusieurs dizaines d'équations différentielles non linéaires simultanément et d'en donner un résultat visible soit sous la forme de courbes tracées sur un enregistreur, soit sous celle d'un signal lumineux sur un oscilloscope.

Cette rapidité de calcul et cette interface «conviviale» étaient, au début des années 1960,

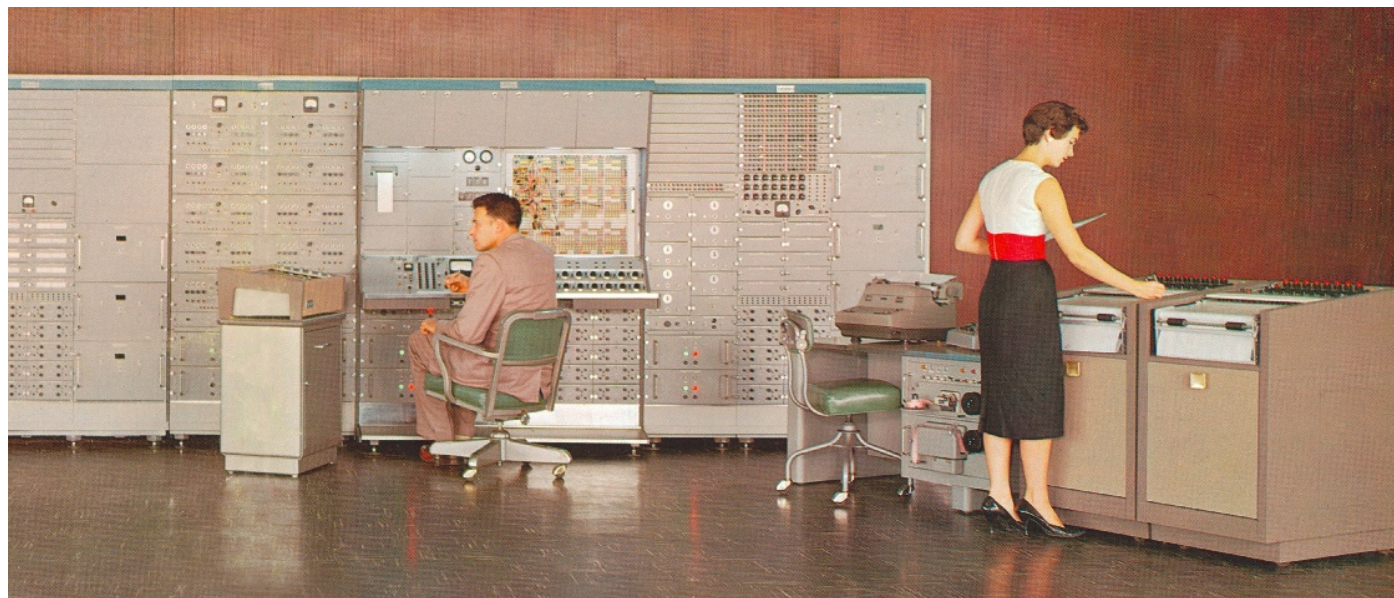


les principaux avantages de ces calculateurs par rapport aux «calculatrices arithmétiques», les ordinateurs numériques ou binaires de l'époque qui, par comparaison, travaillaient en *batch*: il fallait leur livrer une pile de cartes perforées et attendre le résultat, qui ne parvenait que plusieurs heures plus tard, là où les calculateurs analogiques donnaient un résultat en quelques secondes.

Un autre avantage de ces machines était leur câblage – leur programme, en quelque sorte. Certes, il était long à réaliser, mais une fois effectué, il était très facile de faire varier les paramètres, les coefficients, le temps, et l'on pouvait simuler en direct (en temps réel) les solutions des systèmes d'équations, ou encore accélérer un phénomène qui, dans la réalité, aurait duré plusieurs heures ou dizaines d'heures et le visualiser en quelques minutes. À l'inverse, il était aussi possible de ralentir un événement très rapide (une explosion, par exemple) pour en comprendre l'évolution. Le monde analogique était un monde très physique, très visuel, qui «parlait» aux ingénieurs. Les machines analogiques fonctionnaient comme de véritables modèles réduits, où l'on lisait directement la valeur des grandeurs physiques simulées.

En revanche, ils présentaient un inconvénient: le manque de précision. La nature physique du signal analogique conduisait à une perte d'information à chaque passage par un opérateur élémentaire, car, le plus souvent, celui-ci était un composant électrique, dont la précision n'est pas infinie. C'est ce qui explique l'importance de la qualité de réalisation de ces composants, tels les amplificateurs ou les

L'unité de base du calculateur EAI 231R (la partie devant laquelle un homme est assis) était rarement utilisée seule. Dans les années 1960, pour augmenter leurs capacités de calcul, les ingénieurs non seulement couplaient plusieurs EAI 231R étendus (deux ici), mais aussi leur associaient des dispositifs annexes tels que des générateurs de fonction, des multiplieurs, une imprimante et un système automatique numérique d'entrée et sortie des données muni d'une machine à écrire (à droite).



potentiomètres servocommandés, des dispositifs qui servaient à introduire dans la simulation les coefficients des équations. Tous ces éléments présentaient un coût élevé. Les câbles de connexion, par exemple, portaient des



Le monde analogique était très physique, visuel, ce qui parlait aux ingénieurs

embouts en or pour limiter les faux contacts. Typiquement, dans les années 1960, chaque composant avait une précision de l'ordre de 1 pour 10000 (soit 10^{-4}) et la précision finale pouvait être de l'ordre de 1% (10^{-2}) ou 1 pour 1000 (10^{-3}). Ces chiffres peuvent prêter à sourire quand on compare aux précisions des ordinateurs actuels, mais ils n'étaient pas gênants à l'époque, car les modèles mathématiques représentant les systèmes physiques n'étaient guère plus précis.

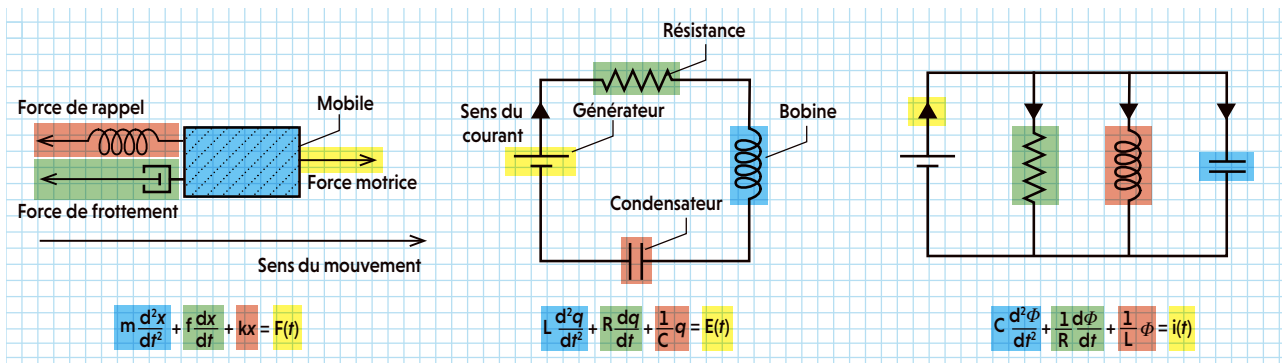
À la différence d'autres machines analogiques principalement utilisées pour la régulation ou les automatismes industriels – des systèmes fermés dédiés à une application

spécifique comme la régulation de la température d'une machine, de la vitesse de rotation d'un moteur ou du débit d'une pompe –, les calculateurs analogiques de type EAI étaient appelés « calculateurs universels », car ils permettaient de traiter des problèmes variés à l'aide de leurs montages électriques adaptés et changeables.

LES CALCULATEURS HYBRIDES : UN COURT RÉPIT

Malgré cet « universalisme », dès la fin des années 1950, les ingénieurs ont constaté un certain nombre de limitations aux calculateurs analogiques : de nouveaux problèmes à résoudre nécessitaient, par exemple, l'utilisation de mémoires qui permettraient de stocker les résultats de calculs. On cherchait aussi à améliorer ces machines de diverses façons. Ainsi, une piste envisagée à la fin des années 1960 consistait à programmer et automatiser les interconnexions électriques, afin de gagner du temps sur les interconnexions faites de façon manuelle, qui étaient un facteur limitant du calcul analogique.

Certains ingénieurs – utilisateurs ou promoteurs des techniques analogiques – ressentait également le manque de théoriciens mathématiciens dans le champ du calcul analogique, resté un domaine d'ingénieur. Ils constataient que dans le champ du calcul numérique, on redécouvrait des méthodes de résolution d'équation mises au point par des mathématiciens de la fin du XIX^e siècle et du début du XX^e (comme les méthodes de Runge-Kutta de résolution d'équations différentielles par itérations successives) qui se révélaient parfaitement adaptées aux premiers ordinateurs et à leurs >



> mémoires de faible capacité. Dans ce domaine numérique, les progrès concernant la taille des mémoires et la vitesse de calcul des machines allaient de pair avec les avancées théoriques mathématiques et algorithmiques.

C'est pourquoi, dès la fin des années 1950, devant les progrès des ordinateurs numériques, les industriels ont commencé à envisager de coupler les techniques analogique et numérique pour bénéficier des avantages de l'une et de l'autre: précision illimitée (ou presque) pour les calculateurs numériques, rapidité, simplicité de programmation et souplesse de calcul pour les calculateurs analogiques. Cette évolution conduisit les constructeurs à proposer des calculateurs dits «hybrides».

Fabriquée à partir de 1965, la machine EAI 8800, analogique, a ainsi été d'emblée conçue pour être utilisable soit seule, soit couplée à un ordinateur numérique. Entre 1965 et 1970, le CEA, comme d'autres industriels, a peu à peu remplacé ses équipements EAI 231R par des calculateurs hybrides EAI 8900 comportant des unités analogiques 8800 et une unité numérique 8400 (32 000 mots de mémoire avec 32 bits par mot et une interface ayant 32 canaux de conversion). Toutes ces machines étaient interconnectables et offraient la possibilité de traiter des problèmes nécessitant plus de 500 amplificateurs.

Au début des années 1970, tous les grands industriels disposaient de centres de calcul analogique. On en dénombrait 75 en France, dans la chimie, l'aéronautique... Pourtant, c'était déjà le chant du cygne de cette technologie, et les calculateurs hybrides n'ont fait que retarder de quelques années le passage au numérique.

UNE DEUXIÈME VIE CHEZ MATRA DÉFENSE

Mais revenons à notre calculateur EAI 8800. Fabriqué en 1965, il a fait partie de ces machines hybrides qui ont remplacé les équipements E 231R au CEA. Jusqu'au début des années 1970, il a rendu de bons et loyaux services au CEA et à EDF dans la conception des centrales nucléaires. Puis on perd sa trace au milieu des

PROBLÈMES ANALOGUES

Imaginez un mobile de masse m soumis d'une part à une force motrice e , d'autre part, à une force de frottement proportionnelle à sa vitesse et à une force de rappel proportionnelle à son déplacement x (à gauche). L'équation de son mouvement est alors équivalente à celle de la charge électrique q en fonction du temps dans un circuit électrique comportant une résistance, une bobine et un condensateur en série (au centre). Quand le circuit est en parallèle (à droite), une telle équivalence existe aussi à condition d'utiliser comme variable non plus la charge, mais l'intégrale ϕ de la tension par rapport au temps.



Publicité de l'entreprise Derveaux, spécialisée dans la construction de calculateurs analogiques dans les années 1950, parue dans le magazine *L'Onde électrique* en 1956.

années 1970, mais on le retrouve dans la division défense de Matra, au milieu des années 1980, où il a été utilisé pour la conception de missiles air-air, comme me l'a raconté Philippe Longis, chef en 2006 du département Modélisation et simulation de MBDA.

Au début des années 1980, en effet, la complexité croissante des missiles, avec notamment l'introduction des calculateurs de vol embarqués numériques, a conduit les constructeurs de missiles comme Matra à deux évolutions importantes. D'une part, ils se sont mis à développer les simulations numériques, qui sont devenues alors un outil prépondérant pour les études de développement, les algorithmes embarqués, la préparation des tirs et l'évaluation des performances du système. D'autre part, les fabricants de missiles ont dû se doter de moyens de simulation en temps réel permettant de tester des équipements réels de missiles (autodirecteurs, calculateurs embarqués, détecteurs inertiels...) dans un environnement représentatif d'un tir. C'est là que sont intervenus, grâce à leur rapidité de calcul, les calculateurs analogiques électroniques, dont notre EAI 8800.

Dès le début des années 1980, Matra a créé un «laboratoire de simulation avec éléments réels». Il faut se représenter le missile sur un banc d'essai, connecté au calculateur, tout comme la cible à atteindre. Le calculateur devait réagir aux mouvements de la cible en temps réel pour adapter le vol du missile. Le laboratoire comportait des simulateurs de cible (soit électromagnétiques, soit infrarouges), des simulateurs de mouvements (des simulateurs hydrauliques recréant les mouvements de lacet, tangage et roulis) et des calculateurs effectuant la simulation du vol de missile (aérodynamique, équations de la dynamique du vol, cinématique...). Ces essais étaient réalisés au sol, en laboratoire, et permettaient de valider les matériels de vol dans un grand nombre de tests en environnement virtuel.

À cette époque, les performances des calculateurs numériques ne permettaient pas encore de faire tourner en temps réel ces

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.

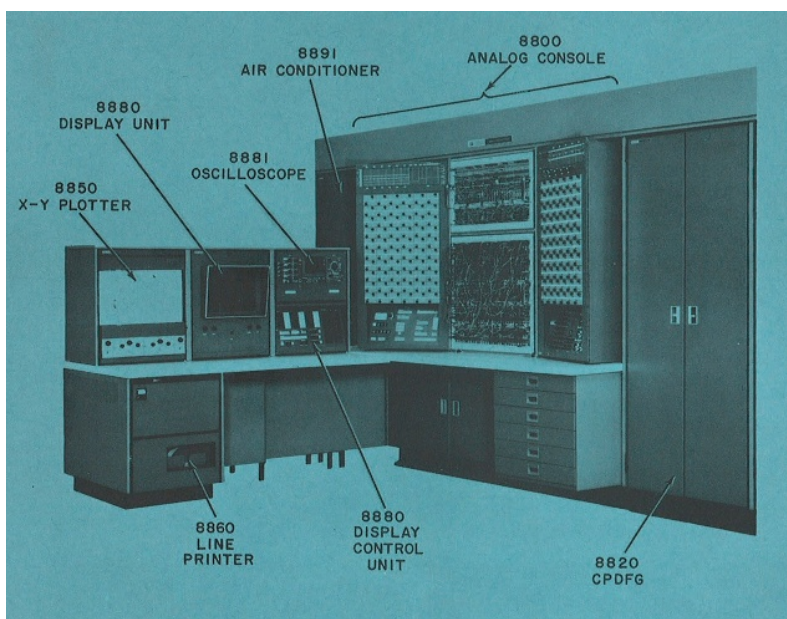
Grâce à cette approche, les missiles ont réduit drastiquement le nombre de tirs. Si dans les années 1960, 200 tirs étaient nécessaires au développement d'un missile, ils n'en réalisaient plus que 15 en 1990, et seulement quelques-uns dans les années 2000. Cette démarche était à la fois économique, car 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 POUHELLE 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^eéd., McGraw-Hill, 1972.