



# ESPACE

## & Vous

### L'APOLLO GUIDANCE COMPUTER

GILLES GEERAERTS

Credit images : NASA, PxHere, Wikimedia  
Ed. Resp. : M. Swaelens - ULB CP238 - 1050 Bruxelles

SPECTACLE DIDACTIQUE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

3<sup>e</sup> > 6<sup>e</sup> SECONDAIRE & GRAND PUBLIC

ULB CAMPUS DU SOLBOSCH

INFOS : SCIENCES.BRUSSELS/SPECTACLE



# L'APOLLO GUIDANCE COMPUTER

Gilles Geeraerts

## C'EST VRAIMENT UN ORDINATEUR CE VIEUX TRUC ?

Cela aura sans doute échappé à beaucoup, mais nous avons fêté, en août 2021, un anniversaire important pour la conquête spatiale : les 55 ans de l'Apollo Guidance Computer (ou AGC). Mais de quoi s'agit-il ?

L'AGC était l'ordinateur qui se trouvait à bord du module de commande et du module lunaire des vaisseaux spatiaux du programme Apollo, ceux-là même qui ont per-

mis à Neil Armstrong et tous ses successeurs de visiter la Lune. Le module de commande était la partie du vaisseau qui restait en orbite autour de la lune avec un astronaute à bord, pendant que ses deux petits camarades empruntaient le module lunaire en direction de la surface de notre satellite pour leur promenade dominicale (ou presque).

Un ordinateur de bord était bien nécessaires sur ces modules ! En effet, l'ordinateur prenait en charge toute une série d'éléments du pilotage, qui était trop complexe pour un seul pilote, notamment lors de la phase d'alunissage.

## SOUS LE CAPOT DE L'AGC

En voyant les équipements informatiques de pointe qui équipent les vaisseaux spatiaux contemporains (comme les écrans tactiles des capsules Dragon qui conduisent les astronautes, spationautes et cosmonautes à l'ISS), on en oublierait presque que la technologie qui a permis d'envoyer des hommes sur la lune date de l'époque où les premiers postes de télévision (en noir et blanc) faisaient leur entrée dans les foyers. À cette époque, un petit ordinateur occupait le volume d'un buffet normand, chauffait énormément et offrait des

Le DSKY (le Display KeYboard) de l'AGC, qui servait d'interface (clavier et écran) pour les astronautes.



performances ridicules face aux téléphones que nous avons aujourd'hui toutes et tous dans nos poches. Essayons de comparer les caractéristiques de l'AGC à celle d'un ordinateur actuel :

	ACG	PC de 2021
<b>Fréquence du processeur</b>	2,048 MHz	3 à 4 GHz
<b>Nombre de transistors</b>	Environ 17 000	Plusieurs milliards
<b>Mémoire vive (RAM)</b>	4 ko	Au moins 8 Go
<b>Stockage pour les programmes</b>	73 ko, non-modifiable (ROM)	1 To ou plus, modifiable
<b>Interfaces d'entrée</b>	Clavier numérique 19 touches	Souris, clavier (environ 100 touches),...
<b>Interface de sortie</b>	Écran numérique monochrome, capable d'afficher une vingtaine de chiffres	Écran haute résolution, affichage de millions de couleurs

Si vous vous sentez dépassé par les termes techniques, pas de panique, le but de ce petit article est justement de démystifier tout cela...

## LES COMPOSANTS DE BASE D'UN ORDINATEUR

Pour cela, nous devons commencer par rappeler quels sont les briques de base de tout ordinateur, quelque soit sa forme ou son âge. Un ordinateur est une machine qui sert à exécuter des programmes (comme les « apps » de nos téléphones). À cette fin, il dispose d'un processeur et d'une mémoire primaire<sup>1</sup>. Un programme est une sorte de texte composé d'instructions bien choisies que le processeur peut comprendre et qui manipulent des données (par exemple, « faire la somme de deux nombres »). Le processeur sert donc à exécuter les instructions du programme l'une après l'autre. La mémoire, elle, sert à contenir le programme à exécuter, mais aussi les données que le programme doit manipuler. Le processeur peut interroger la mémoire pour obtenir la prochaine instruction à exécuter, ou lire et écrire des données dans cette mémoire.

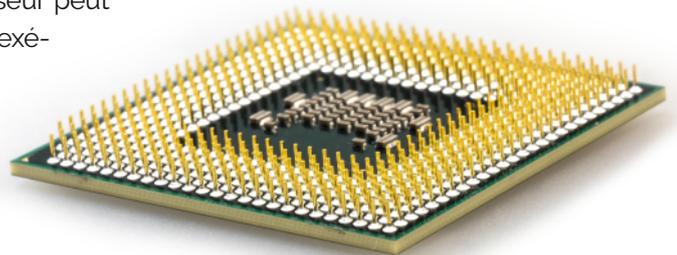
## LA REPRÉSENTATION DES DONNÉES

Mais comment sont représentées ces données dans la mémoire, ces données que le processeur manipule ? C'est à la fois simple et compliqué : un ordinateur ne manipule que des 0 et des 1, car les circuits électroniques qui le composent sont plus simples à concevoir ainsi (on en reparlera plus tard). C'est donc simple ? Non, car il faut pouvoir représenter toute information (nombres, images, textes, vidéos)... uniquement à l'aide de 0 et de 1... voilà qui devient plus compliqué...

Prenons un exemple pour mieux comprendre. Comment peut-on représenter le nombre 210 à l'aide de 0 et de 1 uniquement ? Nous allons le décomposer en une somme de puissances de 2 (ce qui explique le nom de « binaire »). En effet, on peut voir que :

$$210 = 128 + 64 + 16 + 2 = 2^7 + 2^6 + 2^4 + 2$$

1. Souvent appelée RAM pour *Random Access Memory*.



À partir de cette décomposition, on peut représenter 210 sous forme de chiffres 0 et 1, chiffres qu'on appelle des bits (pour *binary digit*, chiffre binaire en anglais). Il suffit de faire correspondre chaque bit à une puissance de 2, et de faire la somme des puissances de 2 qui correspondent à un 1 pour retrouver 210.

Puissance de 2 :	$2^7$	$2^6$	$2^5$	$2^4$	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
Représentation binaire de 210 :	1	1	0	1	0	0	1	0
210 =	128	64	+	16		+	2	

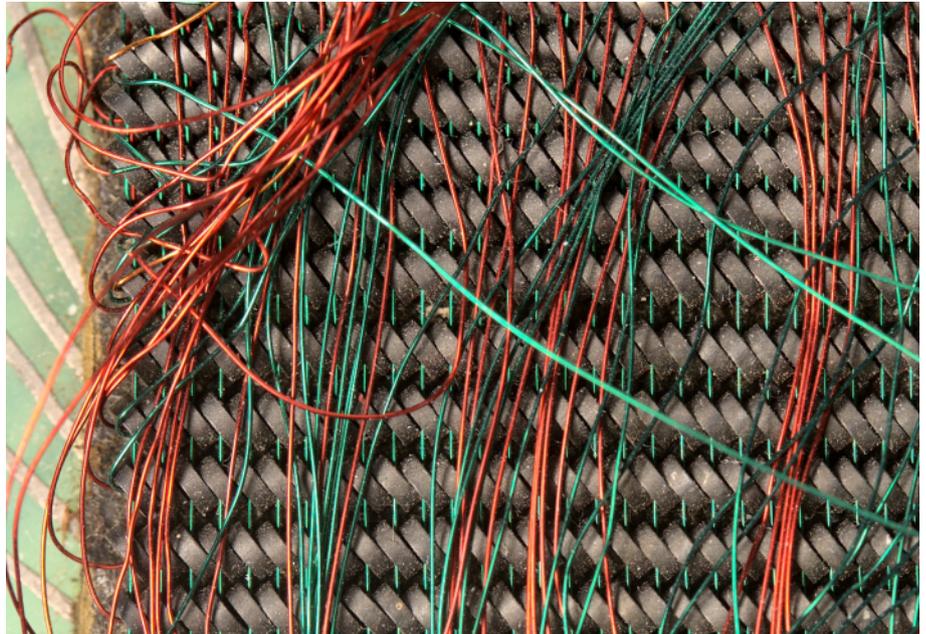
Concrètement cela donne (on a l'habitude de mettre la plus petite puissance,  $2_0$ , à droite) :

Donc, en binaire, 210 se représente 11010010. Évidemment, il faut trouver d'autres stratégies pour représenter d'autres informations que les nombres, mais cet exemple nous donne une idée...

## CAPACITÉ DES MÉMOIRES

Maintenant que nous savons comment l'information est représentée, nous pouvons nous pencher sur la quantité d'information (le nombre de bits) qu'une mémoire peut stocker. On a l'habitude de regrouper les chiffres binaires par paquets de 8, ce qui forme un octet (ou *byte* en anglais). L'octet forme une unité de base qu'on note « o ». On peut y ajouter tous les préfixes SI : kilo-, méga-, giga-, téra-,... pour obtenir un kilooctet (1000 octets), un méga-octet (un million d'octets), un gigaoctet (un milliard d'octets) et un téraoctet (mille milliards d'octets).

L'AGC disposait donc d'une mémoire de travail (mémoire primaire) de 4 ko, soit 4 000 octets pour stocker les données qu'il manipulait. Nos ordinateurs modernes ont facilement 8 Go de RAM à leur disposition, soit deux millions de fois plus que l'AGC ! En outre, la mémoire de l'AGC était réalisée à l'aide de tores de ferrite : chaque bit individuel était stocké dans un minuscule anneau de ferrite magnétisé, et dont la direction du champ magnétique indiquait soit un 0 soit un 1. De minuscules fils de cuivre traversaient tous ces tores pour en lire ou modifier le contenu binaire.

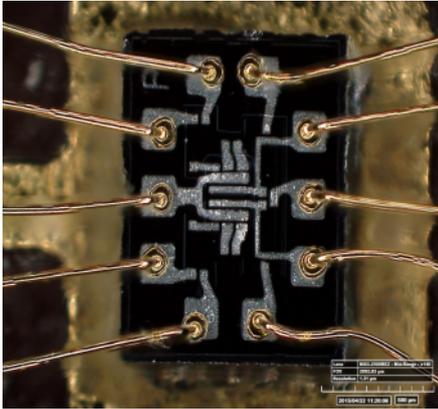


Les programmes exécutés par l'AGC durant le vol étaient, eux, stockés dans une mémoire qu'on ne pouvait pas modifier<sup>1</sup> de 73 ko. Pour cette mémoire, chaque bit était aussi représenté par un tore de ferrite, et c'est le sens dans lequel les fils de cuivre traversaient les tores qui fixaient un 0 ou un 1. Des armées de couturières programmeuses étaient engagées pour « tresser » ces fils correctement à travers les tores, à l'aide d'une aiguille... Sur un ordinateur moderne, nous disposons d'un SSD ou d'un disque dur qui stocke jusqu'à 1 To de données, voire plus ; soit mille milliards d'octets ! Ces mémoires de masse sont modifiables ce qui nous permet de faire des mises à jour de nos programmes, télécharger le dernier jeu qui nous plaît, ou stocker des données sur le long terme.

## RÉALISATION DU PROCESSEUR

Tout comme celui de l'AGC, les processeurs de nos ordinateurs modernes sont réalisés à l'aide de transistors. Inventé en 1947 aux laboratoires Bell aux États-Unis, ce composant électronique allait ouvrir l'ère de l'informatique. Un transistor peut remplir plusieurs fonctions, mais dans un ordinateur, c'est essentiellement une sorte de commutateur que l'on peut activer pour laisser passer le courant électrique ou pas. Ces deux états (passant ou blo-

1. Ce qu'on appelle une *Read Only Memory* ou ROM



Un des circuits intégrés qui composent le processeur de l'AGC. Il contient six transistors.

quant) expliquent pourquoi on représente l'information sous forme de 0 et de 1 uniquement. Avant l'invention du transistor, les ordinateurs utilisaient des lampes comme celles des anciennes radios pour la même fonction. Ces lampes avaient l'inconvénient d'être fragiles et de chauffer beaucoup. Avec le transistor, on gagne en fiabilité, en volume et en énergie.

Dans l'AGC, les transistors sont, pour la première fois dans un ordinateur, présents dans un circuit intégré.

Cela signifie que les transistors ne sont plus des composants individuels soudés sur une carte, mais que plusieurs d'entre eux, fortement miniaturisés, sont intégrés dans un composant qui réalise une fonction de calcul. Le processeur de l'AGC possède environ 2800 circuits intégrés contenant chacun 6 transistors. Dans un ordinateur moderne, tous les transistors du processeur se trouvent dans un seul circuit, et les capacités de miniaturisation permettent de faire tenir des milliards de ces transistors sur la surface de l'ongle d'un pouce ! Cette augmentation permet bien entendu de faire réaliser à nos processeurs modernes des calculs

bien complexes ! Une autre caractéristique des processeurs est leur fréquence, qui est indicative de la vitesse à laquelle ils traitent les instructions. Comme pour les ondes sonores, cette fréquence se mesure en Hertz. L'AGC était basé sur une fréquence de 2MHz (deux millions de Hertz), ce qui était très rapide pour son temps.

Aujourd'hui, nos processeurs fonctionnent à des fréquences de l'ordre de 3 à 4 GHz, soit mille fois plus vite.

## CLAVIER, ÉCRAN

Dans l'espace réduit d'une capsule Apollo, il était difficile d'embarquer un clavier complexe ou un écran cathodique (les « écrans plats » n'ont fait leur apparition qu'à la fin des années 1990).

L'AGC était manipulé par les astronautes à l'aide du DSKY (prononcé « dès ki »), qui comprenait un clavier rudimentaire et cinq petits écrans capables d'afficher quelques chiffres, en plus de quelques voyants de contrôle. Les astronautes entraient des commandes composées d'un « verbe » et d'un « nom », autrement dit d'une action à faire effectuer par l'ordinateur, et d'une donnée à traiter. Ces verbes et noms étaient des valeurs numériques que les astronautes devaient apprendre.

## L'AGC EST-IL BIEN UN ORDINATEUR ?

Malgré ses caractéristiques très rudimentaires, l'AGC possède bien les mêmes composants et le même principe général de fonctionnement que nos ordinateurs modernes. Mais la présence d'un processeur d'une mémoire... est-ce suffisant pour qualifier ce qu'est un

ordinateur ? Le domaine de l'informatique théorique nous offre une réponse dans les travaux du célèbre mathématicien anglais Alan Turing. Celui-ci a défini, en 1936 la notion de « machine de Turing », qui est un modèle abstrait du fonctionnement d'un ordinateur. Une machine de Turing possède une série d'états dans lesquels elle peut se trouver et qui influencent son comportement. La machine possède aussi un « ruban », comme un long ruban de papier, sur lequel elle peut lire et écrire (en fonction de l'état où elle se trouve).

Nos ordinateurs modernes (au sens large, y compris les smartphones, les tablettes, etc), ainsi que l'AGC correspondent bien à ce modèle : leurs programmes décrivent les différents états de la machine, et leurs mémoires constituent le ruban qui peut stocker de l'information. On dit donc qu'ils sont Turing-complets, et on voit bien que, malgré l'évolution technologique fulgurante qu'on a pu voir en 55 ans, les principes de base sont restés les mêmes. Notre « vieux truc » que constitue l'AGC est donc bel et bien un ordinateur à part entière !

## POUR ALLER PLUS LOIN

Si vous êtes intéressé par le fonctionnement de l'AGC, et que vous maîtrisez l'anglais, la chaîne YouTube « CuriousMarc » possède une série de vidéos montrant la rénovation et la remise en service d'un vrai AGC ! [https://www.youtube.com/playlist?list=PL-\\_93BVApb59FWr-LZfdlisi\\_x7-Ut\\_-w7](https://www.youtube.com/playlist?list=PL-_93BVApb59FWr-LZfdlisi_x7-Ut_-w7)

