Composants intégrés d'un système sur puce

1. Avantages des systèmes sur puce

La miniaturisation a permis d'**augmenter les capacités des mémoires** en stockant de plus en plus de transistors sur le même espace, mais aussi d'**accélérer les performances** des microprocesseurs, d'une part parce que la multiplication du nombre de circuits permet d'augmenter les performances globales, d'autre part parce que la présence de tous les circuits (CPU, GPU, mémoire…) sur une même puce évite les temps de communication entre des circuits éloignés.

Les systèmes sur puce (*SoCs* pour *Systems on Chips* en anglais) regroupent dans un seul circuit nombre de fonctions autrefois effectuées par des circuits séparés assemblés sur une carte électronique.
Ces circuits plus petits ont une **consommation réduite**, ce qui confère une meilleure **autonomie** aux smartphones.
Ils chauffent moins que les ordinateurs traditionnels et n'ont donc généralement pas besoin d'être refroidis par des ventilateurs.

La production des SoCs est très rentable puisque la valeur ajoutée est énorme relativement à la quantité de matière première utilisée.

Un système sur puce est conçu et mis au point de façon logicielle. Ses briques électroniques sont accessibles par des APIs (*Application Programming Interface*). Cela signifie qu'en pratique, on ne cherche pas à comprendre comment un circuit fonctionne, on utilise son interface comme une bibliothèque logicielle. Ce système d'assemblage de briques permet de produire des SoCs spécifiques aux besoins.

2. La course à la miniaturisation, ou la véritable histoire des ordinateurs

1946 : invention du **premier ordinateur** entièrement électronique, l'**ENIAC**, conçu par l'armée américaine pour calculer la trajectoire des tirs d'artillerie. Pesant 30 tonnes, de la taille d'une grande pièce, il utilisait 19 000 lampes.

1947 : invention du **premier transistor** dans les **laboratoires Bell** par les Américains John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain qui ont reçu le prix Nobel de physique en 1956. Il est dix fois plus petit que les lampes.

1954 : fabrication du **premier ordinateur à transistors** dans les laboratoires Bell, le TRADIC Phase One

1957 : **premier ordinateur à transistors commercialisé**, l'**IBM 608** compte 3 000 transistors.

1958 : Jack St. Clair Kilby, de **Texas Instruments**, fabrique le **premier circuit intégré**, en plaçant sur une plaque de germanium semi-conductrice les transistors, les résistances et les capacités. Il inventera aussi la calculatrice de poche Texas Instruments commercialisé en 1972.

1965 : énoncé de la **loi de Moore**, modifié en 1975, dans lequel Gordon Moore, cofondateur d'Intel, prédit que la quantité de transistors que l'on peut graver sur une carte de silicium doublera tous les deux ans. Cette prédiction est devenue la ligne directrice d'Intel, et des autres fabricants de puces électronique.

1966 : **premier ordinateur à circuit intégré en silicium**, l'**Appolo Guidance Computer**. Chaque vol à destination de la Lune était équipé de deux AGC. L'AGC avait une vitesse d'horloge de 1 Mhz, une mémoire morte (ROM) de 72 ko contenant les programmes, et une mémoire vive (RAM) de 4 ko.

En 1969, dans l'usine IBM de Corbeil-Essonnes, le directeur technique montre les différentes étapes de miniaturisation des composants de l'ordinateur franchies en dix ans, avec l'utilisation du transistor et du circuit intégré. Vidéo :
https://enseignants.lumni.fr/fiche-media/00000000640/les-transistors-et-la-miniaturisation-de-l-ordinateur.html

1971 : **premier microprocesseur commercialisé**, l'**Intel 4004**, 4 bits. C'est la première intégration réussie de toutes les fonctions d'un processeur sur un seul et unique circuit intégré. Il est beaucoup moins performant que les autres ordinateurs de l'époque mais ouvre la voie vers la construction d'ordinateurs bien moins chers. C'est le début des ordinateurs personnels.

La prédiction de Moore, prophétie autoréalisatrice, a tenu jusqu'à aujourd'hui.
En 1971, l'Intel 4004 comptait 2 250 transistors.
En 2019, l'AMD Epyc Rome compte 39 540 000 000 ≈ 39 milliards.
Or, $2\,250 \times 2^{24} \approx 38$ milliards (24 doublements en 48 ans). La loi de Moore est respectée !

En 2020, seuls **Samsung** et **TSMC** fabriquent des transistors de 5 nm (nanomètres). TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) fabrique des puces pour Apple, AMD, Nvidia (cartes graphiques) et Qualcomm (connu notamment pour les SoCs Snapdragon équipant de nombreux smartphones).
Intel prévoie des processeurs 5 nm pour 2023 alors que TSMC prépare déjà le 3 nm ou 2 nm, donnant un sérieux avantage concurrentiel à AMD.

La mort de la loi de Moore
Un transistor, plus précisément un MOSFET (metal–oxide–semiconductor field-effect transistor) de 2 nm fait dix fois la taille d'un atome de silicium. Intel envisage le 1.4 nm pour 2029 mais on atteint les limites du possible.

Les chercheurs se tournent vers deux nouvelles pistes :

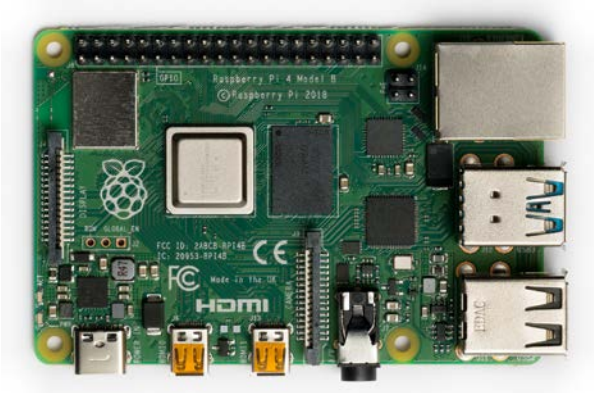
- les puces neuromorphiques simulent les neurones des cerveaux des êtres vivants
- les puces quantiques remplacent le bit (2 valeurs possibles) par le qubit qui prend simultanément une infinité d'états possibles.

3. Exemples de SoC

3.1. Raspberry Pi

Le **Raspberry Pi** est un nano-ordinateur de la taille d'une carte de crédit conçu à l'université de Cambridge. On peut l'acheter nu pour quelques dizaines d'euros.

Le SoC est la pièce argentée au centre. Le Raspberry Pi 4 est équipé du Soc Broadcom BCM2711. Il regroupe le CPU ARM Cortex-A72 (processeur quatre cœurs à 1.5 Ghz), le GPU (processeur graphique), les circuits permettant de gérer la mémoire (MMU), l'Ethernet…



By Miiicihiaieil Hieinizilieir / Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80140657

La mémoire du Raspberry n'est pas incluse dans le SoC. Il s'agit du rectangle noir à droite sur le dessin.

3.2. Smartphones

Les SoCs des smartphones rassemblent différents circuits, principalement :

- Microprocesseur principal : CPU
- Microprocesseur graphique : GPU
- Microprocesseurs spécialisés dans le traitement d'image (ISP, Image Signal Processing), dans l'encodage/le décodage multimedia (DSP, Digital System Processor)
- Mémoire
- Contrôleurs permettant de gérer les composants du smartphone : appareil photo, GPS, connections (4G, 5G, Wifi, Bluetooth…), entrées/sorties, alimentation
- Gestion de la sécurité

Le SoC Exynos 980 de Samsung, gravé en 8 nm, équipe le Samsung Galaxy A71 5G. C'est le premier SoC avec modem 5G. Son CPU compte huit cœurs (deux Cortex-A77 et six Cortex-A55).

Le circuit « Connectivity » gère le Wifi, le Bluetooth, le GPS
« Camera » correspond à l'ISP.
« Video » effectue l'encodage et le décodage de vidéos.
NPU (Neural Processing Unit) est un accélérateur d'intelligence artificielle.

Schéma de l'Exynos 980 de Samsung

Le SoC Snapdragon 865 de Qualcomm, gravé en 7 nm par TSMC, équipe de nombreux smartphones haut de gamme, dont le Xiaomi Mi10. Son CPU dispose de 8 cœurs.

Qualcomm Hexagon 698 Processor est le DSP. Il permet aussi l'accélération de l'intelligence artificielle, ce SoC n'ayant pas de NPU.
Qualcomm Adreno 650 GPU comporte trois blocs : GPU, vidéo et affichage.
Qualcomm Sensing Hub gère les entrées audio, vidéo et les capteurs.
Le Snapdragon 865 est prévu pour être couplé avec un modem 5G qui n'est pas intégré dans le SoC.

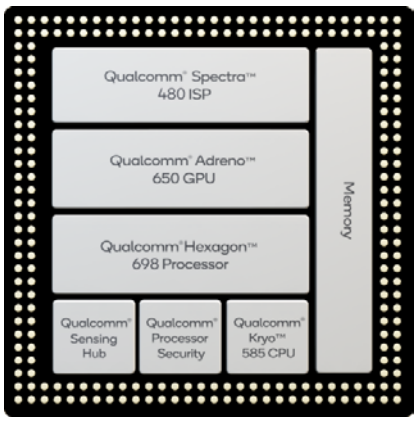


Schéma du **Snapdragon 865 de Qualcomm**