

Chapitre 18 - Les systèmes sur puce

Objectifs :

- ▷ Connaître quelques composants intégrés d'un système sur puce
- ▷ Identifier les principaux composants sur un schéma de circuit
- ▷ Comprendre les avantages de leur intégration en terme de vitesse et de consommation

1 Introduction

La réduction de taille des éléments des circuits électroniques a conduit à l'avènement de systèmes sur puce. Ce *SoC* (pour *System on a Chip* en anglais) qui regroupe dans un seul circuit nombre de fonctions autrefois effectuées par des circuits séparés assemblés sur une carte électronique.

Un tel système sur puce est conçu et mis au point de façon logicielle, ses briques électroniques sont accessibles par des API, comme pour les bibliothèques logicielles.

2 De l'ordinateur au smartphone/tablette

Dans un ordinateur "classique" tel qu'un PC de bureau, le "*hardware*" est organisé autour de 4 éléments principaux :

- ▷ **le processeur (CPU – Central Processing Unit)** se charge de réaliser les calculs les plus courants, ceux qui permettent par exemple de faire tourner le système d'exploitation ou un navigateur web.
- ▷ **la mémoire vive (RAM – Random Access Memory)** permet d'enregistrer temporairement les données traitées par le processeur.
- ▷ **la carte graphique (ou GPU – Graphics Processing Unit)** se charge d'afficher une image, qu'elle soit en 2D ou bien en 3D comme dans les jeux.
- ▷ **la carte-mère (Motherboard)** permet l'acheminement des données entre les composants (CPU, RAM, GPU, disque dur, SSD, cartes réseau,..., etc.) via des "bus".



Principaux éléments d'un PC :

1. CPU surmonté d'un dissipateur thermique (*ventirad*)
2. Barrettes de RAM
3. GPU
4. Carte mère

Mais depuis le début de l'ère des smartphones et des tablettes, on assiste à l'émergence de systèmes tout-en-un appelé **SoC** (*System on a Chip*) afin d'optimiser la miniaturisation et l'intégration des différents composants.

Ces derniers sont alors bien mieux interconnectés les uns aux autres, avec par exemple une fréquence processeur qui varie en fonction de la fréquence de la carte graphique du fait de contraintes thermiques et de consommation.

Un Soc présente donc une structure complètement inédite par rapport à un ordinateur classique où chaque composant est plus ou moins indépendant.

A retenir !

Un « **système sur une puce** », souvent désigné dans la littérature scientifique par le terme anglais *system on a chip* (d'où son abréviation **SoC**), est un système complet embarqué sur une seule puce ("circuit intégré"), pouvant comprendre de la mémoire, un ou plusieurs microprocesseurs, des périphériques d'interface, ou tout autre composant nécessaire à la réalisation de la fonction attendue.

On peut intégrer de la logique, de la mémoire (statique, dynamique, flash, *ROM*, *PROM*, *EPROM*, *EEPROM*), des dispositifs (capteurs) mécaniques, opto-électroniques, chimiques ou biologiques ou des circuits radio,...,etc.



Puce ARM Exynos
Smartphone Nexus S de Samsung

3 Composition d'un *SoC*

Un *System on Chip* (SoC) est un circuit intégré qui regroupe sur une seule puce plusieurs composants essentiels comme le processeur, le GPU, la mémoire et les contrôleurs. Cette intégration permet de réduire la consommation d'énergie, d'améliorer les performances et d'optimiser l'espace dans les appareils électroniques.

Très utilisé dans les smartphones, tablettes et objets connectés, le SoC offre une solution compacte et efficace pour l'informatique embarquée.

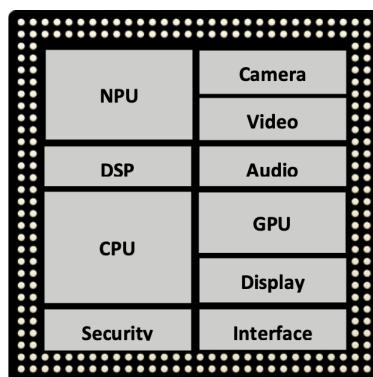


FIGURE 1 – Architecture simplifiée du SoC *Samsung Exynos 990 - Galaxy S20*

3.1 Le processeur (CPU)

Le **processeur** ou « *Central Processing Unit* » (**CPU**) est le cœur du *SoC*. Son fonctionnement est identique à celui d'un ordinateur.

On y retrouve donc plusieurs **cœurs** cadencés à différentes **fréquences** effectuant des **threads** et stockant des informations en **cache**.



▷ Les cœurs :

Un processeur compte généralement plusieurs cœurs, on parle couramment dans la littérature technique de dual-core, quad-core ou d'octo-core parfois. Ainsi, ces processeurs se composent respectivement de

deux, quatre ou huit coeurs. Ceux-ci permettent de lancer en parallèle plusieurs applications de manière simultanée (multitâche) et permettent l'utilisation d'application lourde comme des jeux.

▷ **La fréquence :**

La fréquence d'un processeur est le nombre de cycles de calculs qu'il peut effectuer chaque seconde.

Elle va donc naturellement déterminer la durée d'exécution d'une tâche : plus la fréquence du processeur est élevée, plus l'exécution d'une tâche est rapide.

Mesurée en gigahertz (GHz), celle-ci est souvent différente entre chaque cœur.

▷ **Les threads :**

Les coeurs réalisent ce qu'on appelle un thread, littéralement un **fil d'exécution**, une tâche qui doit être réalisée par le processeur.

▷ **Le cache :**

C'est une petite mémoire rapide intégrée au processeur. En effet, celle-ci va permettre de **stocker les informations** récurrentes au plus près du processeur pour éviter d'avoir à aller les chercher sans arrêt dans la RAM.

3.2 La puce graphique (GPU)

La **puce graphique** ou « *Graphics Processing Unit* » (**GPU**) est un élément crucial pour les gamers, car c'est lui qui est en charge de calculer les images afin de pouvoir les afficher à l'écran.



Celle-ci prend ainsi en charge les images en 2D et en 3D que ce soit une page web, une vidéo ou encore une partie endiablée de votre jeu favori.

Une carte graphique doit donc réaliser un nombre élevé de tâches, puisque qu'elle doit par exemple calculer la **couleur à afficher** sur chaque pixel de l'écran de votre smartphone.

Par exemple dans le cas d'une image Full HD (1920×1080), le GPU affiche 2 073 600 pixels différents ou 8 294 400 pixels pour de l'Ultra HD (3840×2160).

Rappelons également que ce calcul est fait selon la **fréquence de rafraîchissement** de l'écran. Celle-ci peut par exemple varier entre 60 et 120 fois par secondes c'est-à-dire entre 60 Hz et 120 Hz.

3.3 La puce neuronale (NPU)

La **puce neuronale** ou « *Neuronal Processing Unit* » (**NPU**) est une puce en charge de l'intelligence artificielle des smartphones.



Les calculs de l'intelligence artificielle ont longtemps été faits par le biais de serveurs dans le cloud (distant). Néanmoins, depuis quelques années pour des raisons de **rapidité et de respect de la vie privée**, les calculs se font désormais directement sur les smartphones.

C'est utile par exemple dans *Google Translate* pour reconnaître des caractères, pour optimiser les photos ou encore l'autonomie.

3.4 Le modem (Interface)

Les smartphones embarquent également dans le SoC une unité réseau assurant la prise en charge des différents protocoles de communication.



Cette unité est la partie la plus compliquée à développer et à implémenter sur un SoC. Néanmoins, il s'agit d'un élément crucial afin d'assurer le nomadisme d'un smartphone en itinérance.

Le modem intégré au SoC gère non seulement le **Wifi**, le **Bluetooth**, le **NFC** ou bien encore les **technologies mobiles**. C'est-à-dire la **4G**, ou plus récemment la **5G** mais également de plus vieux réseaux tels que la **3G**.

3.5 Le processeur de signal numérique (DSP)

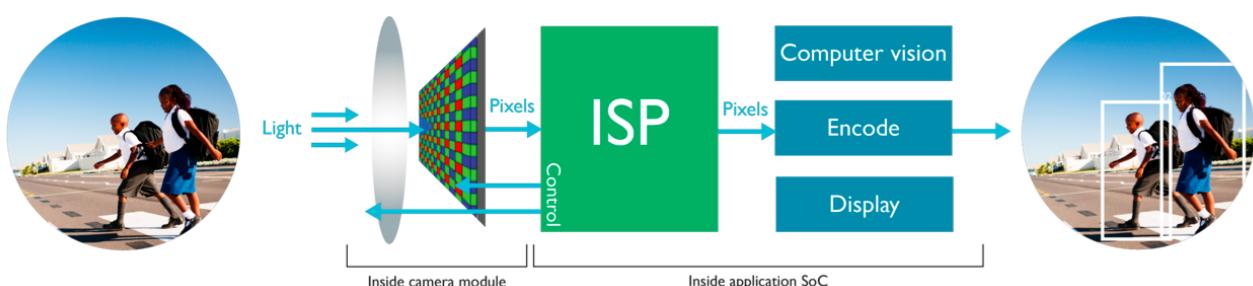
Le processeur de signal numérique ou « *Digital Signal Processor* » (**DSP**) est en charge de **traiter les signaux numériques**.

Ainsi, il va permettre le filtrage, la compression ou encore l'extraction de différents signaux tels que la musique ou encore une vidéo.

3.6 Le processeur de signal d'images (ISP)

Le processeur d'image ou « *Image Signal Processor* » (**ISP**) est une puce prenant en charge la **création d'images numériques**.

En effet, à cause de leurs tailles minuscules, les **capteurs photo** des smartphones ne sont pas de très bonne qualité d'un point de vue de l'optique pure. La qualité qu'il est actuellement possible d'obtenir va être intimement liée à cette puce qui va compenser logiquement certaines limitations optiques (zoom numérique).



3.7 Le processeur de sécurité (SPU)

Le processeur de sécurité ou « *Secure Processing Unit* » (**SPU**) est le « **bouclier** » du smartphone.

Son alimentation électrique est indépendante afin de ne pas pouvoir être éteint en cas d'attaque sur celui-ci. Le SPU est d'une importance capitale.

En effet, celui-ci va stocker les données **biométriques**, **bancaires**, la carte **SIM** ou encore les **titres de transport**. C'est lui qui contient les clés de chiffrement des données de l'utilisateur.

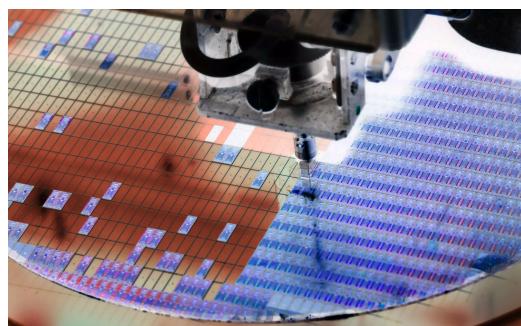
4 Les avantages d'un *SoC* par rapport à un système classique

Outre leur taille miniaturisée bien adaptée aux terminaux nomades (smartphones et tablettes), les SoC offrent d'autres avantages par rapport aux systèmes "classiques" rencontrés dans les ordinateurs :

- ▷ les SoC sont conçus pour consommer beaucoup moins d'énergie qu'un système classique à puissance équivalente de calculs ;
- ▷ cette consommation réduite d'énergie permet dans la plupart des cas de s'affranchir de la présence d'un système de refroidissement actif comme les ventilateurs ou de type « watercooling » ; un système équipé de SoC est donc silencieux car il chauffe relativement peu ;
- ▷ étant donné les distances très faibles entre, par exemple, le CPU et la mémoire, les données circulent beaucoup plus vite, ce qui permet d'améliorer grandement les performances ; en effet, dans les systèmes "classiques" les BUS chargés d'acheminer les données sont souvent des "goulots d'étranglement" en termes de performances à cause de la vitesse limitée de circulation des données. En revanche, le principal inconvénient d'un SoC est que là où un ordinateur équipé d'une carte mère permet de faire évoluer les composants individuellement, l'extrême intégration du SoC présente en revanche l'inconvénient de n'autoriser aucune mise à jour possible du matériel.

5 Quelques familles de *SoC* utilisées dans les smartphones

Les nouveaux procédés de gravure des semi-conducteurs CMOS telle que la **lithographie extrême ultraviolette**, ont permis de réduire significativement la taille des composants électroniques constituants les *SoC*.



Ainsi, on dispose aujourd'hui de la même puissance dans un smartphone que celle embarquée dans un ordinateur il y a quelques années de cela. Ceci s'est cependant fait au prix d'une complexité technologique croissante. Par exemple, la génération de *SoC* des téléphones *iPhone 11* est gravée en **7 nm** depuis juillet 2019. On rappelle que $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$!

Le *SoC A13 Bionic d'Apple* est par exemple composé de 8,5 milliards de transistors répartis sur une surface de $98,48\text{mm}^2$. On pense que les futures générations seront gravée en 1 nm aux alentours de 2030 !

On trouve une grande variété de *SoC* en fonction des différents constructeurs. Par exemple, voici les caractéristiques d'une ancienne génération de smartphones :

| SoC | Gravure | Instructions | CPU | GPU | Smartphone |
|----------------|---------|--------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| Exynos 990 | 7 nm | ARM v8.4 | 8 cœurs 64 bits | Mali-G77 MP11 | Samsung Galaxy S20 |
| A13-Bionic | 7 nm | ARM v8.3-A | 6 cœurs 64 bits | Apple 4 cores | Apple iPhone 11 |
| Snapdragon 865 | 7 nm | ARM v8.2-A | 8 cœurs 64 bits | Qualcomm Adreno 650 | Xiaomi Mi 10 |
| Kirin 990 | 7 nm | ARM v8.2-A | 8 cœurs 64 bits | Mali-G76 MP16 | Huawei P40 |

Pour les modèles de smartphones du début des années 2020, la principale difficulté technologique a été d'intégrer aux *SoCs* les modems 5G qui sont complexes à fabriquer.

Ils étaient gravés en 10 nm sur une puce indépendante du *SoC*. Le prochain défi technologique a été d'intégrer les modems 5G directement dans le *SoC* gravé en 7 nm puis 5 nm.

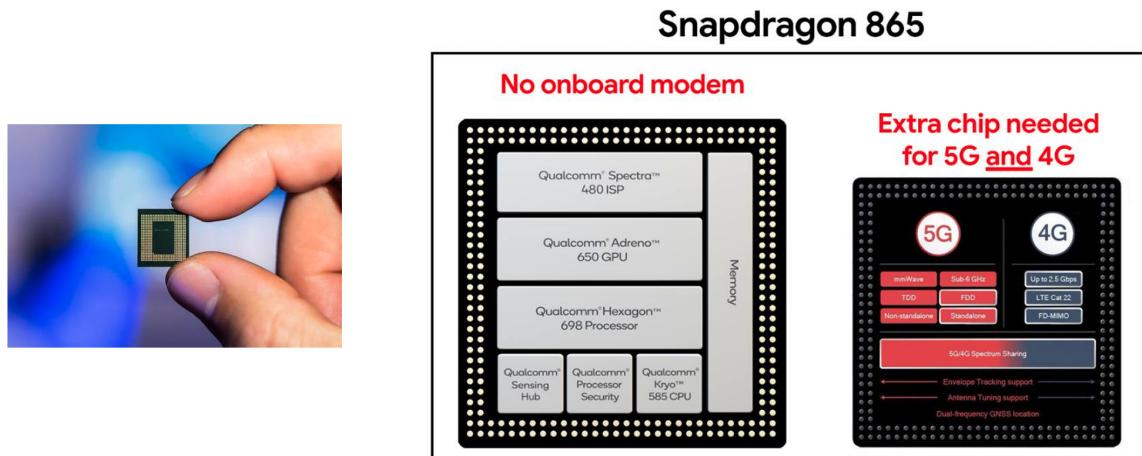


FIGURE 2 – Block diagram – Snapdragon 865

6 L'architecture ARM

Dotés d'une architecture relativement plus simple que d'autres familles de processeurs, et bénéficiant d'une faible consommation électrique, les processeurs **ARM** (*Advanced Risc Machine*) sont devenus dominants dans le domaine de l'informatique embarquée, en particulier dans la téléphonie mobile et les tablettes.

Les architectures ARM reposent sur des processeurs à jeu d'instructions réduit **RISC** (*Reduced Instruction Set Computer*) 32 bits (ARMv1 à ARMv7) ou 64 bits (ARMv8).

Aujourd'hui, ARM est surtout connu pour ses systèmes sur puce (*SoC*), intégrant sur une seule puce :

- ▷ microprocesseur
- ▷ processeur graphique (GPU)
- ▷ DSP
- ▷ FPU
- ▷ SIMD
- ▷ contrôleur de périphériques

Ceux-ci sont présents dans la majorité des smartphones et tablettes.



ARM propose des architectures qui sont vendues sous licence de propriété intellectuelle aux concepteurs. Ils proposent différentes options dans lesquelles les constructeurs peuvent prendre ce qui les intéresse pour compléter avec leurs options propres ou de concepteurs tiers.

ARM propose ainsi pour les *SoC* les plus récents les microprocesseurs *Cortex* (*Cortex-A* pour les dispositifs portables de type smartphones et tablettes, *Cortex-M* pour le couplage à un microcontrôleur, *Cortex-R* pour les microprocesseurs temps réel), des processeurs graphiques (Mali), des bus *AMBA* sous licence libre, ainsi que les divers autres composants nécessaires à la composition du *SoC* complet.

Certains constructeurs, tels que *Nvidia*, préfèrent produire leur propre processeur graphique, d'autres, comme *Samsung*, préfèrent prendre dans certains cas un processeur graphique de prestataire tiers ou d'ARM selon les modèles, et d'autres, comme *Apple*, modifient certains composants du microprocesseur en mélangeant plusieurs architectures processeur ARM.

7 Conclusion

Les SoCs sont utilisés dans tous les téléphones, tablettes, système embarqués et consoles :

- ▷ iPhone 15 : SoC A16 Bionic
- ▷ Samsung Galaxy S11 : SoC Exynos 2400
- ▷ Nintendo Switch : Nvidia Tegra X1
- ▷ Sony PS5 : SoC d'AMD

Les fabricants de SoCs sont très nombreux :

- ▷ AMD
- ▷ Apple
- ▷ Broadcom
- ▷ Intel
- ▷ Nvidia
- ▷ Qualcomm
- ▷ Samsung
- ▷ Texas Instrument

Même s'il n'y a que deux architectures différentes : x86 et ARM.

| DESIGNERS | | MANUFACTURERS | | | |
|---|---|--|---|---|---|
| INTEGRATED DEVICE MANUFACTURERS | | WAFER FAB EQUIPMENT PROVIDERS | | | |
|     |  | Litho ASML | Deposition  | Etch  | Process  |
|     |     |     |   |     |   |
|         |    |     |     |  |  |

8 Exercices

Exercice 1 : En résumé

Résumer en quelques phrases le contenu de cette vidéo *Systems on a Chip as Fast As Possible* (jusqu'à 5'40"). Mettre les sous-titres automatiques en français si besoin.

Exercice 2 :

1. Qu'est-ce qu'un *SoC* ?
2. Quels sont les appareils à base de *SoC* ?
3. Au niveau matériel (*hardware*), qu'est-ce qui différencie fondamentalement un *SoC* des composants d'un ordinateur ?

Exercice 3 :

1. Pourquoi les CPU d'un *SoC* embarquent-ils plusieurs coeurs ?
2. Donner un ordre de grandeur de la fréquence du CPU d'un *SoC*.
3. Sur quel paramètre influe la fréquence du CPU d'un *SoC* ?
4. Qu'est-ce qu'un thread ?
5. Qu'est-ce que la mémoire cache d'un CPU ?
6. Dans un *SoC*, à quoi sert le GPU ?
7. Dans un *SoC*, quel élément est chargé du traitement des photos prises par la (les) caméra(s) intégrée(s) au smartphone ?
8. Dans un *SoC*, quel élément permet de lire de l'audio ou de la vidéo ?
9. Dans un *SoC*, à quoi sert le SPU ?
10. Quel élément d'un *SoC* permet à un smartphone de communiquer avec d'autres machines ?

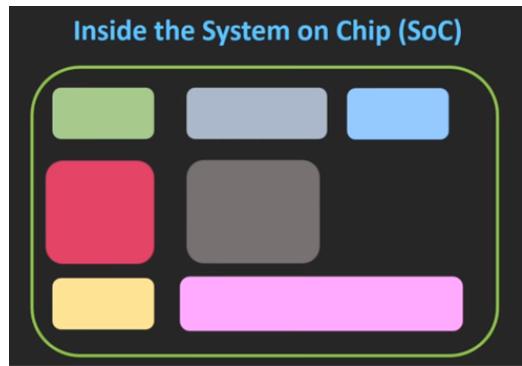
Exercice 4 :

1. Quels sont les principaux avantages d'un SoC ?
2. Citer le principal inconvénient d'un SoC.

Exercice 5 : Recherches Internet

1. En vous inspirant du tableau de la page 5, créer un tableau similaire avec 5 smartphones actuels (le vôtre et ceux de quelques camarades).
2. Pour les modèles les plus récents (2025) de téléphones portables, quelle est la finesse de gravures des *SoC* ?
3. En 2025, quel est l'ordre de grandeur de la surface d'un *SoC* ?
4. En 2025, , quel est l'ordre de grandeur du nombre de transistors présents sur un *SoC* ?
5. En 2025, quel est l'ordre de grandeur de la densité moyenne de transistors par mm^2 dans un *SoC* ?
6. Quelle sera la finesse de gravure des *SoC* pour la prochaine génération de smartphones ?
7. Quelle est la principale difficulté technologique rencontrée à l'heure actuelle par les concepteurs de *SoC* ?

Exercice 6 : Compléter le schéma du *SoC* ci-dessous :



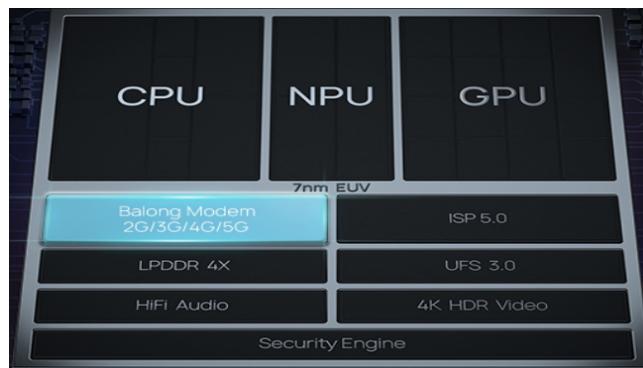
Exercice 7 : A partir de l'article du site [elektormagazine.fr](#) :

1. Relever les différentes caractéristiques du *SoC* du *Raspberry Pi 3* modèle B+.
2. Les comparer au *SoC* du *Raspberry Pi 4*.
3. Quelles sont les principales évolutions qui contribuent à ce gain ? Une copie de l'article est disponible [ici](#).

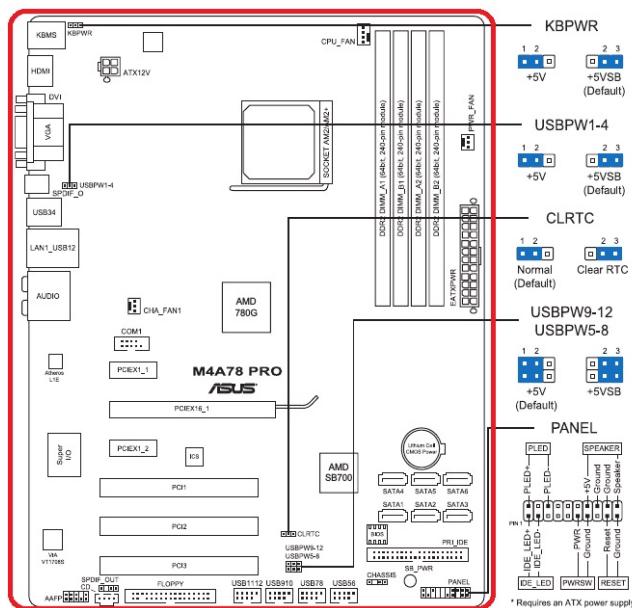
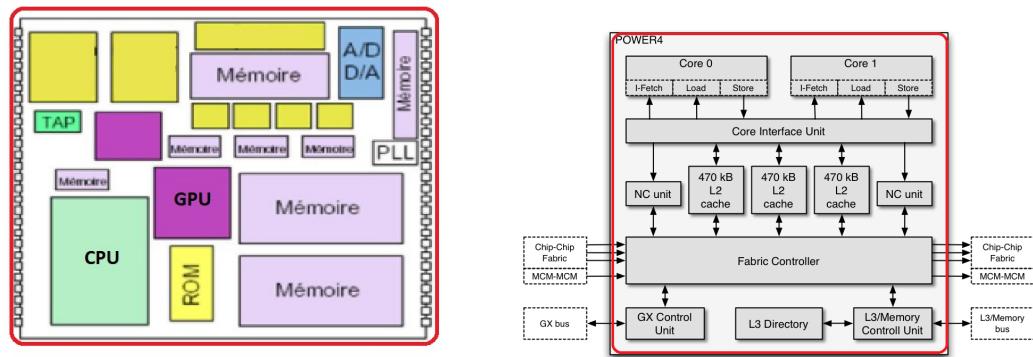


Exercice 8 : La photo ci-dessous montre le détail d'un *SoC Kirin 990*.

Identifier les différentes parties de ce *SoC*.



Exercice 9 : Parmi les images ci-dessus, la(les)quelle(s) représente(nt) un *SoC*.



Exercice 10 : Sujet de Bac

Répondre aux 3 questions de la partie 1 de l'exercice 2 du sujet de **Bac 2022, Nouvelle-Calédonie, J1**.



Figure 1

Raspberry Pi 4B
Processeur ARM 64-bit quad core 1,5 GHz
8 Gio RAM
WiFi et Ethernet
1 prise jack, 4 ports USB, 2 ports micro-HDMI
40 broches GPIO
Carte micro-SD 64 Go (amovible)
Alimentation via USB-C (5 V, 3 A, 15 W)



Figure 2

Mini-PC
Processeur Intel Celeron 64 bit quad core 1,5 GHz
8 Gio RAM
WiFi et Ethernet
2 prises jack, 4 ports USB, 1 port HDMI
SSD 250 Go
Alimentation séparée (19 V, 3,42 A, 65 W)

Exercice 11 : Exposés

Parmi la liste, ci-dessous choisir un thème :

1. Les SoC et l'intelligence artificielle embarquée : Michel

- Comment les SoC modernes intègrent des unités de traitement dédiées à l'IA (NPU ou TPU).
- Applications récentes : reconnaissance faciale, traitement du langage naturel, voitures autonomes, etc.

2. Les SoC dans la 5G et l'Internet des Objets (IoT) : l'ère des connexions intelligentes : Ange

- Impact des SoC dans le déploiement de la 5G : gestion des réseaux, smartphones 5G, IoT connecté.
- Rôle des SoC dans l'optimisation des performances des appareils IoT intelligents.

3. Les SoC et la gestion de la confidentialité avec l'IA : Léane

- Rôle des SoC dans la sécurisation des données personnelles (exemple : cryptage des informations dans des SoC pour smartphones).
- Comment les SoC sont utilisés pour répondre aux défis de confidentialité dans les systèmes d'IA (par exemple : confidentialité des données traitées par IA sur les appareils).

4. Les SoC dédiés à la vision par ordinateur et l'IA : applications en temps réel : Matteo

- Les SoC intégrant des capacités de vision par ordinateur et leur utilisation dans des technologies récentes (comme les caméras intelligentes, la réalité augmentée, etc.).
- L'impact sur des secteurs comme la santé, l'automobile ou la sécurité (exemple : Tesla et la vision par ordinateur pour les véhicules autonomes).

5. Les SoC et l'optimisation de l'IA dans les smartphones : Ian

- Étude des SoC récents intégrant des capacités d'IA dans les smartphones (par exemple, les séries Apple A14/A15, Qualcomm Snapdragon).
- Comment ces SoC optimisent l'IA pour des applications pratiques (reconnaissance vocale, photographie intelligente, etc.).

6. Le rôle des SoC dans les assistants vocaux intelligents

- Analyse des SoC intégrés dans des dispositifs comme Amazon Echo, Google Home, et autres assistants vocaux.
- L'IA embarquée et son rôle dans l'amélioration des interactions vocales et des commandes contextuelles.

7. L'impact des SoC dans le développement de l'IA générative (ex. ChatGPT) Lino

- Comment les SoC peuvent être utilisés pour accélérer les calculs nécessaires aux modèles d'IA générative tels que ChatGPT, DALL·E, etc.
- Défis techniques et innovations récentes pour les calculs massifs (exemple : SoC spécialisés pour l'entraînement des modèles d'IA).

8. L'évolution des SoC pour les applications de réalité augmentée (AR) et réalité virtuelle (VR) : Guillaume

- Le rôle crucial des SoC dans les technologies AR/VR récentes : latence, puissance de traitement, gestion graphique.
- Applications pratiques dans les jeux vidéo, les industries créatives, la formation, etc.

9. Les SoC dans les véhicules autonomes : intégration de l'IA et des capteurs

- Comment les SoC sont utilisés pour traiter les données en temps réel provenant des capteurs dans les véhicules autonomes.
- Impact de l'IA dans le traitement des données pour prendre des décisions en temps réel.

10. Les SoC et la transition énergétique : vers des systèmes plus efficaces

- Rôle des SoC dans l'optimisation de la consommation d'énergie dans les dispositifs IoT et les smartphones.
- Comment les SoC peuvent contribuer à des solutions plus écologiques dans l'IA embarquée.

Vous devrez réaliser une présentation que vous déposerez sur *Classroom* pour la semaine prochaine.

Ce travail de recherche sera présenté à l'oral (**10 minutes à l'oral** par personne).

