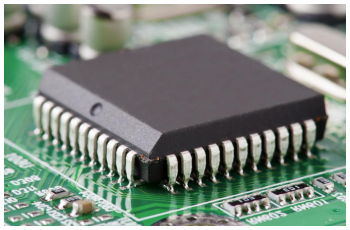
Composants intégrés d'un système sur puce

Architectures matérielles

① Le circuit intégré



Un **circuit intégré** (IC, *Integrated Circuit*), aussi appelé **puce électronique**, est un composant qui regroupe des milliers, voire des milliards, de composants électroniques (transistors, résistances, condensateurs) sur une plaquette de silicium de quelques millimètres carrés.

C'est Jack Kilby (1923–2005), ingénieur chez Texas Instruments, qui a inventé le premier circuit intégré en 1958, posant les bases de toute l'informatique moderne. Il a reçu le prix Nobel de physique en 2000 pour cette invention.

Depuis, la **miniaturisation** n'a cessé de progresser. La **finesse de gravure** (mesurée en nanomètres) indique la taille des plus petits transistors gravés sur la puce : plus elle est faible, plus on peut intégrer de transistors. En 2025, les puces grand public sont gravées en 3 nm et la production en 2 nm démarre.

Cette progression suit la **loi de Moore** (1965) : le nombre de transistors sur une puce double environ tous les deux ans. Cette loi empirique s'est vérifiée pendant plus de 50 ans, mais se heurte aujourd'hui aux limites physiques de la matière à l'échelle atomique.

1.1 Quelques repères chronologiques

Année	Puce	Transistors	Finesse de gravure
1971	Intel 4004	2 300	10 µm
1989	Intel 486	1,2 million	1 µm
2006	Intel Core 2	291 millions	65 nm
2020	Apple M1	16 milliards	5 nm
2023	Apple M3	25 milliards	3 nm
2024	Apple M4	28 milliards	3 nm

En un demi-siècle, le nombre de transistors a été multiplié par plus de 10 millions, tandis que la finesse de gravure est passée de 10 µm à 3 nm (soit un facteur 3 000). Cette miniaturisation est le moteur de toutes les évolutions décrites dans la suite.

② Du circuit intégré au système complet

Tous les composants décrits ci-dessous sont des circuits intégrés. Ce qui les distingue, c'est **ce qu'ils intègrent** sur la puce. On peut les voir comme des niveaux d'intégration croissants :

	CPU	MCU	SoC
Processeur	✓	✓	✓
Mémoire (RAM, ROM)		✓	✓
Entrées/Sorties		✓	✓
GPU, radio, capteurs			✓
Puissance de calcul	Élevée	Modérée	Variable
Consommation	Élevée	Faible	Faible
Exemples	Intel Core, AMD Ryzen	ATmega328P (Arduino), STM32, PIC	Apple M4, Snapdrago
Usages typiques	Ordinateurs, serveurs	Robotique, domotique	Smartphones, tablette

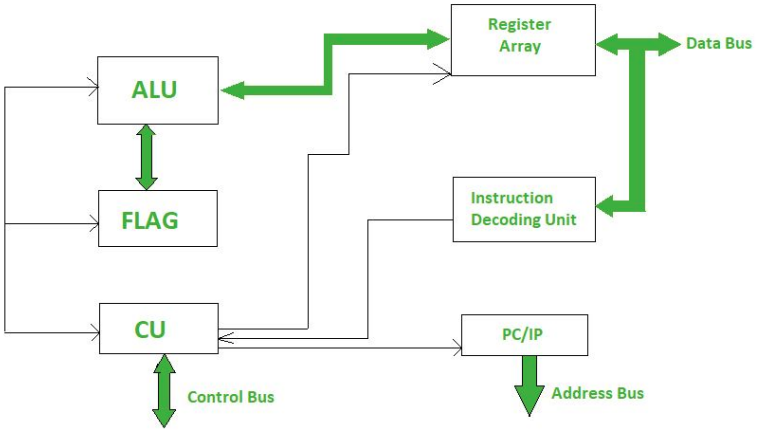
2.1 Microprocesseur (CPU)



Un **microprocesseur** (CPU, *Central Processing Unit*) est un circuit intégré qui contient uniquement le cœur de calcul d'un ordinateur : l'**unité arithmétique et logique** (UAL), chargée des calculs, l'**unité de contrôle**, qui dirige l'exécution des instructions, et des registres. C'est le « cerveau » de la machine : il lit les instructions d'un programme et les exécute.

Jusqu'au début des années 1970, un processeur nécessitait plusieurs circuits intégrés séparés. En 1971, Intel réussit à tout regrouper sur une seule puce (l'Intel 4004) : le **microprocesseur** était né.

Un microprocesseur ne fonctionne pas seul : il a besoin de mémoire externe (RAM, disque) et de circuits d'entrée/sortie, connectés via une **carte mère**.



Ses principales caractéristiques sont :

— le **jeu d'instructions** : l'ensemble des opérations élémentaires que le processeur sait exécuter (addition, comparaison, branchement...). Un processeur peut disposer de plusieurs centaines d'instructions différentes ;

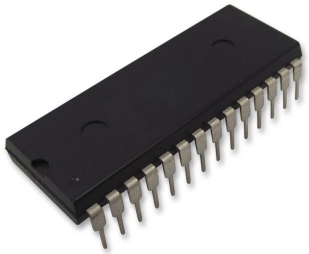
— la **largeur du bus de données** : le nombre de bits traités simultanément. Les premiers microprocesseurs traitaient 4 bits ; aujourd'hui la norme est 64 bits ;

— la **fréquence d'horloge** : elle cadence le rythme d'exécution des instructions. Un processeur à 3 GHz effectue 3 milliards de cycles par seconde ;

— le **nombre de cœurs** : les processeurs modernes contiennent plusieurs cœurs de calcul capables de travailler en parallèle.

La puissance globale résulte de la combinaison de ces facteurs. Dans les années 1970, un processeur effectuait moins d'un million d'instructions par seconde (MIPS) ; aujourd'hui, on dépasse les 10 milliards.

2.2 Microcontrôleur (MCU)



Un **microcontrôleur** (MCU, *MicroController Unit*) est un circuit intégré qui rassemble dans un seul boîtier :

— un **microprocesseur** (souvent peu puissant mais suffisant pour la tâche visée) ;

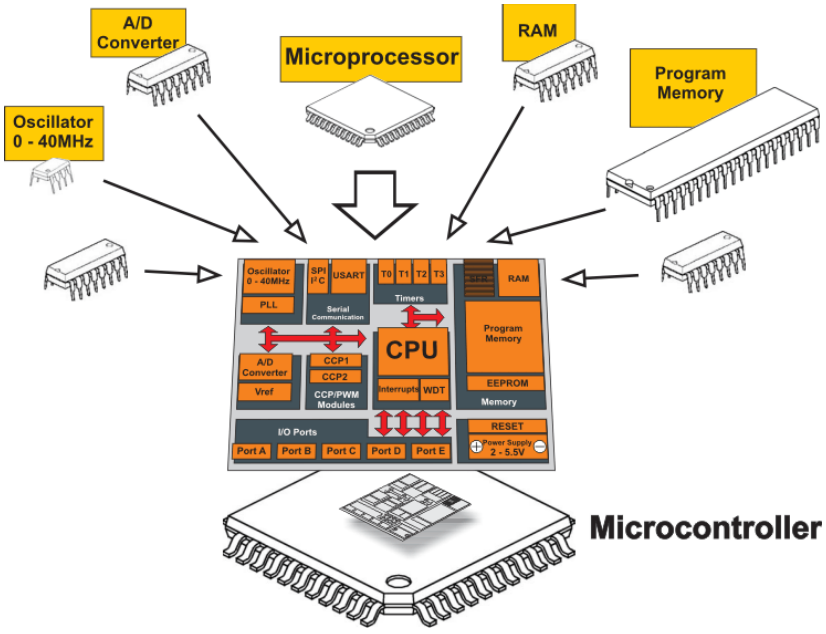
— de la **mémoire** (RAM pour les données temporaires, ROM/Flash pour le programme) ;

— des **périphériques d'entrée/sortie** (ports série, convertisseurs analogique-numérique, timers...).

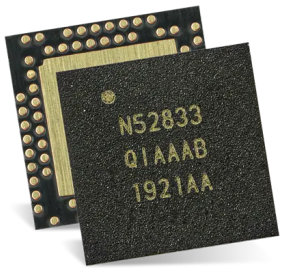
C'est un véritable petit ordinateur autonome sur une puce, conçu pour exécuter une tâche spécifique de manière fiable et économe en énergie.



On retrouve les microcontrôleurs dans une multitude d'applications du quotidien : machine à laver, four à micro-ondes, système ABS d'une voiture, télécommande, carte Arduino… Ils sont aussi très utilisés en robotique et en domotique.



2.3 Système sur puce (SoC)



Un **système sur puce** (SoC, *System on a Chip*) pousse l'intégration encore plus loin qu'un microcontrôleur. Sur une seule puce, on trouve :

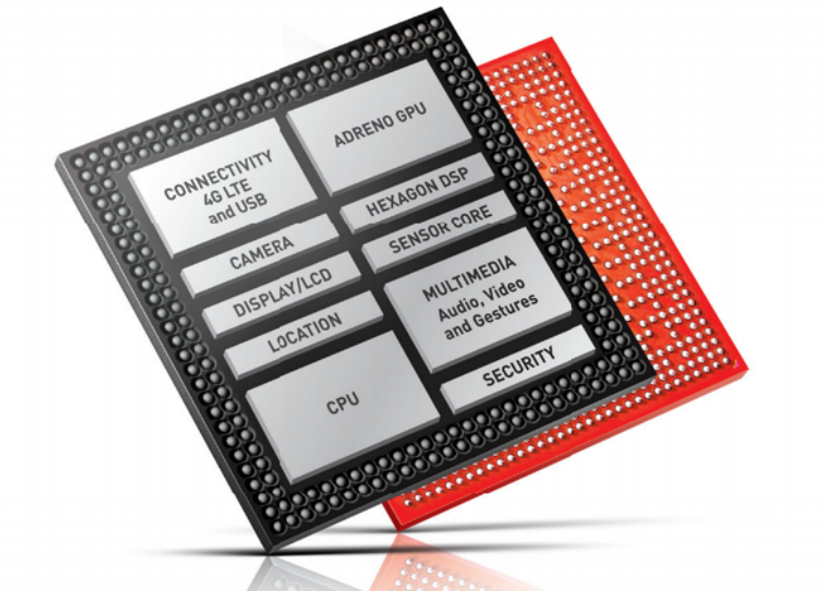
— un ou plusieurs **processeurs** (CPU) ;

— un **processeur graphique** (GPU) ;

— de la **mémoire** ;

— des **contrôleurs de communication** (Wi-Fi, Bluetooth, 4G/5G) ;

— des **capteurs** et **coprocesseurs** spécialisés (intelligence artificielle, traitement du signal…).



Le SoC s'est imposé avec l'informatique nomade : smartphones, tablettes, montres connectées. Son atout majeur est de combiner haute performance et faible consommation d'énergie dans un encombrement minimal.

En contrepartie, là où un ordinateur de bureau permet de remplacer individuellement le processeur, la carte graphique ou la mémoire, un SoC forme un tout indissociable : **aucune mise à jour matérielle n'est possible**.

2.4 Avantages et limites de l'intégration

Avantages. L'intégration de plusieurs composants sur une même puce apporte deux gains majeurs :

— **vitesse** : sur une carte mère classique, le processeur, la mémoire et le GPU sont des puces séparées reliées par des pistes de plusieurs centimètres. Les signaux électriques mettent du temps à parcourir ces

distances, ce qui engendre de la **latence**. Dans un SoC, tous les composants sont à quelques millimètres les uns des autres : les communications sont quasi instantanées ;

— **consommation** : piloter des signaux sur de longues pistes nécessite plus d'énergie. Un SoC, avec ses connexions internes courtes, consomme beaucoup moins, ce qui est essentiel pour les appareils sur batterie.

Limites. Cette intégration a aussi des contreparties :

— **dissipation thermique** : concentrer des milliards de transistors actifs sur quelques mm² génère une chaleur intense, difficile à évacuer ;

— **coût de conception** : concevoir un SoC complexe nécessite des investissements de plusieurs milliards de dollars et des années de développement ;

— **non-évolutivité** : si un composant du SoC devient obsolète ou tombe en panne, il est impossible de le remplacer seul ;

— **limites physiques** : en dessous de quelques nanomètres, des effets quantiques (effet tunnel) perturbent le fonctionnement des transistors.

③ Systèmes embarqués

Un **système embarqué** est un système informatique autonome, intégré dans un dispositif qu'il contrôle, et dédié à une tâche précise. Il se distingue d'un ordinateur généraliste par :

— des **ressources limitées** (mémoire, puissance de calcul, taille, énergie) ;

— une **fonction spécialisée** (freinage ABS, régulation thermique, pilote automatique…) ;

— des **contraintes de fiabilité** souvent critiques, parfois en **temps réel** (un système de freinage doit réagir en quelques millisecondes).

Le logiciel d'un système embarqué est appelé **firmware** (ou micrologiciel). Contrairement aux programmes d'un ordinateur classique stockés sur un disque dur, le firmware est gravé dans une mémoire non volatile (ROM, Flash) et s'exécute dès la mise sous tension.

Les systèmes embarqués s'appuient généralement sur des **microcontrôleurs** (pour les systèmes simples et économes) ou des **SoC** (pour les systèmes plus complexes comme les smartphones ou les drones).

On les retrouve partout : automobile (injection, ABS, airbag), aéronautique (pilote automatique), médical (pacemaker, IRM), domotique (thermostat connecté), industrie (robots de chaîne de montage), etc.