



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.

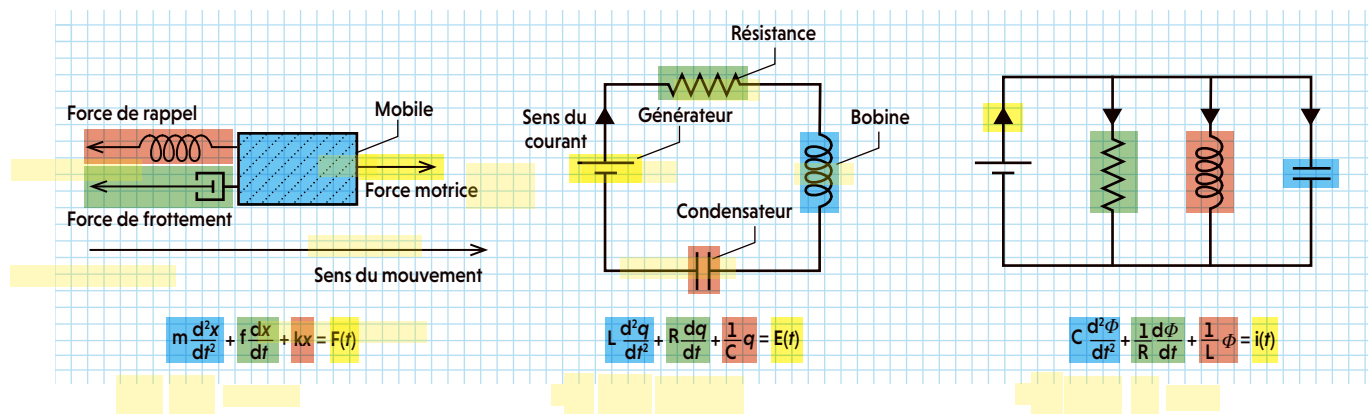
À la différence d'autres machines analogiques principalement utilisées pour la régulation ou les automatismes industriels – des systèmes fermés dédiés à une application

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 – ressentaient 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 et, 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