



Introduction

Dans ce chapitre du thème *Architectures matérielles, systèmes d'exploitation et réseaux*, on retrace d'abord l'avènement de la machine ordinateur et de la science informatique au milieu du XXI^{ème} siècle.

Ensuite, on présente le modèle d'architecture de Von Neumann.

Enfin, on s'intéresse aux développements récents de l'intégration qui ont conduit aux systèmes sur puces. On identifie les principaux composants sur un schéma de circuit et les avantages de leur intégration en termes de vitesse et de consommation.

Sources :

📖 « *Architecture et technologie des ordinateurs* » de Emmanuel Lazard et Pablo Zanella.

📖 « *Manuel de TNSI* » de Balabonski, Conchon, Filiâtre, Nguyen.

1 Histoire des ordinateurs

1.1 Machines mécaniques

Histoire 1

Les premières machines à calculer mécaniques apparaissent au XVII^{ème} siècle avec la *Pascaline* de **Blaise Pascal** capable d'effectuer addition et soustraction en 1642 et la première machine capable d'effectuer les quatre opérations, réalisée par Leibniz en 1694.

Au XIX^{ème} siècle, **Charles Babbage** conçoit les plans d'une machine analytique. Elle ne fut jamais réalisée mais elle comportait une mémoire, une unité de calcul et une unité de contrôle, comme dans les ordinateurs modernes, ainsi que des périphériques de sortie (clavier et imprimante). **Ada Lovelace** compose les premiers programmes pour la machine analytique, elle a compris qu'une telle machine est universelle et peut exécuter n'importe quel programme de calcul.

1.2 Fondements théoriques de l'informatique

Histoire 2

Dans un article fondateur de 1936 *On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem*, **Alan Turing**, définit précisément la notion de calcul et la relie à l'exécution d'un algorithme par une machine imaginaire qui servira de modèle aux ordinateurs modernes.

En même temps qu'il fonde l'informatique comme science, il en pose les limites avec l'exemple de fonctions non calculables. Il résout le *problème de l'arrêt* en démontrant qu'on ne saurait construire un programme général capable de prouver la terminaison de n'importe quel programme.

En 1937, **Claude Shannon** démontre comment il est possible d'effectuer des calculs à l'aide de l'électricité avec des relais électromagnétiques en prolongeant les travaux du logicien Georges Boole. Il explique comment construire un additionneur à quatre chiffres binaires qu'il désigne pour la première fois sous le terme de bit pour *binary digit*.



1.3 Machines à programmes externes



Histoire 3

La seconde guerre mondiale accélère la réalisation de machines à calculs pour calculer des trajectoires balistiques ou déchiffrer des codes secrets.

En Allemagne, Konrad Zuse réalise en 1941, le Z1, première machine entièrement automatique lisant son programme sur une carte perforée. Aux États-Unis, Howard Aiken conçoit le Mark I. Ces premières machines électromécaniques sont colossales, et occupent des pièces entières.

En 1945, Mauchly et Eckert conçoivent avec l'ENIAC une première machine utilisant des tubes à vide.

1.4 L'ordinateur, une machine universelle à programme enregistré



Histoire 4

Les premiers ordinateurs apparaissent aux États-Unis et en Angleterre, juste après-guerre, ils sont réalisés selon l'architecture décrite par John Von Neumann dans son rapport sur la construction de l'EDVAC.

Un ordinateur est une machine programmable, capable d'exécuter tous les programmes calculables sur une machine de Turing et dont les programmes et les données peuvent être enregistrés dans une mémoire modifiable.

1.5 Miniaturisation et démocratisation



Histoire 5

Dans les années 1950, les firmes DEC, BULL et surtout IBM développent les premiers ordinateurs commerciaux et les progrès technologiques s'enchaînent.

Le **transistor**, réalisé en matériau **semi-conducteur** (germanium puis silicium), inventé en 1947, remplace progressivement les **tubes à vide**. Au début des années 1960, on réalise les premiers **circuits intégrés**, en gravant tous les transistors d'un circuit dans une même plaque de silicium. Depuis la fin des années 1960, la densité de transistors par unité de surface des circuits intégrés, double environ tous les 18 mois, selon la feuille de route des industriels établie en loi empirique sous le nom de *loi de Moore*, du nom d'un des fondateurs d'Intel. La miniaturisation est le facteur principal d'amélioration des performances et de la démocratisation des ordinateurs. En effet si la lumière parcourt 30 cm en une nanoseconde dans le vide, la vitesse de propagation des électrons dans un semi-conducteur est plus lente de l'ordre de 1 cm par nanoseconde, la taille physique des circuits est donc importante.

En 1971, apparaît le premier **microprocesseur**, l'*Intel 4004* qui marque les débuts de la micro-informatique : une unité de traitement complète (unité de commande et UAL) est gravée sur un circuit intégré. Avec l'essor du réseau Internet et de ses applications comme le Web et l'explosion des télécommunications mobiles, les objets se transforment en ordinateurs : smartphones, objets connectés ... et de plus en plus de composants (mémoire, interface d'entrée/sortie) sont intégrés aux puces : on parle de **System On Chip**.



Exercice 1

Visionner le cours d'architecture disponible sur la plateforme Lumni entre les temps 17' et 22'.
<https://www.lumni.fr/video/une-histoire-de-l-architecture-des-ordinateurs>

1. Commenter le tableau ci-dessous.
2. Qu'appelle-t-on System On a Chip?

Snapdragon 855 – Qualcomm, 2018 Lumni

	Sortie	Fréq.	Transistors	Surface	Gravure
Intel 4004	1971	740 kHz	2300	12 mm2	10 000
IBM Power4	2001	1.1 GHz	174 000 000	412 mm2	180
Snpdragon 855	2018	1.8 GHz	6 700 000 000	73 mm2	7

Histoire 6 Amélioration des performances

Source : « Architecture et technologie des ordinateurs » d'Emmanuel Lazard

Entre le microprocesseur *Intel 4004* de 1971 et un *core i9* de 2017, le rapport de performance est de quelques millions.

L'amélioration des performances est due principalement aux progrès dans la finesse de gravure des circuits intégrés passée de 10 µm pour un transistor en 1971 à 10 nm en 2017. Avec la miniaturisation, on a pu :

- ☞ augmenter la fréquence de fonctionnement des circuits avec cependant un mur de dissipation thermique atteint vers 2004, la fréquence plafonnant désormais à 3 ou 4 GHz;
- ☞ améliorer l'architecture interne des unités de commande et d'exécution avec des évolutions pour les architectures monoprocesseur (jeux d'instructions **CISC** ou **RISC**, pipelines, multiplication des unités fonctionnelles) puis le développement des architectures multiprocesseur et du **parallélisme** ce qui présente de nouveaux défis en terme de programmation.

CPU	Horloge	Exécution	Nombre de coeurs
4004	740 kHz	10 cycles/instruction	1
core i9	4 GHz	10 instructions/cycle/coeur	8
gain	× 5000	× 100	× 8

2 Architecture de Von Neumann

2.1 Un processeur pour calculer et une mémoire pour stocker programme et données



Cours-Essentiel 1

Un ordinateur est une machine **programmable, automatique et universelle** :

- **programmable** : la séquence d'opérations exécutée par un ordinateur peut être entièrement spécifiée dans le texte d'un programme;
- **automatique** : un ordinateur peut exécuter un programme sans intervention extérieure (câblage ...);
- **universelle** : un ordinateur peut exécuter tout programme calculable (selon la théorie de Turing) avec le jeu d'instructions câblé dans son processeur.

En 1945, **John von Neumann**, mathématicien hongrois exilé aux États-Unis, publie un rapport sur la réalisation du calculateur EDVAC où il propose une architecture permettant d'implémenter une machine universelle, décrite par **Alan Turing** dans son article fondateur de 1936 sur le problème de l'arrêt.


L'**architecture de Von Neumann** va servir de modèle pour la plupart des ordinateurs de 1945 jusqu'à nos jours, elle se compose de quatre parties distinctes :

☞ L'**Unité Centrale de Traitement** (*Central Processing Unit* en anglais) ou **Processeur** est constituée de deux sous-unités :

- L'**Unité de Commande** charge la prochaine instruction dont l'adresse mémoire se trouve dans un registre appelé **Compteur de Programme** (PC en anglais) ou **Compteur ordinal**, la décode avec le **décodeur** et commande l'exécution par l'ALU avec le **séquenceur**. L'instruction en cours d'exécution est chargée dans le **Registre d'Instruction**. L'**Unité de Commande** peut aussi effectuer une opération de branchement, un saut dans le programme, en modifiant le **Compteur de Programme**, qui par défaut est incrémenté de 1 lors de chaque instruction.
- L'**Unité Arithmétique et Logique** (ALU en anglais) qui réalise des opérations arithmétiques (addition, multiplication ...), logiques (et, ou ...), de comparaisons ou de déplacement de mémoire (copie de ou vers la mémoire). L'ALU stocke les données dans des mémoires d'accès très rapide appelées **registres**. Les opérations sont réalisées par des circuits logiques constituant le **jeu d'instructions** du processeur.

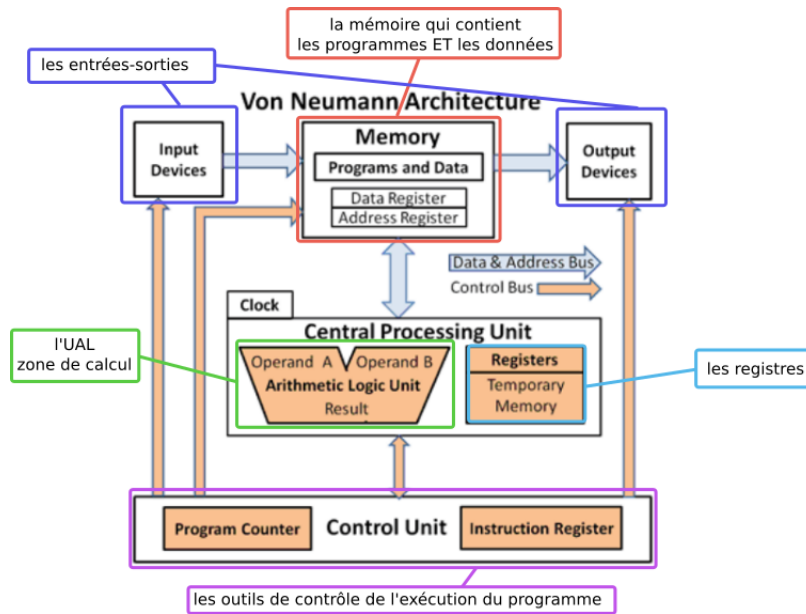
☞ La **mémoire** où sont stockés les **données** et les **programmes**.

☞ Des **bus** qui sont des fils reliant le **CPU** et la **mémoire** et permettant les échanges de données et d'adresses.

Les adresses, les données et les commandes circulent par les bus.  **Un bus ne peut être utilisé que par deux composants (émetteur/récepteur) à la fois!**

☞ Des dispositifs d'**entrées/sorties** permettant d'échanger avec l'extérieur (lecture ou écriture de données).

Dans le modèle de Von Neumann, le processeur exécute une instruction à la fois, de façon séquentielle.



Source : Gilles Lassus

Exercice 2 QCM type E3C

1. Dans l'architecture générale de Von Neumann, la partie qui a pour rôle d'effectuer les opérations de base est :

- Réponse A :** l'unité de contrôle
- Réponse B :** la mémoire
- Réponse C :** l'unité arithmétique et logique
- Réponse D :** les dispositifs d'entrée-sortie

2. Parmi tous les registres internes que possède une architecture mono-processeur, il en existe un appelé compteur ordinal *program counter*.

Quel est le rôle de ce registre ?

- Réponse A :** il contient l'adresse mémoire de la prochaine instruction à exécuter
- Réponse B :** il contient le nombre d'instructions contenues dans le programme
- Réponse C :** il contient l'adresse mémoire de l'opérande à récupérer
- Réponse D :** il contient le nombre d'opérandes utilisés

2.2 Hiérarchie des mémoires



Cours-Essentiel 2

On distingue plusieurs types de mémoires suivant leur **persistance**, leur **capacité**, leur **rapidité d'accès**. Tous les types de mémoire utilisent une unité élémentaire d'information qui peut prendre deux états 0 ou 1 qu'on appelle **binary digit** ou **bit**. La plus petite unité adressable en mémoire comporte traditionnellement 8 bits soit un **octet**. De nos jours les mémoires sont réalisées en matériaux supraconducteurs à partir de transistors : il faut deux portes logiques NOR pour réaliser une cellule mémoire de type *bistable*, chacune nécessitant deux transistors.



☞ Une **mémoire vive** ou **volatile** nécessite une alimentation électrique, elle est non persistante mais d'un accès rapide.

- Un **registre** est une mémoire de très petite capacité mais d'accès très rapide car située directement dans l'**Unité Centrale de Traitement**.
- La **mémoire centrale** contient les **instructions** et les **données**. Tout programme que l'on souhaite exécuter doit être chargé en mémoire centrale ou **Random Access Memory** qui est une mémoire de grande capacité.

Les bits disponibles sont regroupés par blocs en **mots mémoires** de même taille, correspondant à un ou plusieurs octets. C'est aussi la largeur du **Registre de mot** : 32 bits ou 64 bits en général de nos jours.



Chaque mot mémoire est adressable directement à partir de son adresse, on parle de **mémoire à accès direct**.

- Pour améliorer les performances, une **mémoire cache**, placée entre le processeur et la **mémoire centrale** permet d'accéder plus rapidement aux instructions et données en cours d'utilisation qui ont une plus grande probabilité d'être réutilisées.
- **Mémoire cache** et **registres** sont des *mémoires statiques (SRAM)* par opposition à la **mémoire centrale**, qui est *dynamique (DRAM)* : chaque cellule mémoire est constituée d'un transistor couplé à un condensateur qu'il faut recharger périodiquement (toutes les millisecondes).

La mémoire dynamique est plus simple à fabriquer et permet une plus grande intégration : le coût par bit est moins élevé mais le rafraîchissement en fait une mémoire plus lente.



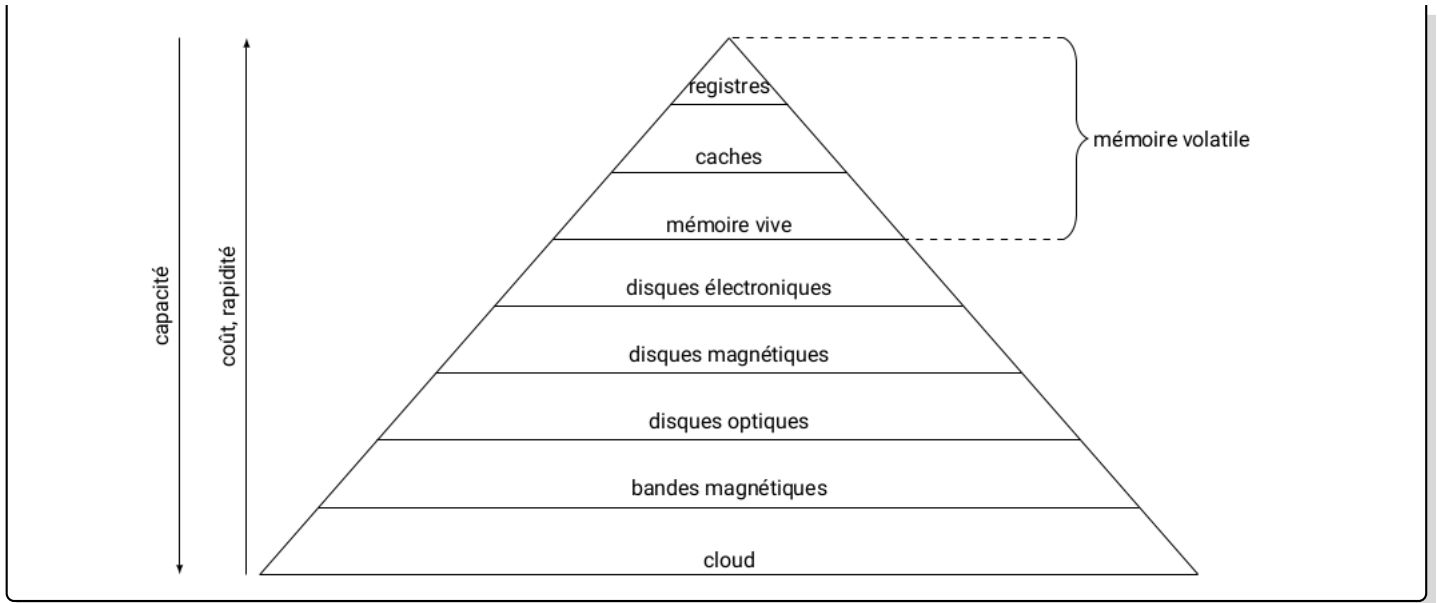
Le temps d'accès à la mémoire centrale est entre 5 et 50 fois supérieur à celui d'un registre, cette différence de vitesse entre le processeur et la mémoire est le **goulot d'étranglement de l'architecture de Von Neumann**.

☞ Une **mémoire persistante** ou **non volatile** permet de stocker des données sans alimentation électrique, avec d'autres procédés physiques (disques magnétiques) :

- Les disques durs magnétiques ou SSD, permettent de stocker données et programmes, dont le système d'exploitation, chef d'orchestre de tous les programmes. Leur capacité est presque 500 fois supérieure à celle de la mémoire centrale mais avec un temps d'accès inversement proportionnel. Le **système d'exploitation** peut étendre virtuellement la mémoire centrale en utilisant les capacités des mémoires persistantes (**swapping**)
- La carte mère d'un ordinateur contient des données nécessaires au démarrage dans la **mémoire morte** ou **Read Only Memory**. Cette mémoire n'est pas modifiable.

mémoire	temps d'accès	débit	capacité
registre	1 ns		≈ Kio
mémoire cache	2 – 3 ns		≈ Mio
RAM	5 – 60 ns	1 – 20 Gio/s	≈ Gio
disque dur	3 – 20 ms	10 – 320 Mio/s	≈ Tio

Lorsqu'on se rapproche du processeur, le coût de la mémoire et sa rapidité d'accès augmentent tandis que sa capacité diminue.



3 Miniaturisation et intégration

3.1 Microprocesseur et micro-ordinateur



Cours-Essentiel 3

- ☞ Un **microprocesseur** est un circuit intégré réalisant sur une même puce de silicium une unité centrale de traitement complète : unité de commande et UAL. Depuis l'apparition du premier microprocesseur, l'Intel 4004, la taille de la puce (quelques millimètres carrés) est restée stable mais le nombre de transistors a été multiplié par un million!
- ☞ Un **micro-ordinateur** rassemble sur une **carte mère** un microprocesseur, de la mémoire, des périphériques d'entrée-sortie et des bus de communications. Depuis les années 1980, la micro-informatique s'est développée dans les entreprises, les écoles puis les foyers.



Exercice 3

À partir de la page Web <http://villemin.gerard.free.fr/Multimed/Gravure.htm> répondre aux questions suivantes :

1. Combien de transistors sont intégrés dans les super-puces en 2017?
2. Quel est l'ordre de grandeur de l'investissement nécessaire pour bâtir une usine qui fabriquera des puces avec une finesse de gravure de 3 nanomètres?
3. Quel autre fabricant, concurrent de Samsung, investit dans une usine capable de graver en 5 nanomètres?

3.2 Microcontrôleur



Cours-Essentiel 4

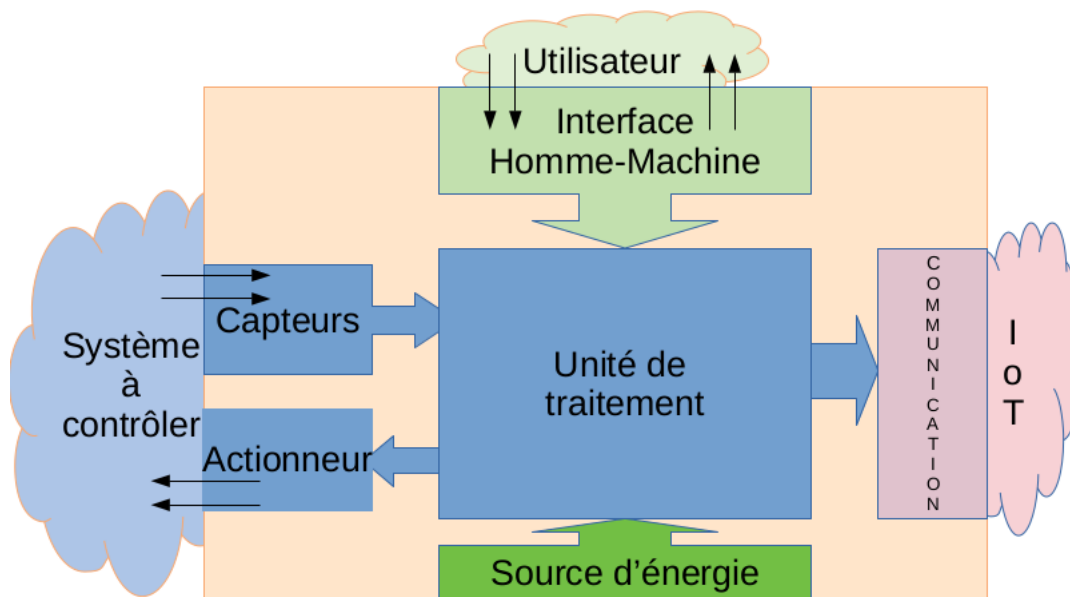
Les progrès de la microélectronique ont permis de pousser plus loin l'intégration avec la réalisation de **microcontrôleurs**, des circuits intégrés regroupant sur une même puce un microprocesseur, de la mémoire, des ports d'entrée-sortie, des périphériques et des bus de communication. Les **microcontrôleurs** sont utilisés dans les *systèmes informatiques embarqués* (voitures, avions, armes ...) où ils sont associés à d'autres composants comme des **capteurs** et des **actionneurs** pour interagir avec leur environnement.

Un microcontrôleur doit répondre à des contraintes :

- de *coût* : équipant des systèmes plus complexes et produits à grande échelle, leurs capacités sont limitées aux tâches réalisées et ils exécutent souvent un seul programme ;
- de *consommation électrique* : ils doivent souvent fonctionner en continu et leur fréquence d'horloge est réduite pour limiter l'empreinte énergétique ;
- de *temps* : embarqués dans des systèmes critiques (transport), ils doivent offrir des garanties de temps de réponse, c'est pourquoi ils n'exécutent pas en général de système d'exploitation, les processus en cours ne doivent pas être interrompus.



Les microcontrôleurs sont au coeur de la révolution IOT de l'Internet des objets.



Source : Schéma d'un microcontrôleur par Olivier Lécluse

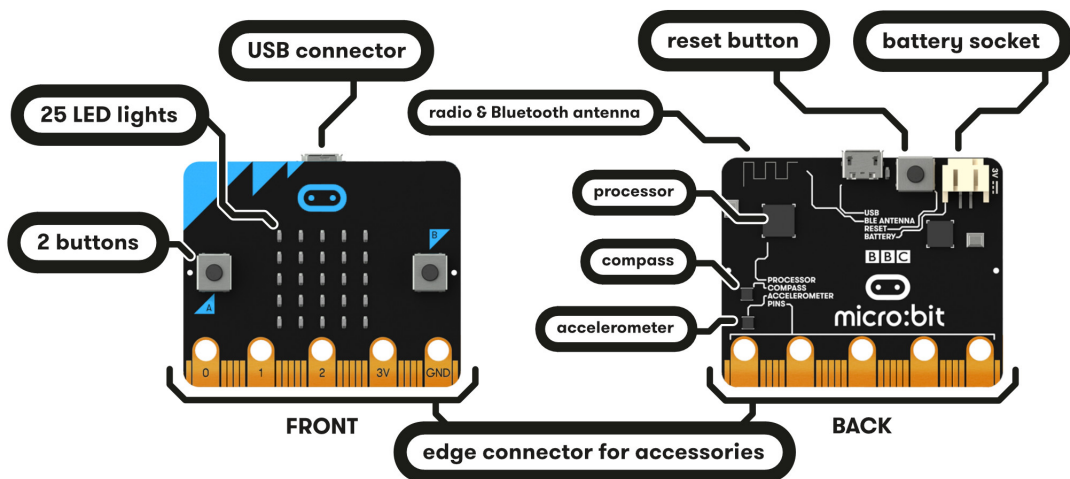


Exercice 4 Un exemple de microcontrôleur

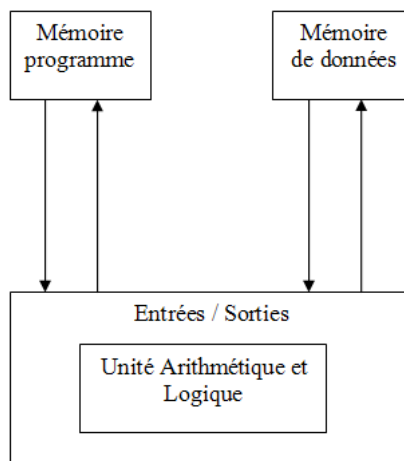
Dans l'article Wikipedia sur la carte éducative **micro:bit**, on peut lire qu'elle est équipée d'un :

Microcontrôleur Nordic Semiconductor nRF51822, 16 MHz, 32 bits, à processeur ARM Cortex-M0, 256 ko de mémoire de stockage flash (ou mémoire morte, EEPROM ou ROM), 16 ko de mémoire vive (SRAM ou RAM) statique.

1. Le processeur ARM Cortex-M0 est à jeu d'instructions RISC, alors qu'un processeur Intel de la famille x86 est à jeu d'instructions CISC. Que désignent ces jeux d'instructions RISC ou CISC dans l'architecture d'un processeur? Pourquoi les processeurs RISC sont-ils plus répandus dans les microcontrôleurs?
2. Quelle distinction faut-il faire entre une mémoire morte et une mémoire vive? Citer différents types de mémoires morte ou vive.
3. À partir de la représentation ci-dessous des deux faces d'une carte **micro:bit**, citer différents capteurs et actionneurs avec lesquels le processeur/microcontrôleurs peut communiquer.



Exercice 5 Architecture de Harvard



Source : Architecture de Harvard Wikipedia

Citons un article Wikipedia sur les microcontrôleurs **PIC** de la firme Microchip :

Un microcontrôleur PIC est une unité de traitement et d'exécution de l'information à laquelle on a ajouté des périphériques internes permettant de réaliser des montages sans nécessiter l'ajout de composants annexes. Un microcontrôleur PIC peut donc fonctionner de façon autonome après programmation.

Les PIC intègrent une mémoire programme non volatile (FLASH), une mémoire de données volatile, une mémoire de donnée non volatile (E2PROM), des ports d'entrée-sortie (numériques, analogiques, MLI, UART, bus I2C, Timers, SPI, etc.), et même une horloge [...]

Les PIC se conforment à l'architecture Harvard : ils possèdent une mémoire de programme et une mé-



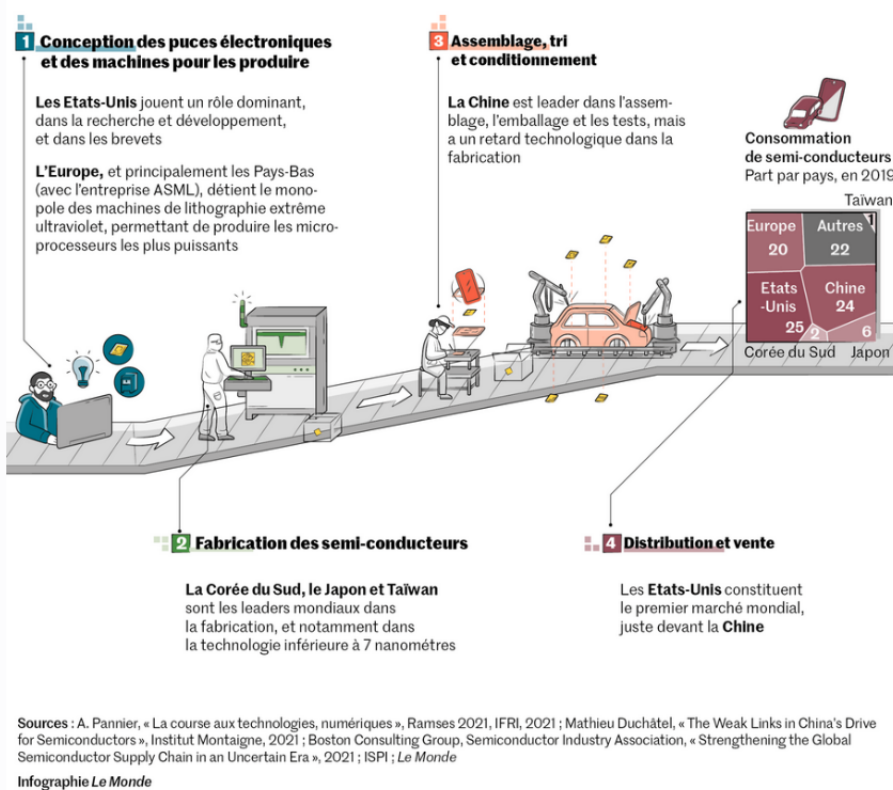
moire de données séparées. [...]

1. Comment l'architecture de Harvard se distingue-t-elle de celle de Von Neumann? Quels avantages présente-t-elle pour les microcontrôleurs?
2. Quelle est l'origine de sa désignation?

3.3 Système sur une puce



Cours-Essentiel 5



Production des puces Une chaîne mondialisée, des acteurs interdépendants et des tensions géopolitiques Chine/USA

- ☞ Au milieu des années 2000 sont apparus les premiers smartphone, qu'on devrait plutôt qualifier d'ordiphones. Le coeur d'un smartphone est un **système sur puce (System On Chip en Anglais)** regroupant sur une même puce : un puissant microprocesseur, de la mémoire, des coprocesseurs spécialisés pour accélérer les calculs (GPU, DSP), des modules de communication (5G, Wifi), de sécurité (cryptographie, biométrie) ... Les SOC **Snapdragon** de la firme Qualcomm sont très répandus dans la téléphonie mobile mais on trouve des SOC dans d'autres appareils (tablettes, consoles de jeux, smart TV, montres connectées, calculatrices ...). Les **matériaux semi-conducteurs** sont à la base des technologies utilisées dans la conception des puces électroniques.
- ☞ Le succès des SOC, composants incontournables de *l'informatique nomade*, s'explique par plusieurs avantages :
 - de *coût* : l'intégration de tous les composants dans une puce permet de réduire le coût de fabrication. Plusieurs acteurs interviennent dans la chaîne qui est mondialisée : une puce Snapdragon équipant un



smartphone du coréen Samsung, est conçue par l'américain **Qualcomm** à partir du jeu d'instructions sous licence du britannique **ARM** et elle est fabriquée par le fondateur taiwanais **TSMC**.



Les concepteurs de SOC ne sont pas forcément ceux qui les fabriquent comme dans l'écosystème Intel x86 : les circuits intégrés sont conçus à l'aide d'algorithmes, l'informatique est une science qui se conçoit elle même!

- d'énergie : la grande partie de la consommation électrique d'un circuit dépend du câblage donc rapprocher les composantes sur une même puce permet de réduire la consommation électrique, ce qui est essentiel pour les appareils mobiles. Le SOC d'un smartphone n'a pas besoin de ventilateur pour le refroidissement! **ARM** commence à développer des SOC pour serveurs, la faible consommation énergétique serait un gros avantage par rapport aux architectures Intel x86 dominantes sur ce marché.
- de sécurité : la conception globale d'un SOC est un avantage pour contrôler le matériel et le micrologiciel. L'investissement en recherche et dans l'outil de production est considérable et d'une importance géostratégique critique : le leadership américain est disputé par les chinois. Le numéro un mondial de la fabrication de puces est le taiwanais **TSMC** : à cause des tensions avec la Chine, les américains le contraignent à relocaliser aux USA une partie de la production.



L'intégration extrême d'un SOC ne permet pas de le réparer ou le mettre à jour ce qui est un inconvénient en terme de durabilité. Néanmoins certaines plateformes proposent des blocs de logiques programmables et les SOC basés sur un processeur ARM peuvent accueillir des modules logiques personnalisables qui agissent comme des UAL complémentaires.

Snapdragon X16 LTE

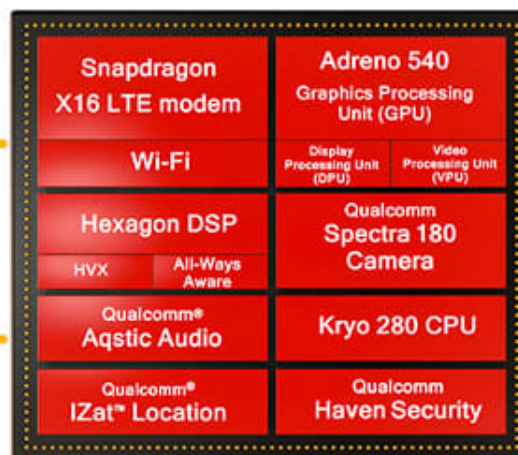
World's first announced gigabit-class LTE modem

Qualcomm® Hexagon™ DSP

Tensorflow and Hallide Support

Qualcomm® Kryo™ 280 CPU

Our most power efficient architecture to date



Qualcomm® Adreno™ Visual Processing

25% Faster Graphics Rendering
60x More Display Colors*

Qualcomm Spectra™ Camera ISP

Smooth Zoom
Fast-Autofocus
True to Life Colors

Qualcomm Haven™ Security

First to support full biometric suite

Source : Plateforme du SOC Snapdragon 835



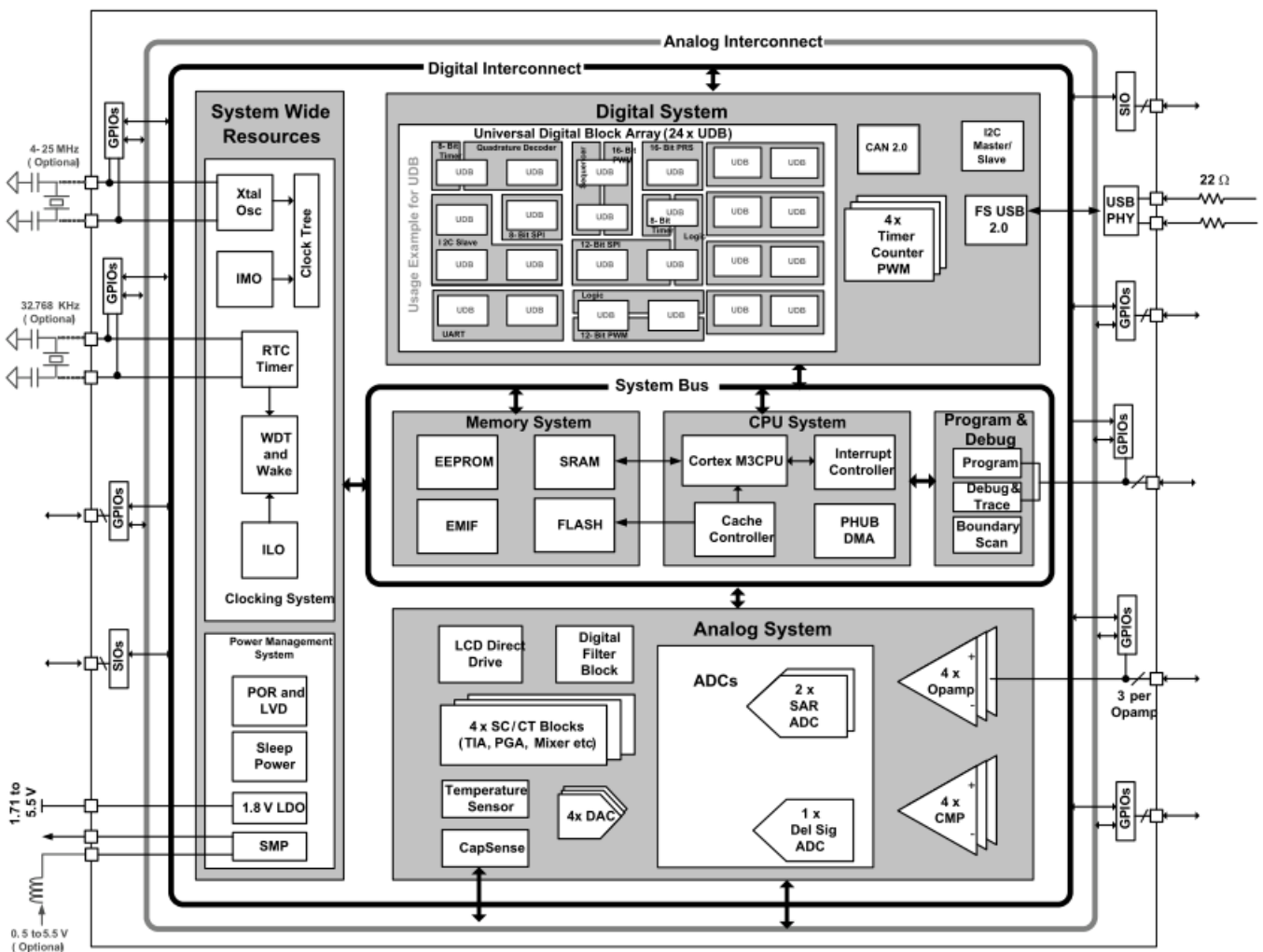
Exercice 6

Ouvrir le descriptif du SOC Snapdragon 835 :

https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/snapdragon_product_brief_835_0.pdf

On pourra aussi consulter https://fr.wikipedia.org/wiki/Qualcomm_Snapdragon

1. Sur quel jeu d'instructions est basée le processeur?
2. Quelle est la finesse de gravure? Quelle entreprise a gravé la puce?
3. Que signifient les lettres L et P dans le type de mémoire LPDDR4 utilisé?
4. Quels modules de communication réseau sont disponibles sur la puce?
5. Quels tâches spécifiques sont réalisées par un Digital Signal Processor? Quel est l'avantage par rapport à un processeur généraliste?
6. Quel est le rôle d'un processeur ISP?



Source : SOC 5LP Cypress avec CPU ARM et convertisseur analogique/numérique



Table des matières

1 Histoire des ordinateurs	1
1.1 Machines mécaniques	1
1.2 Fondements théoriques de l'informatique	1
1.3 Machines à programmes externes	2
1.4 L'ordinateur, une machine universelle à programme enregistré	2
1.5 Miniaturisation et démocratisation	2
2 Architecture de Von Neumann	3
2.1 Un processeur pour calculer et une mémoire pour stocker programme et données	3
2.2 Hiérarchie des mémoires	5
3 Miniaturisation et intégration	7
3.1 Microprocesseur et micro-ordinateur	7
3.2 Microcontrôleur	8
3.3 Système sur une puce	10