

1 Un peu d'histoire : de l'ENIAC au téléphone portable

1.1 1945 : ENIAC

Le premier ordinateur entièrement électronique capable, en principe, de résoudre tous les problèmes calculatoires par la saisie d'un programme informatique est l'**ENIAC** (Electronic Numerical Integrator And Computer) construit en **1945**.

Sa capacité est de 20 nombres à 10 chiffres signés permettant chacun de réaliser 5 000 additions simples chaque seconde (pour un total de 100 000 additions par seconde). Il ne peut en revanche gérer que 357 multiplications ou 38 divisions par seconde. Cette puissance de calcul lui a permis en 1949 de calculer 2000 décimales de π de en 70 heures. Son poids est de 30 tonnes et il occupe la surface d'une maison individuelle ! Sa **consommation** est de **150 kW**, soit l'équivalent de 100 bouilloires électriques branchées simultanément ! Il faudrait la puissance électrique disponible dans une vingtaine de maisons individuelles pour l'alimenter.

1.2 Années 1960 : AGC Apollo

Dans les années 1960, les mission Apollo qui ont envoyé des hommes sur la lune ont imposé une puissance de calcul disponible dans un espace restreint. Cela a conduit à la conception de l'ordinateur AGC (Apollo Guidance Computer).

Celui-ci ne pèse que 32 kg et possède une consommation électrique suffisamment faible pour être embarqué dans une capsule spatiale fonctionnant sur batteries. Ces progrès ont été possibles grâce notamment au recours aux circuits intégrés (CI) pour réaliser des fonctions logiques : il a fallu plus de 5 000 portes NOR pour constituer l'unité de calcul de l'AGC. L'AGC possède une mémoire de stockage de 72 ko et une mémoire de travail (RAM) de 2 ko.

1.3 1971 : Intel 4004

Le **premier microprocesseur commercialisé** est apparu en **1971** : c'est le **4004 d'Intel**.



Il intègre dans **une seule puce** 2300 transistors ce qui lui donne une **puissance de calcul comparable à l'ENIAC** !

1.4 À partir de 1975 : ordinateurs personnels

En 1975 est apparu le premier microprocesseur bon marché permettant l'essor des ordinateurs personnels : le **6502** de MOS. Ce microprocesseur a équipé le tout premier ordinateur APPLE (APPLE 1) et est encore fabriqué de nos jours ! *Le site Visual 6502 permet de voir le fonctionnement interne de ce processeur lors de l'exécution d'un programme.*

À partir des années 1980, l'architecture des ordinateurs n'a plus beaucoup évolué. Les puces ont intégré de plus en plus de composants leur permettant de réaliser des opérations plus complexes. **La miniaturisation de la gravure de la puce a permis une montée de la fréquence d'horloge permettant aux ordinateurs d'aller plus vite ainsi qu'une consommation d'énergie moindre.**

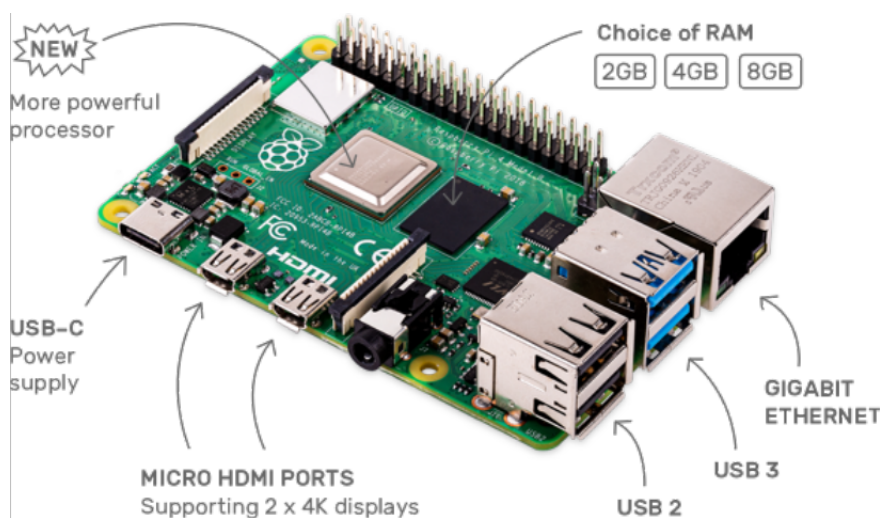
1.5 Aujourd'hui : systèmes sur puces

Les puces sont devenues tellement miniaturisées que l'on trouve maintenant sur une seule puce un système embarqué complet réalisant toutes les fonctions d'un ordinateur. La carte BBC microbit en est un exemple :



Cette carte embarque un microcontrôleur qui est un système complet tenant dans une seule puce : SoC (System on Chip). On y trouve de la mémoire RAM, de la mémoire Flash, un microprocesseur, des périphériques d'interface, un circuit radio.

Une autre catégorie de l'utilisation de ces puces intégrées se trouve dans les SBC (Single Board Computers) ou ordinateurs sur carte unique dont le représentant le plus célèbre est probablement le Raspberry Pi.



Cette carte est assez puissante pour faire fonctionner le système d'exploitation Linux et être utilisé comme ordinateur de bureau. Il est néanmoins le plus souvent utilisé en mini serveur ou sur des projets IoT.

L'aboutissement de toute cette miniaturisation est le téléphone portable qui intègre tout ce que la technologie peut nous apporter : un microprocesseur puissant, de la mémoire, des interfaces de communication rapides (4G, 5G, Wifi...), un contrôleur graphique digne d'une console de jeu, tout cela fonctionnant sur batterie avec une durée de fonctionnement de plusieurs heures.

2 Description d'un système sur puce

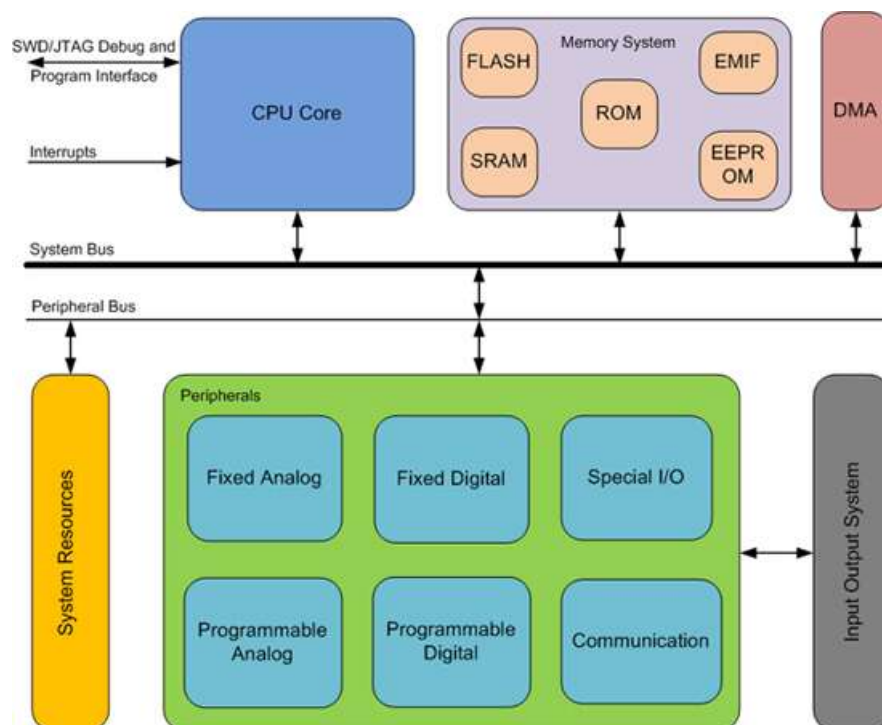
Au sein d'un ordinateur classique tel qu'un PC de bureau, le processeur (CPU) se charge de réaliser les calculs les plus répandus, ceux qui permettent par exemple de faire tourner le système d'exploitation ou un navigateur web. On trouve aussi la carte graphique (GPU) qui se charge d'afficher une image, qu'elle soit en 2D ou bien en 3D comme dans les jeux. La carte-mère relie entre eux tous les composants, le CPU, le GPU, mais également la RAM et d'autres cartes additionnelles et petites puces.

Mais depuis le début de l'ère des smartphones, on assiste à l'émergence de systèmes tout-en-un. Ainsi, **presque tout le contenu d'un ordinateur se retrouve finalement dans une seule puce sur le smartphone : le System on Chip (SoC), ou système sur une puce.**

Un SoC comprend à la fois :

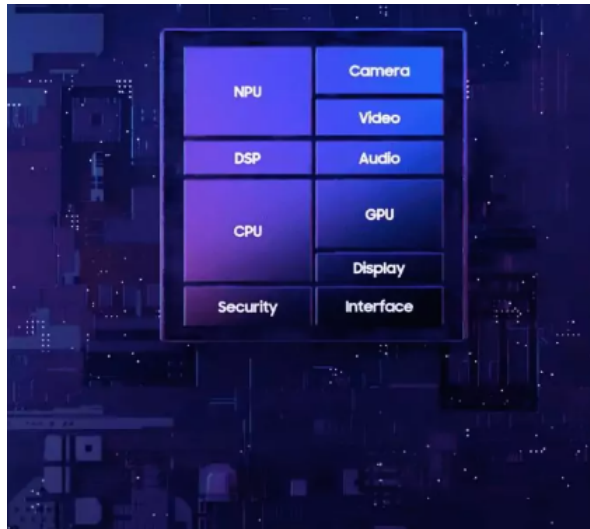
- le processeur central à un ou plusieurs cœurs de calcul
- un processeur graphique
- la mémoire vive
- la mémoire statique (Rom, Flash, EPROM)
- les puces de communications (Bluetooth, WiFi, 3G/4G/5G)
- les capteurs nécessaires au fonctionnement d'un smartphone ou d'un objet connecté
- ...

En clair, le système sur une puce comprend **tous les éléments essentiels** d'un ordinateur comprimé dans une **forme réduite**. Son faible encombrement, sa **rapidité**, son caractère complet et sa **faible consommation d'énergie** en font un circuit intégré idéal pour les applications mobiles, notamment l'IoT.



2.1 Exemple

Prenons l'exemple du SoC Exynos 990 qui équipe les Galaxy S20



Architecture du SoC Samsung Exynos 990 (Galaxy S20)

On y trouve :

- Le **processeur (CPU)**
- Le **carte graphique (GPU)**
- La **puce neuronale** ou Neural Processing Unit (**NPU**), est une puce en charge de l'intelligence artificielle de votre smartphone.
- Le **modem** qui gère non seulement le Wifi, Bluetooth, le NFC ou bien encore les technologies mobiles. C'est-à-dire la 4G, ou plus récemment la 5G mais également de plus vieux réseaux tels que la 3G.
- Le **processeur de signal numérique** ou Digital Signal Processor (**DSP**) est en charge de traiter les signaux numériques. Ainsi, il va permettre le filtrage, la compression ou encore l'extraction de différents signaux tels que la musique ou encore une vidéo.
- Le **processeur d'image** ou Image Signal Processor (**ISP**) est une puce prenant en charge la création d'images numériques. Dans la réalité et de par leurs tailles minuscules, les capteurs photo de nos smartphones sont mauvais. La qualité qu'il est actuellement possible d'obtenir est intimement liée à cette puce. En effet, c'est grâce à elle que votre smartphone va traiter la prise et la création de votre photo.
- Le **processeur sécurité** ou Secure Processing Unit (**SPU**) est le bouclier de votre smartphone. Son alimentation électrique est indépendante afin de ne pas pouvoir être éteint en cas d'attaque sur celui-ci. Le SPU est d'une importance capitale, celui-ci va stocker vos données biométriques, bancaires, votre SIM ou encore vos titres de transport. C'est lui qui contient les clés de chiffrement de vos données.
- N'oublions pas les différentes choses qui ne sont pas représentée sur le schéma, la **mémoire**, comme la mémoire LPDDR (Low Power Double Data Rate, littéralement : « Vitesse de données double à faible consommation »), ou comme l'UFS (Universal Flash Storage) qui est un standard de mémoire flash ...

3 Compléments

3.1 Le CPU du SoC

Un processeur classique cherchera à effectuer la tâche qui lui est confiée en visant la plus haute performance possible sans se soucier de la consommation d'énergie. **Le processeur d'un SoC** fonctionne lui à rebours de ce principe et les constructeurs cherchent avant tout à le rendre **le plus efficient, efficace en terme d'énergie, possible dans toutes ses tâches**. Le but est qu'il utilise le moins possible d'énergie. Mais également que l'énergie qu'il utilise, provenant de la batterie, soit le mieux utilisée, afin de rentabiliser celle-ci.

Pour arriver à de bonnes performances en ménageant la consommation d'un processeur, il est possible de jouer sur plusieurs facteurs : la fréquence du processeur, le type de cœur au sein du processeur, ainsi que le procédé de gravure.

3.2 La fréquence (MHz)

La fréquence de fonctionnement est un facteur important dans la consommation d'un processeur, mais trop la baisser a de sérieuses conséquences sur ses performances. On trouve actuellement des puces dotées d'une fréquence de fonctionnement comprise entre 1,3 et 3 GHz environ.

3.3 Les cœurs

Le type de cœurs au sein du processeur a également son rôle à jouer.

Par exemple un cœur Cortex-A53 consomme beaucoup moins qu'un cœur Cortex-A72, mais ne fournit absolument pas le même niveau de performance. Si le premier est spécialement conçu pour consommer extrêmement peu d'énergie, le second est plus porté vers la performance, mais consomme beaucoup plus.

3.4 La gravure

Enfin de nouveaux procédés de gravure sont également un facteur crucial dans le domaine des SoC pour offrir de bonnes performances avec une faible consommation. Il permet d'obtenir une amélioration des performances (en augmentant le nombre de transistors) tout en limitant l'augmentation de la taille de la puce ainsi que sa consommation électrique.

Par exemple, le passage d'une gravure 28 nanomètres à 16 nanomètres a permis d'utiliser 75% moins d'énergie pour les mêmes tâches lors du remplacement du cœur Cortex-A15 par le Cortex-A72 (2018).

La finesse de gravure est aujourd'hui de moins de 10 nanomètres.

3.5 L'architecture même du SoC

Là encore, la finesse de gravure a un rôle primordial qui couplée avec la promiscuité des différents composants permet aux données de circuler très rapidement. Cette miniaturisation permet de compenser une partie de la baisse de fréquence par rapport à un ordinateur classique.

La mémoire est accessible beaucoup plus rapidement.
L'idée est que plus l'information est proche de la source de traitement (CPU),
plus l'accès sera rapide.

Pour de meilleures performances, on cherchera donc à centraliser sur une même puce un maximum de composants. On en arrive donc à la notion de composants intégrés sur une puce.

4 Quelques exemples

Voici quelques exemples chez les principaux fabricants :

- **Apple (A13 Bionic)** : il équipe les iPhone 11, le SoC dispose d'un CPU 6 cœurs : 2 cœurs 2.65 GHz Lightning et 4 cœurs 1.8 GHz Thunder. Le GPU du SoC est le A13 GPU 4 cores.
- **Qualcomm (Snapdragon 865)** : Qualcomm est le leader sur le marché des SoC mobiles. Le Snapdragon 865 dispose d'un CPU 5G 8 cœurs : 1 cœur 2.8 GHz Kryo 585, 3 cœurs 2.4 GHz Kryo 585 et 4 cœurs 1.8 GHz Kryo 585. Le GPU quant à lui est un Adreno 650.
- **Huawei (Kirin 990)** : il équipe Huawei P40 et P40 Pro. On y retrouve un CPU 5G 8 cœurs avec 2 cœurs 2.86GHz A76, 2 cœurs 2.36GHz A76 et 4 cœurs 1.95GHz A55. La carte graphique (GPU) est un Mali-G76 MP16.
- **Samsung (Exynos 990)** : il équipe les Samsung Galaxy S20 en Europe. Le Soc Exynos 990 dispose d'un CPU 5G 8 cœurs : 2 cœurs 2.73GHz Samsung M5, deux cœurs 2.5GHz Cortex A76 et quatre cœurs 2GHz Cortex A55. Pour finir, le GPU est un ARM Mali G77MP11.