



Cours Système sur puce (SoC)

Antoine MAROT (antoine.marot@ensemblescolaire-niort.com)

David SALLÉ (david.salle@ensemblescolaire-niort.com)

Julien SIMONNEAU (julien.simonneau@ensemblescolaire-niort.com)

Ce document est mis à disposition selon les termes de la licence

Creative Commons BY-NC-SA 4.0



Version du document v0.1

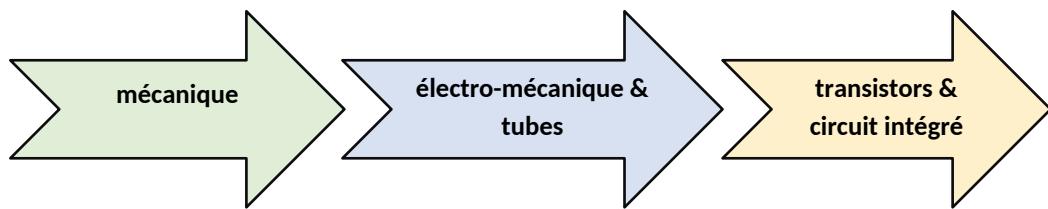
Date 20/01/2021

Table des matières

| | |
|---|----|
| 1 - Histoire du calcul : des cailloux aux SoC..... | 3 |
| 1.1 - Ère mécanique (-??? à 1900)..... | 3 |
| 1.2 - Ère électro-mécanique et tubes (1900 à 1950)..... | 4 |
| 1.3 - Ère électronique (1950 à aujourd'hui)..... | 5 |
| 1.4 - Et après ?..... | 6 |
| 2 - Assemblage..... | 7 |
| 2.1 - Vue d'ensemble..... | 7 |
| 2.2 - Du transistor au SoC | 7 |
| 3 - Les systèmes sur puce (SoC)..... | 8 |
| 3.1 - Définition..... | 8 |
| 3.2 - Marché..... | 8 |
| 3.3 - Avantages/inconvénients..... | 9 |
| 3.4 - Architecture..... | 9 |
| 3.5 - Composants..... | 10 |
| 4 - Activités à faire | 12 |
| 4.1 - Vos smartphones..... | 12 |
| 4.2 - Le Raspberry Pi 3B..... | 13 |
| 4.3 - Le robot Lego Mindstorm EV3..... | 14 |
| 5 - Webographie..... | 15 |

1 - Histoire du calcul : des cailloux aux SoC

Depuis l'aube de l'humanité, l'Homme compte et effectue des calculs. Très tôt il a cherché des outils pour faciliter ses calculs et les rendre plus fiables.



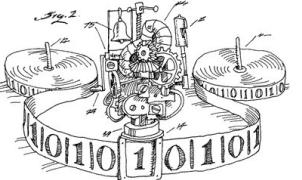
1.1 - Ère mécanique (-??? à 1900)

Le mot « **calcul** » vient de « calculus » en latin, caillou.

| Quand | Qui | Quoi |
|-------|---------------------------------|--|
| -???? | Un berger | Il dépose dans un panier autant de cailloux que de moutons |
| -2000 | ??? | Le boulier en plus de représenter les nombres permet d'effectuer des calculs |
| 1617 | John NAPIER | Le bâton de NAPIER permet d'effectuer des multiplications et divisions sous forme d'additions/soustraction sur le même principe que le logarithme |
| 1642 | Blaise PASCAL | La pascaline utilise un système d'engrenages pour effectuer des calculs. Elle sera améliorée par Leibniz plus tard |
| 1834 | Charles BABBAGE Ada LOVELACE | La machine analytique permet d'exécuter une séquence d'opérations matérialisée sur des cartes perforées. |
| 1854 | George BOOLE | Il démontre que tout processus logique peut se décomposer en une suite d'opérations logiques ET , OU et NON |

1.2 - Ère électro-mécanique et tubes (1900 à 1950)

Cette époque voit la mise en relation de différentes idées de l'ère mécanique avec les nouvelles découvertes.

| Quand | Qui | Quoi | |
|--------------|--|--|---|
| 1907 | John FLEMING Lee FOREST DE | Invention du tube à vide et de la triode ancêtre du transistor capable de générer 2 états courant/pas courant |  |
| 1935 | IBM | Lance un calculateur à relais utilisant des cartes perforées : IBM 601 Il y aura 1500 exemplaires vendus aux scientifiques et comptables |  |
| 1936 | Alan TURING | Invente la machine de Turing (machine théorique) et définit ce qui est calculable par une machine de ce qui ne l'est pas |  |
| 1938 | Claude SHANNON | Pendant sa thèse il définit le bit (BInary digiT) et fait le rapprochement entre les états d'un relai et l'algèbre booléenne | |
| 1941 | John ATANASOFF Clifford BERRY | Création d'un calculateur binaire à partir de tube à vides et de l'algèbre booléenne : ABC |  |
| 1941 | Konrad ZUSE | Le Z3 , premier calculateur avec programme enregistré dans la machine (2600 tubes) |  |
| 1943 | Alan TURING Howard AIKEN | Le Colossus I est créé pour déchiffrer les messages secrets Enigma de l'armée allemande (1500 tubes) Le Harvard Mark I est créé la même année basé sur l'architecture Harvard. |  |
| 1946 | Prespert ECKERT John W. MAUCHLY John Von Neumann | L' ENIAC ses 30 tonnes et ses 19000 tubes est utilisé pour faire des calculs balistiques pour l'armée américaine. Son successeur l' EDVAC sera basé sur l'architecture de Von Neumann |  |

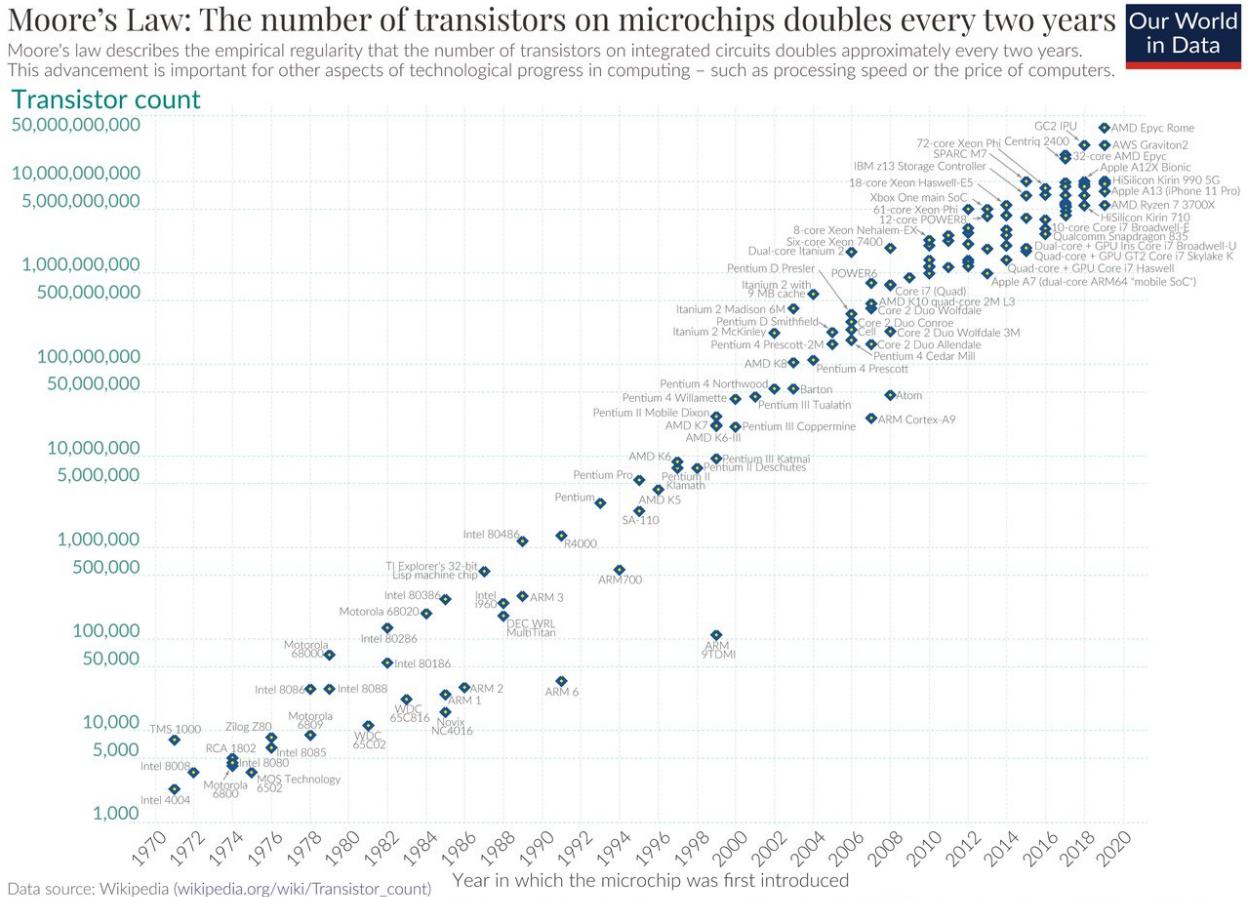
1.3 - Ère électronique (1950 à aujourd'hui)

L'invention décisive du transistor va tout changer, car il permet de miniaturiser les machines.

| Quand | Qui | Quoi |
|--------------|---|--|
| 1947 | John BARDEEN William SHOCKLEY Walter BRATTAIN | Invention du transistor qui comme le tube à vide permet de créer un interrupteur commandable. Ce dernier étant plus petit, plus fiable et moins gourmand en énergie |
| 1958 | Alan KILBY Robert NOYCE | Invention du circuit intégré c'est à dire plusieurs transistors reliés entre eux sur une même puce |
| 1960 | IBM | IBM remplace les tubes par des transistors et circuits intégrés sur sa gamme d'ordinateurs IBM 7000 et plus tard IBM 360 |
| 1971 | Intel | Création par Intel du premier microprocesseur 4 bits le 4004 embarquant tous les composants (registres, ALU, instruction decoder) avec 2300 transistors. Équivalent à l'ENIAC |
| 1974 | Intel | Premier SoC sur la montre Microma de Hamilton pour gérer l'écran LCD, le timer... |
| 1976 | Apple | Sorti du premier ordinateur « grand public » le Apple I basé sur le microprocesseur 6502 (4500 transistors). Jusque là, les ordinateurs étaient restés dans les domaines industriels, scientifique et militaire |
| 1981 | IBM | Lancement du IBM PC basé sur un processeur Intel 8088 (29000 transistors) |
| 1984 | Motorola | Premier téléphone mobile cellulaire le DynaTAC 8000X sur réseau AMPS Nokia créera 10 ans plus tard le premier téléphone GSM |
| 2007 | Apple | Lancement de l' iPhone 1 . Le téléphone devient un smartphone avec ses applications. Il est basé sur un SoC Samsung S5L8900 (processeurs ARM11 et Power VR soit environ 1 milliards de transistors) |

1.4 - Et après ?

La loi de Moore indique un doublement du nombre de transistors tous les 2 ans environ. Elle se vérifie depuis les premiers microprocesseurs, mais quand sera-t-il à l'avenir sachant que la miniaturisation des transistors (3nm aujourd'hui) est proche des limites de la physique ?



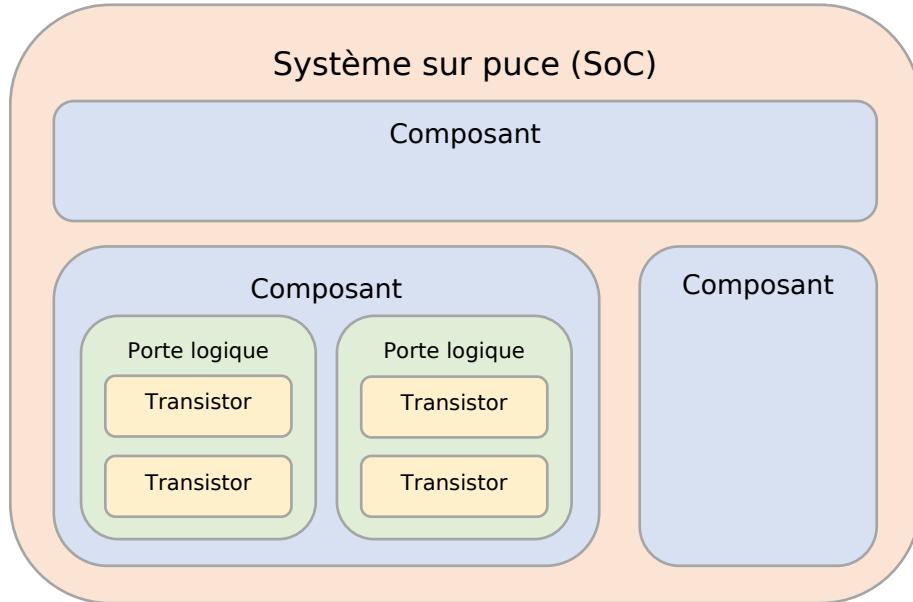
D'autres pistes de recherche sont en cours pour calculer sans transistors, on peut citer notamment :

| Quoi | Comment | Réalisations |
|-------------------------|--|---|
| Calculateur quantique | Il utilise des qubits (à la fois 0 et 1 en même temps) pour effectuer certains calculs en parallèle beaucoup plus vite que les machines à transistors. <i>Les résultats sont par contre très instables et difficiles à lire</i> | Quelques calculs bien particuliers. (Google en 2019 avec un processeur à 53 qubits) |
| Calculateur moléculaire | Il utilise l'ADN pour coder les problèmes et la biologie moléculaire des nos cellules pour les résoudre. Le processus est long, très long. | Recherche du meilleur chemin, TicTacToe |

2 - Assemblage

2.1 - Vue d'ensemble

Dans ce chapitre, quelques extraits vidéo présenteront le fonctionnement des transistors, des portes logiques, des calculateurs pour finir par les systèmes sur puce.



2.2 - Du transistor au SoC

Fonctionnement des **transistors** électroniques NPN et PNP :

<http://www.youtube.com/watch?v=Uqvk7x6nmfg&t=1m17s>

Fonctionnement des **portes logiques** à partir d'un assemblage de transistors :

https://www.youtube.com/watch?v=L_EFljkLz_M&t=1m4s

Fonctionnement d'un composant **calculateur** (additionneur) à partir de portes logiques donc de transistors :

https://www.youtube.com/watch?v=L_EFljkLz_M&t=5m02s

Fonctionnement d'un **système sur puce** (SoC) à partir de composants constitués de composants, eux mêmes réalisés à partir de portes logiques et de transistors :

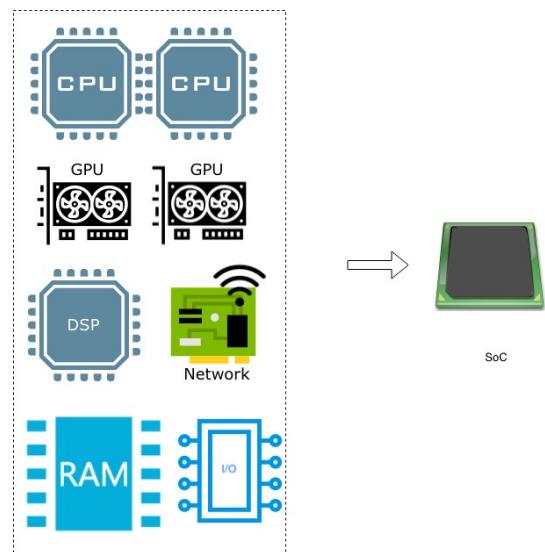
<https://www.youtube.com/watch?v=NKfW8ijmRQ4>

3 - Les systèmes sur puce (SoC)

3.1 - Définition

Comme son nom l'indique un système sur puce (**System on Chip** in english) est un assemblage de différents composants sur une même puce au lieu de les mettre sur une même carte.

Apparu dans les années 70 en même temps que les premiers microprocesseurs, ils ont connu une grande popularité dans les années 90 avec l'essor de la téléphonie mobile et plus tard avec les objets connectés.

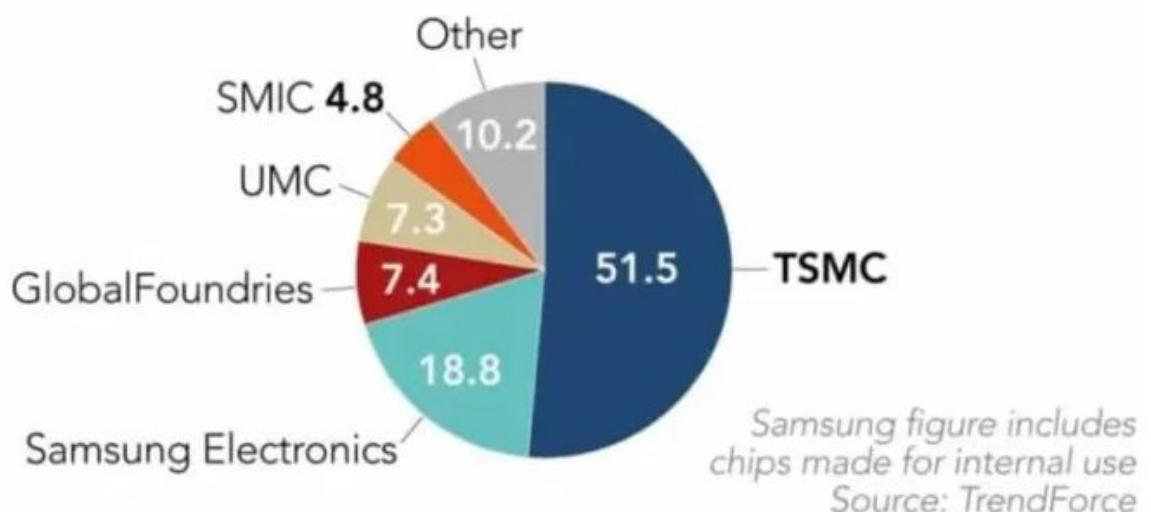


3.2 - Marché

Le marché des SoC est en croissance constante porté par les smartphones.

La société TSMC est l'un des principaux fabricants de SoC et fournit notamment : Apple, Broadcom, Qualcomm, MediaTek, AMD, Nvidia...

Global foundry market share in April-June (In percent)



3.3 - Avantages/inconvénients

Les systèmes sur puce de part leur conception ont des avantages mais aussi des inconvénients par rapport à une solution traditionnelle type carte mère d'ordinateur

| Critère | SoC | Carte mère PC |
|--------------------------------------|--|---|
| |  |  |
| Taille | +++ | - - - |
| Consommation électrique | ++ | - - |
| Chaleur dégagée | ++ | - - |
| Circulation des données | ++ | - - |
| Bruit | ++ | - - |
| Adaptation aux besoins spécifiques | + | - |
| Coût (phase de fabrication) | + | - |
| Coût (phase de conception) | - | + |
| Puissance de calcul | - | + |
| Complexité conception | - - | ++ |
| Facilité pour dégager la chaleur | - - | ++ |
| Possibilité de réparation/évolution* | - - - | +++ |

(*) concernant l'évolution il existe les PSoc : Programmable SoC qui permettent de pouvoir faire évoluer certaines parties d'un SoC.

3.4 - Architecture

Autres différences notables au niveau de l'architecture :

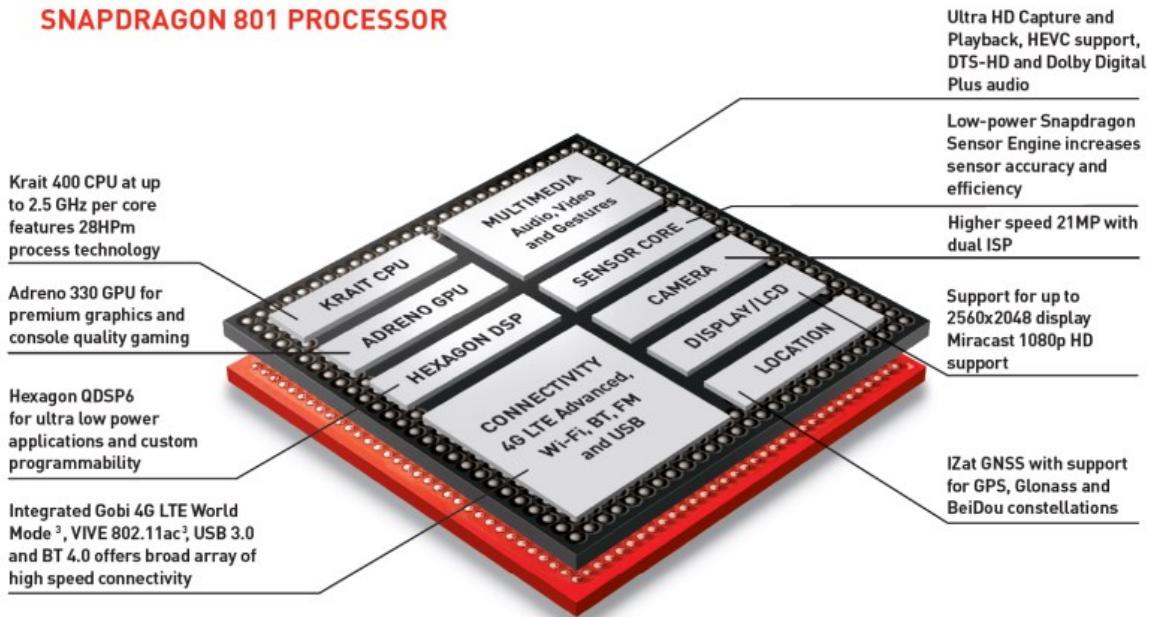
| Critère | SoC | PC |
|----------------------------------|---|---|
| Architecture | ARM | x86 |
| Jeu d'instructions du processeur | RISC (Reduced Instructions Set Computer) | CISC (Complex Instructions Set Computer) |

L'architecture ARM est la plus courante sur les SoC car n'importe quel fabricant peut concevoir et fabriquer des puces ARM en achetant une licence à la société éponyme.

Les instructions RISC, plus courtes et plus simples, sont censées s'exécuter plus vite sur le processeur.

3.5 - Composants

Voici le diagramme d'un SoC de smartphone ainsi qu'une descriptions des composants couramment rencontrés :

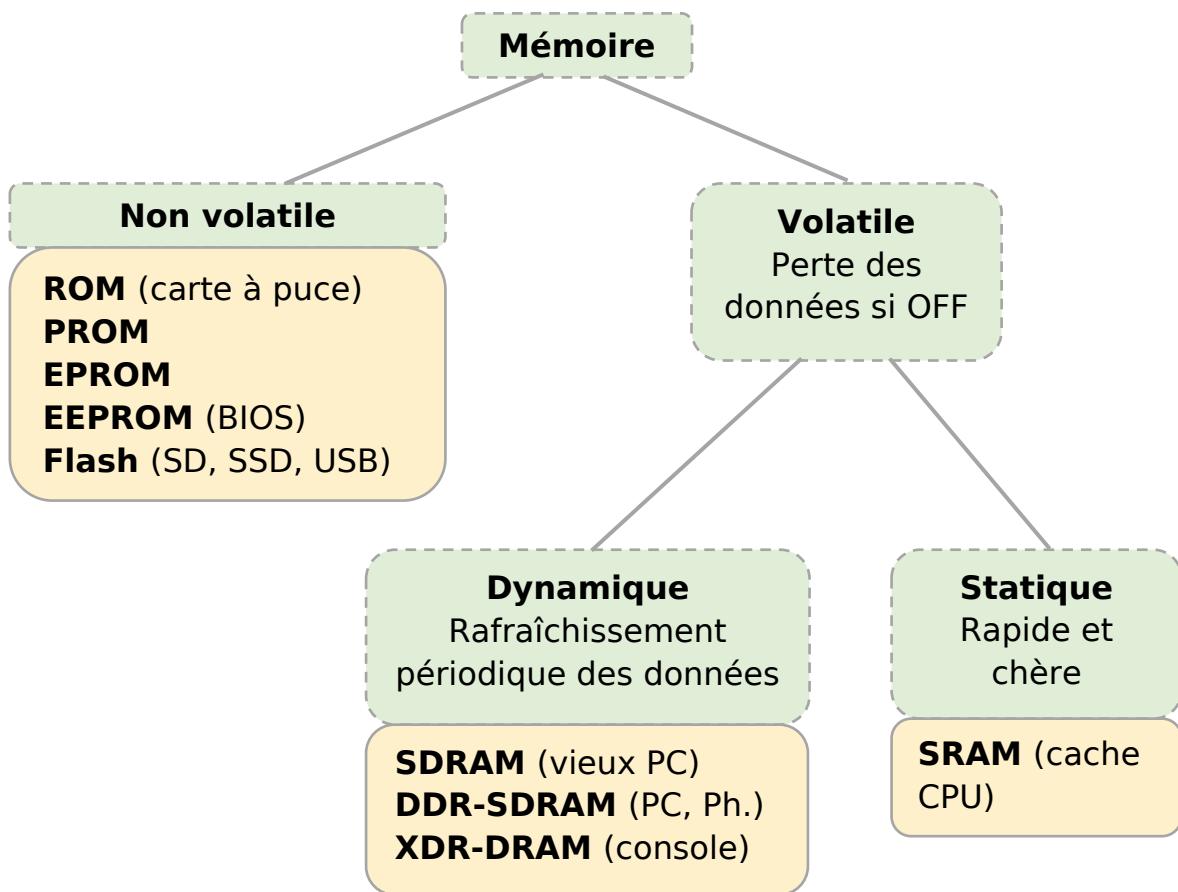


| Nom | Rôle |
|-----------------|--|
| CPU | Central Processing Unit : c'est le processeur et chef d'orchestre du SoC comme sur un PC. Il peut être composé de plusieurs coeurs et travaille à une certaine fréquence |
| GPU | Graphics Processing Unit : en charge de calculer les images affichées à l'écran |
| ISP | Image Signal Processor : gère les images prises par l'appareil photo |
| DSP | Digital Signal Processor : gère les signaux en provenance du micro, des accéléromètres, GPS... |
| Display | Gère l'écran en lien avec le GPU |
| NPU | Neural Processing Unit : gère tout ce qui est en lien avec le machine learning (reconnaissance vocale, habitudes...) |
| NoC | Gère la communication entre tous les composants |
| Interface Modem | Interface de communication vers modem 3G/4G/5G, WiFi, Bluetooth... |
| SPU | Security Processing Unit : gère le cryptage/décryptage des données |
| Memory | Gère les transferts de données entre CPU et mémoire cache ou mémoire DRAM |
| Video | Gère le codage/décodage des flux vidéo (MP4) |
| Audio | Gère le codage/décodage des flux audio (MP3) |
| Storage | Gère les transferts de données avec la mémoire Flash et/ou la carte SD |
| GPIO | General Purpose Input Output : entrées/sorties vers boutons, leds |

Unités utilisées pour comparer les puissances de calcul :

- le nombre de **transistors**
- le nombre d'**instructions** exécutées à la secondes (MIPS : Million of Instructions Per Second, GIPS ou TIPS). Souvent utilisé pour les CPU
- le nombre de **calculs** effectués par seconde (FLOPS : Floating-point Operations Per Second). Souvent utilisés pour les GPU
- les benchmarks

Les mémoires peuvent être de différents types :



4 - Activités à faire

4.1 - Vos smartphones

Trouvez pour votre smartphone les informations suivantes concernant le SoC utilisé (le diagramme de bloc pourra vous être utile).

Complétez le tableau collaboratif **soc_smartphones.xlsx** présent sur Moodle avec vos valeurs.

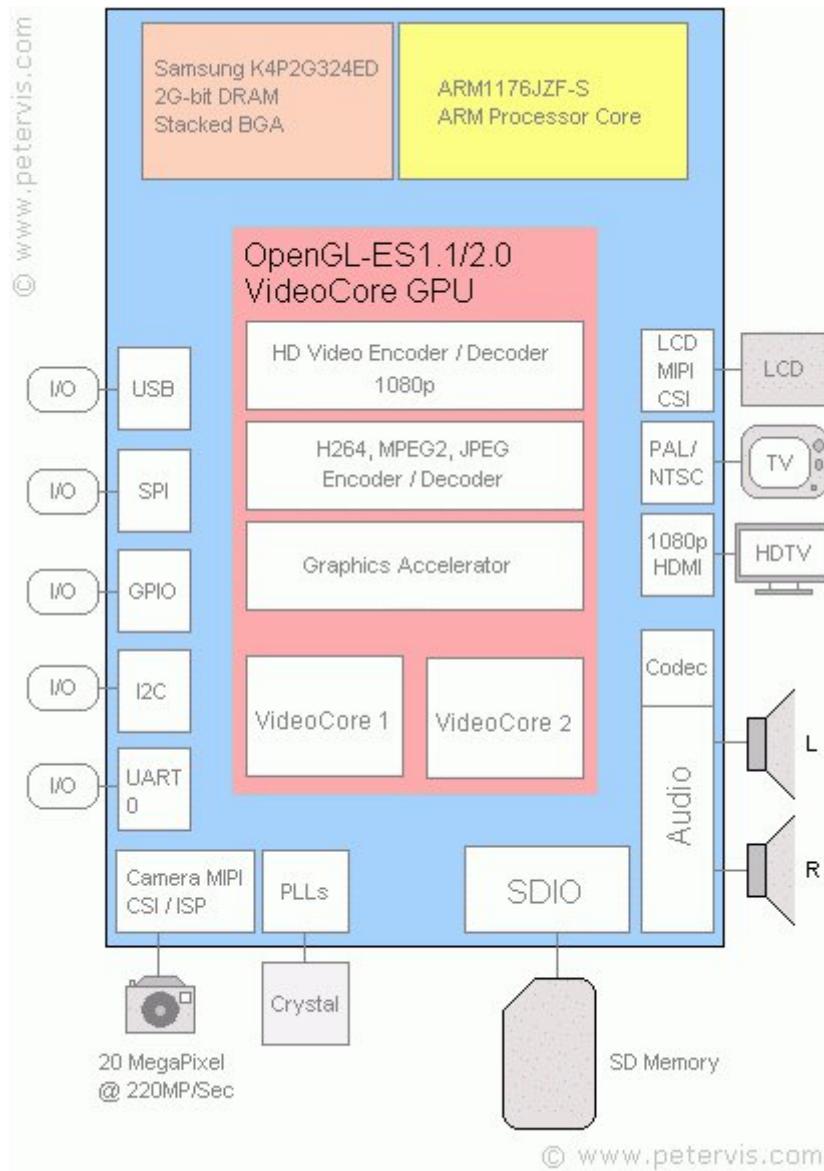
| Critère | Valeur |
|---|---------------|
| Nom, référence | |
| Architecture (ARM, x86, autres) | |
| Taille (8, 16, 32, 64, 128 bits) | |
| Taille gravure transistors (en nm) | |
| Nombre de transistors | |
| Fréquences de travail (en Hz) | |
| Nombre de cœurs | |
| Puissance électrique consommée (en Watts) | |
| Type de mémoire utilisée | |
| Taille de la mémoire utilisée (en octets) | |
| Puissance de calcul du GPU (en FLOPS) | |
| Score benchmark GeekBench 5 | |
| Score benchmark AnTuTu 8 | |

Comparez vos valeurs avec celles de vos camarades de classe.

4.2 - Le Raspberry Pi 3B

Le Raspberry Pi est l'un des plus célèbres mini-ordinateurs. Il est utilisé pour de multiples usages : mini-serveur, console de jeux, lecteur multimédia, caméra, pilotage robot...

Il est équipé du SoC BCM2837 dont voici le diagramme de bloc :

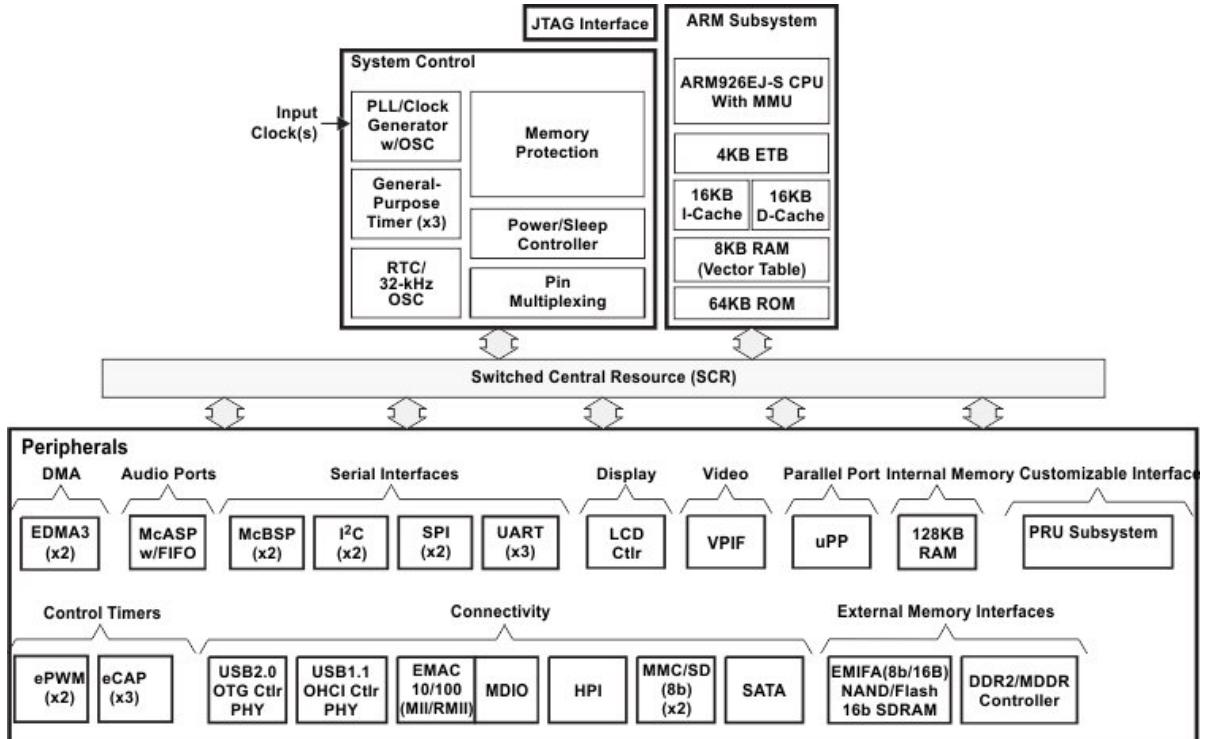


Repérez les différents composants présents sur ce SoC ainsi que ses principales caractéristiques.

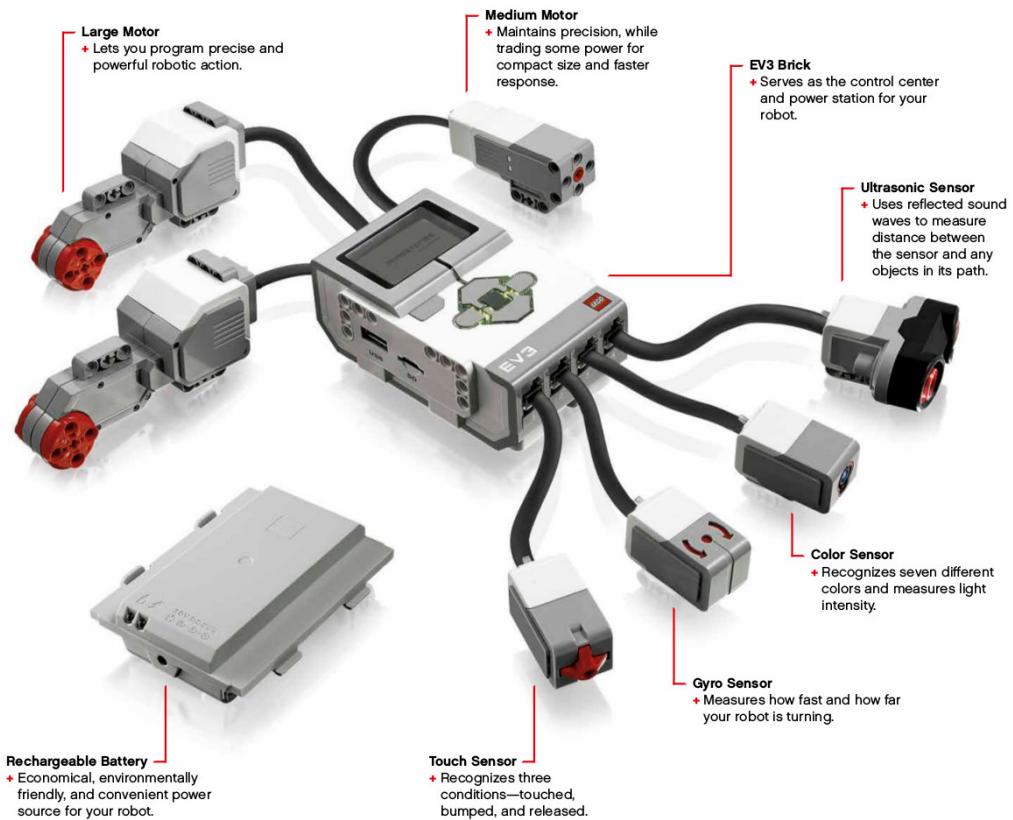
Comparez les aux résultats obtenus avec vos smartphones.

4.3 - Le robot Lego Mindstorm EV3

Le robot Lego Mindstorm EV3 est équipé d'un SoC Texas Instrument Sitara AM1808 dont voici le diagramme :



Faire le lien entre les composants du SoC du diagramme ci-dessus avec les composants visibles du robot ci-dessous :



5 - Webographie

Quelques liens pour aller plus loin :

- <https://www.nand2tetris.org/> (apprendre à créer un ordinateur du transistor au jeu de Tetris en passant par le CPU et le système d'exploitation)
- <https://eater.net/8bit> (créer un CPU 8 bits à partir de composants électroniques)
- <https://www.youtube.com/watch?v=Kk2MH9O4pXY> (Créer un ordinateur à partir des cellules du jeu de la vie de Conway)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count (nombre de transistors sur différents processeurs)
- http://www.info.univ-angers.fr/~richer/ensl3i_crs4.php (présentation détaillée des mémoires)