

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 10 000 (soit 10^{-4}) et la précision finale pouvait être de l'ordre de 1% (10^{-2}) ou 1 pour 1 000 (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 ➤