

# Chapitre 1 Prélude



# HISTOIRE DE L'ÉLECTRONIQUE

De l'âge de pierre à l'ère du numérique



Il était une fois ...

À travers les âges, l'humanité a traversé de nombreuses révolutions. La première avancée majeure fut la maîtrise du feu (il y a environ 400 000 ans), puis vint l'agriculture (entre -9000 et -5000) grâce à la maîtrise de l'eau.

Les premiers effets de l'électricité ont été décrits par Thalès environ 600 ans avant notre ère, mais l'électricité n'est devenue un sujet de recherche qu'au XVIIIe siècle. L'électron n'a quant à lui été découvert qu'en 1897 par John Thomson.



## Électrotechnique : l'électricité comme vecteur d'énergie

Au début, l'électricité n'était utilisée que pour sa fonction de **vecteur d'énergie**.

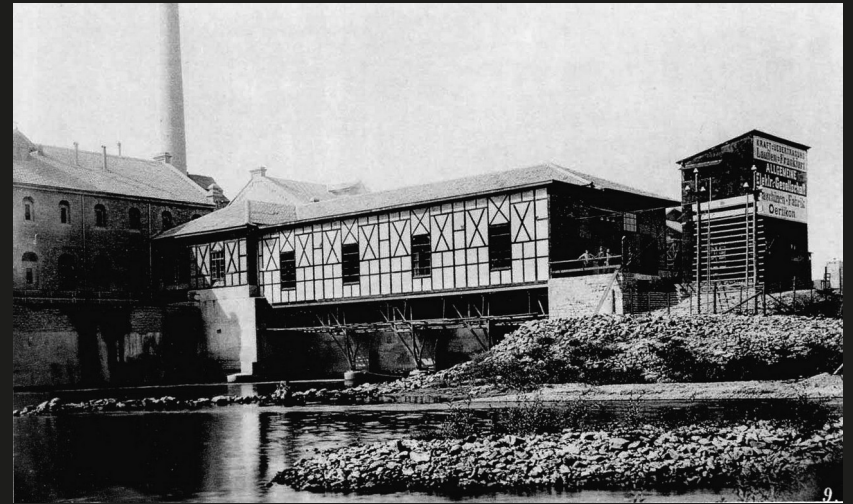
Les machines électriques ont été employées pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, et *vice versa*. En effet l'électricité se convertit facilement en une autre forme d'énergie, tout en étant la forme la plus facilement transportable.



Batterie  
A. Volta, 1799



Machine à induction  
H. Pixii, 1832



Ligne haute tension (Mühlgraben-Frankfurt)  
Mühlgraben, 1891

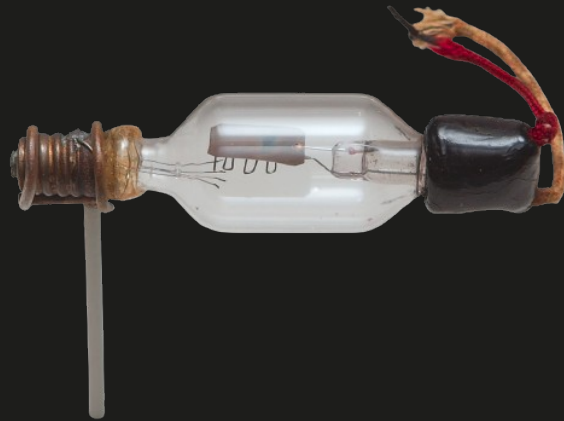
Électronique : l'électricité comme vecteur d'information

Avec la découverte de l'électron en 1897, un nouveau champ de recherche s'ouvre avec pour but de **contrôler le flux d'électron de sorte à transporter de l'information.**

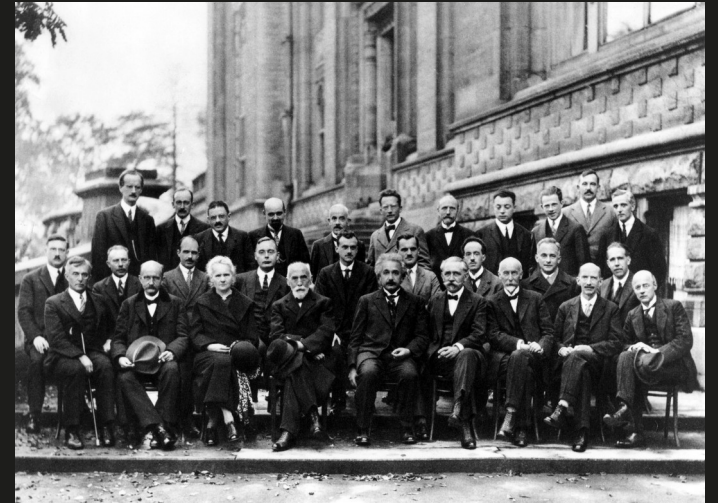
Les tubes à vide sont les premiers composants capables de moduler le flux d'électrons.



John Ambrose Fleming  
Inventeur du tube à vide  
(diode, 1904)



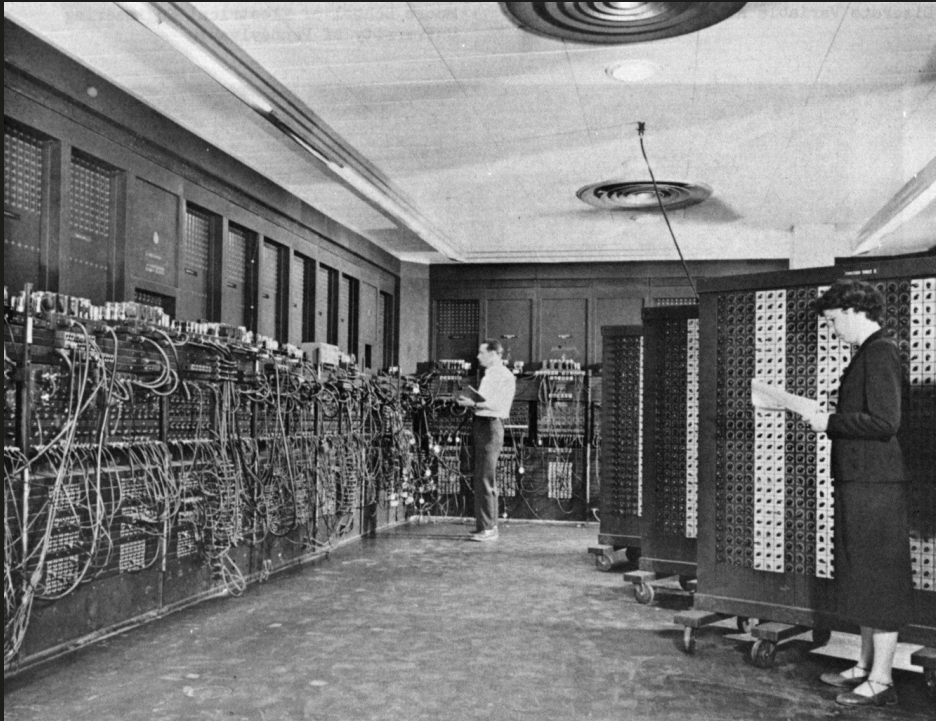
Audion (triode)  
Lee de Forest (1906)



5<sup>e</sup> Conseil de Solvay, 1927  
Thème « électrons et photons »  
17/29 seront lauréats Nobel



L'apothéose de l'emploi des tubes à vide est l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) en 1945, qui est le **tout premier ordinateur entièrement électronique.**



Les six premiers développeurs sur ENIAC sont des mathématiciennes (1944-1955).

100 000 add/s

357 mul/s

38 div/s

116 h : longest working time with no failure

17 468 vacuum tubes

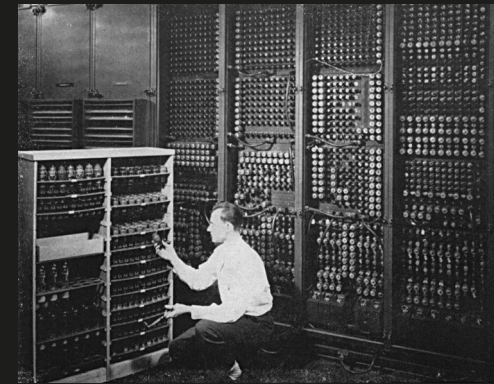
7 200 diodes

70k resistors + 10k capacitors

5M hand-made welds

167 m<sup>2</sup>, 30 tons

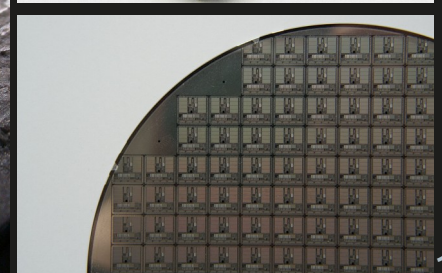
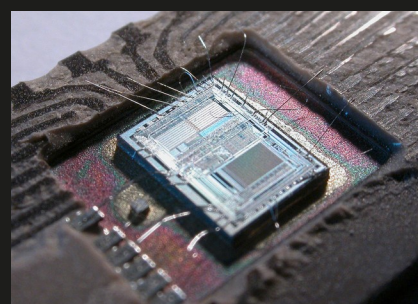
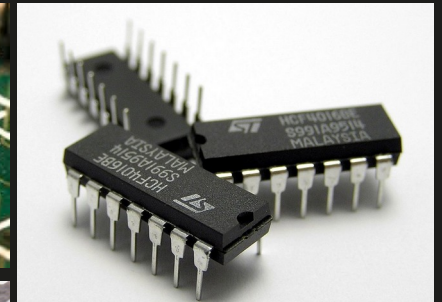
150 kW



## Électronique : l'avènement des semi-conducteurs

Les études approfondies sur les semi-conducteurs et les progrès techniques et technologique nous ont menés vers une nouvelle révolution : après le feu, l'agriculture et l'énergie, le traitement de l'information est désormais à portée de tous !

Le **Transistor bipolaire** (1947) et le **Transistor MOS** (1960) sont la pierre angulaire de tout circuit numérique, surtout depuis l'arrivée des **Circuits intégrés** (TI, 1958).



Premier transistor à jonction bipolaire (1947)  
Bardeen<sup>2</sup>, Schokley, Brattain (Bell Labs), Nobel en 1956

Nous avons vu que l'électricité a d'abord été employée comme source d'énergie. La discipline traitant cet aspect est l'**électrotechnique** et ne sera pas enseignée à l'école.

En effet nous nous concentrerons sur le contrôle de l'électron à des fins de traitement de l'information. La discipline associée est l'électronique, vaste domaine qui englobe :

- L'**électronique analogique**, traitant des signaux variant de manière continue,
- L'**électronique numérique**, traitant des signaux à valeurs et échantillons discrets.

Il est également courant de trouver d'autres moyens de « diviser » la discipline électronique : BH vs HF, AC vs DC, ...



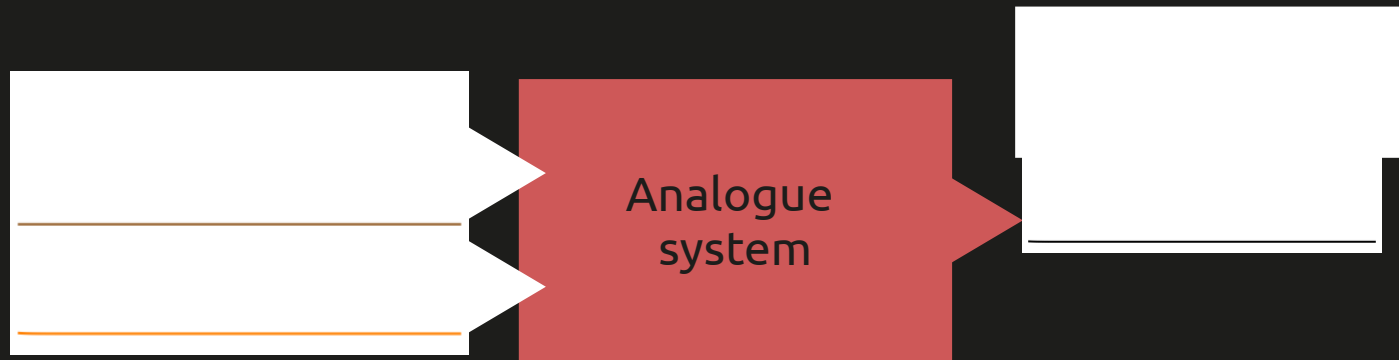
# ÉLECTRONIQUE ANALOGIQUE

De l'utilisation des signaux analogiques dans les circuits



L'électronique analogique est le sujet d'étude des systèmes utilisant des **signaux variant de façon continue** (tension, courant, charge, temps, ...).

Les signaux analogiques sont très sensible aux conditions environnantes (température, bruit, perturbations électro-magnétiques, ...).







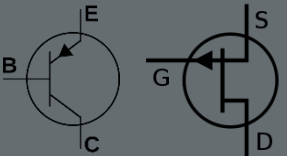
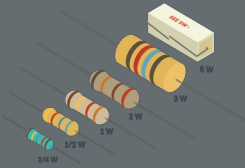
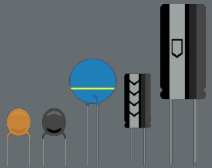

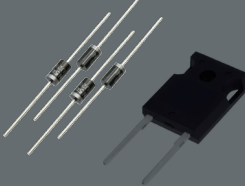
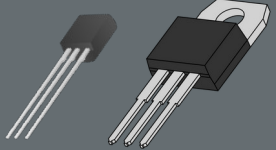




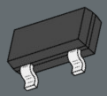
Les circuits analogiques sont de moins en moins utilisés, étant progressivement remplacés par leurs homologues numériques. Toutefois certaines fonctions ne peuvent être réalisées par des circuits numériques.

Les principaux domaines d'utilisation (recherche et marchés) pour l'analogique sont :

- Instrumentation et mesures
- Conversion et stockage de l'électricité (électronique de puissance)
- Télécommunications (antennes, radio-fréquences, hyper-fréquences, ...)
- Conception de PCB (*Printed Circuit Board*, Circuits imprimés)
- Électronique audio

## Composants

La conception de circuit analogique se base sur l'association de composants actifs et passifs. Seules quelques fonctions élémentaires existent, mais l'énorme quantité de références est due à l'existence de versions spécialisées de ces composants

	Resistor	Capacitor	Inductor	Diode	Transistor
Symbol					
Through-hole packages					
Surface Mount packages					











# ÉLECTRONIQUE NUMÉRIQUE

Signaux numériques et utilisations en électronique



La grande majorité des systèmes actuels reposent sur l'électronique numérique plutôt que sur l'analogique. En effet les signaux numériques apportent de nombreux avantages :

- L'information numérique est plus facile à stocker, et en plus grande densité
- Les signaux numériques peuvent tous être traités avec un unique processeur
  - Filtres, chiffrement, traitement du signal, ...
  - Réduction du nombre de composants et donc du PCB, donc diminution du coût de production
- Une fois numérisés, les signaux sont beaucoup moins sensibles au bruit
  - Utilisation en environnement perturbé
  - Augmentation de la distance des télécommunications



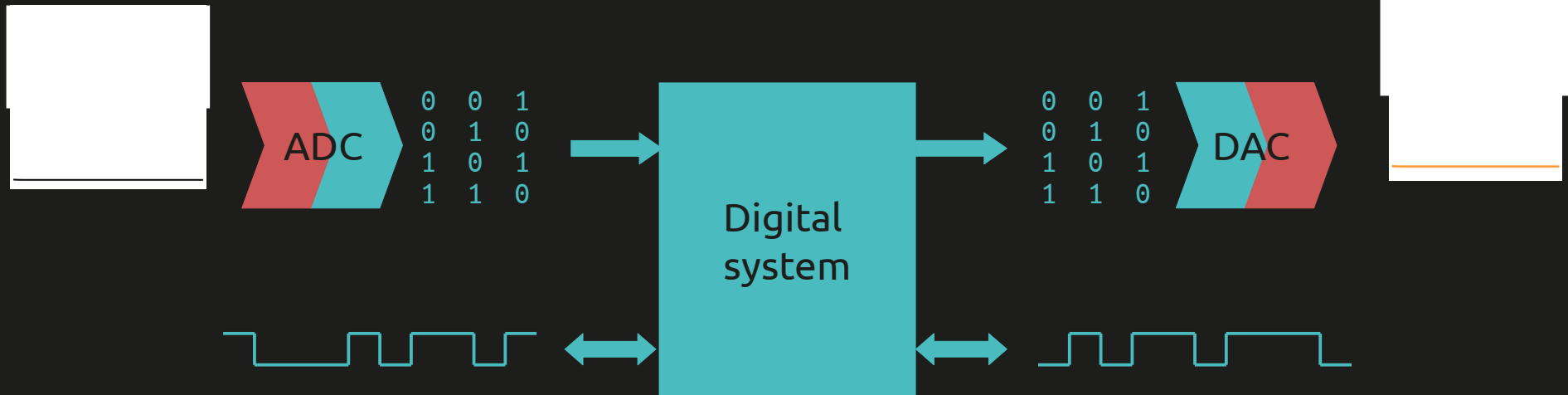
Bien évidemment, le numérique a aussi ses défauts :

- Les signaux ne peuvent pas tous être numérisés (pas directement)
  - Ex : signaux très haute fréquences (4G, 5G, ...)
  - Pour mesurer l'environnement (lui même analogique), les capteurs et conditionneurs sont analogiques
- La numérisation apporte des pertes
  - Perte d'information sur l'amplitude (quantification),
  - Perte d'information temporelle (échantillonnage),
  - Perte d'information spatiale (images)
- Parfois, le signal doit être restitué sous forme analogique
  - Quand la sortie est un actionneur analogique, un étage de télécommunications, ...

## Signaux numériques

**Les signaux numériques utilisent un ensemble de valeurs discrètes**, avec minimum deux pour les signaux binaires. Les valeurs discrètes rendent les signaux moins sensibles au bruit, qui sont donc considérés plus fiables et plus robustes que les signaux analogiques.

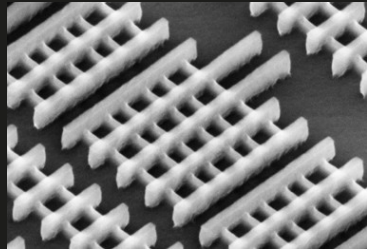
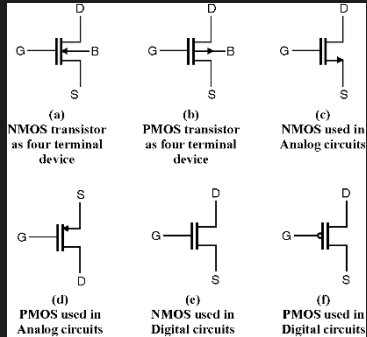
Les valeurs binaires peuvent être facilement stockées et traitées, surtout en association avec l'algèbre de Boole et de la logique combinatoire et séquentielle.



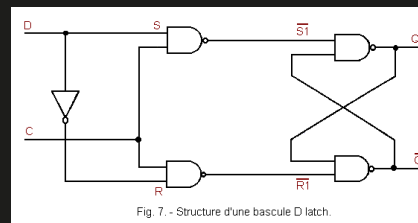
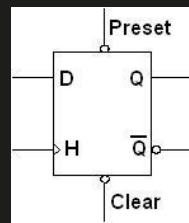
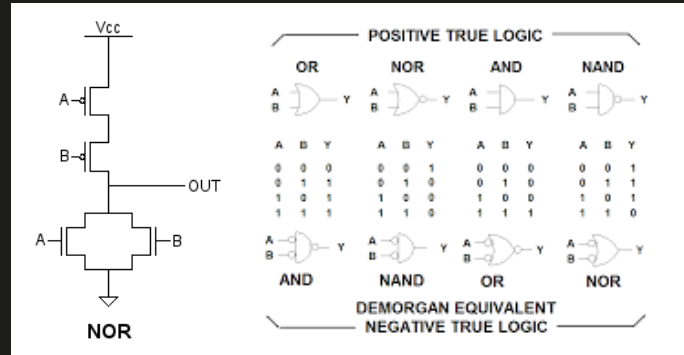
Les circuits numériques s'appuient sur l'utilisation de **transistors en commutation**.

Les transistors sont assemblés pour construire des portes logiques et bascules, elles-mêmes combinées pour créer des fonctions spécialisées.

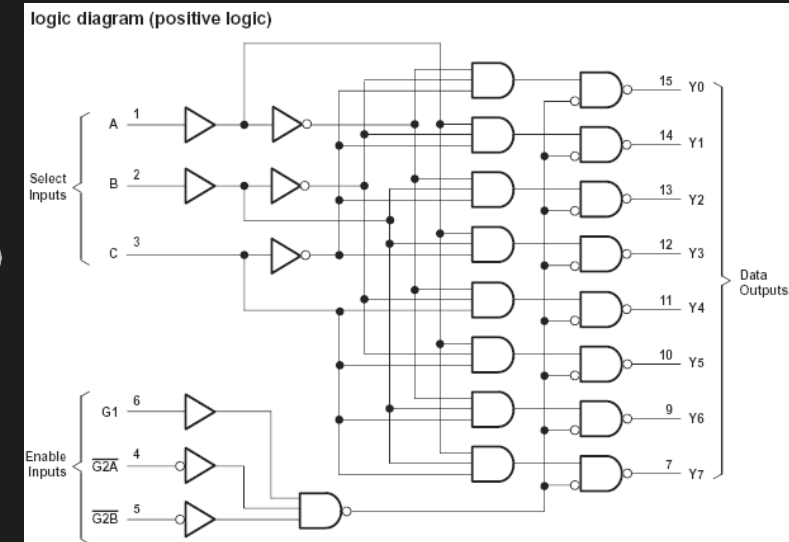
### MOS Transistors



### Logic gates, latches

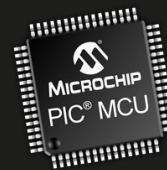
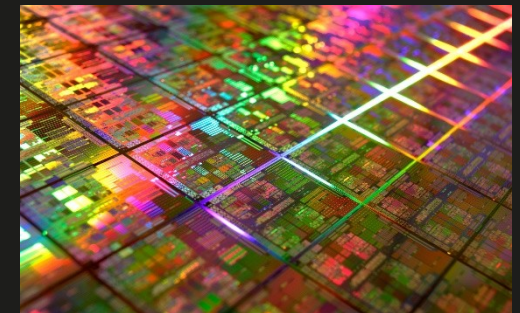
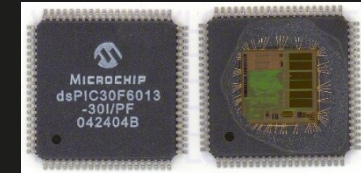
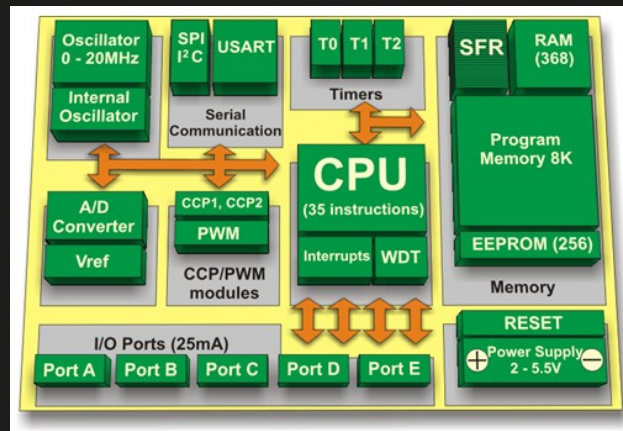
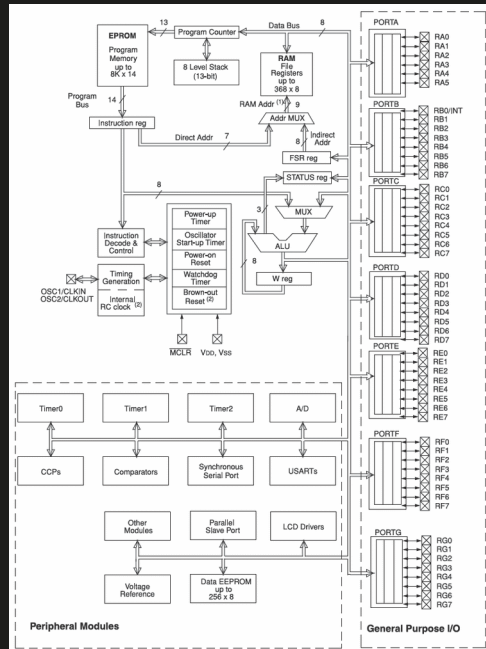


### Specialized circuit



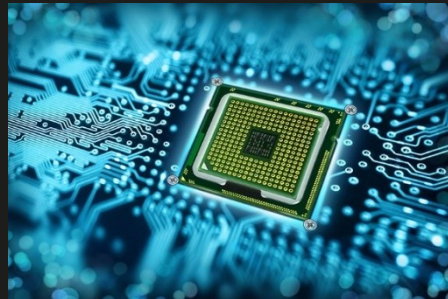
## Circuits numériques

Les blocs spécialistes peuvent être construits dans un **Circuit Intégré (Integrated Circuit, IC)**. Associés à d'autres fonctions via des bus de communication, ils peuvent former des circuits encore plus complexes, comme des processeurs.



Les circuits numériques sont largement utilisés dans les systèmes actuels, principalement embarqués, à des fins de traitement et supervision.

On estime que chacun d'entre nous utilise indirectement quelques 200 processeurs par jour.

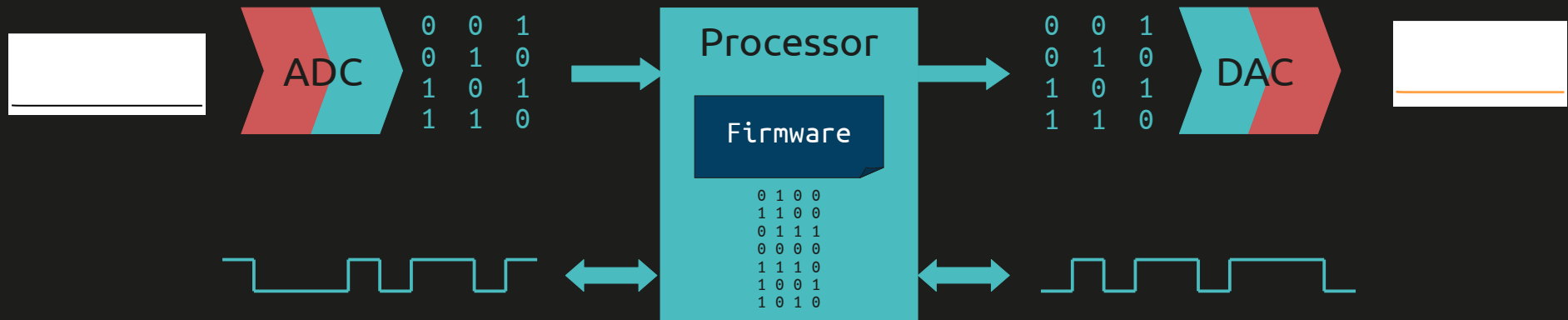




Les systèmes électroniques numériques sont conçus pour des **applications de supervision** ou de **traitement spécifique sur des signaux**.

Plus précisément, les processeurs à CPU sont les **composants en charge du contrôle**. Ils exécutent un programme séquentiel qui contient une suite d'instructions.

Le **CPU (Central Processing Unit, Unité Centrale de Traitement)** est la partie du processeur qui exécute les instructions et traite les données associées.

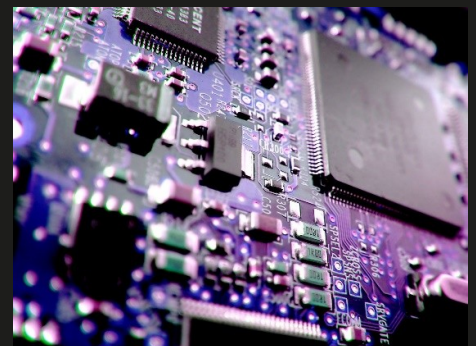
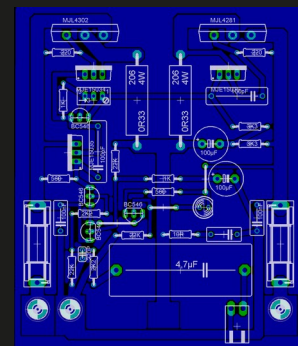
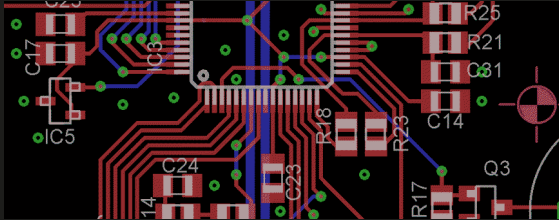


# SYSTÈMES EMBARQUÉS

Systèmes analogiques et numériques



En mélangeant les compétences scientifiques en mathématiques appliquées (traitement du signal, automatique), physique appliquée, électronique numérique et analogique, mécatronique, informatique, ... des systèmes embarqués complexes peuvent être conçus.



## Définition

Un système embarqué est le résultat de la conception d'un circuit électronique et d'un système d'information en vue d'un **besoin spécifique**.

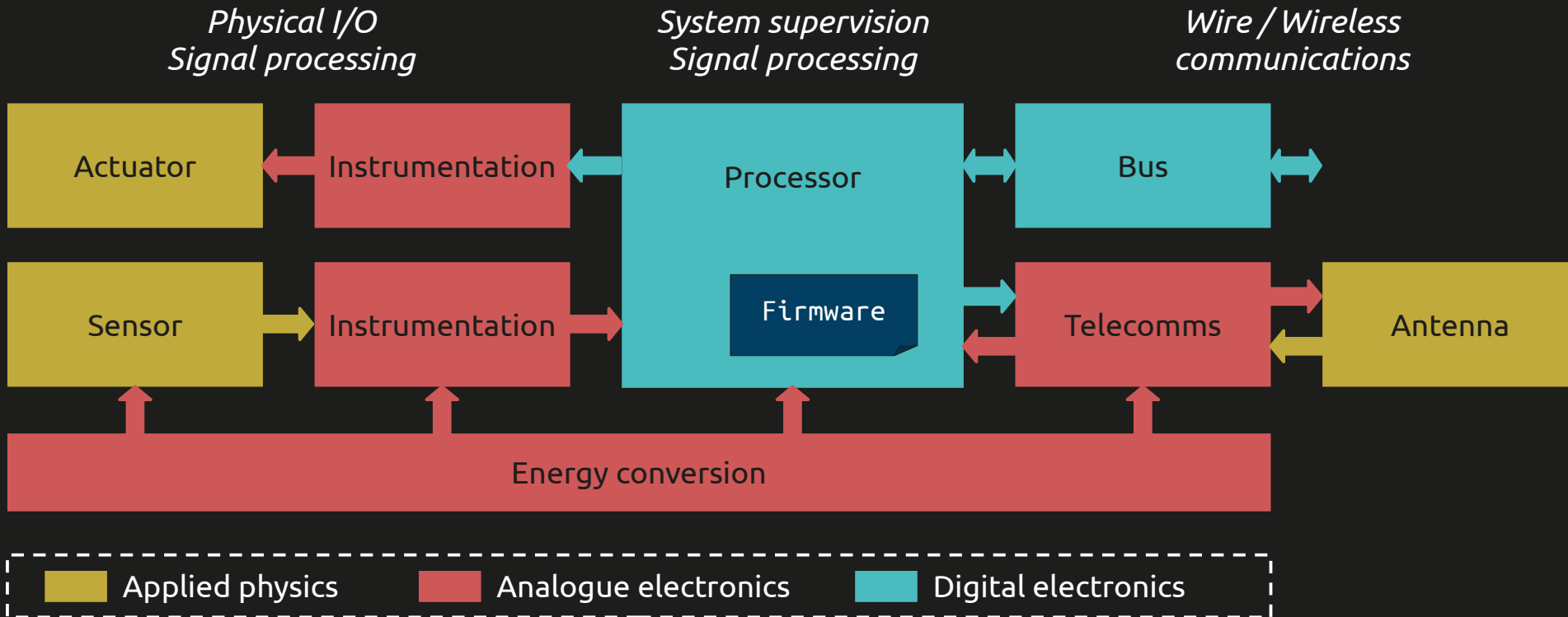
C'est l'opposé de l'ordinateur, qui vise la généricité et a été conçu pour une grande variété d'utilisation.

La conception d'un système embarqué prend en compte les considérations suivantes :

- Coût (volume de production),
- Consommation d'énergie et dissipation de chaleur (durée de vie de la batterie),
- Déterminisme (systèmes temps-réel),
- Robustesse.

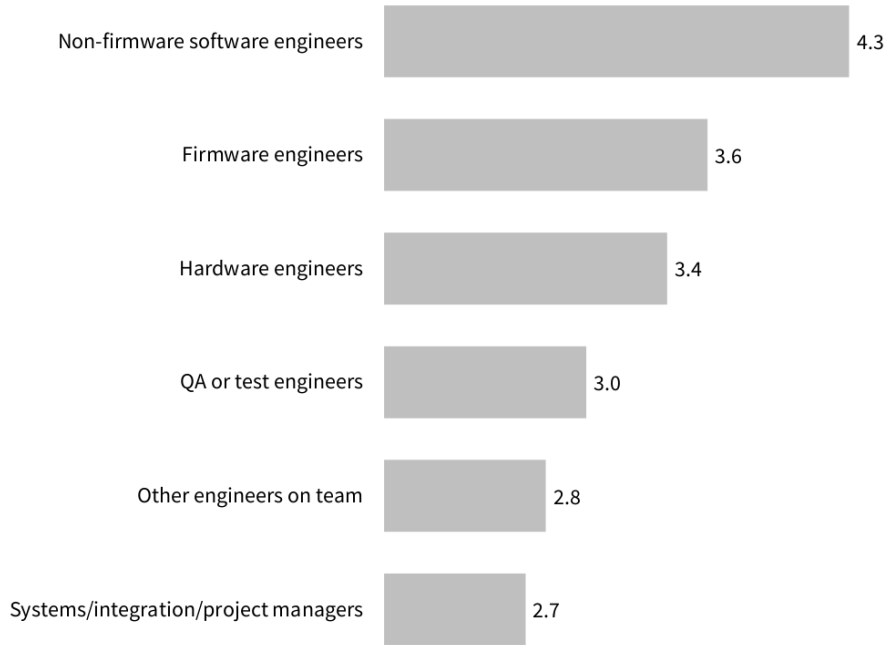


## Architecture générique d'un système électronique



### Embedded development teams are large and cover multiple disciplines

Nearly 20 engineers on the team (more in Americas, fewer in EMEA) – with a plurality focused on software/firmware development



**Average engineers per project = 19.8**

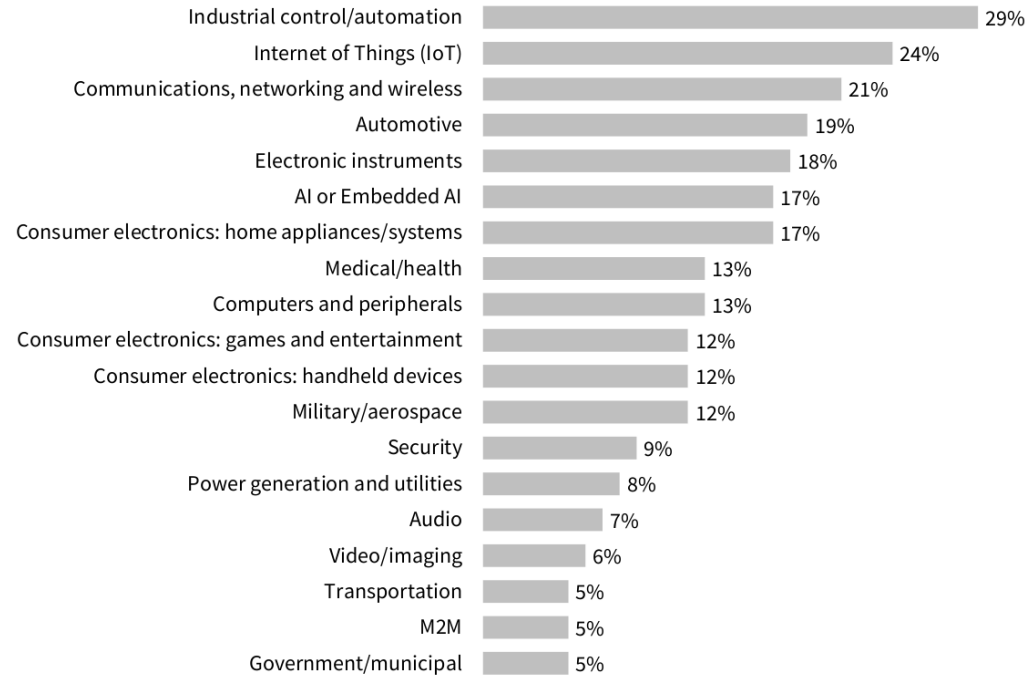
**Mean Scores**



Total Respondents

### Embedded projects target a wide range of applications

Most projects are developed for *industrial automation and instrumentation, IoT, communications, and automotive*



Multiple responses allowed



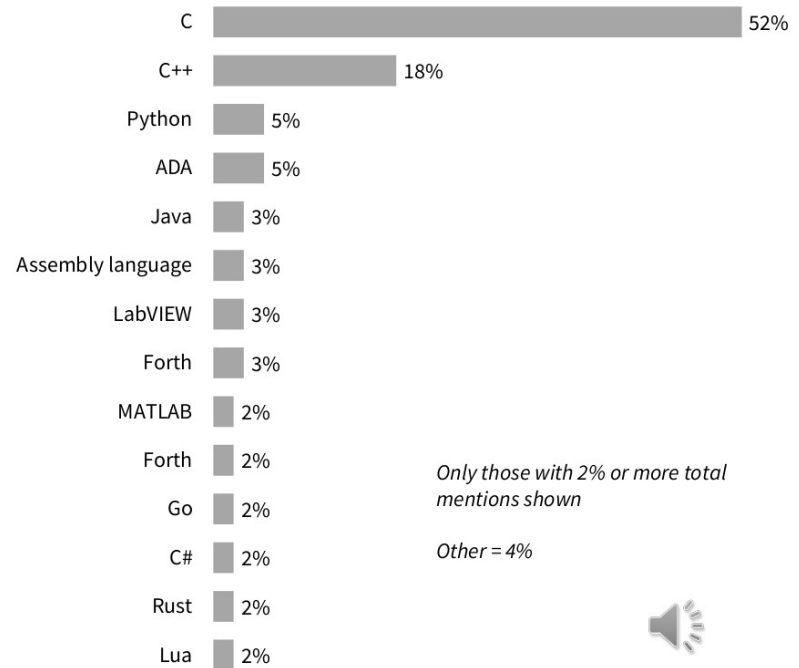
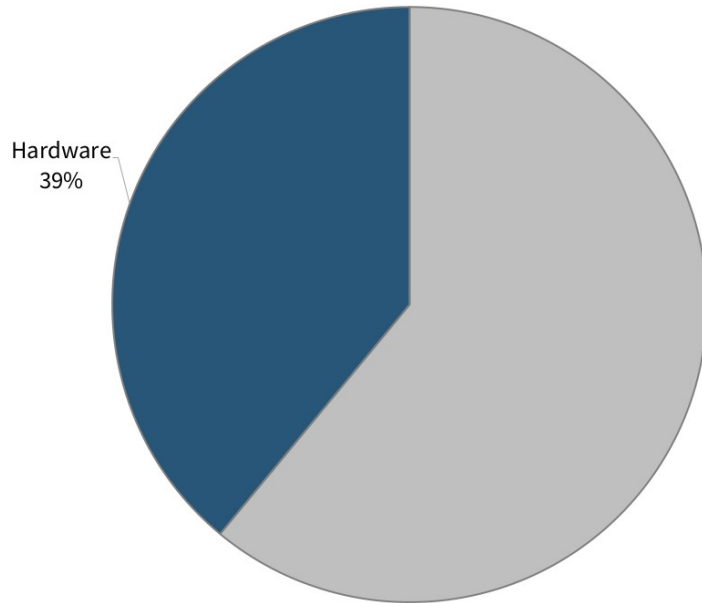
Total Respondents

The Current State of Embedded Development  
May 2023 - Embedded survey, Aspencore

## Langages de programmation

### Software development requires more cycle time

“C” dominates other languages for embedded software programming



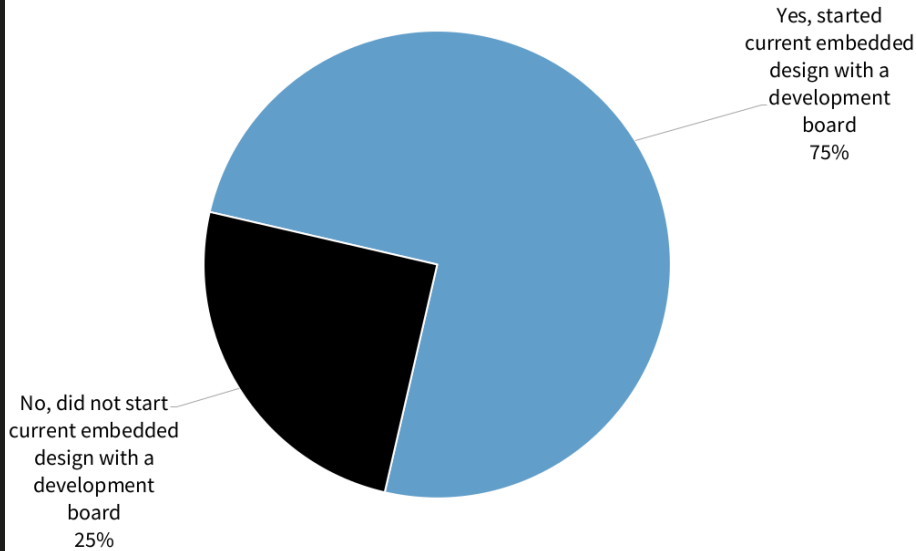
Total Respondents



### Use of development boards in embedded design is widespread

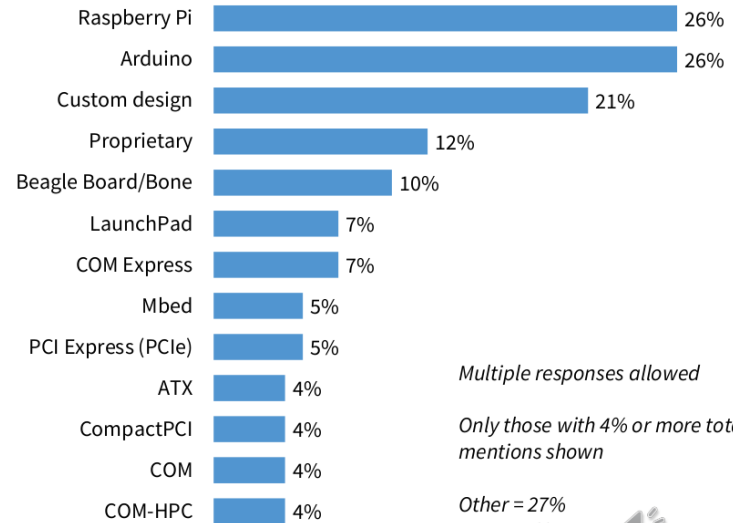
Among those using development boards, more than half use *Raspberry Pi* and *Arduino*

#### Development Board Use when Starting Embedded Projects



Total Respondents

#### Board Used in Current Design(s)



Multiple responses allowed

Only those with 4% or more total mentions shown

Other = 27%  
None = 7%



Base = Those using development board 488()

Ce cours ne traitera pas de tous les éléments constituant un système embarqué. En fait, la plupart des aspects seront abordés au cours de la formation.

D'abord, nous ferons un tour d'horizon des différentes architectures de processeur, pour concentrer notre étude sur une architecture précise :

le **micro-contrôleur (MCU, *MicroController Unit*)**, avec une application directe au MCU PIC18 de Microchip.

La raison est que le micro-contrôleur est le processeur le plus utilisé dans les systèmes embarqués.

Les autres architectures de processeurs (DSP, GPP, FPGA, SoC, ...) auront également leur cours dédié.



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN  
[dimitri.boudier@ensicaen.fr](mailto:dimitri.boudier@ensicaen.fr)

Avec l'aide précieuse de :

- Hugo Descoubes (PRAG ENSICAEN)



Except where otherwise noted, this work is licensed under  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>