

LES DEUX CYCLES DU CO₂

Dès 1845, l'ingénieur minier français Jacques-Joseph Ébelmen a compris que le cycle du CO₂ décrit dans cet article est un cycle géologique lent, mais stabilisateur du climat terrestre à long terme grâce aux puits de calcaire océaniques. Ce processus n'élimine de l'atmosphère que 0,1 milliard de tonnes de carbone par an. Le cycle du carbone organique, en revanche, est beaucoup plus important grâce à la photosynthèse : les plantes terrestres retirent de l'atmosphère 60 milliards de tonnes de carbone par an et 90 autres milliards de tonnes par l'échange gaz-eau et par les microorganismes océaniques. Cependant, ce gigantesque cycle du CO₂ est fermé, car le carbone organique est oxydé au même rythme qu'il est fixé par la photosynthèse. C'est pourquoi il n'est pas pris en compte s'agissant du contrôle géologique de la température. Il peut cependant influencer sur le bilan de CO₂ atmosphérique si – comme cela a été le cas au Carbonifère (il y a environ 360 à 300 millions d'années) – de grandes quantités de carbone organique sont stockées dans des sédiments et deviennent ensuite du charbon. Représentant aujourd'hui 10 milliards de tonnes de carbone (qui équivalent à 37 milliards de tonnes de CO₂), les émissions massives dues à l'utilisation des combustibles fossiles déséquilibrent aussi le cycle du CO₂ organique.

processus transformant les roches silicatées en sol. Selon les quantités de minéraux présents, la météorisation est plus ou moins active. Les surfaces réactives lient efficacement le CO₂ même en cas de faible teneur atmosphérique, et ont une constante de réaction k élevée; celles qui sont moins réactives ont une plus faible probabilité de réagir avec le CO₂ et une constante k moins élevée.

La réactivité d'une surface est déterminée par la quantité de minéraux «primaires» présents dans la zone critique (*voir la figure ci-contre*) : ces minéraux contenus à l'origine dans la roche sont par exemple le feldspath, la biotite (famille des micas), la hornblende ou le pyroxène. Dans une zone critique réactive, ces minéraux silicatés sont si abondants que même de petites quantités de CO₂ réagissent efficacement, de sorte que la roche s'altère. Il en résulte la formation de minéraux dits «secondaires» et, avec eux, celle du sol. Aujourd'hui, les surfaces terrestres réactives se situent dans les chaînes de montagnes hautes et basses, telles l'Himalaya, les Alpes, les Vosges ou le Massif central, etc., ou dans les zones anciennement gelées d'Europe du Nord ou d'Amérique. Les mouvements tectoniques et un taux d'érosion moyen suffisent à éliminer de la surface suffisamment de minéraux secondaires non réactifs pour qu'il y ait toujours assez de minéraux primaires frais disponibles pour réagir.

Dans une zone d'altération moins réactive, les minéraux primaires «frais» sont en revanche déjà épuisés. À leur place, on trouve principalement des minéraux secondaires qui se sont formés au cours de l'altération des roches, comme les minéraux argileux (kaolinite, illite) ou les oxydes de fer. La météorisation de ces minéraux secondaires exige beaucoup d'eau, de chaleur et de CO₂. On

trouve ces surfaces terrestres fortement altérées dans les zones tropicales et tectoniquement inactives d'Afrique, du Brésil ou d'Australie. Il semble que, il y a 15 millions d'années, la plupart des surfaces étaient peu réactives.

Une méthode isotopique relativement nouvelle donne une indication de l'activité passée de la surface terrestre. Comme le lithium (Li) se trouve à l'état de traces dans les roches, il est libéré lors de la météorisation et pénètre dans l'eau interstitielle à partir de laquelle se forment les minéraux argileux. Dans ces derniers, l'isotope ⁶Li, plus léger, est favorisé. Si plus de minéraux argileux contenant du ⁶Li sont produits, alors il y a davantage d'atomes de lithium de l'isotope ⁷Li transportés, *via* les eaux souterraines et les rivières, vers les océans. Il est donc possible d'estimer la réactivité passée de la surface terrestre à partir du rapport isotopique ⁷Li/⁶Li des coquilles calcaires des organismes marins ayant sédimenté. De fait, ce rapport isotopique ⁷Li/⁶Li a augmenté dans les sédiments océaniques au cours des 15 derniers millions d'années (*voir l'encadré page 70*) ; cela signifie que, en moyenne, la réactivité de la surface terrestre (en d'autres termes la constante k) a régulièrement augmenté dans le monde.

Nous avons estimé qu'à un taux de météorisation constant, un doublement du taux d'érosion pourrait avoir été suffisant pour produire cette réactivité accrue. Au cours des 15 derniers millions d'années, cela a de plus en plus refroidi la Terre et a finalement amorcé l'englaçage de l'hémisphère Nord. Cependant, pour quelle raison le taux d'érosion s'est-il modifié? La question reste ouverte.

UNE RÉGULATION MISE À MAL

Une seule chose est sûre : pendant toute l'histoire de la Terre, le thermostat terrestre a maintenu les conditions climatiques favorables à la vie. Malheureusement, l'une des plus grandes perturbations du délicat cycle géologique du CO₂ est en cours, puisque l'humanité a fait passer la concentration atmosphérique de CO₂ de 280 ppm à plus de 400 ppm depuis 1900. Si nous n'agissons pas immédiatement, nous pourrions avoir une atmosphère à 1000 ppm en 2100 et même 2000 ppm en 2200... Or David Archer, de l'université de Chicago, et Victor Brovkin, de l'institut Max-Planck de météorologie à Hambourg, ont montré en 2008 qu'il faudrait pas moins de 3 000 ans pour que la séquestration du dioxyde de carbone dans les océans réduise sa concentration dans l'atmosphère de 1 400 ppm à 600 ppm. En d'autres termes, l'humanité doit mettre fin le plus tôt possible à la dangereuse aventure climatique dans laquelle elle s'est lancée. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. K. Caves Rugenstein et al., **Neogene cooling driven by land surface reactivity rather than increased weathering fluxes**, *Nature*, vol. 571, pp. 99-102, 2019.

F. von Blanckenburg et J. Bouchez, **River fluxes to the sea from the ocean's ¹⁰Be/⁹Be ratio**, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 387, pp. 34-43, 2014.

M. E. Galvez et J. Gaillardet, **Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept**, *Comptes Rendus Géoscience*, vol. 344(11-12), pp. 549-567, 2012.

D. Archer et V. Brovkin, **The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO₂**, *Climatic Change*, vol. 90, pp. 283-297, 2008.

R. A. Berner et K. Caldeira, **The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle**, *Geology*, vol. 26(5), pp. 477-478, 1997.

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

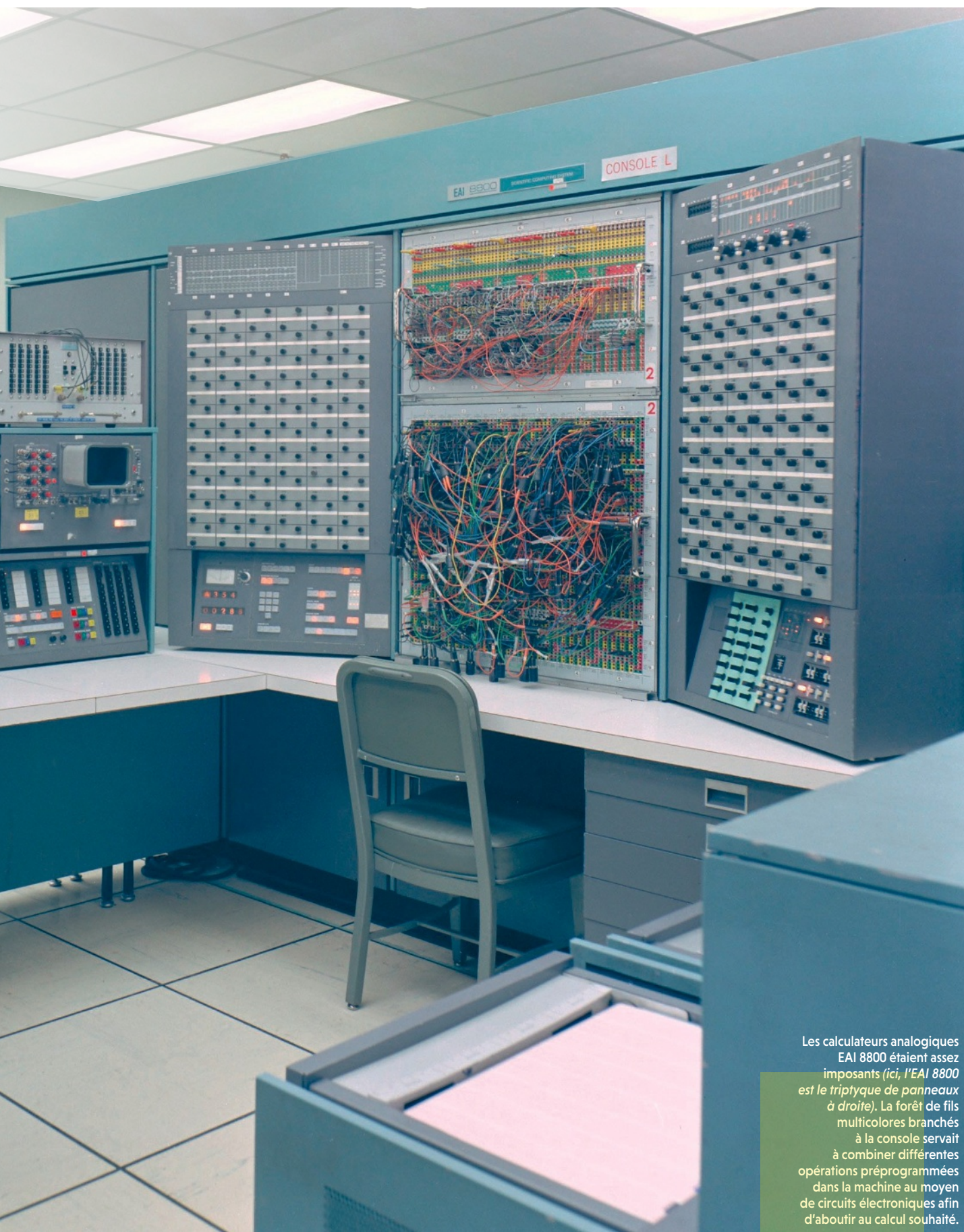
Ou comment l'EAI 8800, une machine de 3 tonnes vieille de plus de cinquante ans accueillie il y a quelques années au musée des Arts et Métiers, à Paris, témoigne que les prédécesseurs des ordinateurs n'ont pas dit leur dernier mot.

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'EI 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

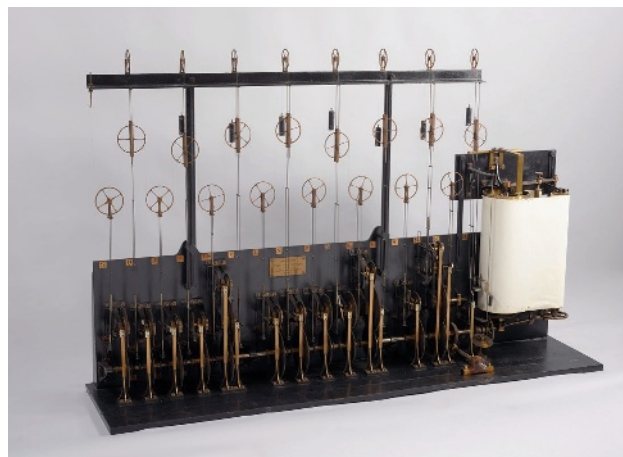
QUELQUES PRÉCURSEURS MÉCANIQUES

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.