

Système sur puce

- Du silicium au smartphone -

J. Boucher

Lycée Pierre-Paul RIQUET, Terminale NSI

5 mai 2025

Plan

Les circuits

« Les circuits, c'est le grand moteur de l'électronique, de l'informatique. Sans les circuits il n'y en aurait pas ! C'est la progression des circuits qui permet le monde numérique. »

G. Berry, Collège de France, avril 2008.

→ [Lien du cours « Des circuits aux systèmes sur puces »](#)

« Toute ligne de code, écrite avec votre langage de programmation préféré, conçue avec votre paradigme de programmation préféré est exécutée par des opérateurs logiques constitués d'atomes de silicium assemblés dans un micro circuit au cur d'un système numérique. Ces opérateurs nanoscopiques sont gravés sur le silicium par un processus de fabrication dont les données techniques de réalisations sont elles-mêmes issues d'un flot de conception d'une chaine logicielle complexe. »

Évolution des circuits à travers le temps

Les machines numériques basées sur un **système à deux états** sont réalisés chronologiquement avec :

- des systèmes mécaniques,
- des systèmes électromécaniques,
- des tubes électroniques
- des **transistors** (1947).

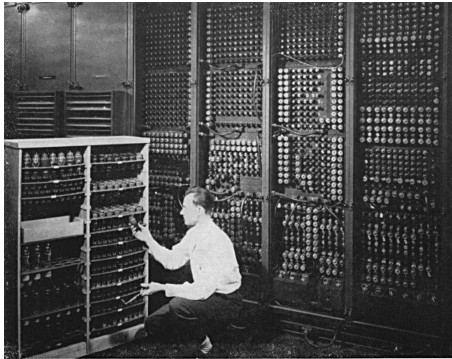


→ L'implantation de quelques transistors dans un seul **circuit** appelé « **intégré** » à base de semi-conducteur fut réalisé en 1958 par Kilby et Noyce.

Ordinateur : machine numérique programmable

« **L'ENIAC** (1945) est remarquablement volumineux : il contient

- 17 468 tubes à vide,
- 7 200 diodes à cristal, 1 500 relais,
- 70 000 résistances,
- 10 000 condensateurs,
- et environ 5 millions de soudures faites à la main »



Intégration et diversification des circuits

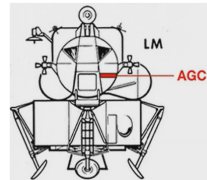
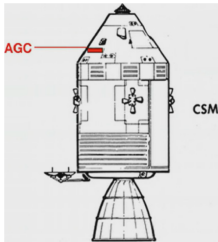
Avec l'avancée des technologies, l'intégration des circuits spécialisés dans les systèmes est de plus en plus grande :

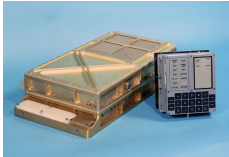
- les circuits logiques combinatoires ou séquentiels ;
- les unités arithmétiques et logiques ou ALU ;
- les mémoires vives (volatiles) ou mortes (permanentes) ;
- les circuits analogiques.

L'essor des supercalculateurs

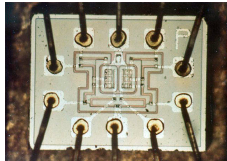
Le **programme Apollo** (1969) a contribué à l'essor de l'informatique :

- développement des programmes de navigation et de pilotage
→ la scission entre matériel et logiciel
- développement de méthodes de programmation et de test novatrice
→ réponse à l'exigences de fiabilité et de la complexité des logiciels
- utilisation des circuits intégrés semi-conducteurs.





Apollo Guidance Computer



Circuit double-porte NON-OU (NOR)

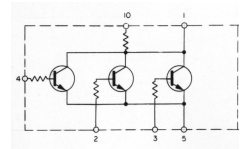
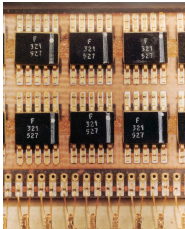


Schéma du circuit



Circuits intégrés de l'AGC



Margaret Hamilton et le code de l'AGC

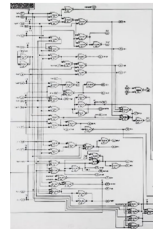
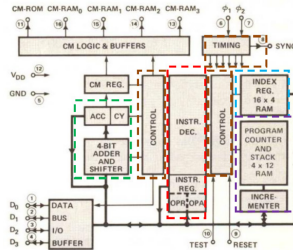
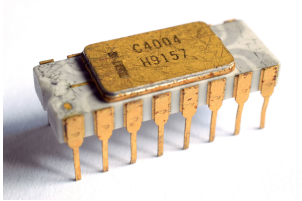


Schéma de l'AGC

La course à la miniaturisation est lancée...

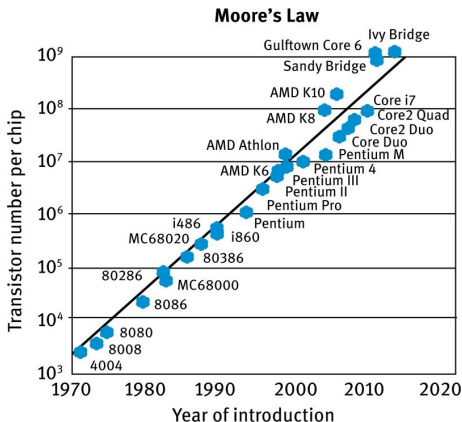
Le 4004 d'Intel est le 1er microprocesseur commercialisé en 1971.



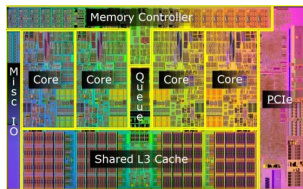
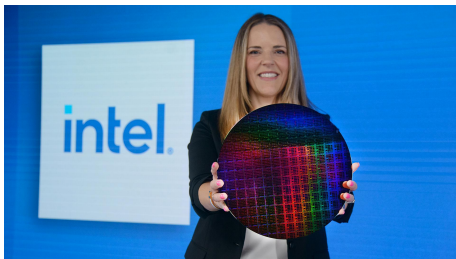
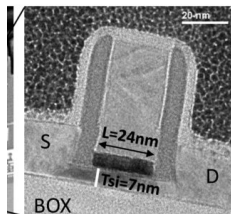
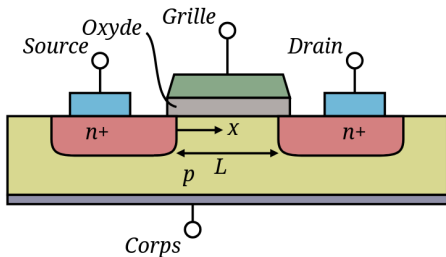
→ première intégration de toutes les fonctions d'un processeur sur un seul et unique circuit intégré

« Le nombre de transistors des microp processeurs sur une puce de silicium doit doubler tous les deux ans »

Gordon E. Moore (1975)

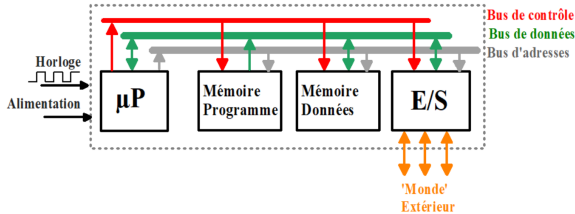


Du micromètre au nanomètre...

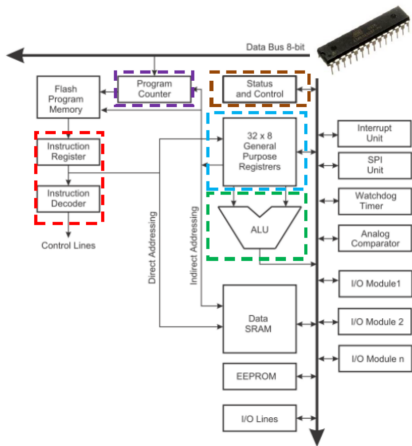


Vers l'intégration du système minimum

- Un **microprocesseur** ne peut fonctionner seul : il doit être associé à des mémoires vives, des mémoires mortes, des gestionnaires d'entrées sorties, des horloges, etc.



- Le **microcontrôleur** est l'intégration du système minimum **sur une seule puce**. Il permet :
 - la réduction de la taille des circuits imprimés sur lesquels sont interconnectés les différents composants d'un système ;
 - la réduction des coûts de fabrication des cartes.



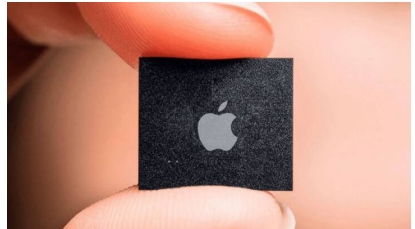
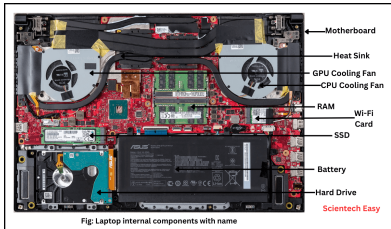
L'ATmega328 cœur de la carte Arduino Uno

Vers l'intégration maximale d'un système sur puce ou SOC

- Les microcontrôleurs restent de nature numérique...
- Les **système sur puce**, ou SOC « System On Chip » en anglais, permettent d'intégrer toutes les fonctions d'un système sur une même puce :
 - des fonctions d'électronique analogique ;
 - des fonctions d'électronique de puissance ;
 - des fonctions de communication, d'accès aux réseaux, au Bluetooth ;
 - accès à l'IoT Internet des Objets.
- Ces systèmes se rencontrent dans l'informatique embarquée, ou embedded en anglais, c'est-à-dire dans les systèmes de traitement de l'information qui agissent en toute autonomie, enfouies à l'intérieur de nos objets du quotidien.

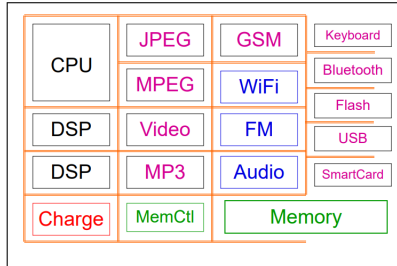
Exemple du smartphone

- Un smartphone intègre les mêmes composants qu'un PC (CPU, RAM, carte graphique, interfaces réseaux, etc.) mais sur une seule puce d'une centaine de mm² seulement !



Exemple du smartphone

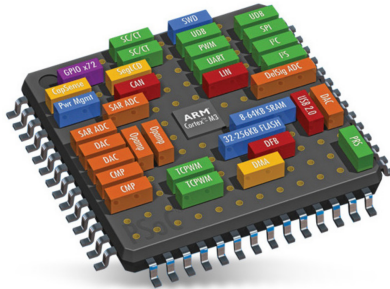
- On trouve sur cette puce les circuits suivants :
 - Microprocesseurs : calculs généraux
 - Digital Signal Processor (DSP) : calculs numériques généraux, spécialités : addition / multiplication, matrices
 - Accélérateurs graphiques : calculs parallèles sur images
 - Accélérateurs divers : compression image / son, cryptographie, ...
 - Contrôleurs de périphériques : mémoires, disques, réseau, ...
 - Gestionnaires internes : horloges, puissance, ...



Bus, NoCs (Network on Chip)

Exemple du smartphone

- Le SoC d'un smartphone intègre aussi les aspects analogiques avec :
 - le traitement de la voix,
 - le codage et le cryptage réalisés en numérique,
 - la gestion de l'écran,
 - la liaison radio et l'accès au réseau GSM



Avantages et inconvénients

Avantages

Le premier avantage évident des SoC est leur **taille réduite**. Mais cette réduction de la taille s'accompagne d'autres avantages très intéressants :

- **le coût est réduit** : le coût de construction d'une puce est proportionnelle à sa surface ;
- **la consommation d'énergie est réduite** : une part importante dans le câblage
- **la dissipation de chaleur peut être passive** : la consommation d'énergie étant beaucoup faible, il n'est plus nécessaire d'intégrer des systèmes de refroidissement lourds, volumineux et sonores.
- **la performances sont meilleures** : on peut augmenter la fréquence puisque les signaux se propagent sur de plus courtes distances, on gagne ainsi en performance

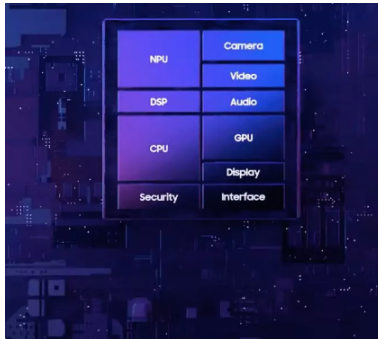
Inconvénients

- le principal inconvénient des SoC est qu'une **défaillance quelconque d'un composant nécessite le remplacement complet** du SoC.
- Les SoC sont **moins performants** que les ordinateurs de bureau « haut de gamme » et ne peuvent pas être personnalisés,

- « Les circuits, c'est le grand moteur de l'électronique, de l'informatique. Sans les circuits il n'y en aurait pas ! C'est la progression des circuits qui permet le monde numérique. » **G. Berry, Collège de France, avril 2008.**
- Les progrès dans la miniaturisation des circuits sur les puces de silicium ont été un moteur de tous ces progrès depuis une cinquantaine d'années
- Les systèmes sur puce permettent de réaliser des ordinateurs complets qui tiennent désormais sur une seule puce de quelques dizaines de mm^2 en **intégrant un très grand nombre de fonctions numériques et analogiques.**

Exercice 0

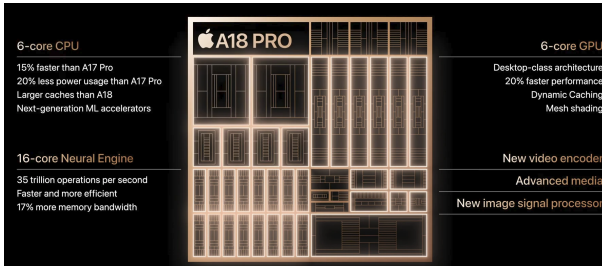
Voici l'architecture du SoC Exynos 2400 qui équipe les Galaxy S24.



Cherche la signification des différents éléments du SoC Exynos 2400.

Indication : Security ou SPU

Exercice 1



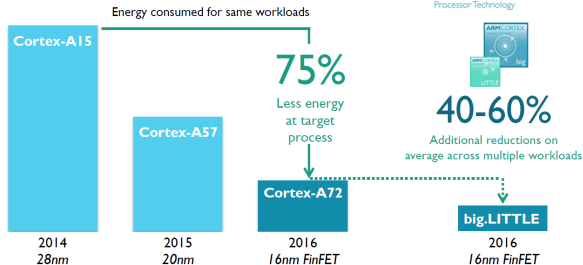
- 1 L'iPhone 16 Pro est équipé de la puce Apple A18PRO. Cherche les fonctionnalités et caractéristiques de ce SoC. Tu cherchera notamment sa finesse de gravure.
- 2 À quoi sert le moteur neuronal intégré ?

Exercice 2

Voici un schéma présentant les performances de consommation d'énergie de différents coeurs ARM (Cortex A72, A57, A72) :

Cortex-A72: Breakthrough Energy Efficiency

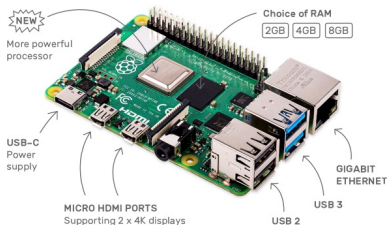
Enabling Slimmer, Sleeker, All-Day Compute Devices



Explique pourquoi la progression de la finesse de gravure permet de diminuer la consommation d'énergie.

Exercice 3

Le Raspberry Pi, modèle 4, est un nano-ordinateur. Il s'agit d'une carte unique plus petite qu'un smartphone classique. Cette carte est assez puissante pour faire fonctionner le système d'exploitation Linux et être utilisée comme un ordinateur de bureau.



Le Raspberry Pi 4 est équipé du SoC Broadcom BCM2711.

Cherche les caractéristiques de cette puce.