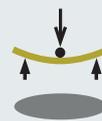
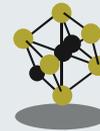
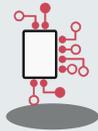
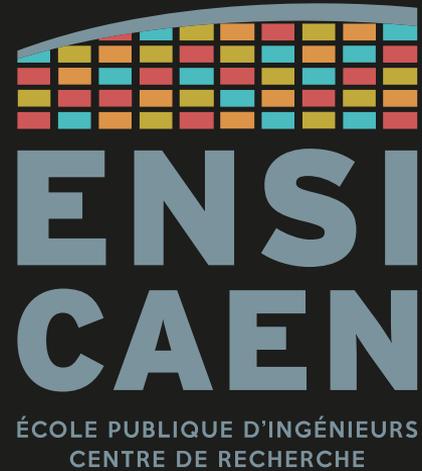


Chapitre 1

Diversité des architectures processeur



Composants élémentaires

1947: Invention du **Transistor à Jonction Bipolaire (BJT)**

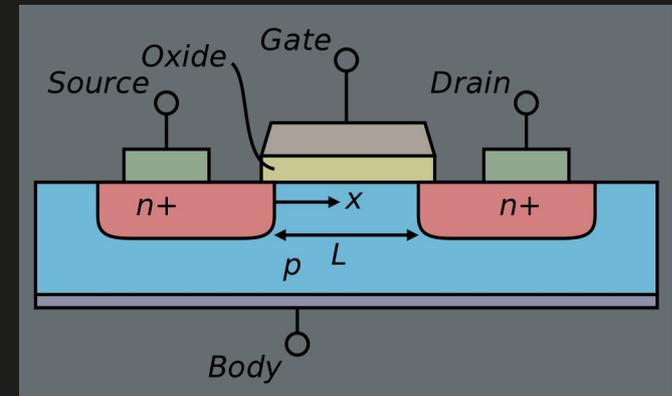
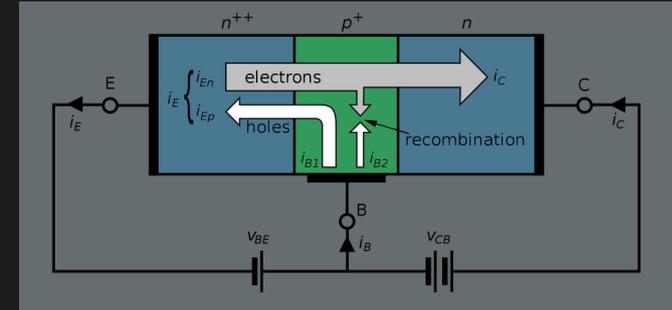
Bardeen, Schokley et Brattain (Bell labs), lauréats du Prix Nobel

1958/1959: Création des **Circuits Intégrés (IC)**

Texas Instruments (*hybrid IC*), puis Fairchild (*true monolithic IC*)

1960: Invention du **Transistor MOS à effet de champ**

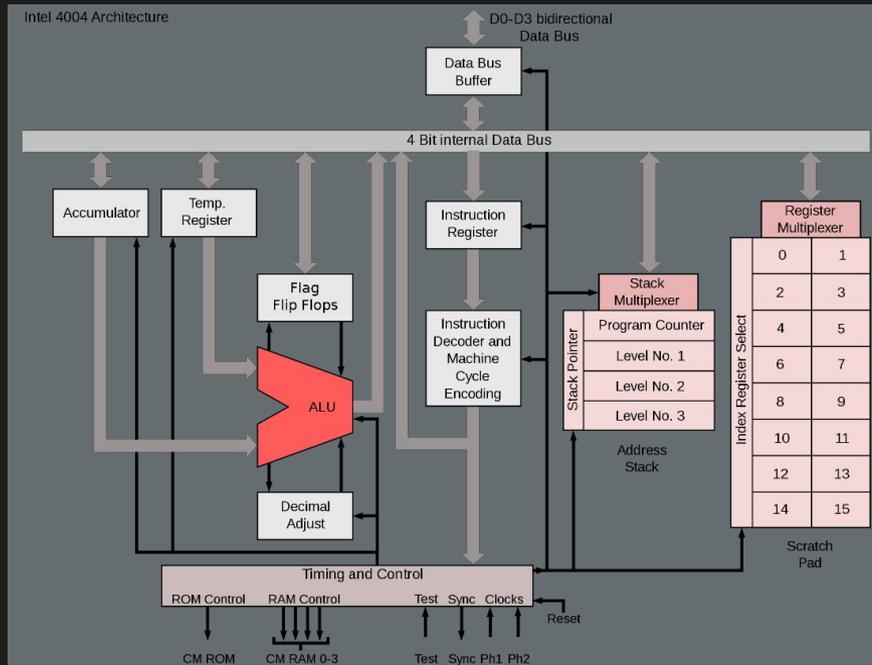
Mohammed Atalla et Dawon Kahng



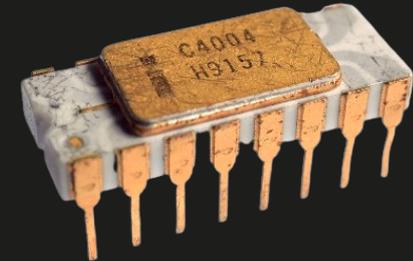
Histoire du processeur

Le premier processeur commercial est le 4004 d'Intel, apparu en 1971.

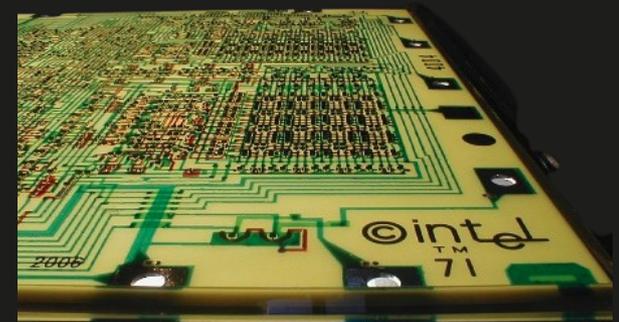
Avec 2300 transistors gravés en $10\ \mu\text{m}$, c'est un processeur 4-bit fonctionnant à 740 kHz (90 kIPS ou kilo-Instruction Per Second). Son boîtier est un DIL-16.



Intel 4004 integrated circuit



Intel 4004 die



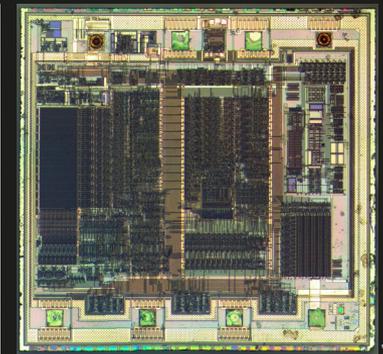
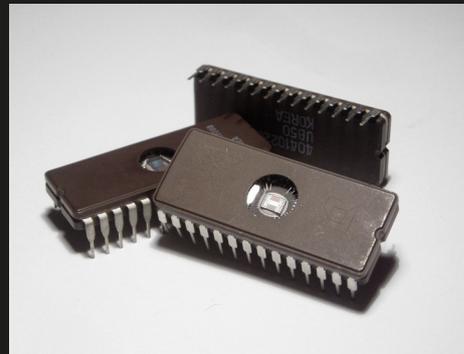
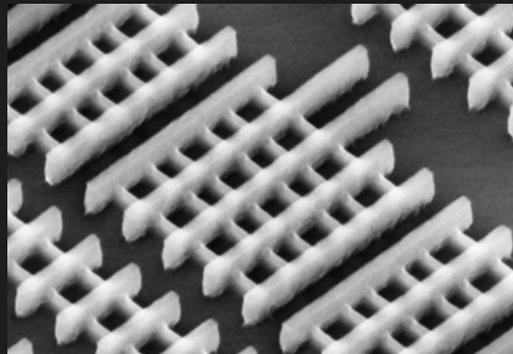
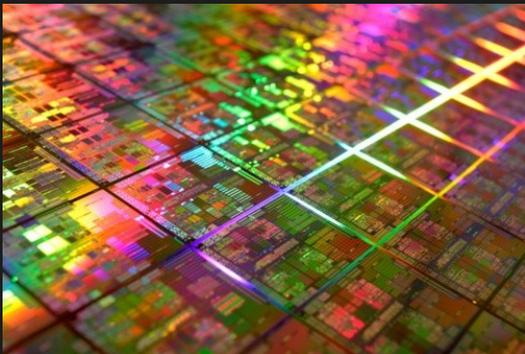
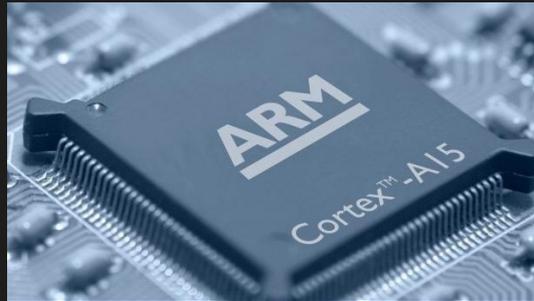
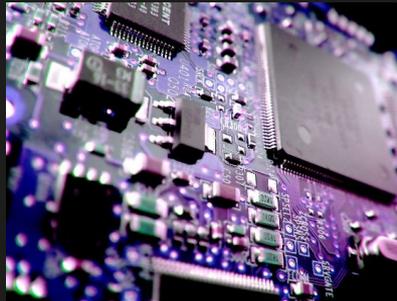
Intel 4004 architecture

DIVERSITÉ DES ARCHITECTURES PROCESSEUR

Histoire du processeur

Depuis, les processeurs ont évolués suivant un processus de sélection naturelle.

Ceux répondant à des besoins spécifiques se sont développés et améliorés, tandis que d'autres ont disparu des marchés et laboratoires de recherche.



Histoire du processeur

Comme pour le domaine du vivant, le processus d'évolution sera toujours en cours.
De nouvelles architectures de processeur pourraient apparaître dans le futur proche !



En attendant, regardons les principales architectures utilisées aujourd'hui.

Architectures généralistes

Processeurs de contrôle

Architectures hybrides

Architectures spécialisées

Coprocesseurs ou processeurs de calcul

MCU

AP

GPP

SoC / SoB

FPGA

DSP

(GP) GPU

Micro
Controller
Unit

Application
Processor

General
Purpose
Processor

System
on
Chip / Board

Field
Programmable
Gate Array

Digital
Signal
Processor

Graphics
Processing
Unit

Computer →

- FPGA-AP
- FPGA-MCU
- GPP-GPU
- AP
- MCU-analog

CONTROL

CALCULUS

Architectures généralistes

Processeurs de contrôle

Architectures hybrides

Architectures spécialisées

Coprocesseurs ou processeurs de calcul

MCU

Micro
Controller
Unit

AP

Application
Processor

CPU

GPP

General
Purpose
Processor

SoC / SoB

System
on
Chip / Board

- FPGA-AP
- FPGA-MCU
- GPP-GPU
- AP
- MCU-analog

FPGA

Field
Programmable
Gate Array

LOGIC

DSP

Digital
Signal
Processor

CPU

(GP) GPU

Graphics
Processing
Unit

General
Purpose
GPU

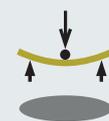
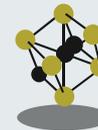
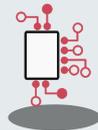
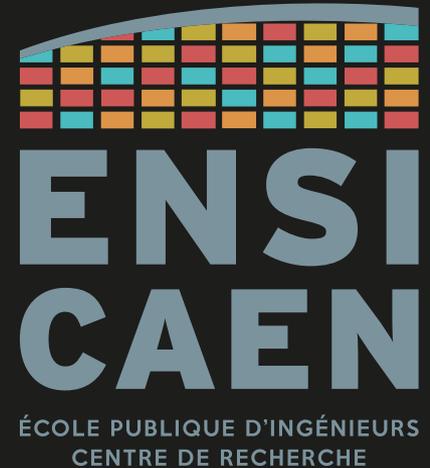
- MCU - MICROCONTROLLER UNIT

Applications

Architectures

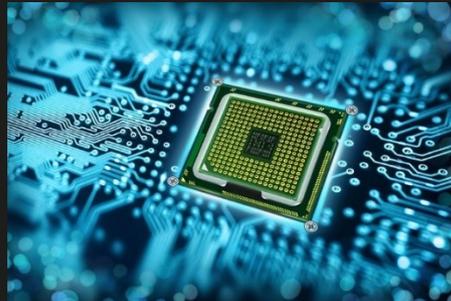
Fabricants et produits

Parts de marché



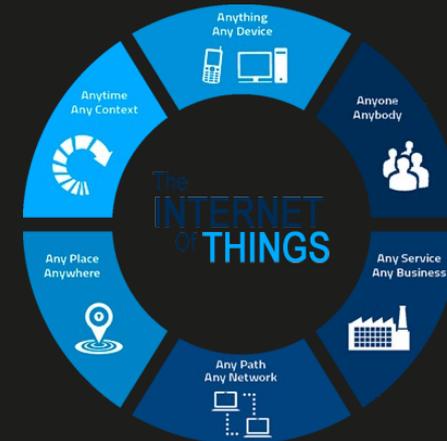
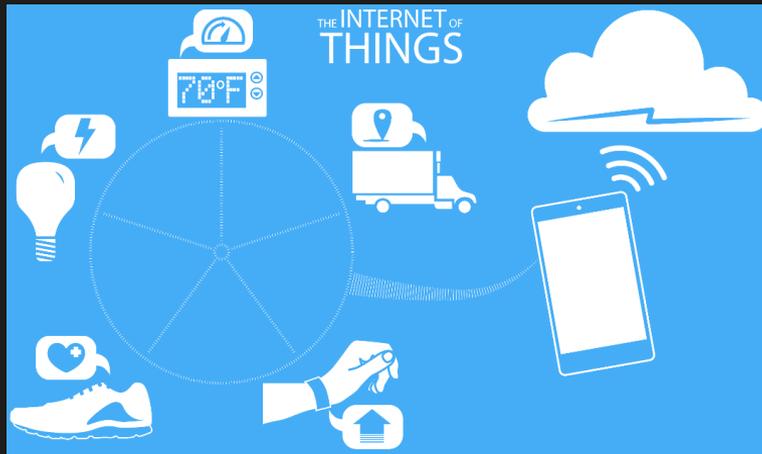
Les micro-contrôleurs (MCU, *Microcontroller Units*) sont les processeurs les plus répandus dans notre environnement.

De près ou de loin, nous utilisons environ 200 processeurs par jour !

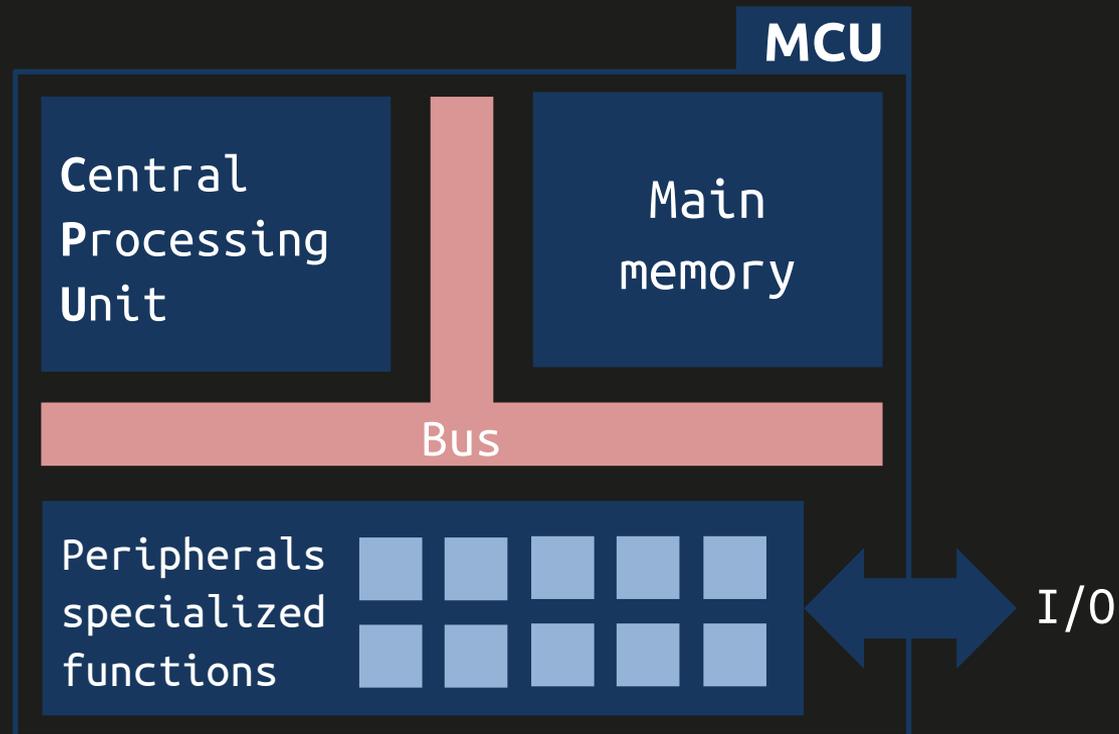


L'un des marchés phares actuels des MCU est celui des objets connectés (**IoT** ou *Internet of Things*). L'IoT représente l'extension d'Internet à des objets et lieux du monde physique. Il est considéré comme la troisième évolution d'Internet et, à ce titre, a été baptisé « Web 3.0 ».

Avec 3,6 milliards de connexions actives en 2015, 11,7 milliards en 2020 et 30 milliards prévues en 2025, l'IoT représentait 18 % des MCU en 2019 et 29 % en 2025.



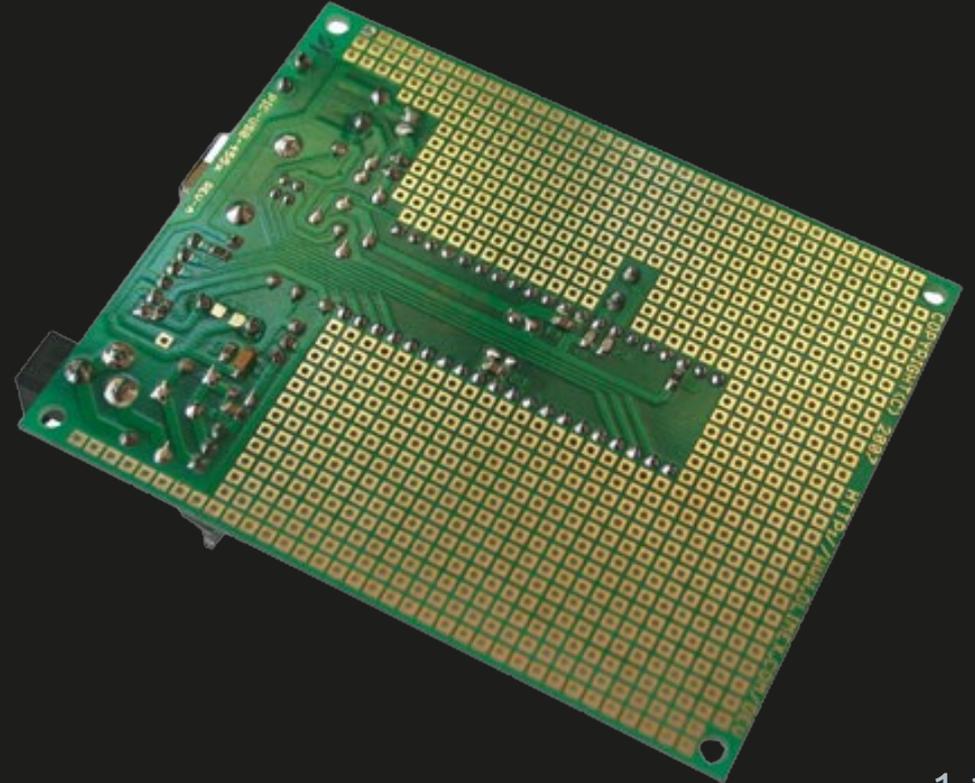
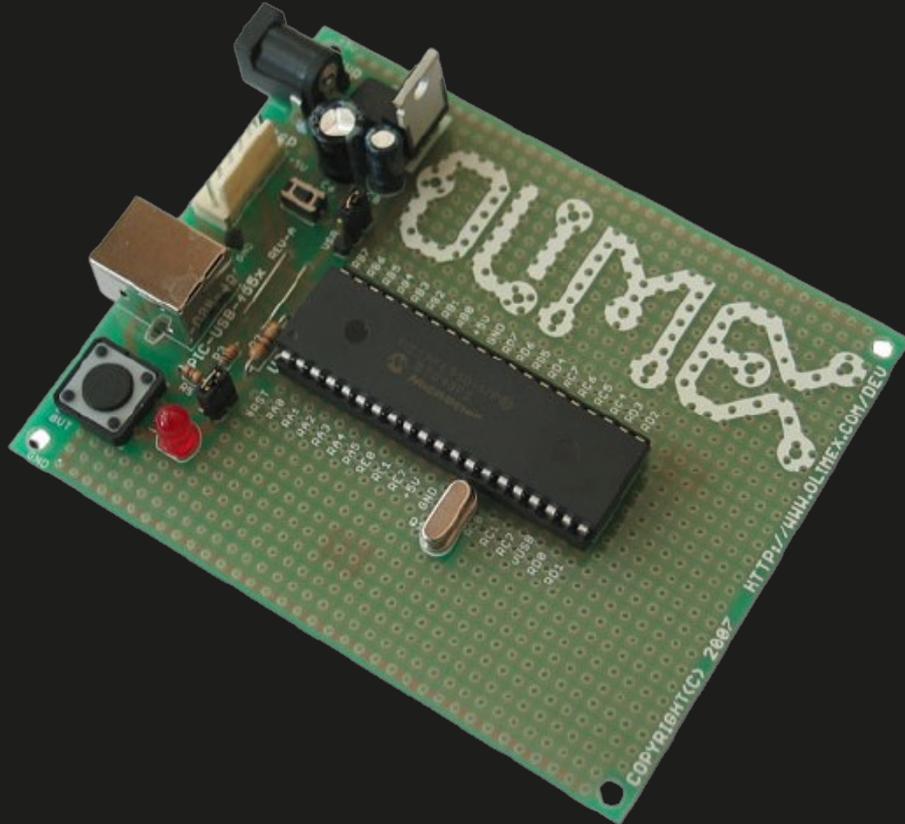
Ces processeurs sont des systèmes numériques intégrés sur puce.
Ils sont pensés pour être autonomes (pas besoin de RAM, de HDD, ...).



MCU – MICROCONTROLLER UNIT

Schéma et carte

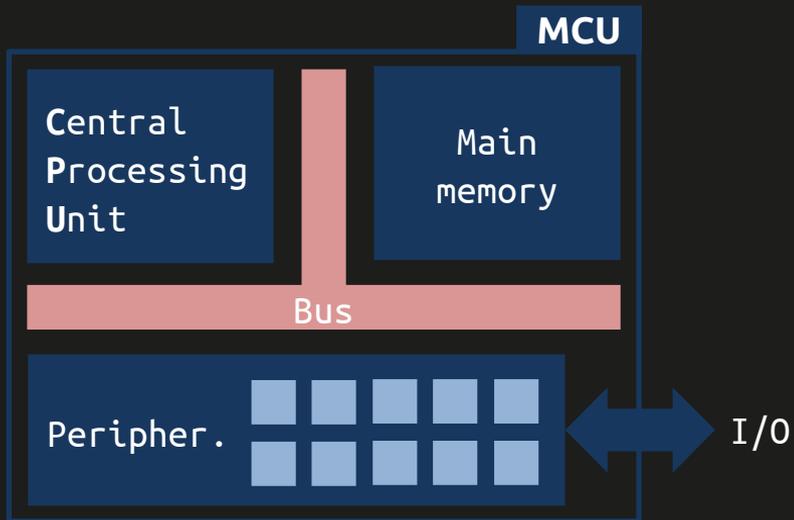
Exercice : repérez les composants du schéma précédent sur les photos ci-dessous.



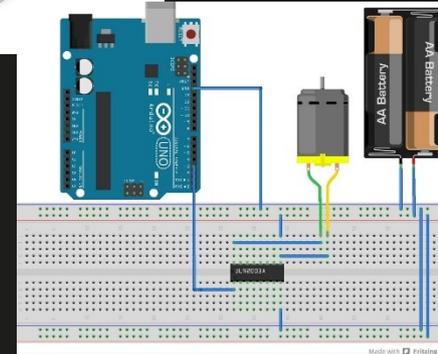
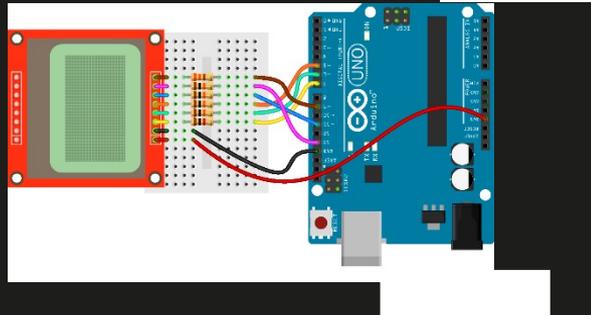
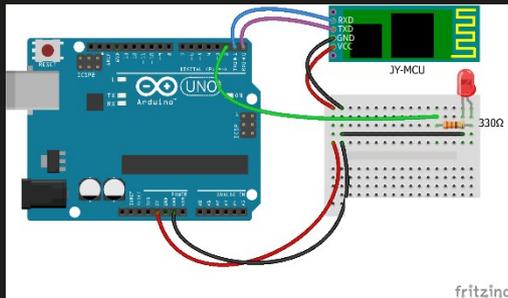
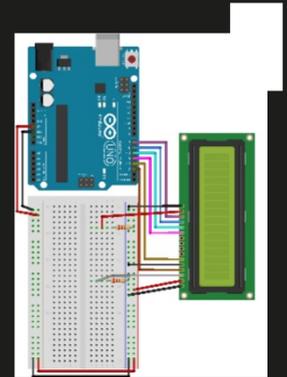
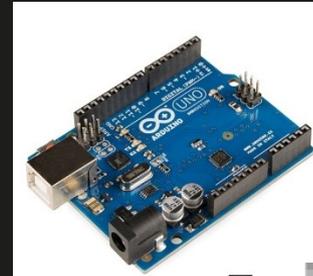
Familles de MCU

Il existe un très grand nombre de solutions MCU chez différents fournisseurs, permettant de résoudre un cahier des charges.

Les MCU d'une même famille sont caractérisés par le même CPU et bus associés. Le **jeu d'instructions (ISA, Instruction Set Architecture)** et donc les outils de compilation sont similaires. Ce qui différencie les MCU d'une même famille sera le jeu de périphériques associés et les ressources mémoire disponibles.

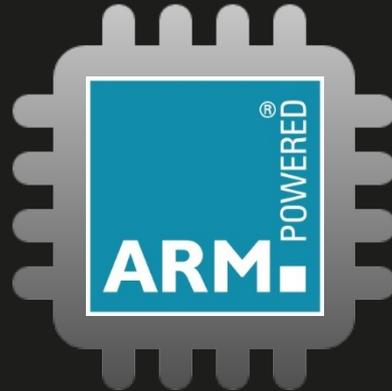


Sûrement le plus populaire des projets électroniques basés sur un MCU, il reste déprécié en enseignements ingénieurs pour son côté trop *friendly/maker* et sa non-application aux marchés en sortie d'école.



Même si le marché des MCU reste concurrentiel, la grande majorité des fondeurs de MCU (STMicro, Renesas, Texas Instruments, NXP, ...) utilisent des architectures CPU similaires, toutes proposées par la société ARM : la famille des **Cortex-M**.

Cela garanti un accès à des outils de développement, bibliothèques et services logiciels fiables, pouvant être libres et open-source (IP / *Graphical* / USB / Bluetooth, *stack*, RTOS, ...).

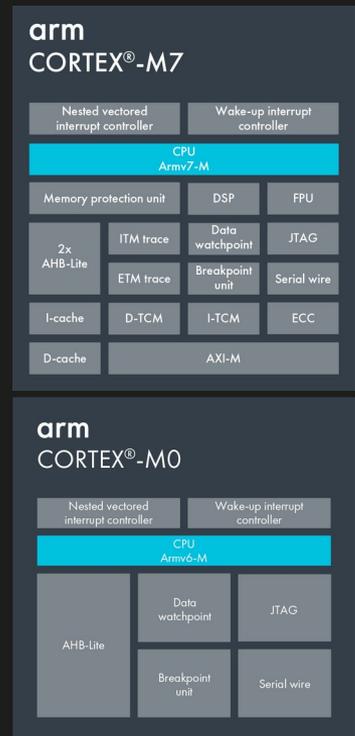
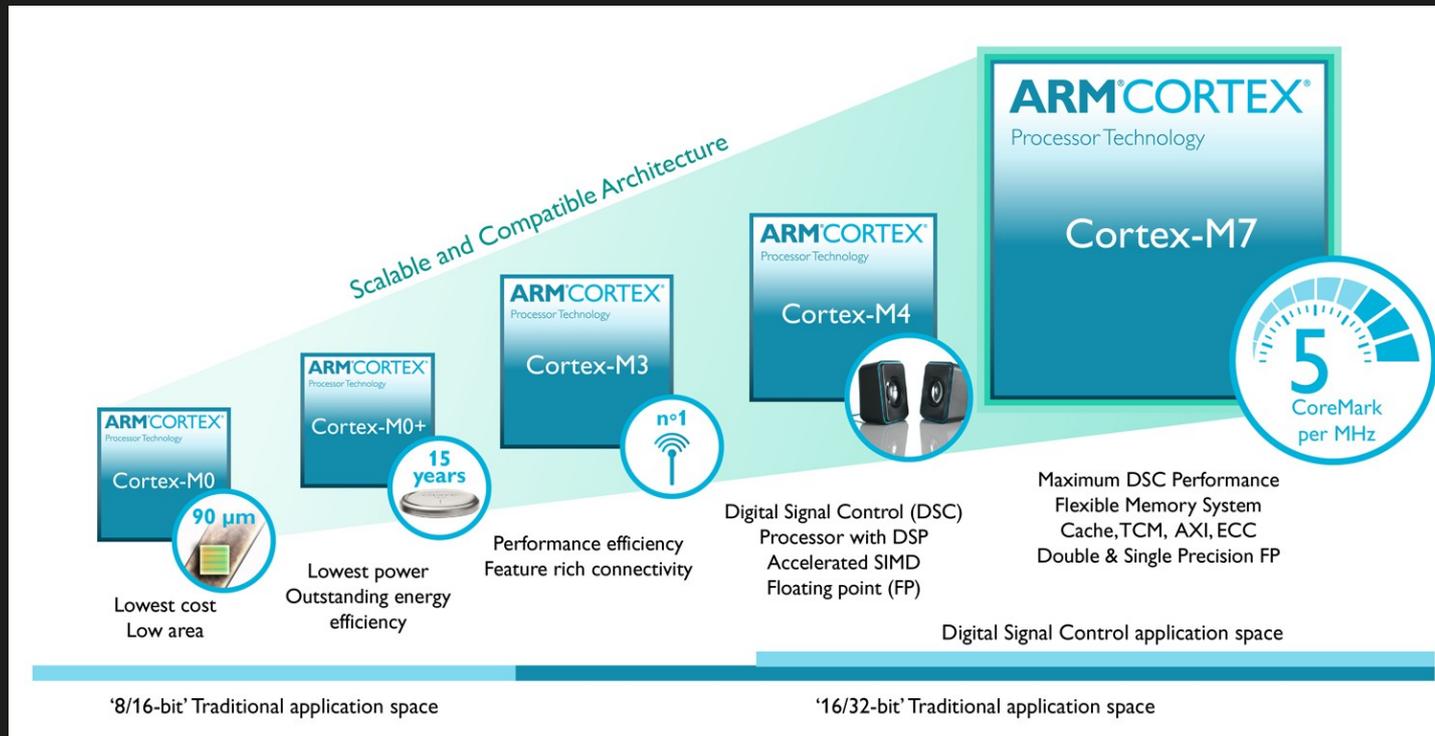


MCU – MICROCONTROLLER UNIT

CPU Cortex ARM

ARM propose la série des processeurs Cortex-M, où M signifie MCU.

Cette série comporte toute une famille de cœurs pour MCU adaptée à un large choix d'application.



Observons à titre d'illustration les gammes des STM32, qui sont des MCU 32-bits basés sur un coeur ARM Cortex-M.

Ils sont proposés par la société STMicroelectronics, société franco-italienne et principal fondeur européen.



STMicroelectronics

Common core peripherals and architecture:

Communication peripherals: USART, SPI, I ² C
Multiple general-purpose timers
Integrated reset and brown-out warning
Multiple DMA
2x watchdogs Real-time clock
Integrated regulator PLL and clock circuit
External memory interface (FSMC)
Up to 3x 12-bit DAC
Up to 4x 12-bit ADC (Up to 5 MSPS)
Main oscillator and 32 kHz oscillator
Low-speed and high-speed internal RC oscillators
-40 to +85 °C and up to 105 °C operating temperature range
Low voltage 2.0 to 3.6 V or 1.65/1.7 to 3.6 V (depending on series)
Temperature sensor

+

STM32 F4 series - High performance with DSP (STM32F405/415/407/417)

168 MHz Cortex-M4 with DSP and FPU	Up to 192-Kbyte SRAM	Up to 1-Mbyte Flash	2x USB 2.0 OTG FS/HS	3-phase MC timer	2x CAN 2.0B	SDIO 2x I ² S audio Camera IF	Ethernet IEEE 1588	Crypto/ hash processor and RNG
------------------------------------	----------------------	---------------------	----------------------	------------------	-------------	--	--------------------	--------------------------------



STM32 F3 series - Mixed-signal with DSP (STM32F302/303/313/372/373/383)

72 MHz Cortex-M4 with DSP and FPU	Up to 48-Kbyte SRAM & CCM-SRAM	Up to 256-Kbyte Flash	USB 2.0 FS	2x 3-phase MC timer (144 MHz)	CAN 2.0B	Up to 7x comparator	3x 16-bit ΣΔ ADC	4x PGA
-----------------------------------	--------------------------------	-----------------------	------------	-------------------------------	----------	---------------------	------------------	--------



STM32 F2 series - High performance (STM32F205/215/207/217)

120 MHz Cortex-M3 CPU	Up to 128-Kbyte SRAM	Up to 1-Mbyte Flash	2x USB 2.0 OTG FS/HS	3-phase MC timer	2x CAN 2.0B	SDIO 2x I ² S audio Camera IF	Ethernet IEEE 1588	Crypto/ hash processor and RNG
-----------------------	----------------------	---------------------	----------------------	------------------	-------------	--	--------------------	--------------------------------



STM32 F1 series - Mainstream - 5 product lines (STM32F100/101/102/103 and 105/107)

Up to 72 MHz Cortex-M3 CPU	Up to 96-Kbyte SRAM	Up to 1-Mbyte Flash	USB 2.0 OTG FS	3-phase MC timer	Up to 2x CAN 2.0B	SDIO 2x I ² S audio	Ethernet IEEE 1588
----------------------------	---------------------	---------------------	----------------	------------------	-------------------	--------------------------------	--------------------



STM32 F0 series – Entry level (STM32F050/051)

48 MHz Cortex-M0 CPU	Up to 12-Kbyte SRAM	Up to 128-Kbyte Flash	3-phase MC timer	Comparator	CEC
----------------------	---------------------	-----------------------	------------------	------------	-----



STM32 L1 series - Ultra-low-power (STM32L151/152/162)

32 MHz Cortex-M3 CPU	Up to 48-Kbyte SRAM	Up to 384-Kbyte Flash	USB FS device	Up to 12-Kbyte EEPROM	LCD 8x40 4x44	Comparator	BOR MSI VScal	AES 128-bit
----------------------	---------------------	-----------------------	---------------	-----------------------	---------------	------------	---------------	-------------



STM32 W series - Wireless (STM32W108)

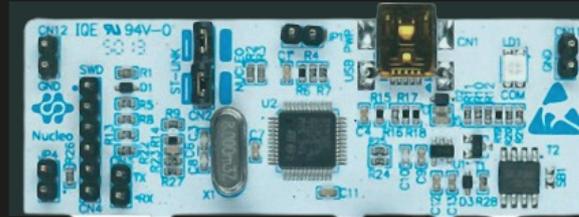
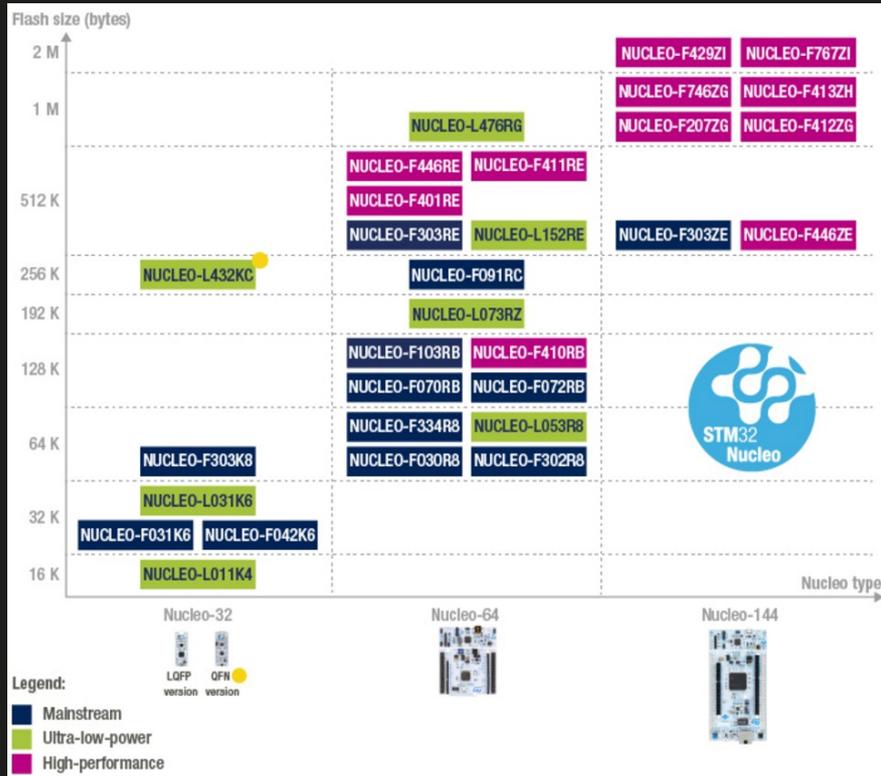
24 MHz Cortex-M3 CPU	Up to 16-Kbyte SRAM	Up to 256-Kbyte Flash	2.4 GHz IEEE 802.15.4 Transceiver	Lower MAC Digital baseband	AES 128-bit
----------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------------------	----------------------------	-------------



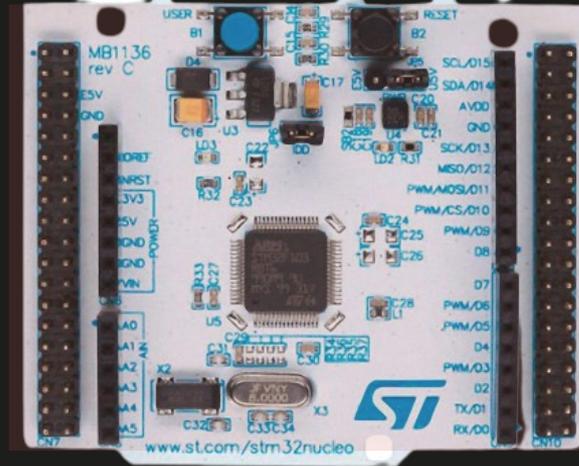
MCU – MICROCONTROLLER UNIT

STMicroelectronics

Le projet Nucleo propose des maquettes d'évaluation à bas coût utilisant des solutions MCU et outils de développement de l'industrie (≈ 10 €).



- Power supply
- Programmer (JTAG emulator)



- Target MCU
- Switch and LED
- External ports
- Shields connectors
- Arduino shield connectors

Nucleo-64

Observons les résultats d'une étude de marché réalisée chaque année.



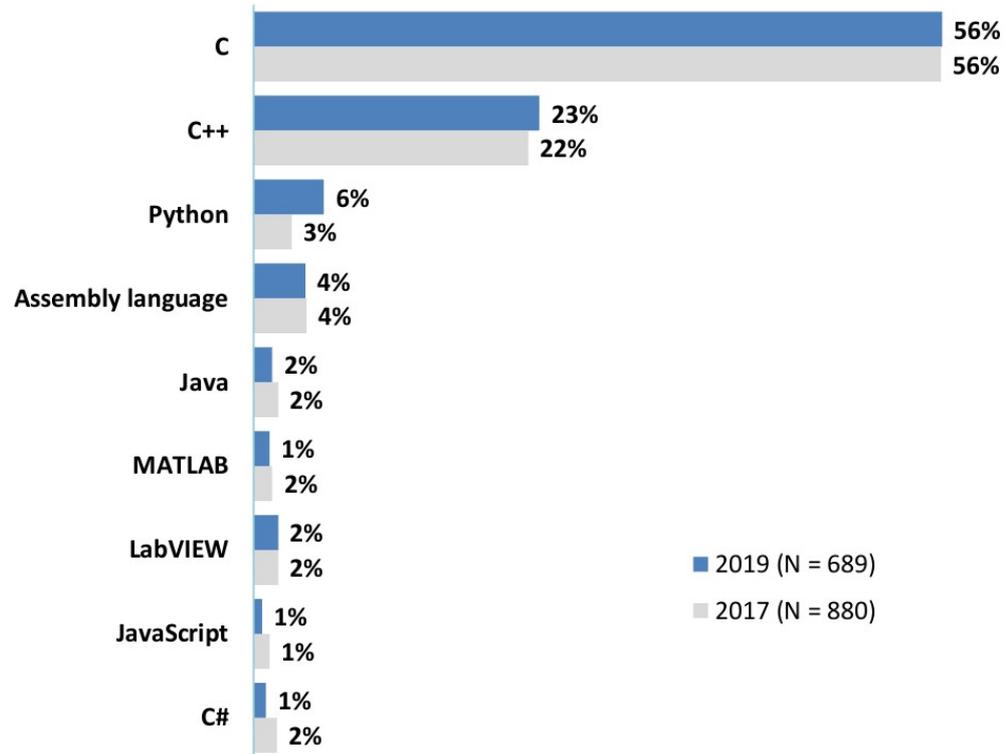
ASPENCORE

2019 Embedded Markets Study
Integrating IoT and Advanced Technology Designs,
Application Development & Processing Environments
March 2019

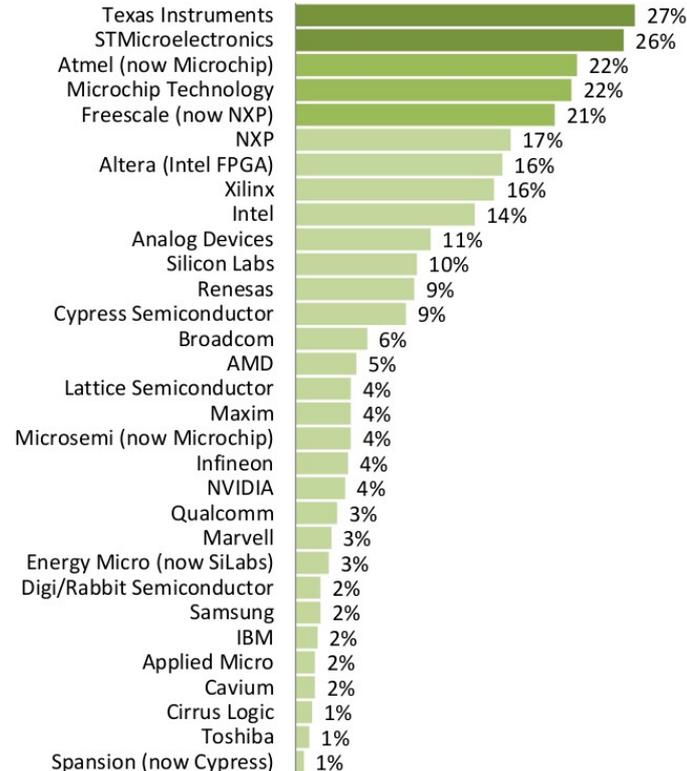
Presented By: **EE**Times embedded

© 2019 AspenCore All Rights Reserved

My *current* embedded project is programmed mostly in:



Please select the processor vendors you are currently using.



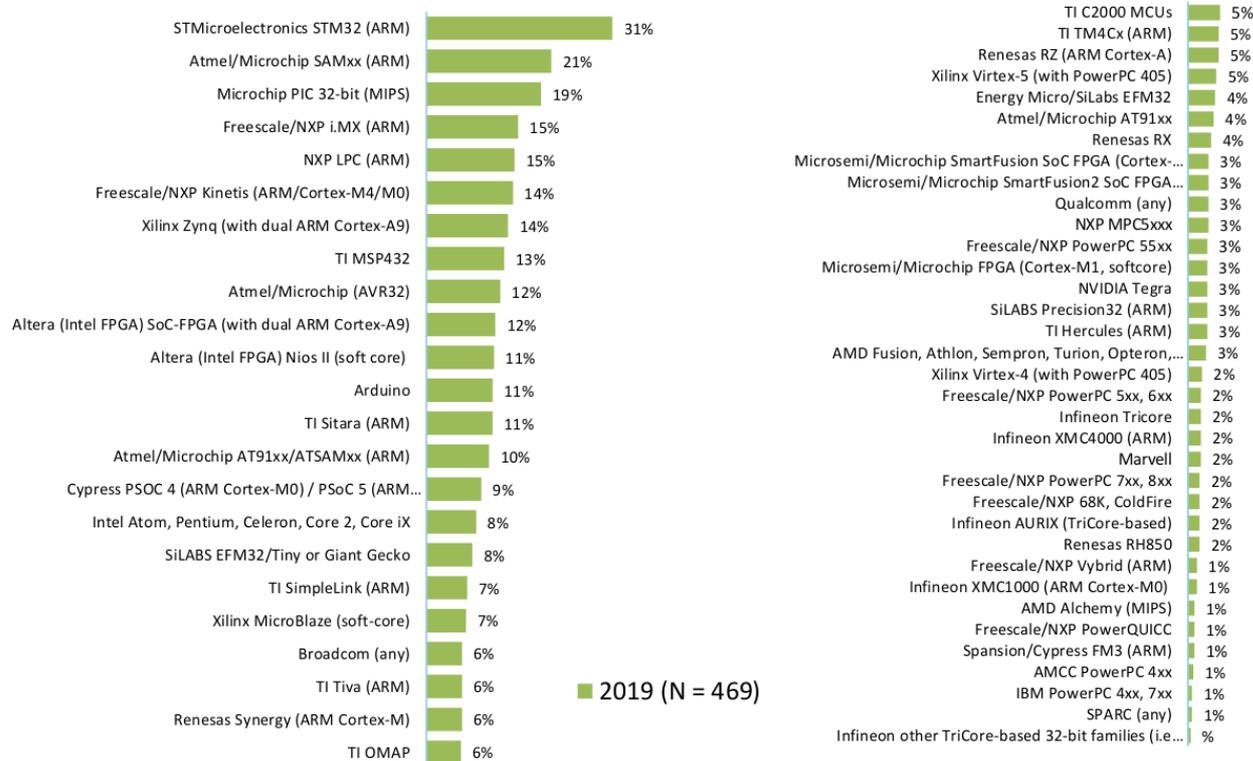
Merged Brands Combined	%
Microchip/Atmel/Microsemi (Net)	40
NXP/Freescale (Net)	28
Intel/Altera (Net)	26
Silicon Labs/Energy (Net)	10
Cypress/Spansion (Net)	9

Top Four Brands by Region:
Americas: TI, Microchip, STMicro, Atmel
EMEA: STMicro, NXP, TI, Atmel
APAC: TI, Atmel, Freescale, STMicro

2019 (N = 458)

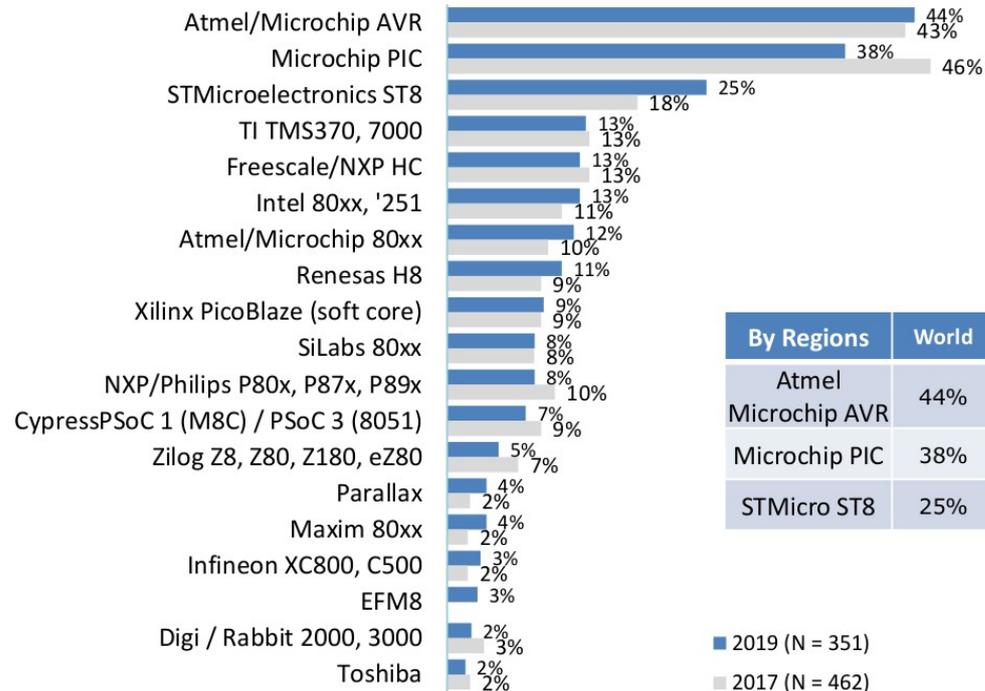


Which of the following 32-bit chip families would you consider for your next embedded project?





Which of the following 8-bit chip families would you consider for your next embedded project?



By Regions	World	Americas	EMEA	APAC
Atmel	44%	44%	52%	39%
Microchip AVR	38%	41%	43%	23%
STMicro ST8	25%	22%	31%	28%

■ 2019 (N = 351)

■ 2017 (N = 462)

- GPP -

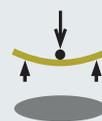
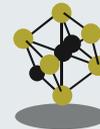
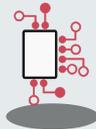
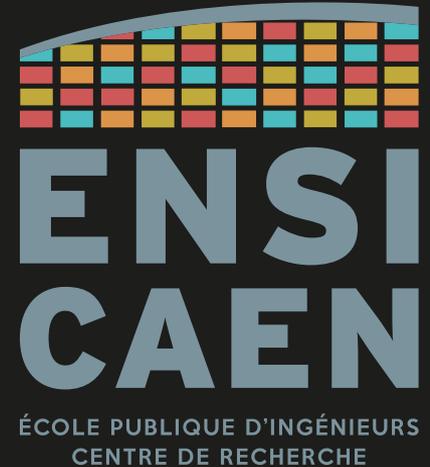
GENERAL PURPOSE PROCESSOR

Applications

Architecture

Carte mère

Processeur superscalaire



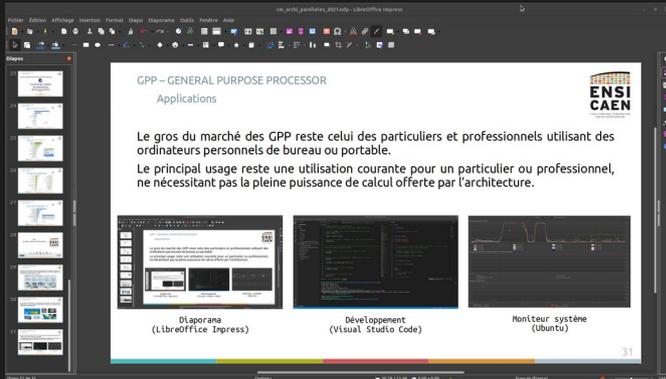
Applications

Les **General Purpose Processors (GPP)** possèdent une architecture CPU complexe leur offrant une **grande polyvalence**, notamment à l'exécution de code faiblement optimisé. Il s'agit par exemple de programmes de contrôle offrant un code séquentiel avec un grand nombre de tests et d'appels de fonctions. Codes difficiles à accélérer.

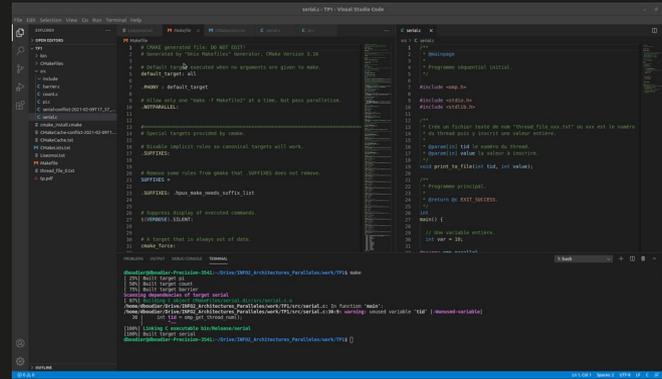
```
444     prev = NULL;
445     for (mpnt = oldmm->mmap; mpnt; mpnt = mpnt->vm_next) {
446         struct file *file;
447
448         if (mpnt->vm_flags & VM_DONTCOPY) {
449             vm_stat_account(mm, mpnt->vm_flags, -vma_pages(mpnt));
450             continue;
451         }
452         charge = 0;
453         if (mpnt->vm_flags & VM_ACCOUNT) {
454             unsigned long len = vma_pages(mpnt);
455
456             if (security_vm_enough_memory_mm(oldmm, len)) /* sic */
457                 goto fail_nomem;
458             charge = len;
459         }
460         tmp = kmem_cache_alloc(vm_area_cachep, GFP_KERNEL);
461         if (!tmp)
462             goto fail_nomem;
463         *tmp = *mpnt;
464         INIT_LIST_HEAD(&tmp->anon_vma_chain);
465         retval = vma_dup_policy(mpnt, tmp);
466         if (retval)
467             goto fail_nomem_policy;
```

Le gros du marché des GPP reste celui des particuliers et professionnels utilisant des ordinateurs personnels de bureau ou portable.

Le principal usage reste une utilisation courante pour un particulier ou professionnel, ne nécessitant pas la pleine puissance de calcul offerte par l'architecture.



Diaporama
(LibreOffice Impress)



Développement
(Visual Studio Code)

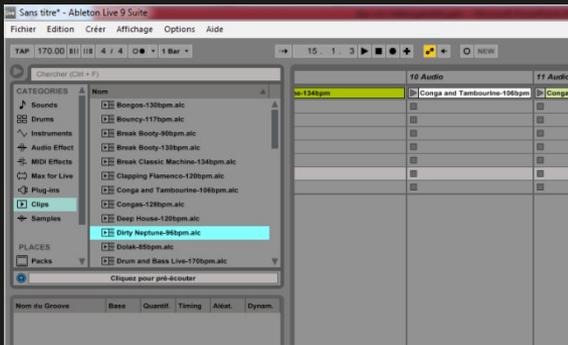


Moniteur système
(Ubuntu)

Applications

On peut également citer les applications de traitement du son, de traitement d'image, de traitement du signal, de développement logiciel ou de montages de médias.

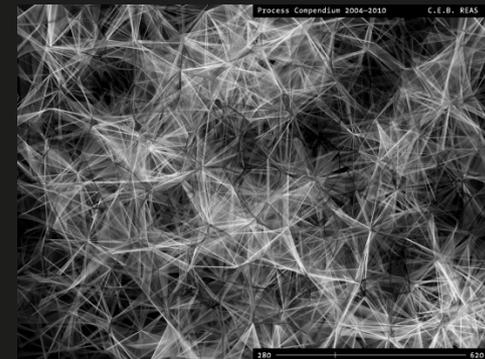
Celles-ci sont plus contraignantes au regard des ressources et exploitent souvent le plein potentiel du matériel.



Montage audio (Ableton)



Traitement du son



Traitement d'image

Les applications industrielles sont également un terrain historique des GPP.

Ils sont typiquement rencontrés sur des tâches de contrôle ou des fonctions de calculs spécialisés. Ce marché tend à utiliser des solutions intégrées (AP, SoC, DSP, FPGA).



Radar GM400
(Thalès)



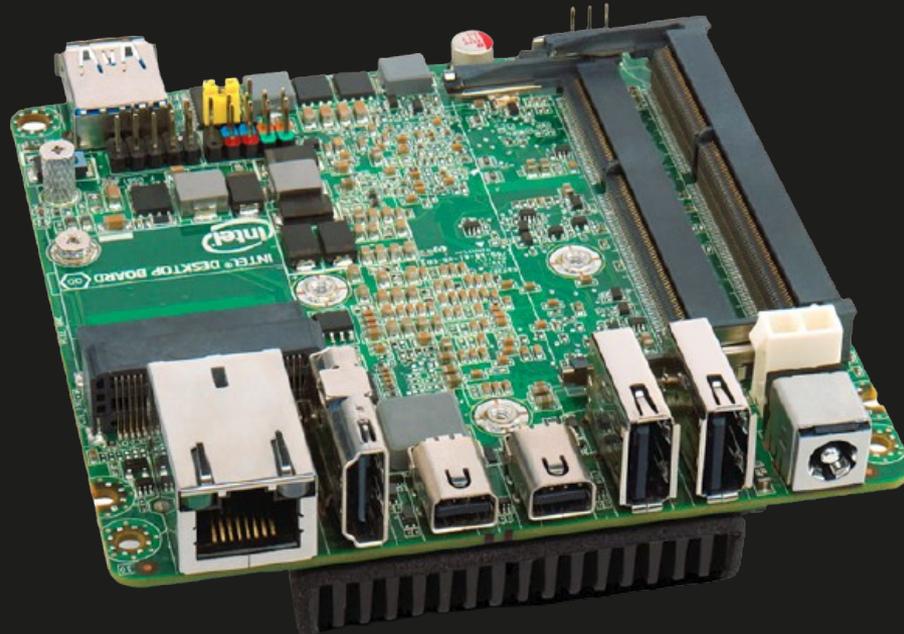
Rafale
(Dassault)



Borne automatique
Box j200

Notons que les GPP peuvent également être exploités par des applications rattachées au domaine des systèmes embarqués.

Voici par exemple la carte mère NUC Core i5 de Intel.



Observons les architectures phares d'Intel, leader actuel et historique du marché des GPP (*General Purpose Processor*) ou MPU (*MicroProcessor Unit*) mais également du marché des semi-conducteurs au sens large.

40 ANS DE COURSE À L'INNOVATION

1971

PROCESSEUR 4004 D'INTEL

Nombre de transistors : **2.300**
Puissance : **108 kilohertz**
10 microns



1981

PROCESSEUR 8088

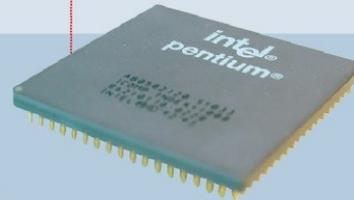
Introduit dans les PC d'IBM
Nombre de transistors : **29.000**
Puissance : **5 megahertz**
3 microns



1993

PENTIUM

Nombre de transistors : **3.1 millions**
Puissance : **66 megahertz**
0,8 micron



2006

INTEL CORE 2 DUO

Nombre de transistors : **291 millions**
Puissance : **2.93 gigahertz**
65 nanomètres



2012

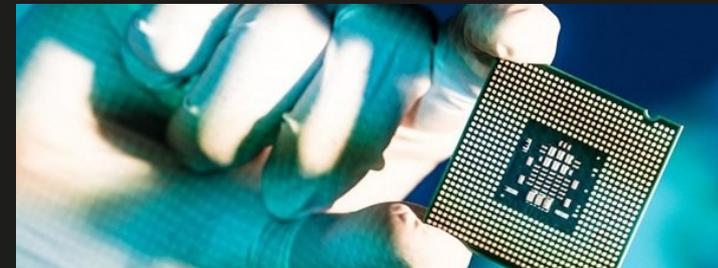
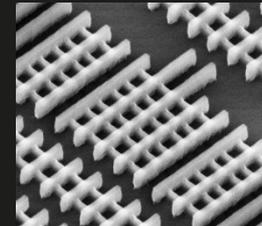
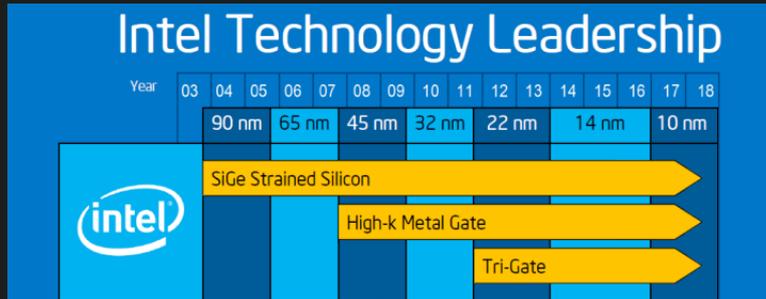
PROCESSEURS IVY BRIDGE

Nombre de transistors : **1.400 millions (3D)**
Puissance non communiquée
22 nanomètres

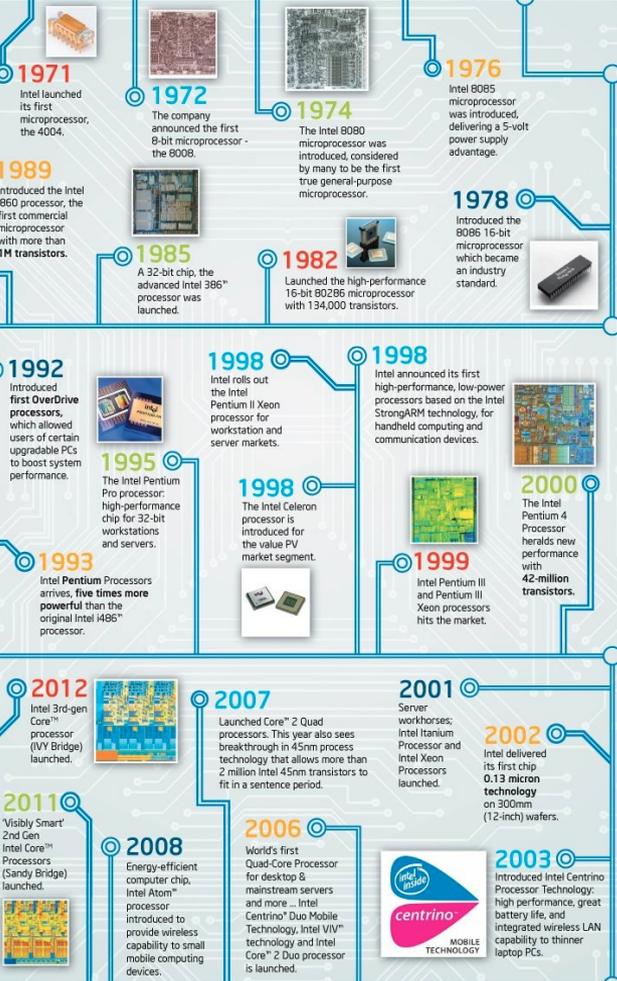


Architectures Intel

Les architectures GPP phares à notre époque sont les familles Core i3/i5/i7 de Intel. Mais prudence, il existe un grand nombre d'autres architectures et fondeurs de GPP ciblant divers marchés différents.



EVOLUTION OF THE PROCESSOR



<https://javadoc4dummies.blogspot.com/2013/03/intel-processor-evolution.html>

<https://www.itechtics.com/processor-generations/>

Intel Processors Generations



<https://www.itechtics.com/processor-generations>



GPP – GENERAL PURPOSE PROCESSOR

Architectures Intel

4004 (1971) Processeur 4 bit
8008 (1972) Processeur 8 bit
8086 (1978) Processeur 16 bit

80386 (1985) Processeur 32 bit

Pentium (1993) Processeur 32 bit

Pentium 4 (2000) Processeur 32 bit

Core 2 Duo (2006) Proc. 32/64 bit

→ Apparition du multi-core chez Intel

→ Naissance de l'ISA x86-64 (calé sur celui d'AMD), rétro-compatible x86-32 et x86-16 !

Core (2008) 12 générations se succèdent jusqu'à aujourd'hui (2022)



→ Premier CPU x86 (ISA x86-16)

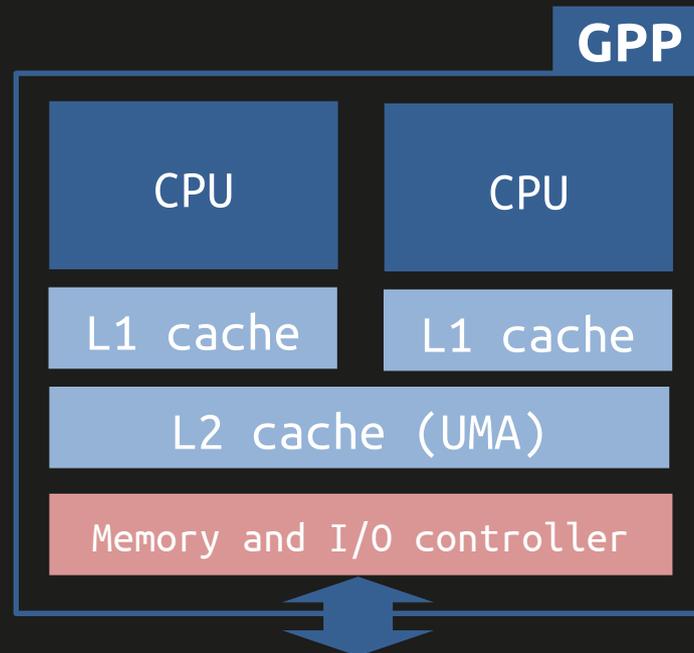
→ ISA x86-32, rétro-compatible x86-16

→ Premier superscalaire commercialisé

→ 2 cœurs logiques (2 threads)

Processeur de traitement nu, dépourvu de mémoire principale.

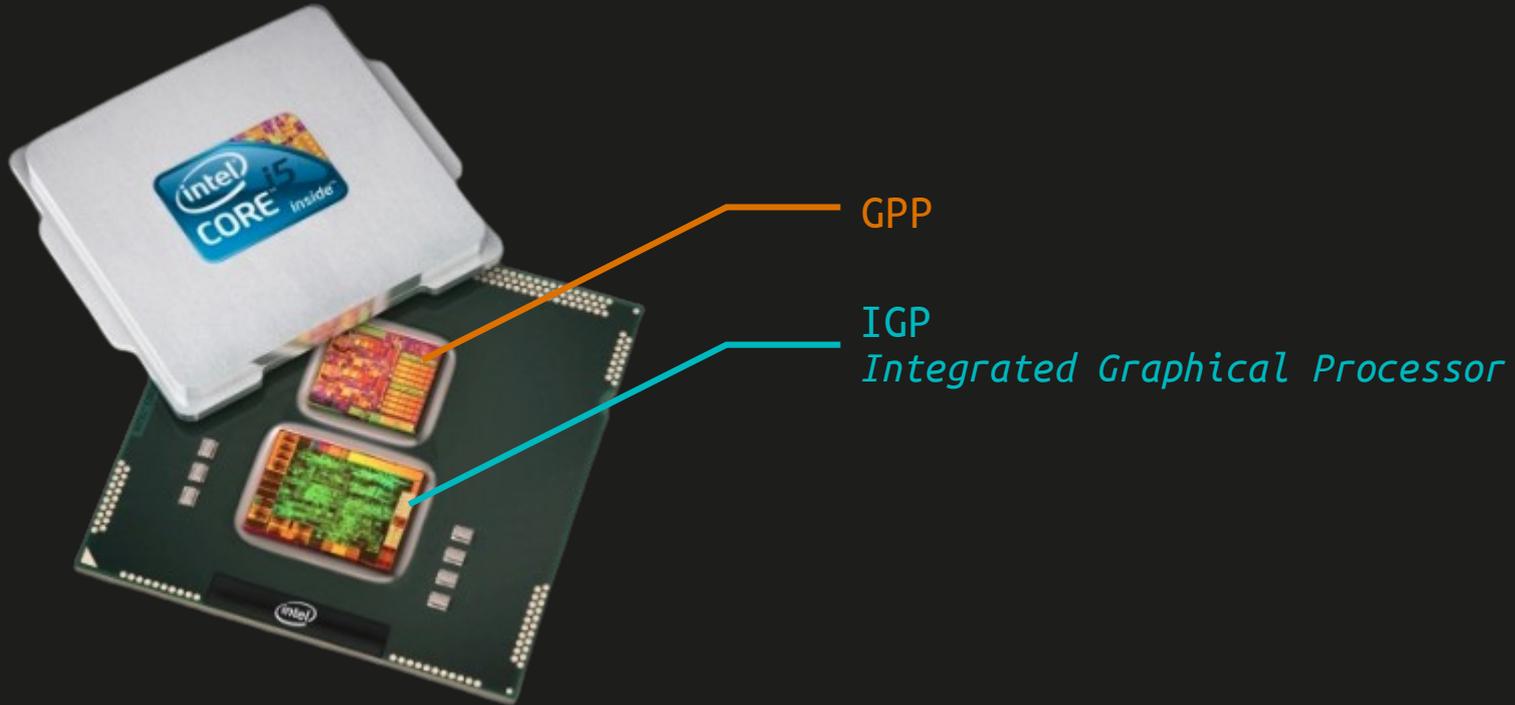
Il embarque un ou plusieurs CPU (architecture homogène) mariés avec leurs caches, possède un modèle mémoire uniforme (UMA) et embarque un contrôleur d'interfaces.



GPP – GENERAL PURPOSE PROCESSOR

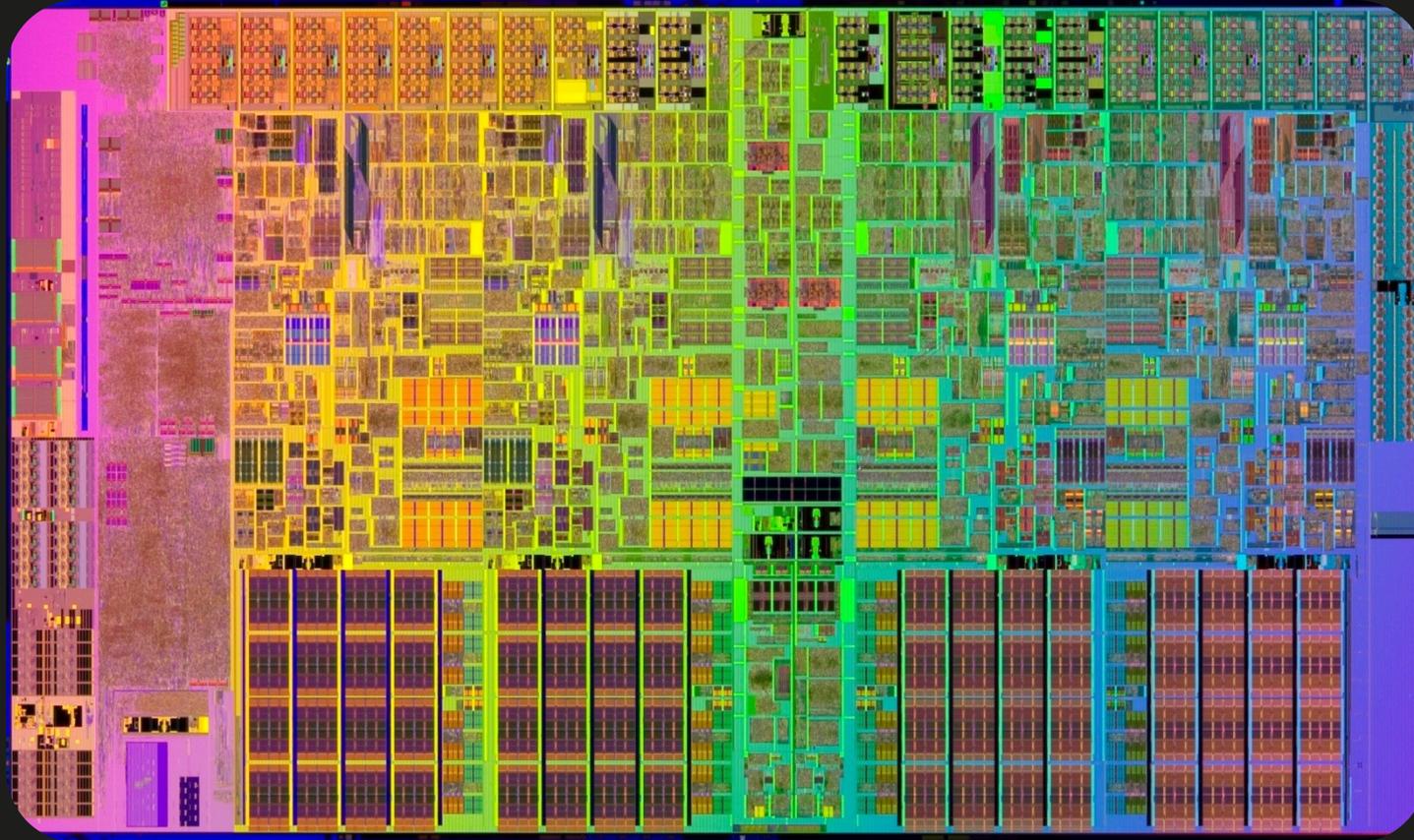
Exemple : Intel Core i5

Exemple de la famille Core i5 de Intel.



GPP – GENERAL PURPOSE PROCESSOR

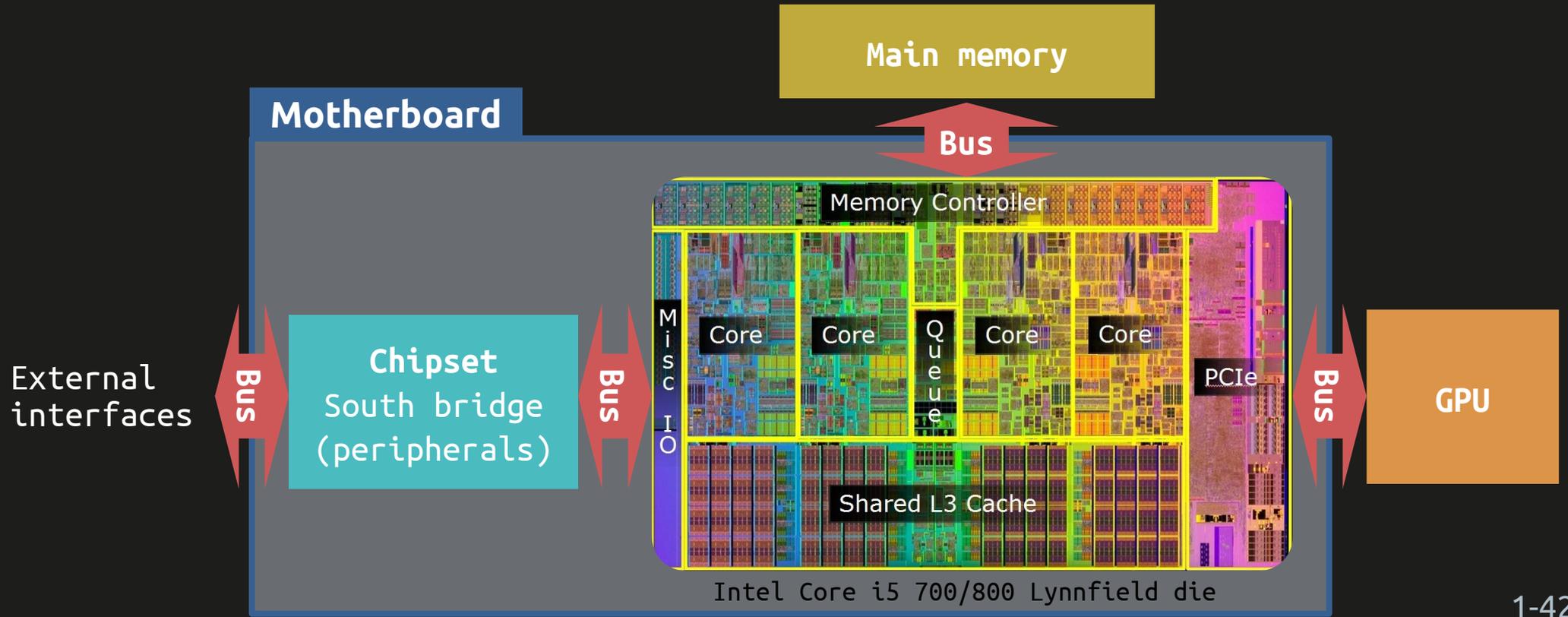
Exemple : Intel Core i5



Intel Core i5 700/800 Lynnfield die

Exemple : Intel Core i5

Intégration dans le système (carte mère)

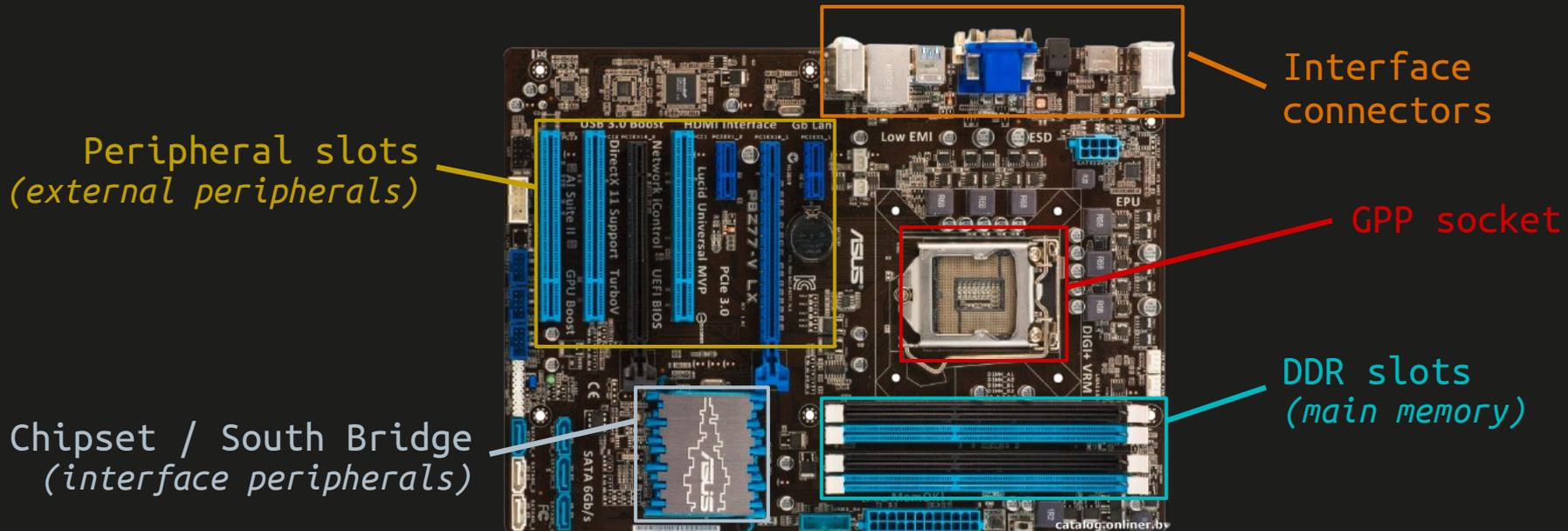


GPP – GENERAL PURPOSE PROCESSOR

Carte mère

Un GPP doit forcément être porté sur une carte mère avec mémoire principale et périphériques d'interfaces externes déportés.

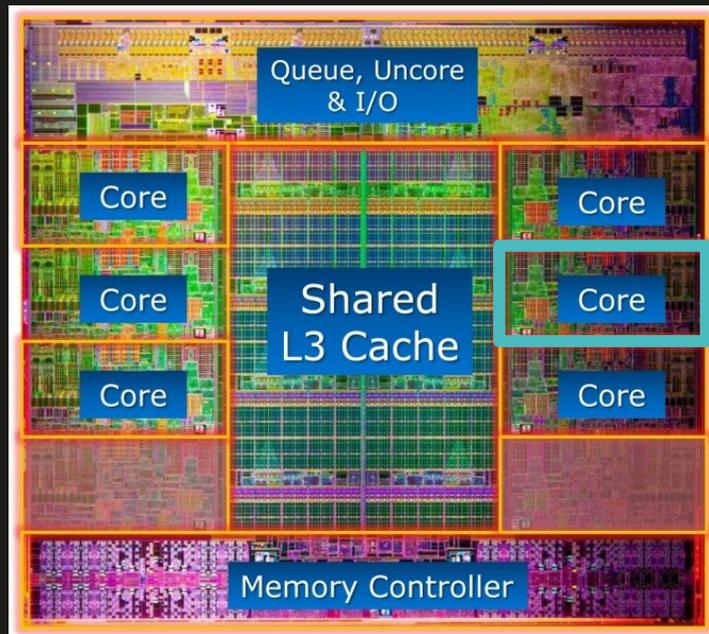
Exemple de carte mère ASUS, n°2 du marché mondial en 2016.



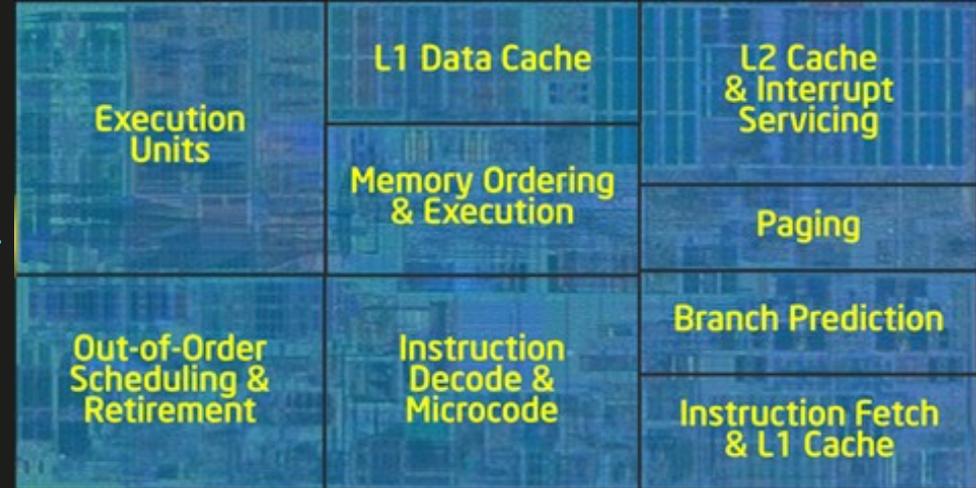
Les GPP possèdent un CPU dit **superscalaire**. Les processeurs possédant ce type de pipeline CPU se caractérisent le plus souvent par le déploiement des mécanismes d'accélération matériels suivants :

- **Étage d'exécution *Out Of Order*** : Exécution des instructions dans le désordre. Ordonnanceur matériel gérant les dépendances fonctionnelles et sur les données, étages de renommage des registres (résultats intermédiaires) et de ré-ordonnement
- **Étage de prédiction au branchement**
- **Étage d'exécution *RISC-like***, même si l'ISA est CISC

Die d'un CPU de la génération Sandy Bridge de Intel, illustré pour un Core i7.



Intel Core i7



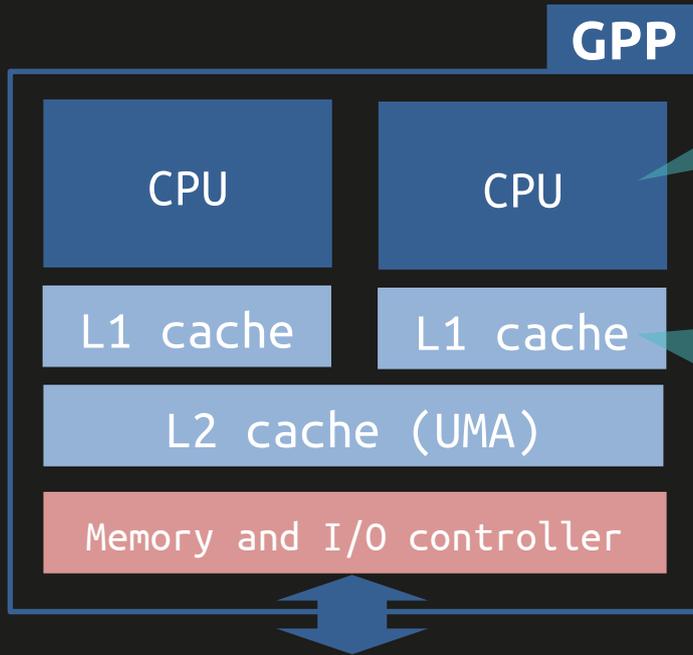
Sandy Bridge CPU/Core

Attention, cette grande polyvalence et complexité matérielle se paye par un manque de déterminisme voire de performance à l'exécution sur des traitements algorithmiques spécifiques.

Les GPP offrent un ratio performance de calcul ramené au coût et au Watt peu intéressant.

Ils sont pensés pour porter un OS (*Operating System*) évolué et exécuter du code applicatif. Prenons les exemples des applications de traitement du son, traitement d'image, traitement vidéo, traitement d'antenne ... pour lesquels ils ne sont pas spécialisés.





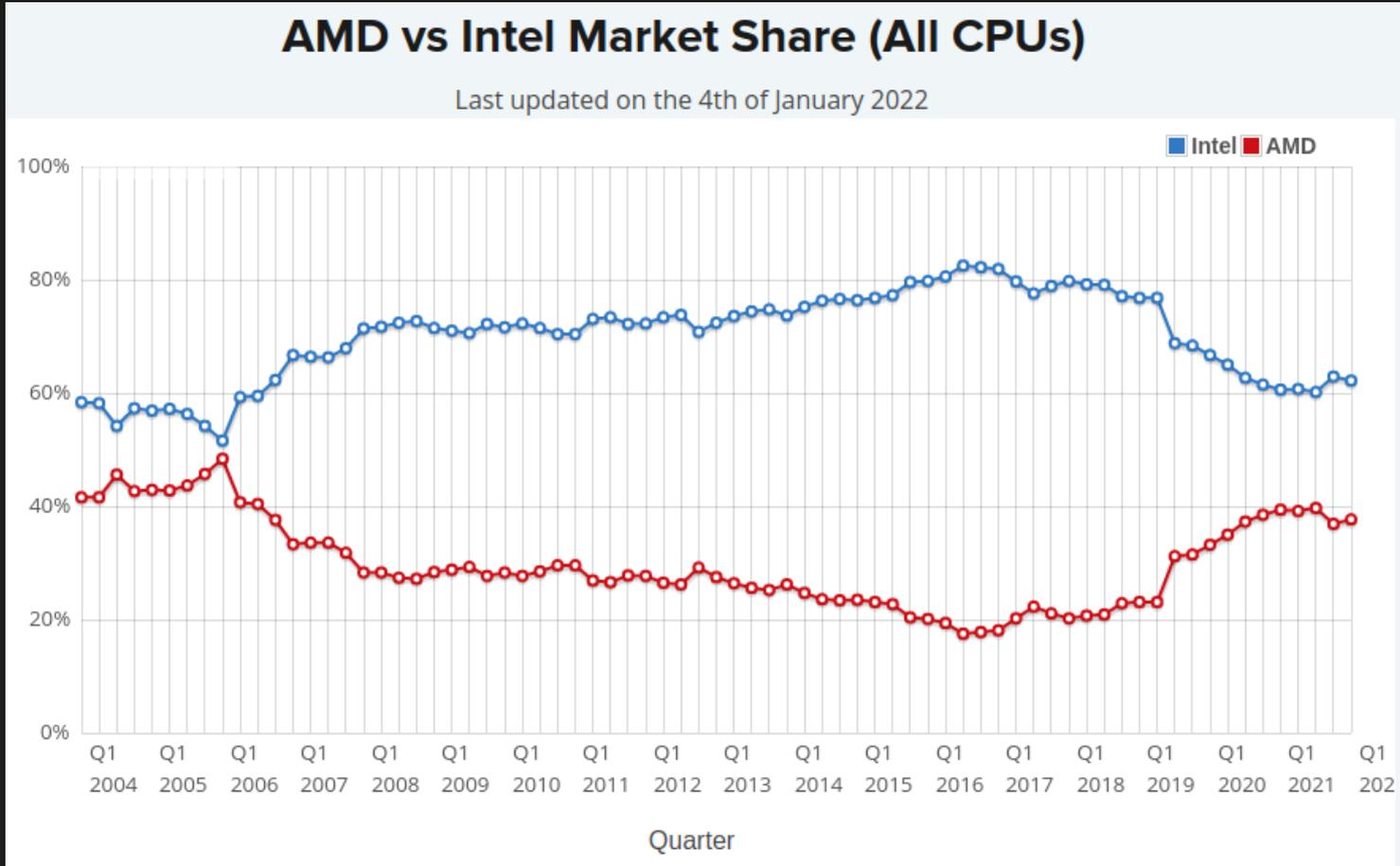
CPU superscalaire

- exécution Out Of Order
- prédiction de branchement
- non déterministe
- mauvais ratio (puissance calcul) / (Watt x Coût)

Mémoire

- Modèle mémoire uniforme (UMA)
- Cache processeur
 - Technologies de transfert rapides
 - Copies d'informations depuis la mémoire principale (DATA ou INST.)
 - Intelligence déportée dans les contrôleurs de caches (LRU)
 - Non déterministe

Parts de marché : Intel vs. AMD



- AP -

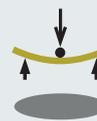
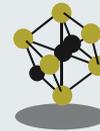
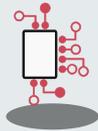
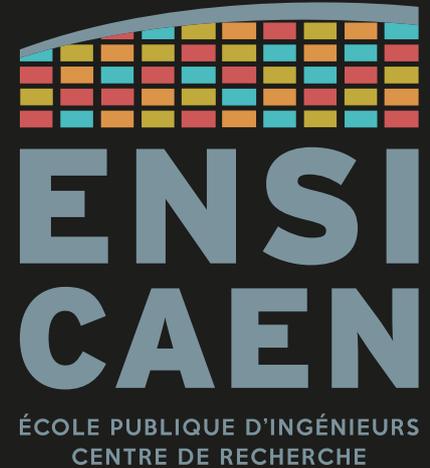
APPLICATION PROCESSOR

Applications

Architecture

Solution Qualcomm

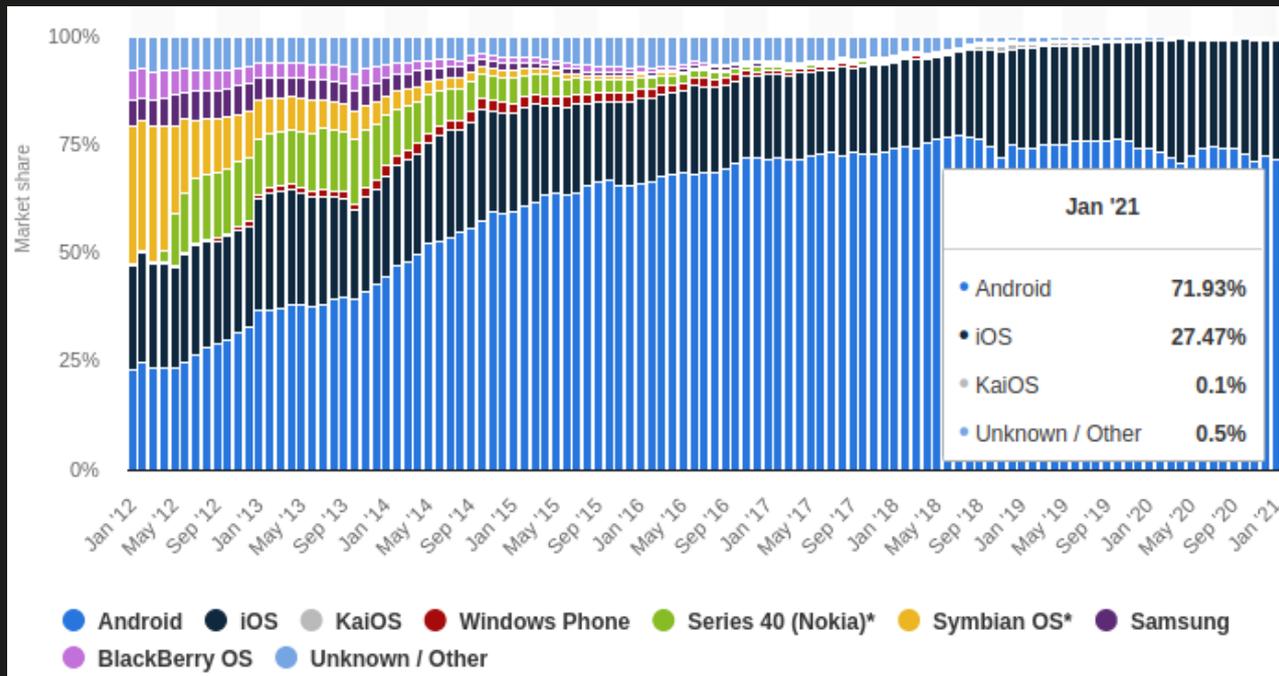
Solution ARM



Le marché des AP (*Application Processor*), processeurs riches en fonctionnalités et services matériels de type SoC (*System on Chip*), reste un marché récent qui a vu son envolé avec celui des terminaux mobiles (smartphone, phablette et tablette).



Le principal marché des AP en terme de parts reste donc celui des terminaux mobiles.
Ce marché voit une utilisation écrasante du système d'exploitation Android en 2016, système basé sur un noyau Linux.

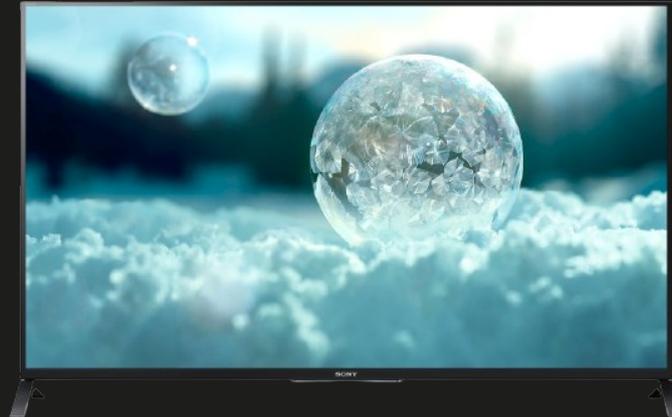


Néanmoins les processeurs applications sont très rencontrés dans les systèmes embarqués au sens large, tous domaines confondus : *consumer*, défense, transport ...

Ces systèmes embarquent généralement un OS et une interface graphique.



Freebox Revolution



Télévision 4K X94C Sony



Tablette Cook
(fait à Caen par EOLANE)

Dans la majorité des cas, ces processeurs sont exploités par des systèmes évolués.
Sur ce marché les systèmes GNU/Linux (très souvent customisés) règnent en maîtres.



Exemple de plateforme industrielle durcie EOLANE (Français n°2 Européen) travaillant autour de SoC/AP iMX6 proposé par Freescale sur système GNU/Linux.

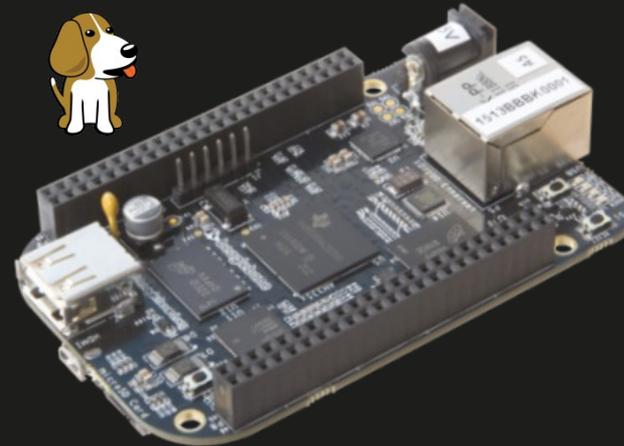
SOM SOLO	SOM QUAD	SBC	STARTER KIT
 <p data-bbox="244 1089 542 1137">UN MODULE EMBARQUÉ OPTIMISÉ POUR VOS PRODUITS</p>	 <p data-bbox="670 1089 1010 1137">UN MODULE MULTIMÉDIA PERFORMANT POUR VOS PRODUITS</p>	 <p data-bbox="1181 1089 1372 1137">UNE SOLUTION PC INDUSTRIEL INTÉGRÉ</p>	 <p data-bbox="1564 1089 1883 1137">UNE PLATEFORME D'ÉVALUATION POUR VOS MAQUETTES</p>

Voici les deux plateformes non-durcies à bas coût qui dominent le marché :

les projets [Raspberry Pi](#) et [Beaglebone](#) (SoC AM335x TI).

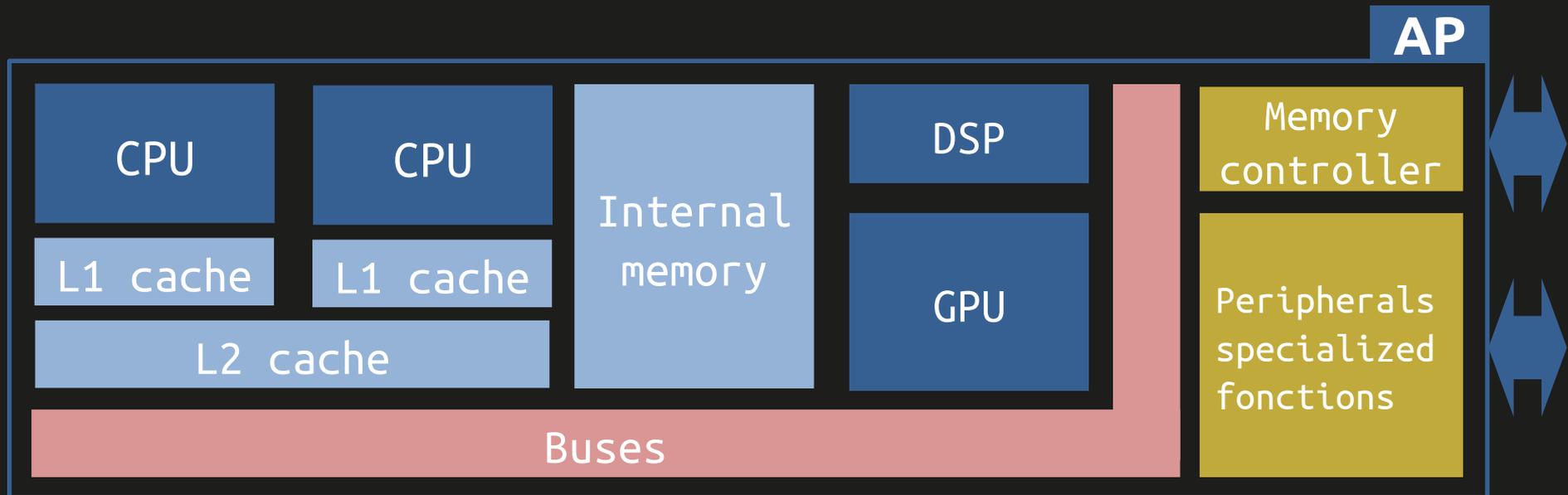
Ces solutions sont également basées sur des systèmes GNU/Linux

Elles sont très rencontrées durant les phases de prototypage ou en milieu universitaire, mais ne peuvent être industrialisées. Néanmoins des versions durcies existent.



Les AP sont des systèmes numériques complets intégrés dans une puce (architecture hétérogène).

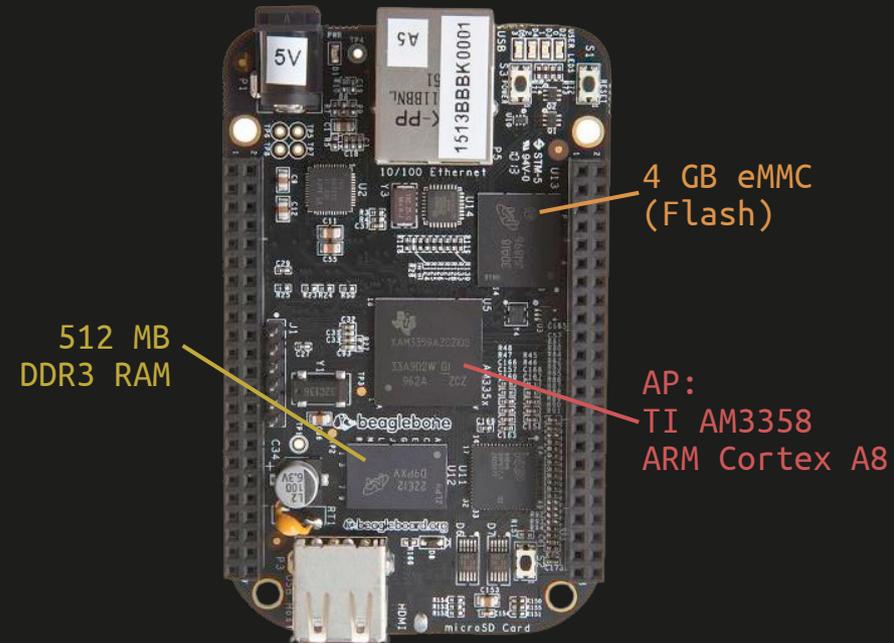
Néanmoins, la mémoire principale doit être ajoutée en externe.



Un **processeur application** embarque toujours un voire plusieurs CPU généralistes superscalaires. Ils sont dédiés à l'exécution du ou des systèmes d'exploitation évolués (virtualisés ou réels) ainsi que des applicatifs.

Un **AP** contient également une voire plusieurs fonctions spécialisées de calcul (GPU, DSP, crypto ...), un jeu de périphériques évolués complet et une mémoire interne ne permettant pas d'accueillir le système (*bootloader*).

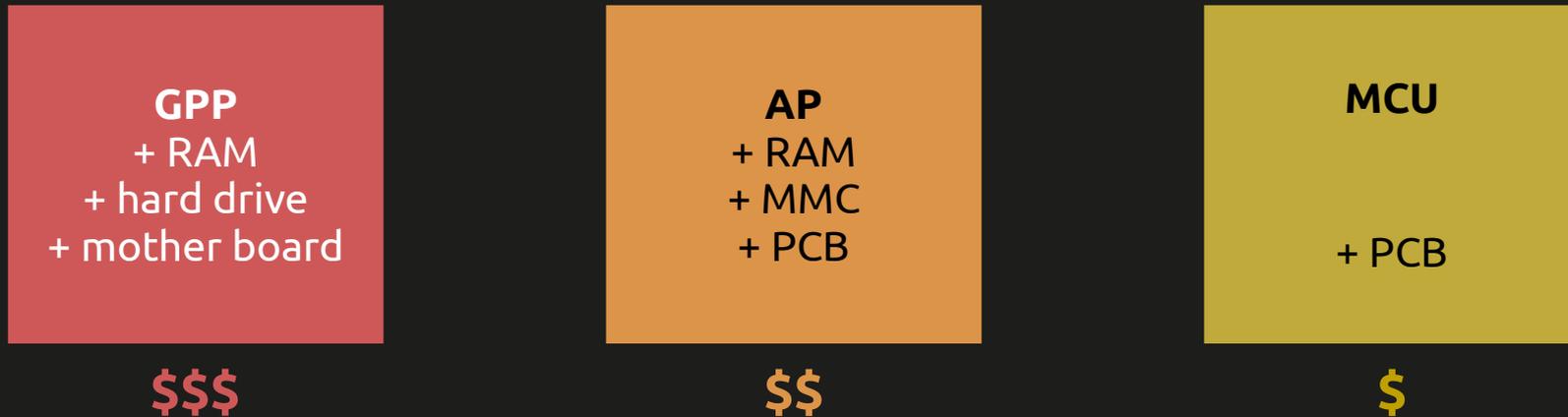
Par conséquent, une **mémoire principale** (DDR volatile) et une mémoire non-volatile de **stockage de masse** (MMC, eMMC, SDCard ...) externes doivent lui être ajoutées.



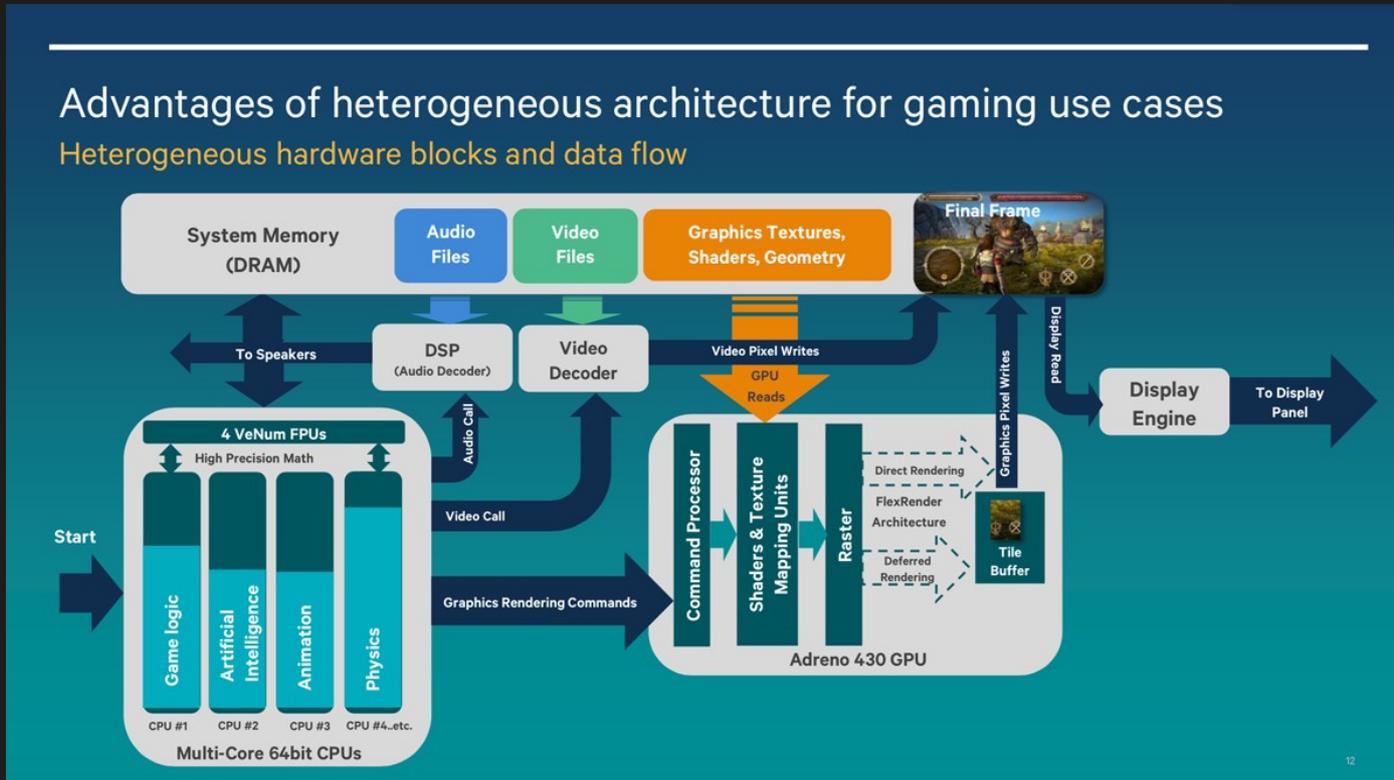
Comparaison des processeurs généralistes

Contrairement aux MCU embarquant tous les services matériels sur la puce afin de contrôler un système (*on chip*), les AP exigent un coût unitaire non négligeable et restent dépréciés pour les applications à faible coût et fort volume.

Ils sont alors utilisés si il y a nécessité d'une interface et/ou de connectivités évoluées dans l'application.



Observons l'intérêt d'une architecture hétérogène pour une application aux jeux vidéos



Le leader du marché en terme de part de marché est Qualcomm, grâce à sa famille Snapdragon dédiée au marché des terminaux mobiles.



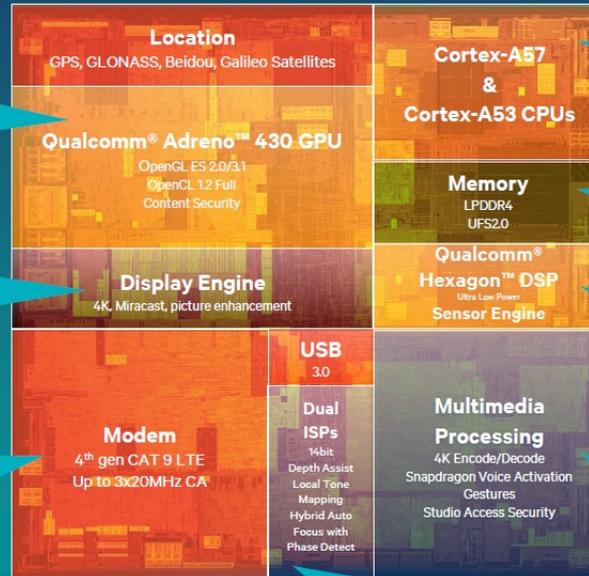
Fonctions matérielles de l'architecture interne de la famille Qualcomm Snapdragon 810

Introducing the Snapdragon 810 Processor

Advanced Graphics & Compute with the Adreno 430 – the best GPU Qualcomm Technologies' has ever made

4K primary & external display support with ecoPix and TruPalette and 3:1 pixel compression

Mobile industry's FIRST announced multi-channel 4G LTE SoC supporting Category 9 Carrier Aggregation



Not drawn to scale.

FIRST Announced ARM®v8-A/64-bit using Cortex®-A57+ Cortex®-A53

Mobile industry's FIRST announced dual channel 1600 MHz LPDDR4 memory

Qualcomm Technologies' FIRST UFS 2.0 Support

Greatly improved power management for DSP/Sensor Engine, Low Power Snapdragon Voice Activation (SVA), 12-channel surround sound decode

Qualcomm Technologies' FIRST hardware implementation of 4K HEVC/H.265 video encode. HEVC designed to deliver up to 50% better video compression

Qualcomm Technologies' FIRST 14-bit Dual ISP for highest quality, depth enabled photography. Up to 21MP for main camera with depth assist, phase detect, for sharper dual camera user experiences

Qualcomm Adreno and Qualcomm Hexagon are pro

AP – APPLICATION PROCESSOR

Exemple smartphone (Nokia 3.1 Plus, 2018)



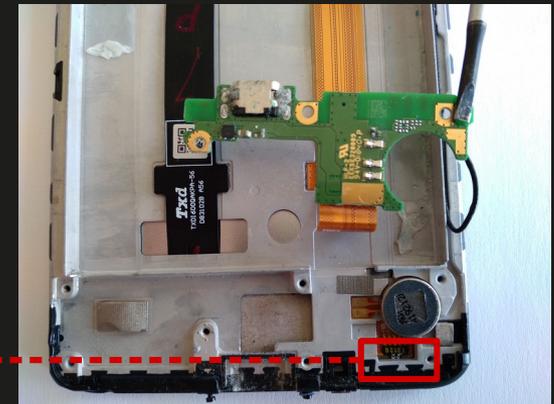
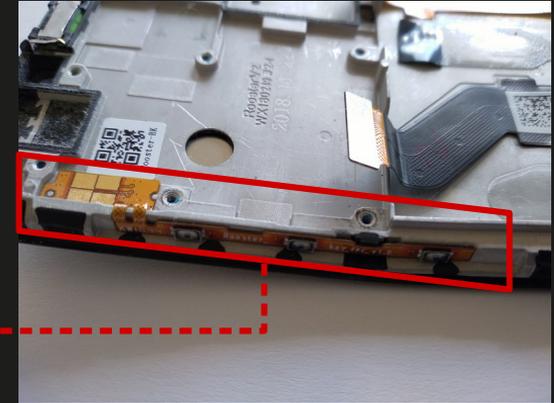
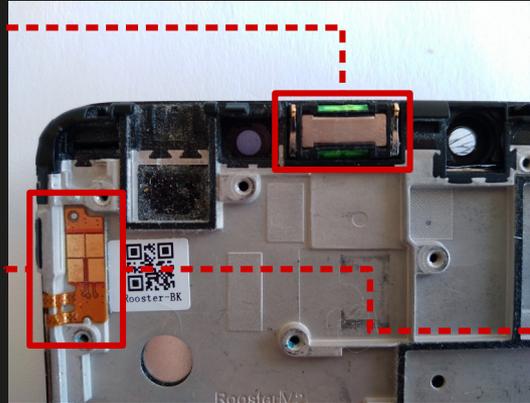
Speaker

Switches connector

Battery
3400 mAh

Loudspeaker

Microphone

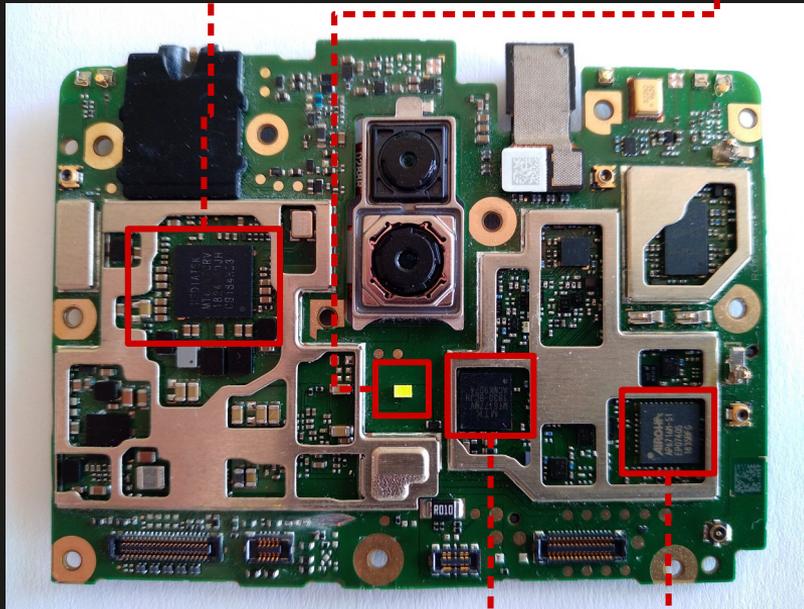


AP – APPLICATION PROCESSOR

Exemple smartphone (Nokia 3.1 Plus, 2018)

MEDIATEK MT6357CRV
Power IC
+capacitors & inductors

Flash LED



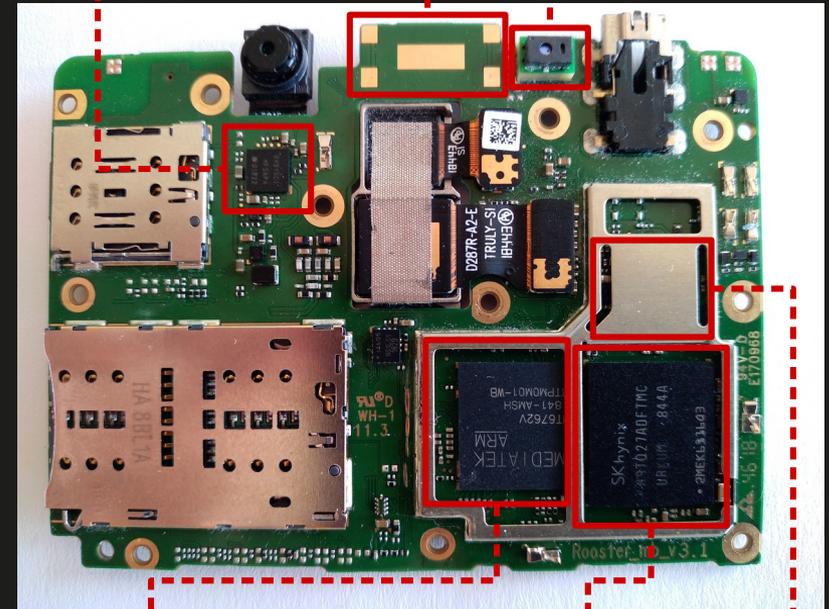
MEDIATEK MT6177MV
Intermediate Frequency IC

**AIROHA
AP6716M-51**
RF IC

RN81XC1
Audio Bluetooth ?

**Front speaker
connector**

**Ambiant
light
sensor**



*Antennas in
the back case*

MEDIATEK MT6762V (Helio P22)
Qualcomm SDM439 Snapdragon (2018)
ARM v8-A (64-bit), Cortex-A53
8 cores, 2 GHz, 12 nm
2-core GPU, DSP

SK hynix
H9TQ27ADFTMC
32 GB Flash
Nand eMMC

RAM ?
2 GB
LPDDR3
(Low-Power)

Solution ARM Cortex-A

Les deux leaders du marché hors terminaux mobiles sont Texas Instruments et Freescale, deux fondateurs offrant de larges communautés d'utilisateurs.

Observons la famille i.MX6 de Freescale :

i.MX 6 Series At a Glance Red indicates change from column to the left

Scalable series of six ARM Cortex A9-based SoC families

i.MX 6SoloLite	i.MX 6SoloX	i.MX 6Solo	i.MX 6DualLite	i.MX 6Dual	i.MX 6Quad
<ul style="list-style-type: none"> Single ARM® Cortex™-A9 at 1GHz 256KB L2 cache, Neon, VFPv16, Trustzone 2D graphics 32-bit DDR3 and LPDDR2 at 400MHz 10/100 Ethernet EPD controller 	<ul style="list-style-type: none"> Single ARM Cortex-A9 up to 1GHz Single Cortex-M4 at 166Mhz 256KB L2 cache, Neon, VFP, Trustzone 3D and 2D Graphics 32-bit DDR3 and LPDDR2 at 400MHz Dual Gigabit Ethernet PCIe (x1 lane) 	<ul style="list-style-type: none"> Single ARM Cortex-A9 up to 1GHz 512KB L2 cache, Neon, VFPv16, Trustzone 3D graphics with 1 shader 2D graphics 32-bit DDR3 and LPDDR2 at 400MHz 1080p30 video Gigabit Ethernet PCIe (x1 lane) EPD controller 	<ul style="list-style-type: none"> Dual ARM Cortex-A9 up to 1GHz 512KB L2 cache, Neon, VFPv16, Trustzone 3D graphics with 1 shader 2D graphics 64-bit DDR3 and 2-channel 32-bit LPDDR2 at 400MHz 1080p30 video Gigabit Ethernet PCIe (x1 lane) EPD controller 	<ul style="list-style-type: none"> Dual ARM Cortex-A9 up to 1/1.2GHz 1 MB L2 cache, Neon, VFPv16, Trustzone 3D graphics with 4 shaders Two 2D GFX engines 64-bit DDR3 and 2-channel 32-bit LPDDR2 at 533MHz 1080p60 video PCIe (x1 lane) Gigabit Ethernet SATA-II 	<ul style="list-style-type: none"> Quad ARM Cortex-A9 up to 1/1.2GHz 1 MB L2 cache, Neon, VFPv16, Trustzone 3D graphics with 4 shaders Two 2D GFX engines 64-bit DDR3 and 2-channel 32-bit LPDDR2 at 533MHz 1080p60 video PCIe (x1 lane) Gigabit Ethernet SATA-II

← Pin-to-pin and Power Compatible →
← Software Compatible →

- ARM Cortex-A9 based solutions ranging up to 1.2GHz
- HD 1080p encode and decode (except 6SoloLite/6SoloX)
- 3D video playback in high definition (except 6SoloLite/6SoloX)
- Integrated IO's may include HDMI v1.4, MIPI and LVDS, display ports, MIPI camera, Gigabit Ethernet, multiple USB 2.0 and PCI-Express
- SW support: Google Android™, Linux®, QNX, Windows® Embedded CE


External Use | 24

Solution ARM Cortex-A

Hors marché des terminaux mobiles, sur le marché de l'embarqué les architectures Cortex-A de ARM sont également reines. Le « A » signifie *Application*.

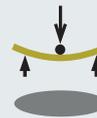
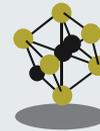
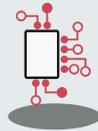
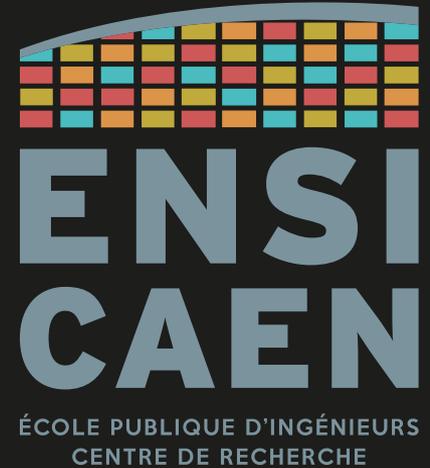
ARM® Cortex® Processors across the Embedded Market

Cortex®-M processors	Cortex®-R processors	Cortex®-A processors
MCU + DSP		
		
	RTOS	Rich OS
Smallest footprint / lowest power	Highest performance / real-time	Highest performance
		

2 CONFIDENTIAL 

- GPU - GRAPHICS PROCESSING UNIT

Applications
Architecture
Produits Nvidia
Marchés



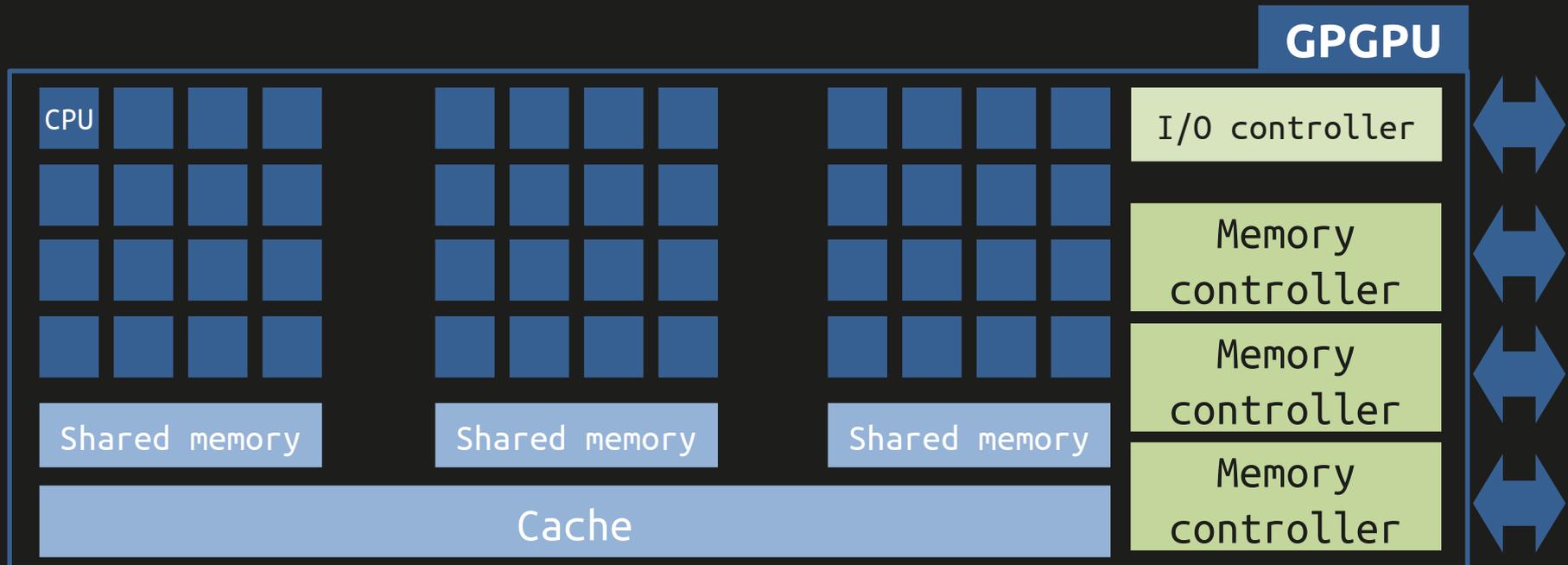
Les **GPU** (*Graphics Processing Unit*) sont des **coprocesseurs** de traitement spécialisés pour le calcul intensif.

Depuis quelques années, nous parlons de GPGPU (*General Purpose GPU*), GPU dédié au calcul massif au sens large. Les applications sont multiples : finance, recherche et sciences, imagerie médicale, jeux vidéos ...



Architecture

Les GPU possèdent un modèle mémoire réparti non uniforme de type NUMA (*Non Uniform Memory Access*), permettant un clonage des données à traiter et un parallélisme d'exécution. Ils intègrent une architecture massivement parallèle.



Solution Nvidia : la carte Tesla P100

Observons le potentiel de la carte Tesla P100 proposée par Nvidia courant 2016 et dédiée aux data center les plus avancés du moment. Basée sur GPU GP100.



SPECIFICATIONS

GPU Architecture	NVIDIA Pascal
NVIDIA CUDA® Cores	3584
Double-Precision Performance	5.3 TeraFLOPS
Single-Precision Performance	10.6 TeraFLOPS
Half-Precision Performance	21.2 TeraFLOPS
GPU Memory	16 GB CoWoS HBM2
Memory Bandwidth	732 GB/s
Interconnect	NVIDIA NVLink
Max Power Consumption	300 W
ECC	Native support with no capacity or performance overhead
Thermal Solution	Passive
Form Factor	SXM2
Compute APIs	NVIDIA CUDA, DirectCompute, OpenCL™, OpenACC

TeraFLOPS measurements with NVIDIA GPU Boost™ technology

Solution Nvidia : architecture Pascal



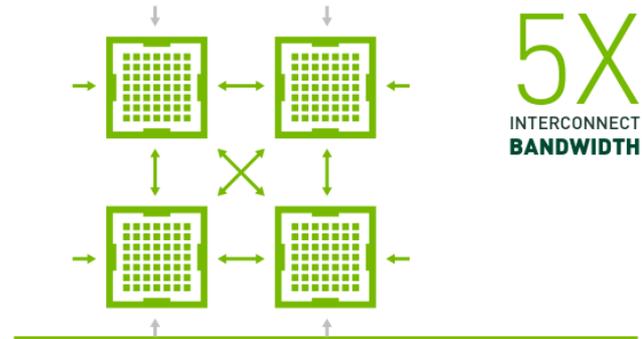
LEAP IN NEURAL NETWORK TRAINING PERFORMANCE
WITH NEW **NVIDIA PASCAL ARCHITECTURE**



FABRICATED WITH **16 NANOMETER FINFET**
FOR UNPRECEDENTED ENERGY EFFICIENCY



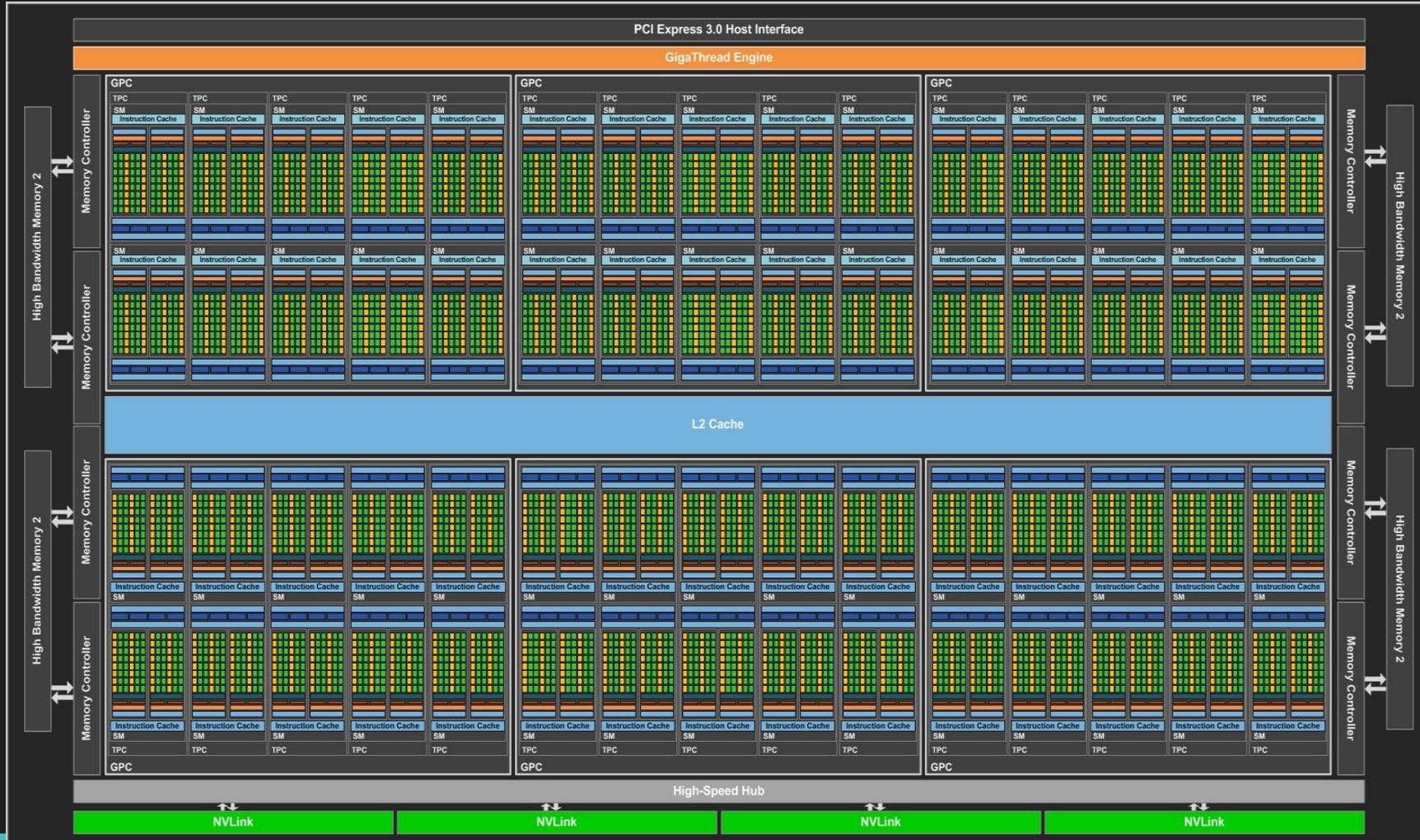
WITH **CoWoS® WITH HBM2** COMPARED TO
NVIDIA MAXWELL™ ARCHITECTURE FOR
BIG DATA WORKLOADS



WITH **NVIDIA NVLINK™** FOR MAXIMUM
APPLICATION SCALABILITY

GPU – GRAPHICS PROCESSING UNITS

Solution Nvidia : Architecture du GPU GP100



Solution Nvidia : Architecture du GPU GP100

Le GPU Nvidia GP100 en chiffres

- 6 Graphics Processing Clusters
- 30 Texture Processing Clusters (5 / GPC)
- 60 Streaming Multiprocessors (2 / TPC)
- 3840 single precision cores (64 / SM)
- 1920 double precision unit (32 / SM)
- 240 texture units (4 / SM)
- 8 memory controllers
 - 8 x 512 KB = 4096 KB L2 cache
 - 4 pairs that control HBM2 DRAM

Note : la carte Tesla P100 exploite 56 SM sur les 60 SM disponibles dans le GP100.

Tesla Products	Tesla K40	Tesla M40	Tesla P100
GPU	GK110 (Kepler)	GM200 (Maxwell)	GP100 (Pascal)
SMs	15	24	56
TPCs	15	24	28
FP32 CUDA Cores / SM	192	128	64
FP32 CUDA Cores / GPU	2880	3072	3584
FP64 CUDA Cores / SM	64	4	32
FP64 CUDA Cores / GPU	960	96	1792
Base Clock	745 MHz	948 MHz	1328 MHz
GPU Boost Clock	810/875 MHz	1114 MHz	1480 MHz
Peak FP32 GFLOPs ¹	5040	6840	10600
Peak FP64 GFLOPs ¹	1680	210	5300
Texture Units	240	192	224
Memory Interface	384-bit GDDR5	384-bit GDDR5	4096-bit HBM2
Memory Size	Up to 12 GB	Up to 24 GB	16 GB
L2 Cache Size	1536 KB	3072 KB	4096 KB
Register File Size / SM	256 KB	256 KB	256 KB
Register File Size / GPU	3840 KB	6144 KB	14336 KB
TDP	235 Watts	250 Watts	300 Watts
Transistors	7.1 billion	8 billion	15.3 billion
GPU Die Size	551 mm ²	601 mm ²	610 mm ²
Manufacturing Process	28-nm	28-nm	16-nm FinFET

¹ The GFLOPS in this chart are based on GPU Boost Clocks.

Les GPU intègrent un grand nombre de CPU à pipeline classique mais avec des EU vectorielles SIMD.

EU = Execution Unit
SIMD = Single Instruction Multiple Data

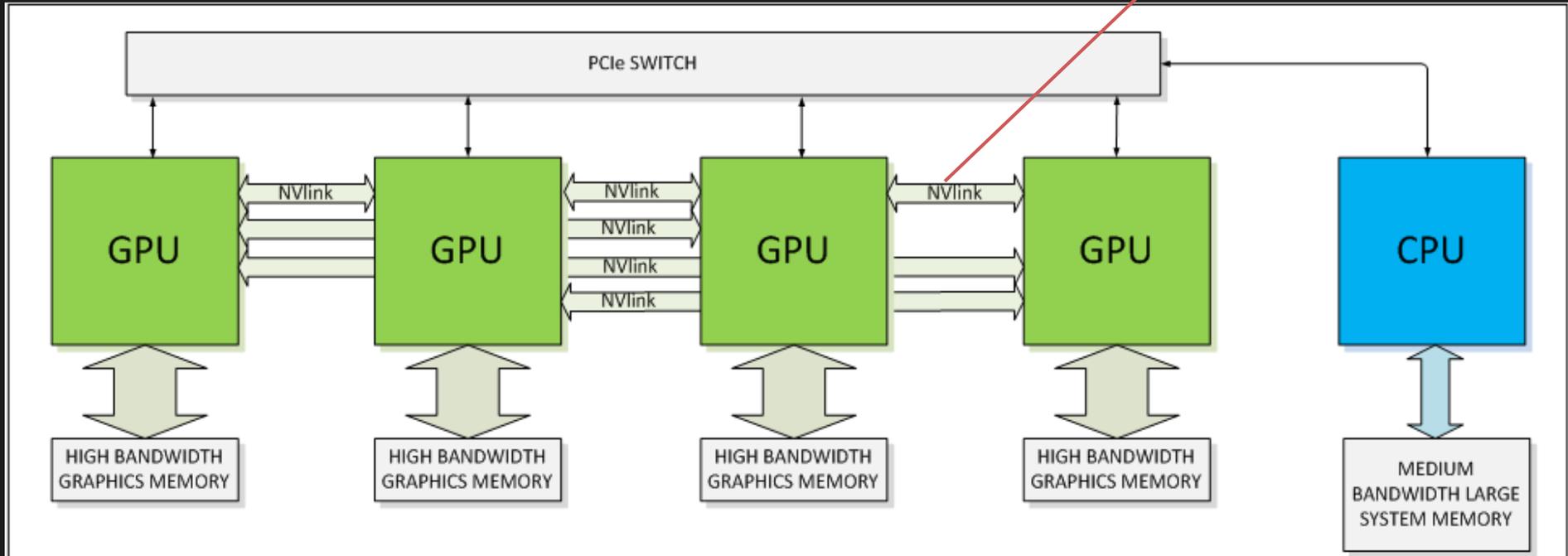
GPC = Graphics Processing Cluster
TCP = Texture Processing Cluster
SM = Streaming Multiprocessor
(multithreaded processor)

Warp = thread of SIMD instructions
DP = Double Precision
LD/ST = Load/Store
SFU = Special Function Unit
Tex = Texture



Système d'interconnexion et de communication (Tesla P100)

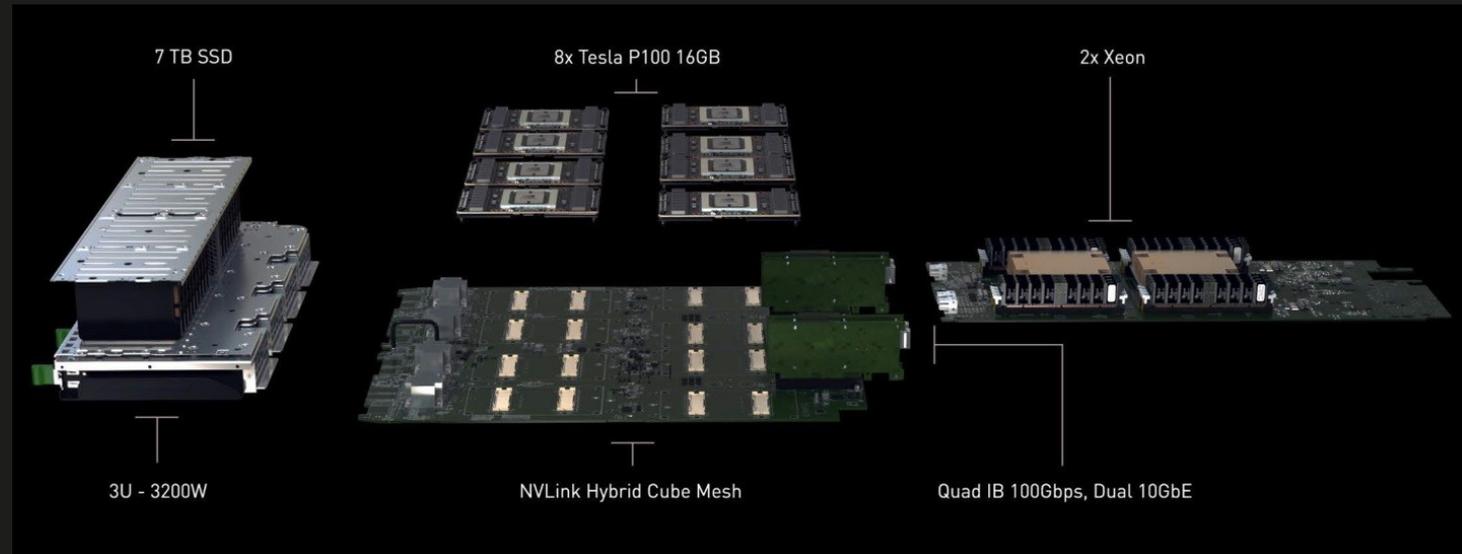
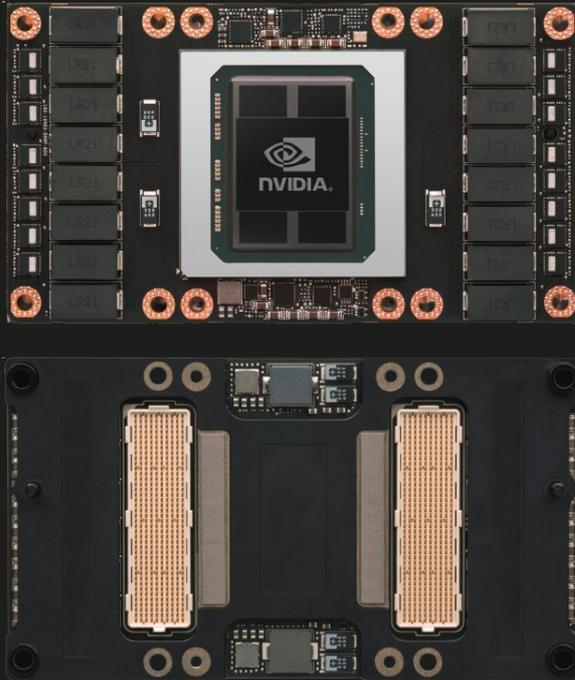
4 NVlink / GPU
40 GB/s / NVlink



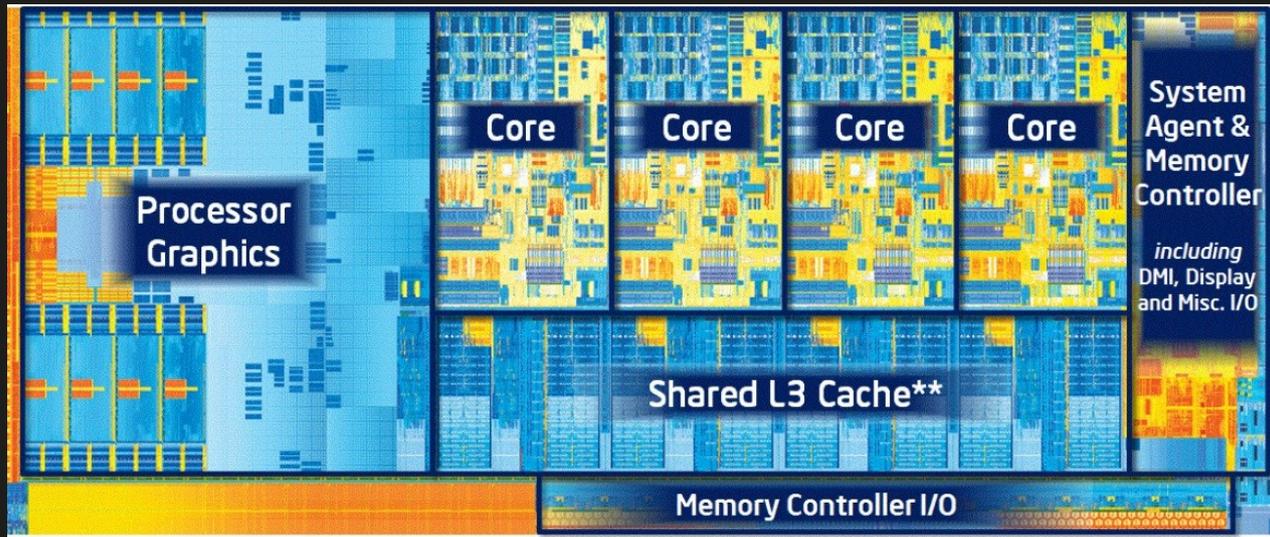
GPU – GRAPHICS PROCESSING UNITS

Solution Nvidia : exemple d'application

Exemple d'application utilisant la carte Nvidia Tesla P100.



Le leader incontesté du marché des GPU/IGP en terme de part est Intel grâce aux coprocesseurs graphiques IGP (*Integrated Graphics Unit*) intégrés dans une grande partie de leurs gammes processeurs GPP (plus de 70% en 2016).



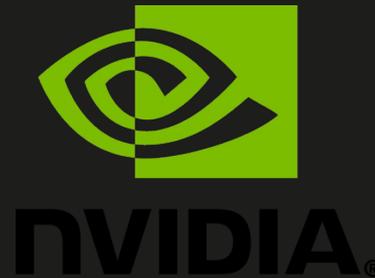
Toutefois, le leader des solutions hautes performances externes est l'américain Nvidia.



Tesla K20C



Tesla P100



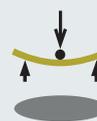
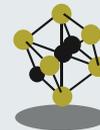
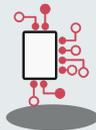
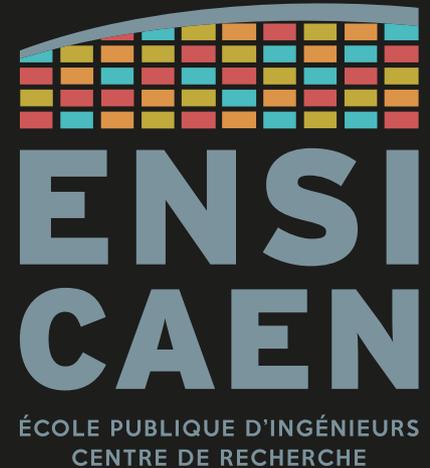
- DSP -

DIGITAL SIGNAL PROCESSOR

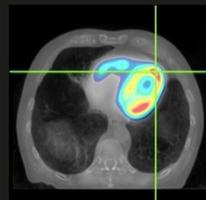
Applications

Architecture

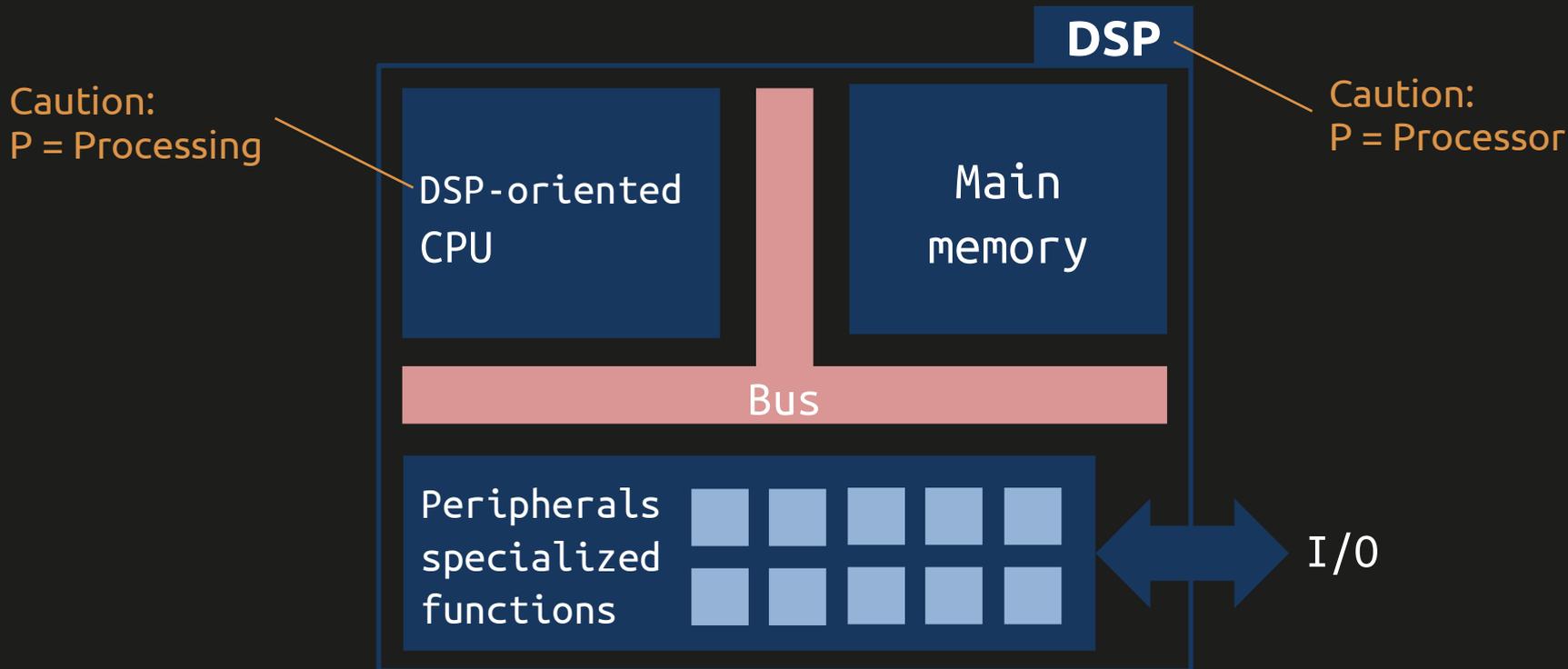
Texas Instruments



Les **DSP** (*Digital Signal Processor*) sont dédiés aux applications impliquant du Traitement Numérique du Signal (TNS ou DSP ou *Digital Signal Processing*).



Les DSP sont très proches des MCU : ce sont des systèmes autonomes.
Leur CPU est néanmoins spécialisé pour le calcul numérique.



Architecture

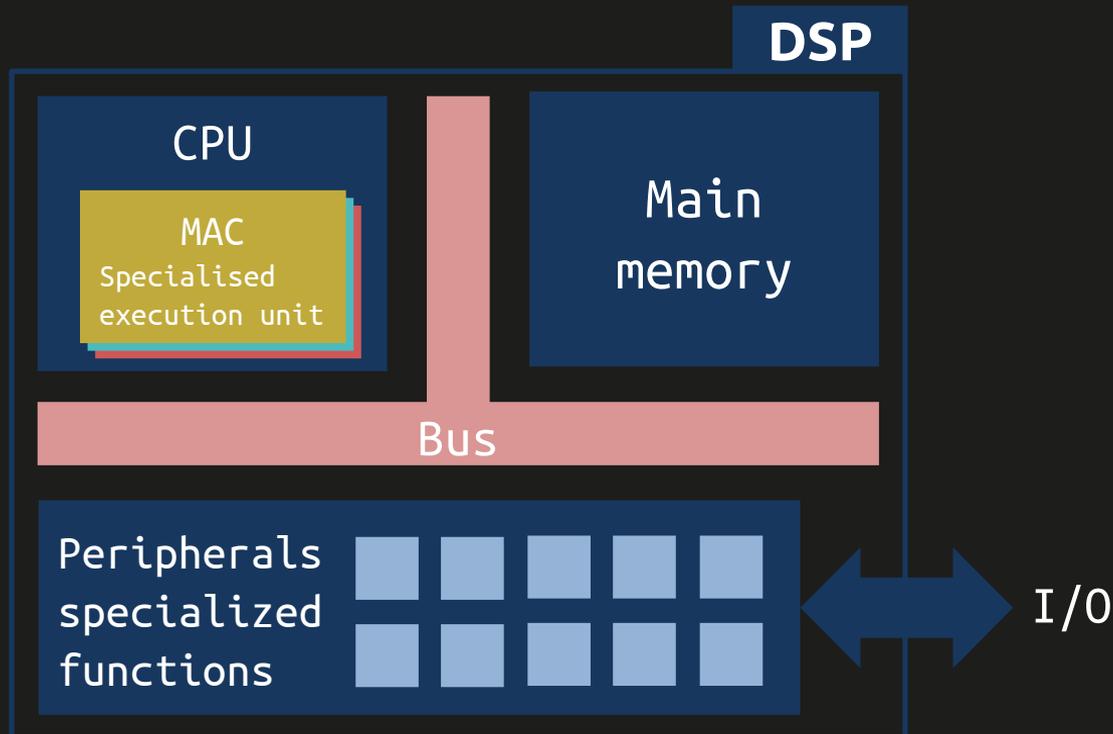
Leur CPU possède des extensions d'instructions et unités d'exécution dédiées au calcul de *MAC (Multiply Accumulate)* ou *SOP (Som Of Products)*. Il s'agit des opérations élémentaires rencontrées dans tout algorithme de Traitement Numérique du Signal.

Expansion of the Danielson-Lanczos Lemma to 8 terms:

$$\begin{aligned}
 F(n) = & \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} + W_N^{\frac{n}{4}} \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k+4)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} + \\
 & W_N^{\frac{n}{2}} \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k+2)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} + W_N^{\frac{n}{2}} W_N^{\frac{n}{4}} \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k+6)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} + \\
 & W_N^{\frac{n}{4}} \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k+1)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} + W_N^{\frac{n}{4}} W_N^{\frac{n}{4}} \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k+5)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} + \\
 & W_N^{\frac{n}{4}} W_N^{\frac{n}{2}} \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k+3)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}} + W_N^{\frac{n}{4}} W_N^{\frac{n}{2}} W_N^{\frac{n}{4}} \sum_{k=0}^{N/8-1} x(8k+7)e^{\frac{-j2\pi kn}{N}}
 \end{aligned}$$

Architecture

CPU avec unités d'exécution dédiées au calcul de **MAC** ou **SOP**. Le jeu d'instructions (ISA) dispose d'instructions spécifiques pour exploiter ces EU.

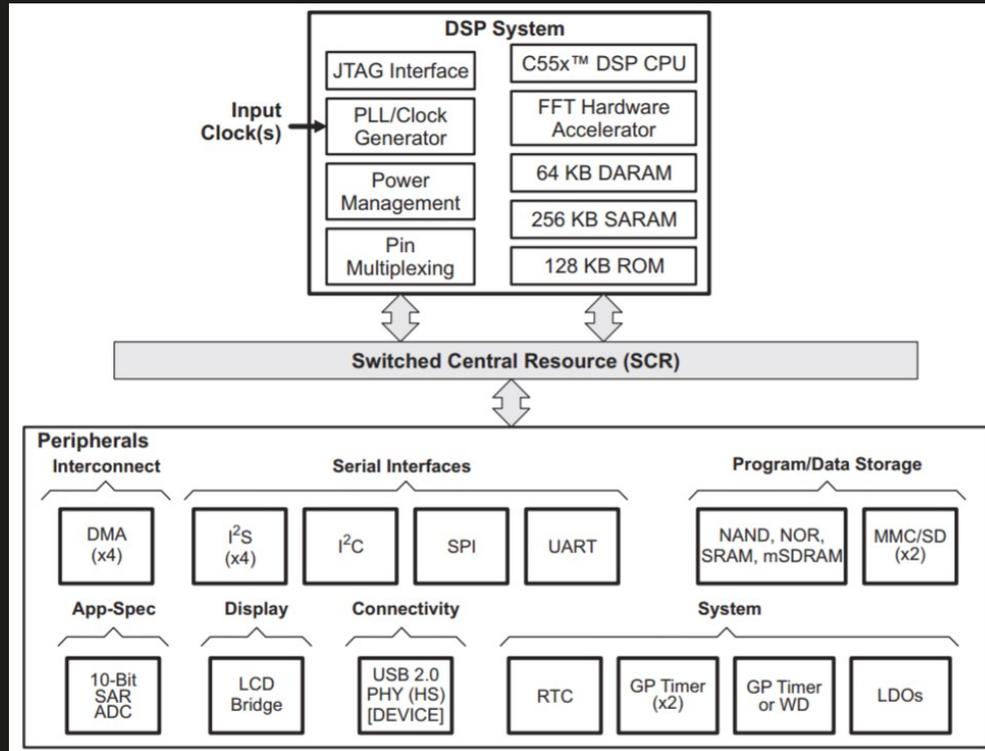


MAC = SOP

MAC : Multiply-Accumulate
SOP : Som of Products

ISA : Instruction Set Architecture
EU : Execution Unit

Observons la solution C5500 DSP proposée par Texas Instruments, l'une des solutions phares du fondateur américain.



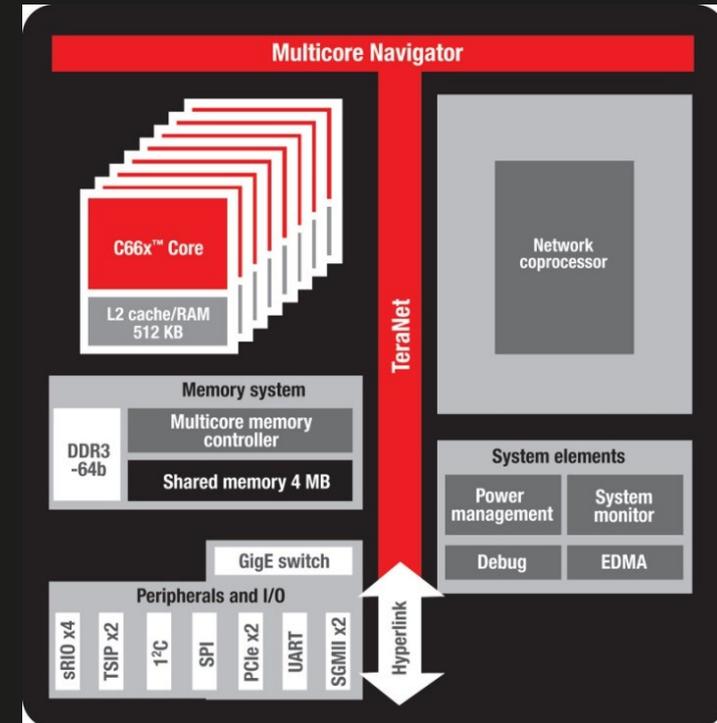
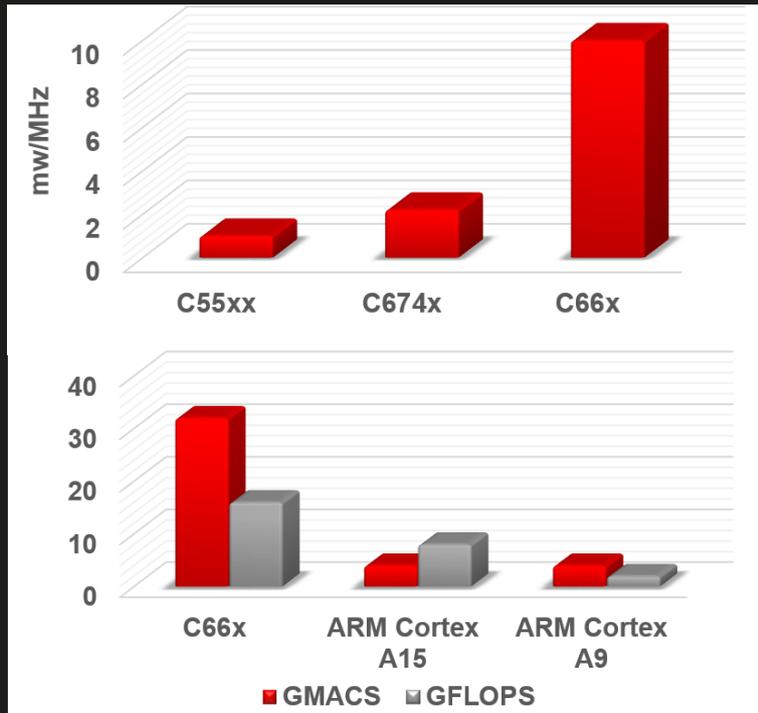
Étudions cet extrait de sa datasheet,
le résumé des spécifications du CPU.

1.1 Features

- CORE:
 - High-Performance, Low-Power, TMS320C55x Fixed-Point Digital Signal Processor
 - 20-, 10-ns Instruction Cycle Time
 - 50-, 100-MHz Clock Rate
 - One or Two Instructions Executed per Cycle
 - Dual Multiply-and-Accumulate Units (Up to 200 Million Multiply-Accumulates per Second [MMACS])
 - Two Arithmetic and Logic Units (ALUs)
 - Three Internal Data and Operand Read Buses and Two Internal Data and Operand Write Buses
 - Software-Compatible with C55x Devices
 - Industrial Temperature Devices Available
 - 320KB of Zero-Wait State On-Chip RAM, Composed of:
 - 64KB of Dual-Access RAM (DARAM), 8 Blocks of 4K x 16-Bit
 - 256KB of Single-Access RAM (SARAM), 32 Blocks of 4K x 16-Bit
 - 128KB of Zero Wait-State On-Chip ROM (4 Blocks of 16K x 16-Bit)
 - Tightly Coupled FFT Hardware Accelerator

Exemple Texas Instruments : C6600

Passons maintenant à la gamme Keystone C6600 proposée par Texas Instruments. Cette architecture DSP est l'une des plus performantes du marché.

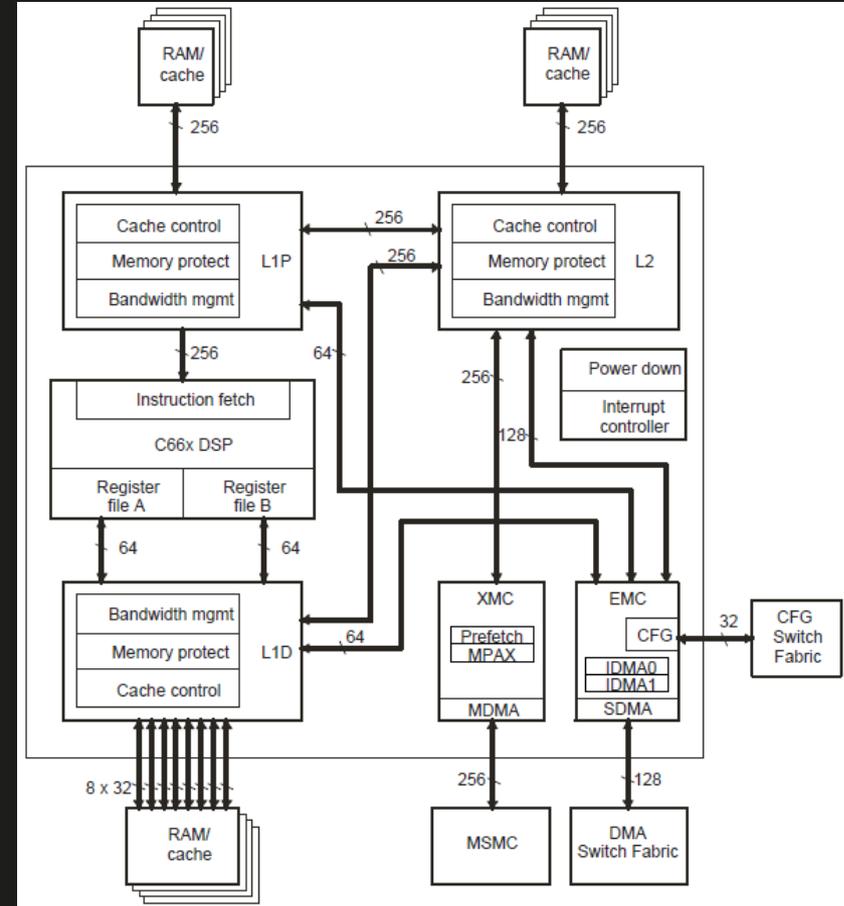


Exemple Texas Instruments : C6600

Cœur (CorePac) C6600 développé par TI.

Hiérarchie mémoire configurable en cache ou SRAM adressable sans perte de bande passante.

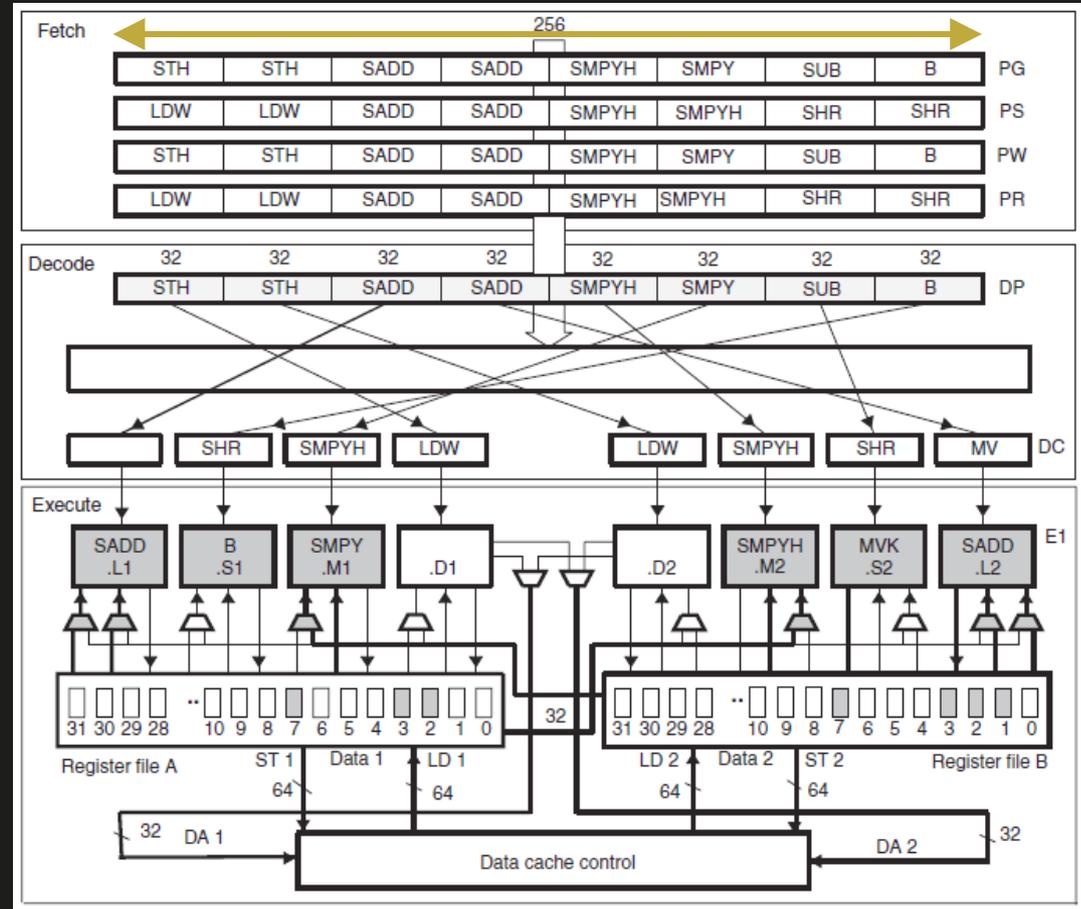
Modèle UMA ou NUMA configurable pour chaque cœur.



Exemple Texas Instruments : C6600

Cœur C6600 avec :

- pipeline matériel VLIW (Very Long Instruction Word) à 14 étages
- pipeline logiciel d'une largeur maximale de 8 instructions.



Exemple Texas Instruments : C6600

Ces DSP sont pensés aussi bien pour un usage en parallèle que pour être chaînés afin d'encasser des chaînes des traitements profondes (reliés en *daisy-chain*).

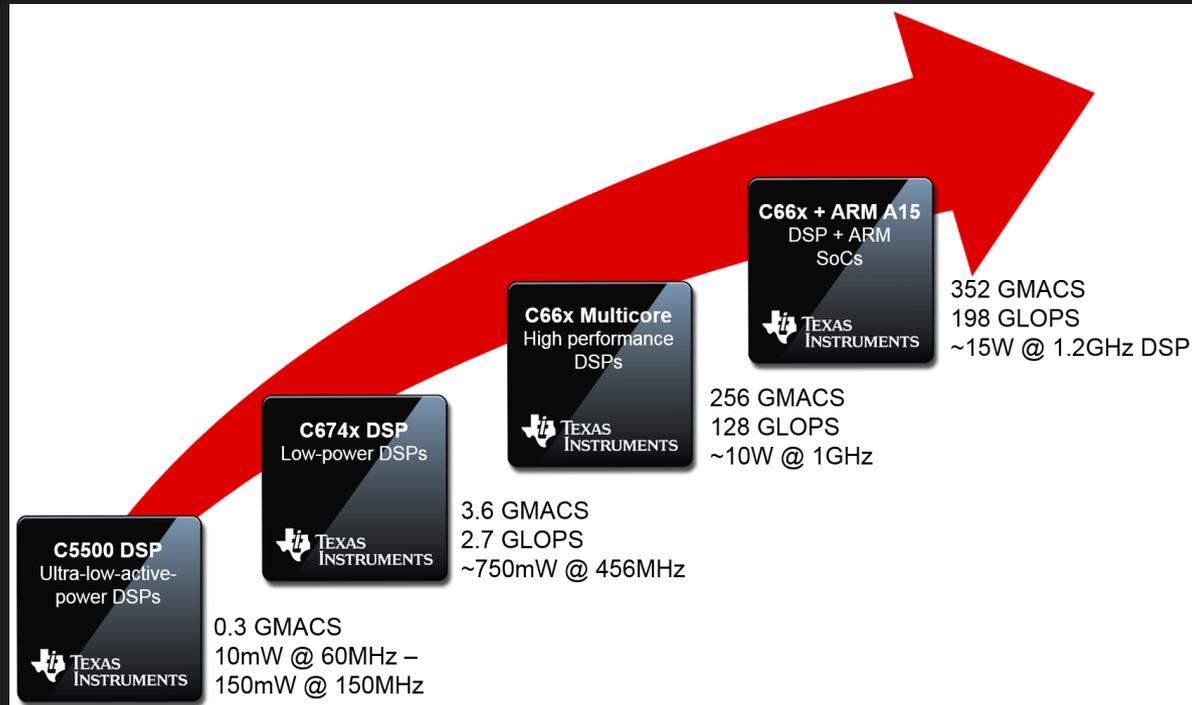


Avantage du *daisy-chain* :

Exemple Texas Instruments : Keystone II

Mais ce n'est pas tout, TI propose la gamme Keystone II. Il s'agit de SoC de type AP spécialisés pour les applications DSP.

Principales applications visées : les télécommunications.



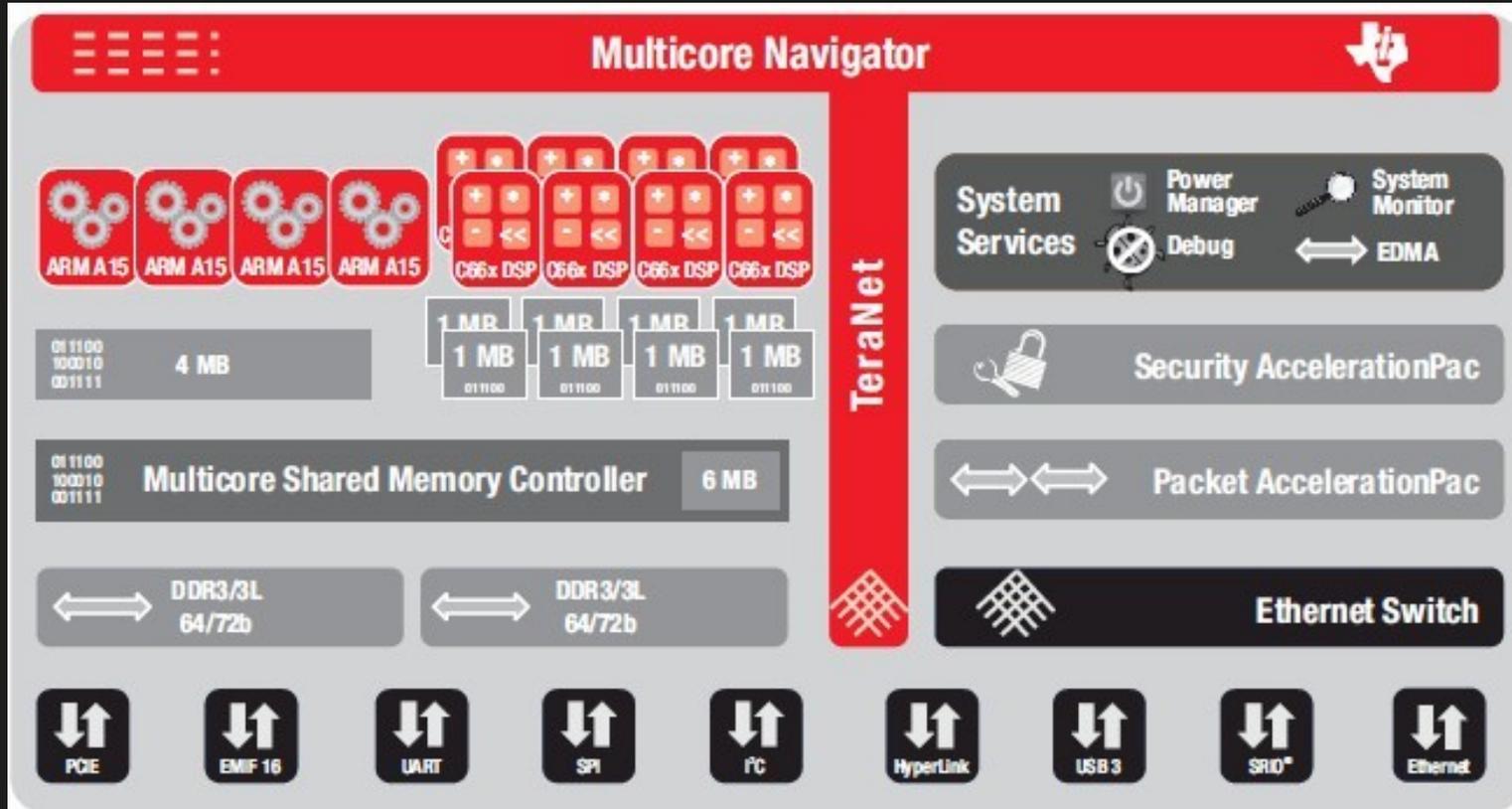
DSP – DIGITAL SIGNAL PROCESSOR

Exemple Texas Instruments : Keystone II

KeyStone
Multicore DSP+ARM®



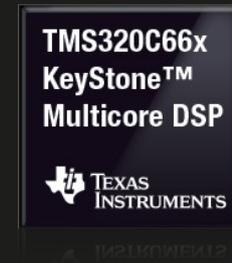
TEXAS
INSTRUMENTS



Le leader historique et actuel incontesté du marché est Texas Instruments.
TI a été la première société à proposer des processeurs DSP en 1982.



TMS32020 (1982)
Up to 8,77 MIPS



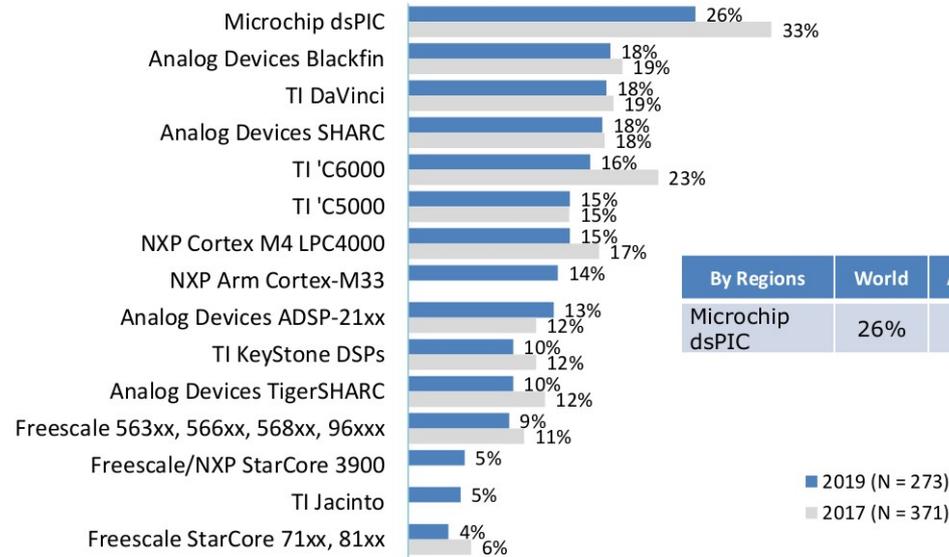
TMS320C6678 (2010)
Up to 256 GMACS

Voici la gamme de processeurs proposée par Texas Instruments.

Microcontrollers (MCUs)		ARM®-based Processors			Digital Signal Processors		
16-bit Ultra Low Power MCU	32-bit Real-Time MCU	32-bit ARM MCU	32-bit ARM Processors for Performance Applications	Application Processors	Singlecore DSP	Multicore DSP	Ultra Low Power DSP
<ul style="list-style-type: none"> • MSP430™ 	<ul style="list-style-type: none"> • C2000™ 	<ul style="list-style-type: none"> • TMS570 Cortex® R4 • RM4 Cortex® R4F • TMS470M Cortex® M3 Automotive 	<ul style="list-style-type: none"> • Sitara™ Cortex A and ARM9 • KeyStone Cortex® A15 and Cortex® A15 + DSP 	<ul style="list-style-type: none"> • OMAP™ Processors • DaVinci™ Video Processors 	<ul style="list-style-type: none"> • C6000™ Power Optimized 	<ul style="list-style-type: none"> • KeyStone Multicore DSP+ARM • C6000™ Multicore 	<ul style="list-style-type: none"> • C5000™



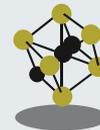
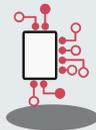
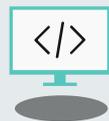
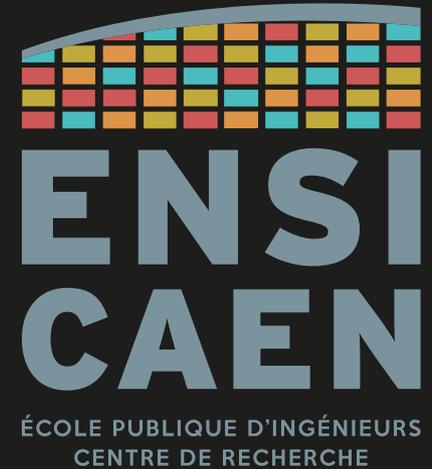
Which of the following DSP chip families would you consider for your next embedded project?



By Regions	World	Americas	EMEA	APAC
Microchip dsPIC	26%	26%	36%	19%

■ 2019 (N = 273)
■ 2017 (N = 371)

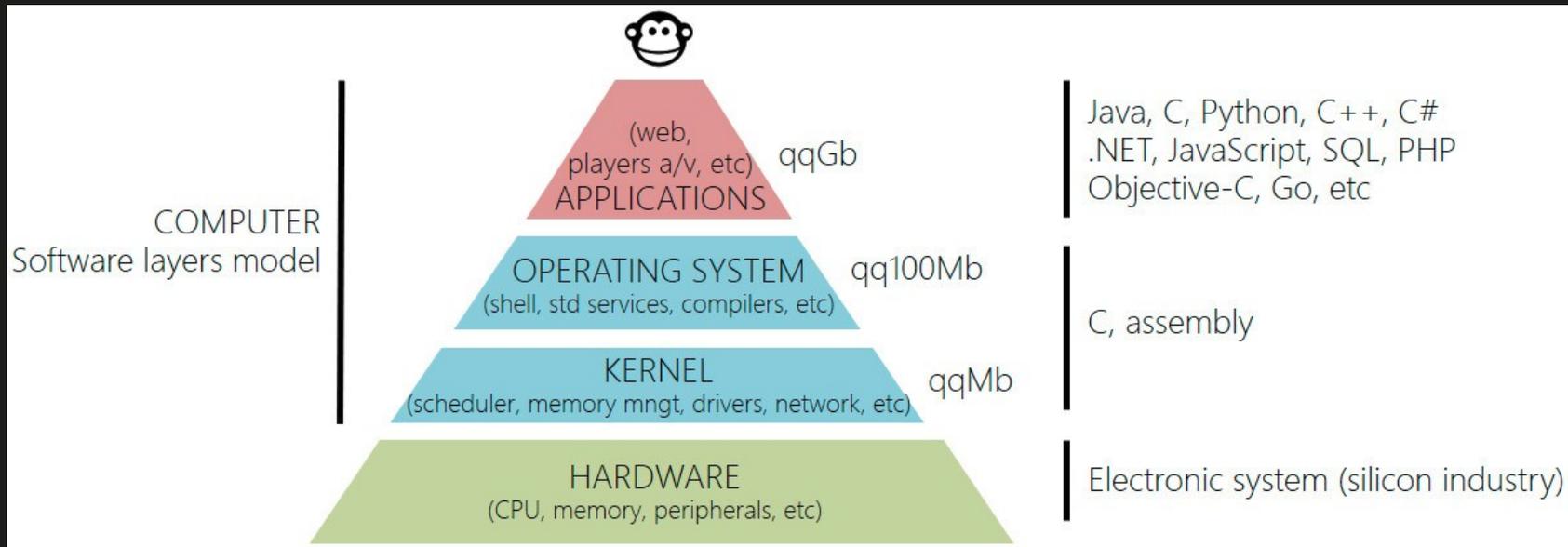
CHOISIR UN PROCESSEUR



CHOISIR UN PROCESSEUR

Systeme = Hardware + Application

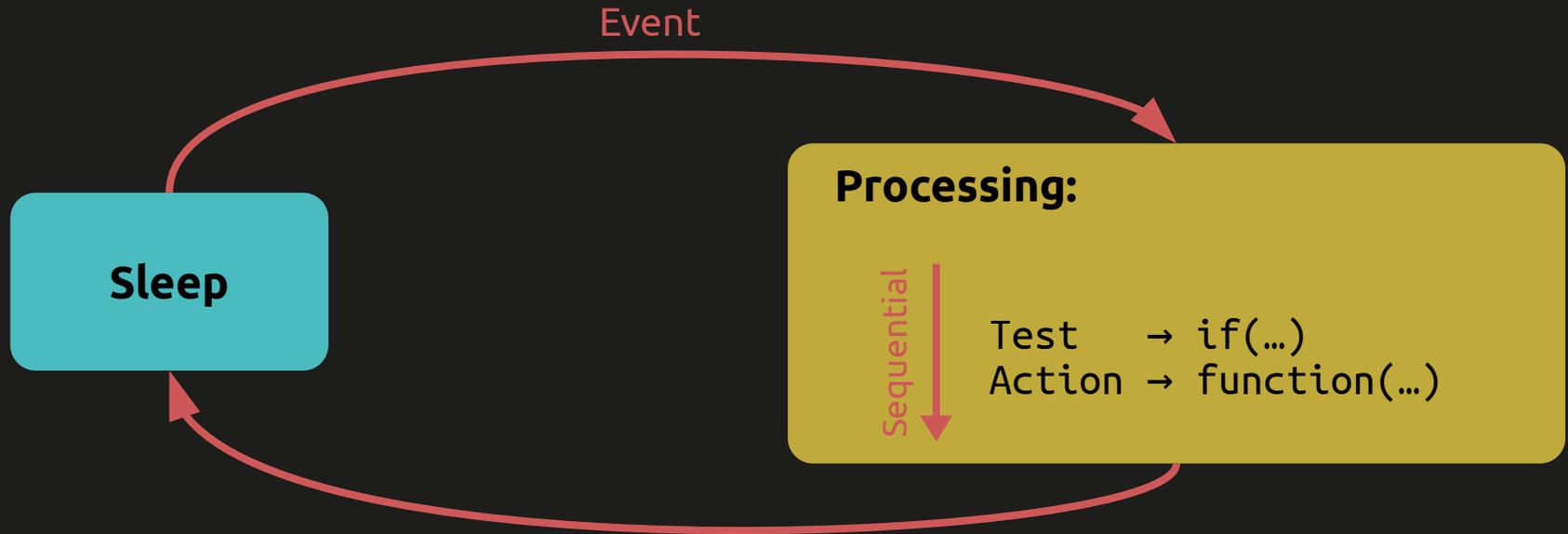
Le système (composé du matériel et du logiciel) est développé dans l'optique de répondre à des spécifications ou exigences bien définies.



CHOISIR UN PROCESSEUR

Si application == supervision

Dans 90 % des cas, le traitement logiciel consiste à effectuer une **simple supervision**.



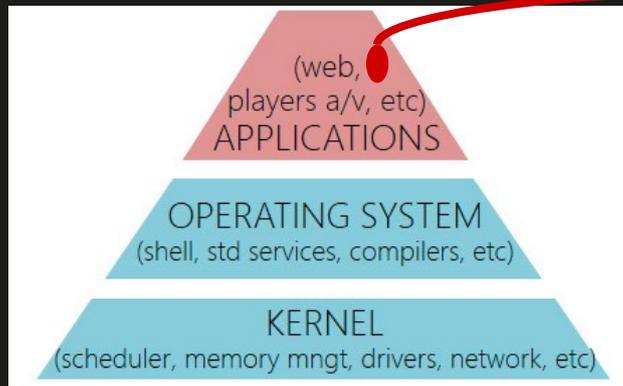
→ Dans ces cas, opter pour un MCU, AP ou GPP

En fonction du niveau de complexité des interfaces (réseau, IHM, ...) et de l'application (mono-/multi-tâches, ...)

CHOISIR UN PROCESSEUR

Si application == algorithme

Mais de temps en temps, la fonction à exécuter peut être un **algorithme**, c'est-à-dire l'application d'un traitement pour une certaine quantité de données (informations).



Exemples d'algorithme : recherche, tri, traitement numérique du signal (audio, radar, communication, ...)

CHOISIR UN PROCESSEUR

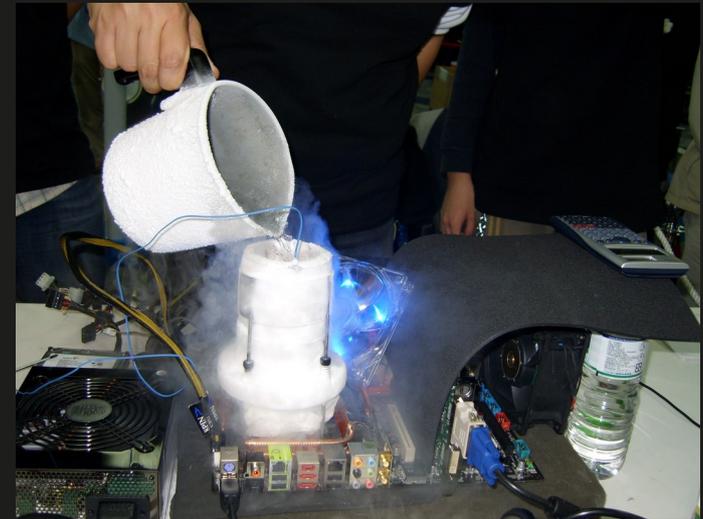
Si application == algorithme

Le premier choix de processeur devrait toujours être un processeur généraliste.

Cependant, quand ses performances ne permettent pas de répondre aux spécifications, il est sage de basculer vers une architecture spécialiste pour :

- Réduire le temps de traitement
- Réduire la taille du code et/ou son empreinte mémoire

Passer d'une architecture généraliste vers une architecture spécialiste devrait toujours être justifié par des mesures.



Exemple d'algorithme

Prenons par exemple l'algorithme de DFT (*Discrete Fourier Transform*) :

For ONE frequency sample

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \times e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}$$

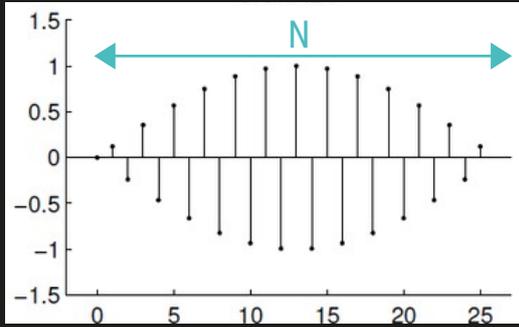
Sum Product } Sum Of Product (SOP)
Multiply-Accumulate (MAC)

- Chaque produit est indépendant des autres
 - → Traitement en parallèle possible !
- Chaque échantillon de fréquence est indépendant des autres
 - → Traitement en parallèle possible !

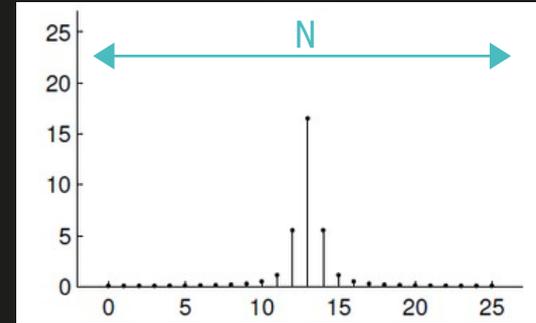
CHOISIR UN PROCESSEUR

Exemple d'algorithme

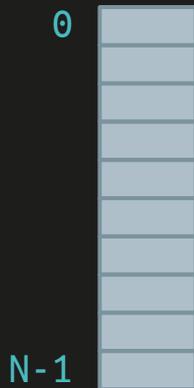
MATH



$$\sum \sum s x e$$



SOFT



```
for( - )  
|   for( - )  
|   |   s * e
```

Annotations: $\times 1024$ (twice) with arrows pointing to the inner loop and the multiplication operation.

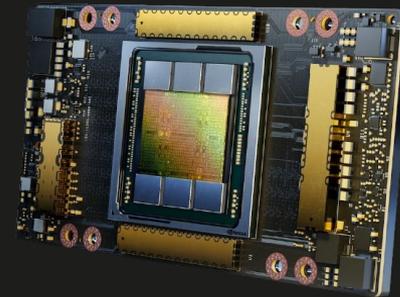
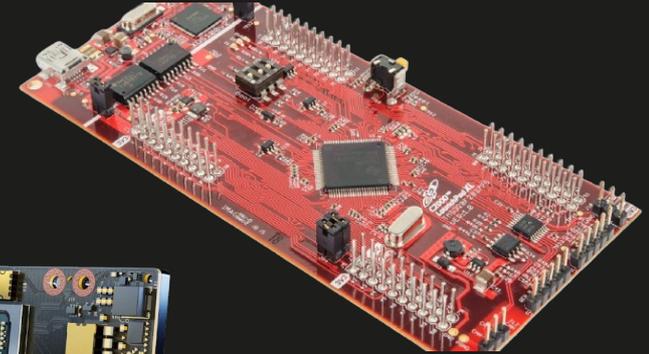


Choisissons un CPU en fonction des besoins :

DSP : faible consommation, faible coût, développement bas niveau (C, asm)

GPU : hautes performances, prix fort, développement haut niveau (C++, OpenMP, Cuda, ...), gros potentiel de parallélisme.

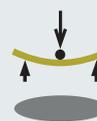
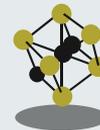
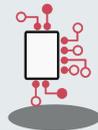
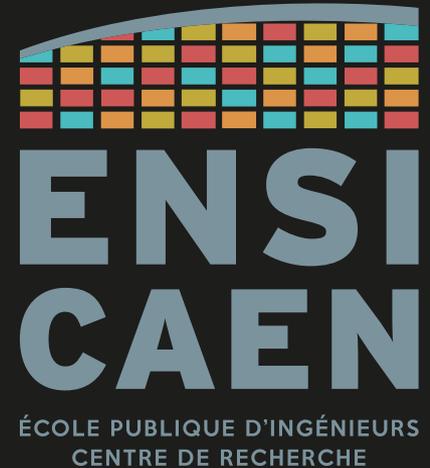
MPPA : *Massively Parallel Processor Array*, pas encore répandu, mais gros potentiel (répartir les coeurs pour des parties d'algorithmes).



MODÈLES D'EXÉCUTION

Classification des processeurs selon leur modèle d'exécution

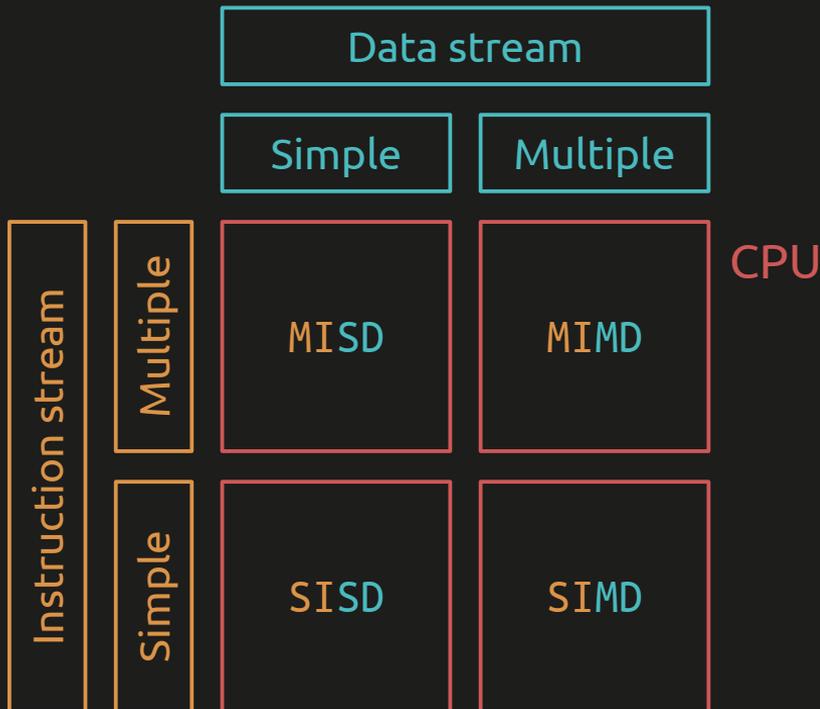
SISD – SIMD – MISD – MIMD



Les prochaines diapos concernent des termes que vous entendrez régulièrement. Elles n'ont pas pour vocation de donner des explications approfondies mais de vous donner une première idée sur leur définition.



Classification de Flynn (1972)



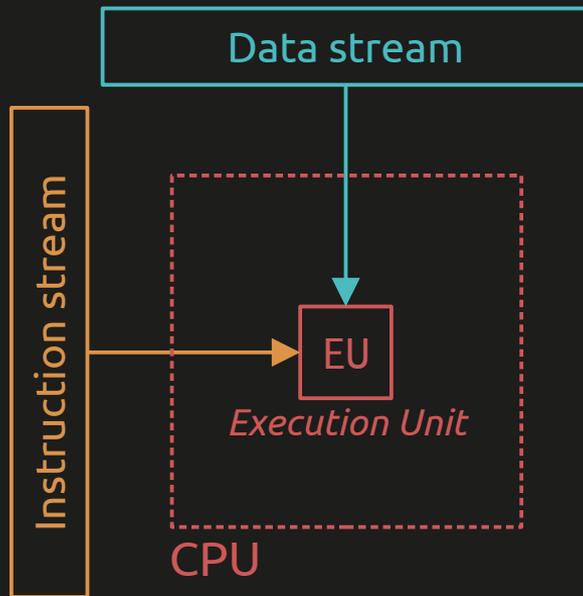
Simple data stream: chaque opérande ne contient qu'une seule donnée (une case mémoire par opérande).

Multiple data streams: chaque opérande contient plusieurs données (un tableau fixe par opérande).

Single instruction stream: le CPU peut exécuter une instruction à la fois (exécution séquentielle).

Multiple instruction streams: le CPU peut exécuter plusieurs instructions simultanément, soit en utilisant le parallélisme de données (ex: boucle *forall*) ou le parallélisme de contrôle (ex: sections parallèles).

SISD – Single Instruction stream, Single Data stream



Le processeur exécute une instruction à la fois, chaque instruction traitant une donnée.

Architecture mono-processeur classique :

→ Architecture Von Neumann

→ Micro-contrôleurs, anciennes générations de processeurs

→ Processeur séquentiel (pas de parallélisme)

→ **Processeur scalaire**

→ Une seule donnée (une seule case mémoire) par opérande

SISD – Single Instruction stream, Single Data stream

*Example: TI C6600 assembly language
Adding two floats*

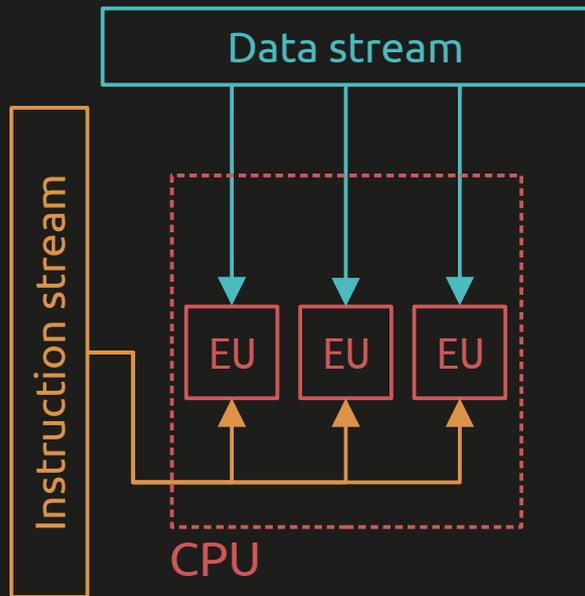
```
; Single Precision ADD  
ADDSP    A17, A5, A5
```

```
; Result:  
; A5 = A5 + A17
```

*Example canonical C:
Adding two floats*

```
float a, b ;  
  
// Initialising a and b ...  
  
a = a + b ;
```

SIMD – Single Instruction stream, Multiple Data streams



La même instruction est exécutée par plusieurs EU, chaque EU traite sa propre donnée. Ainsi le CPU exécute la même instruction sur plusieurs données.

Archi. parallèle avec unité de contrôle centralisée :

→ Processeur vectoriel

→ GPU

→ Jeu d'instructions SSE et AVR d'Intel pour x86

SSE = Streaming SIMD Extension (SSE, SSE2, SSE3, SSE4)

AVR = Advanced Vector Extensions (AVX, AVX2, AVX512)

SIMD – Single Instruction stream, Multiple Data streams

*Example: TI C6600 assembly language
Adding two couples of floats*

```
; Dual ADD Single Precision
DADDSP    A21:A20, A25:A24, A25:A24
```

```
; Result:
; A25 = A25 + A21
; A24 = A24 + A20
```

```
; Just like the SSE for Intel, the C6600
; DSP has a C extension (C functions)
; for vectorial instructions
```

Example: x86 SSE C, adding four couples of floats

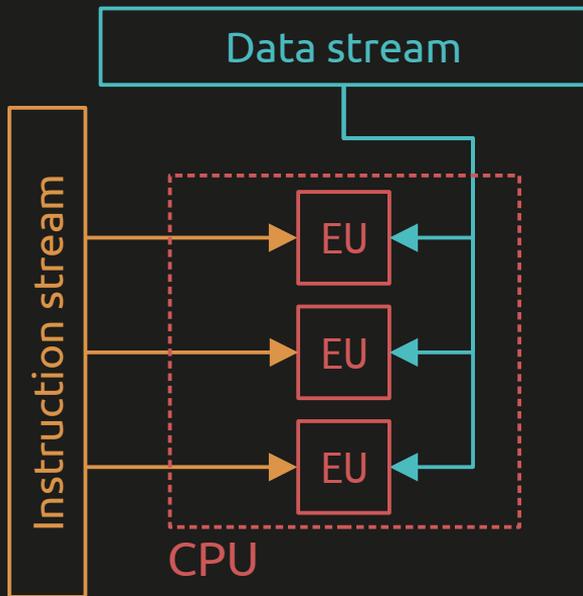
```
float A[N], B[N], C[N] ;

for( int i = 0 ; i < N ; i += 4 ) {
    __m128 reg_b = _mm_load_ps( &B[i] );
    __m128 reg_c = _mm_load_ps( &C[i] );
    __m128 reg_a = _mm_add_ps( reg_b , reg_c ) ;
    __mm_store_pd( &A[i] , reg_a );
}
```

Lanes per type in a 128-bit SIMD register

int8x16	s0	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	s14	s15
int16x8	s0		s1		s2		s3		s4		s5		s6		s7	
int32x4 / float32x4	s0 (x)				s1 (y)				s2 (z)				s3 (w)			
float64x2	s0 (x)								s1 (y)							

MISD – Multiple Instruction streams, Single Data stream



Chaque UE exécute une instruction propre, chaque EU traite une seule donnée.

Peu d'applications en pratique :

→ redondance de code (détection d'erreur d'exécution)

→ **Processeur VLIW** (*Very Long Instruction Word*)

Ex. C66xx Texas Instruments DSP

MISD – Multiple Instruction streams, Single Data stream

*Example: TI C6600 assembly language
Simultaneously adding and multiplying*

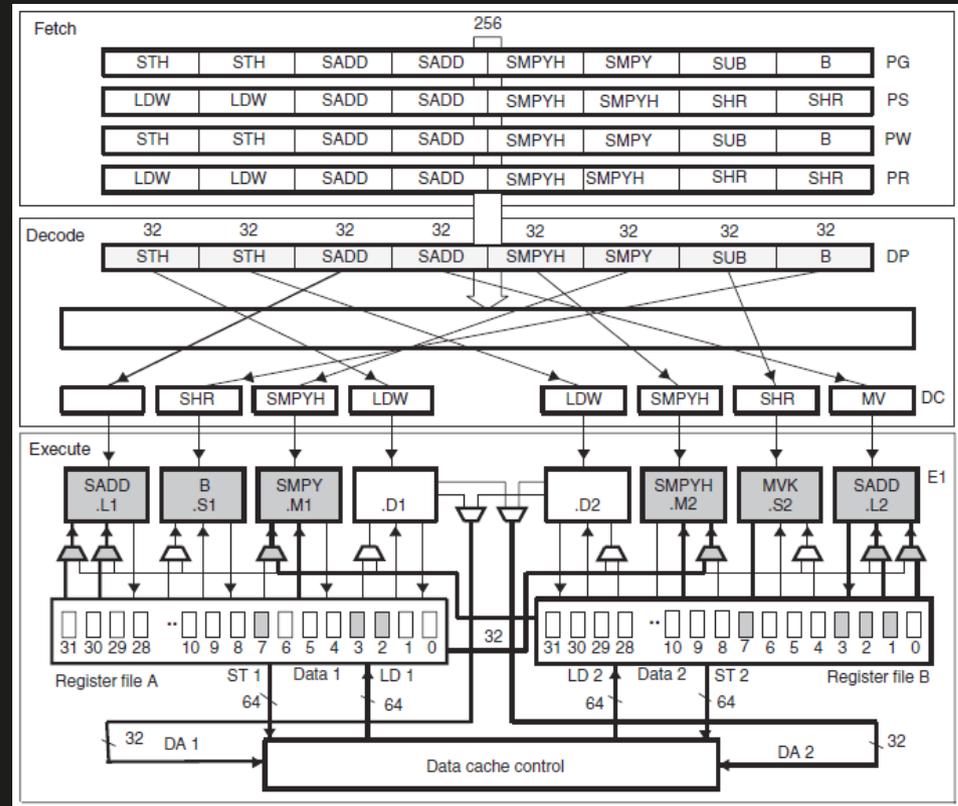
```

; ADD Single Precision
; MULTIPLY Single Precision
  ||  ADDSP  A3, A9, A3
  ||  MPYSP  B3, B9, B3
    
```

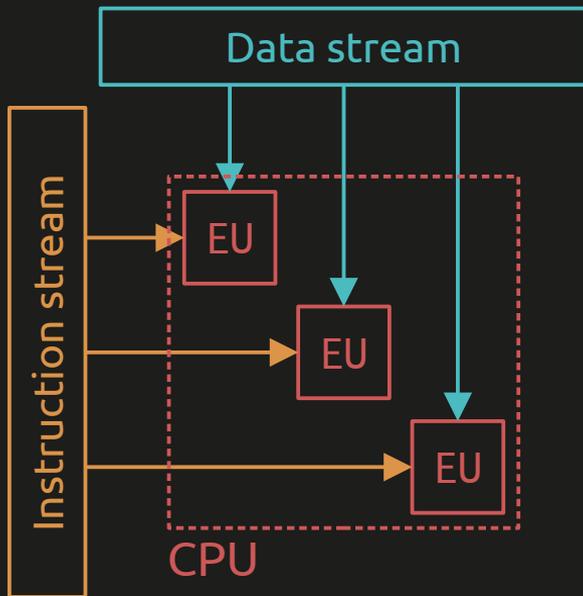
; The pipes (||) explicitly indicate that
; instructions must be executed in parallel
; (use of software pipeline)

```

; Result
; A3 = A9 + A3
; B3 = B9 + B3
    
```



MIMD – Multiple Instruction streams, Multiple Data streams



Chaque EU exécute son propre lots d'instructions (les EU peuvent être groupées), en agissant chacun sur des données différentes.

Archi parallèle avec unités de contrôle indépendantes

→ Processeur super-scalaire

→ N'importe quel GPP moderne : x86-x64 (CISC), Cortex-A (RISC)

→ Inclut le SPMD (*Single Program, Multiple Data*)

MIMD – Multiple Instruction streams, Multiple Data streams

*Example: TI C6600 assembly language
Simultaneously adding and multiplying two
different couples of data*

```
; Dual ADD Single Precision
; Dual SUBTRACT Single Precision
    DADDSP    A21:A20, A25:A24, A25:A24
||    DSUBSP    B25:B24, B23:B22, B23:B22

; The pipes (||) explicitly indicate that
; instructions must be executed in parallel
; (use of software pipeline)

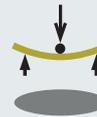
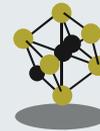
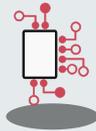
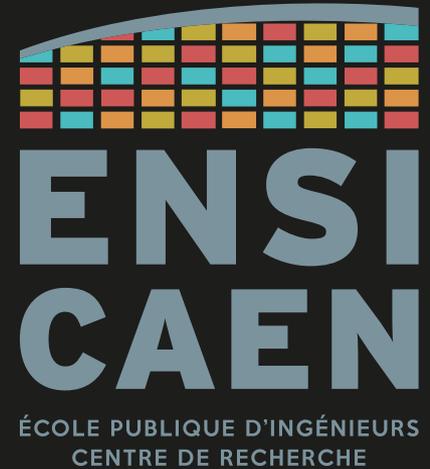
; Result
; A25 = A25 + A21
; A24 = A24 + A20
; B23 = B25 - B23
; B22 = B24 - B22
```

*Example: C and OpenMP
Parallelisation of for loop*

```
#pragma omp parallel reduction(+:acc)
{
    #pragma omp for schedule(static)
    for( k = 0; k < size; k ++ )
    {
        acc += A[i * size + k] * x[k];
    }
}
```

TECHNOS À SUIVRE

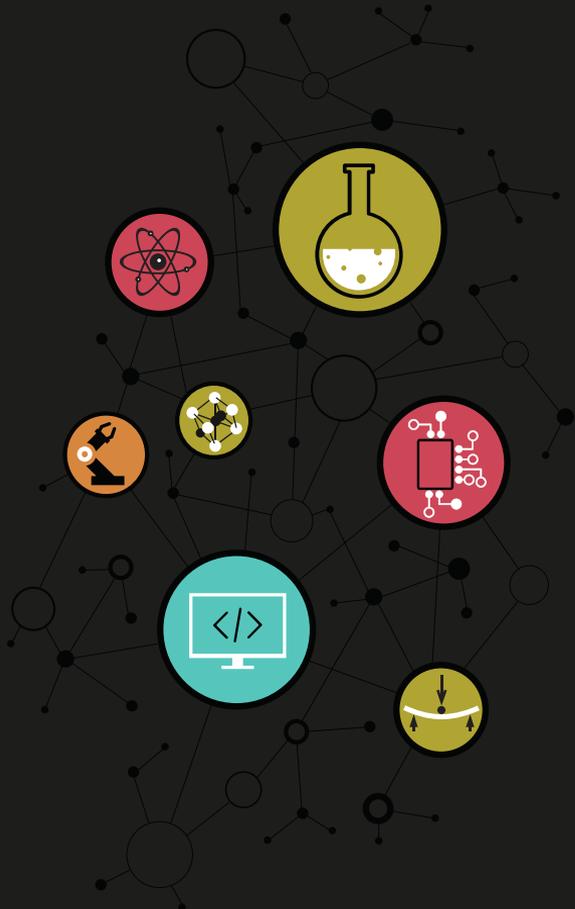
NPU - MPPA





Section en cours de construction

De toute façon on a rarement le temps
d'arriver jusqu'ici !



Dimitri Boudier – PRAG ENSICAEN
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/>