

Chapitre 15 - 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 (*SoC* pour *System on a Chip* en anglais) qui regroupent 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

Exercice 1 :

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 ?

3 Composition d'un *SoC*

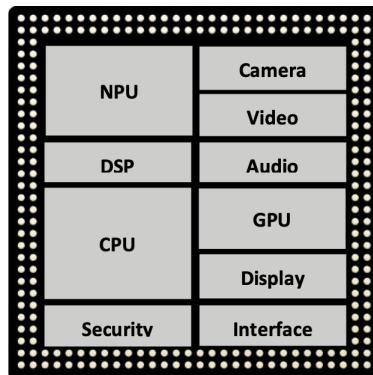


FIGURE 1 – Architecture simplifiée du SoC *Samsung Exynos 990 - Galaxy S20*

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 cœurs. 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 coeurs.

▷ 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.

Exercice 2 :

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 ?

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.

Exercice 3 :

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

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 cœur 64 bits	Mali-G77 MP11	Samsung Galaxy S20
A13-Bionic	7 nm	ARM v8.3-A	6 cœur 64 bits	Apple 4 cores	Apple iPhone 11
Snapdragon 865	7 nm	ARM v8.2-A	8 cœur 64 bits	Qualcomm Adreno 650	Xiaomi Mi 10
Kirin 990	7 nm	ARM v8.2-A	8 cœur 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.

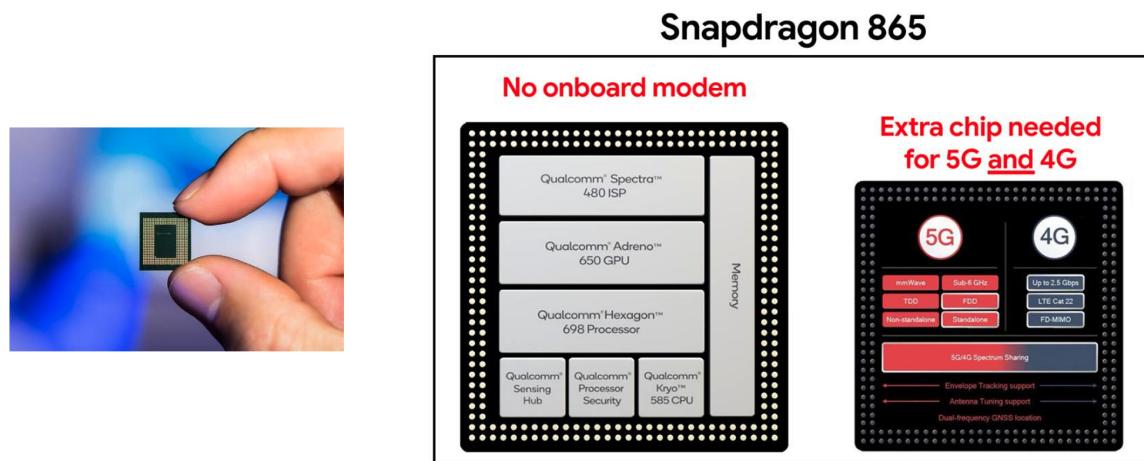


FIGURE 2 – Block diagram – Snapdragon 865

Exercice 4 : Recherches Internet

- En vous inspirant du tableau ci-dessus, créer un tableau similaire avec 5 smartphones actuels (le vôtre et ceux de quelques camarades).
- Pour les modèles les plus récents (2024) de téléphones portables, quelle est la finesse de gravures des *SoC* ?
- Quel est l'ordre de grandeur de la surface d'un *SoC* ?
- Quel est l'ordre de grandeur du nombre de transistors présents sur un *SoC* ?
- Quel est l'ordre de grandeur de la densité moyenne de transistors par mm² dans un *SoC* ?
- Quelle sera la finesse de gravure des *SoC* pour la prochaine génération de smartphones ?
- Quelle est la principale difficulté technologique rencontrée à l'heure actuelle par les concepteurs de *SoC* ?

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 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.



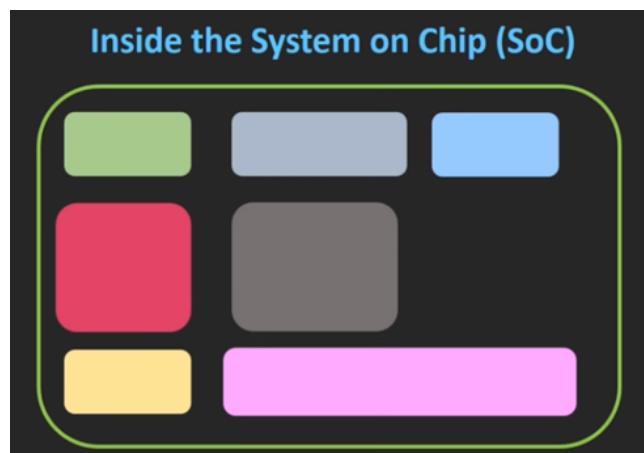
ARM propose des architectures qui sont vendues sous licence de propriété intellectuelle aux concepteurs. Ils proposent différentes options dans lesquelles les constructeurs peuvent prendre ce qui les intéresse pour compléter avec leurs options propres ou de concepteurs tiers.

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.

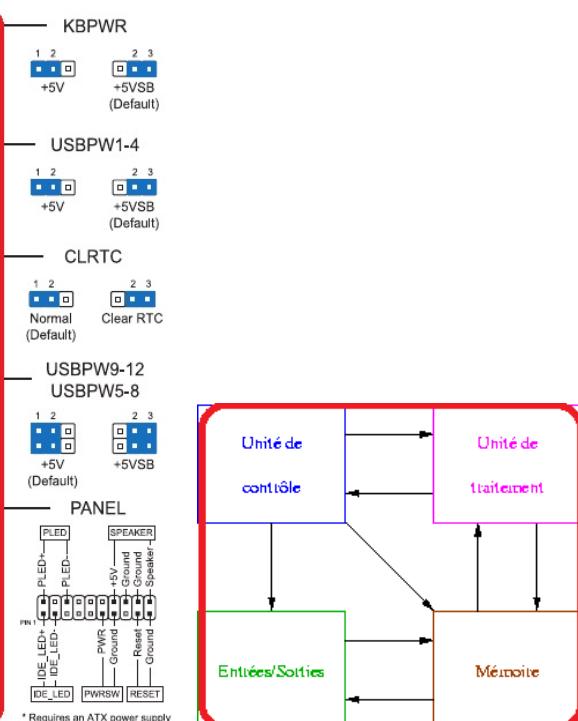
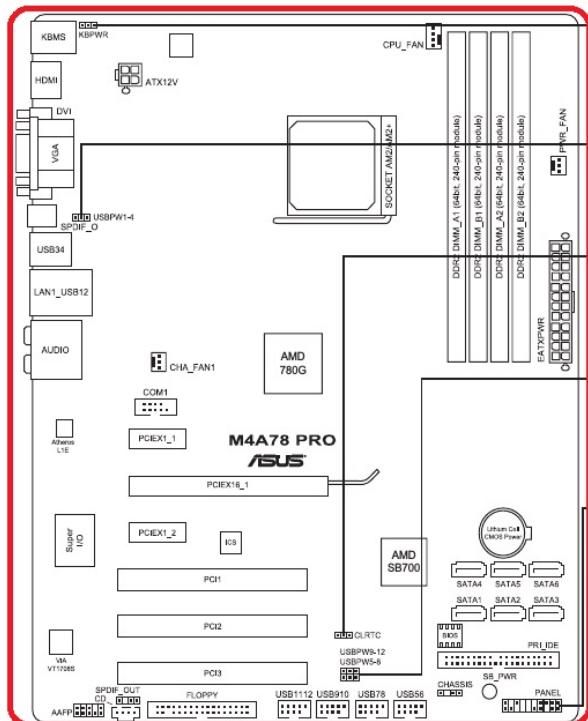
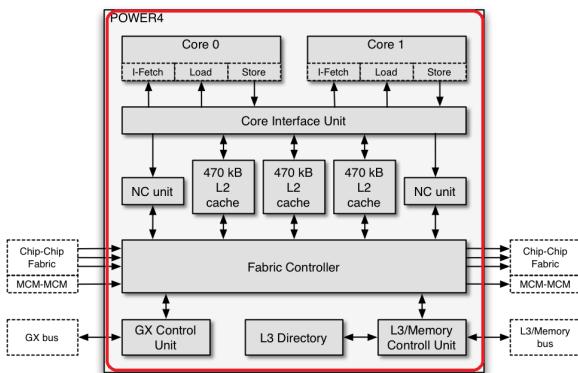
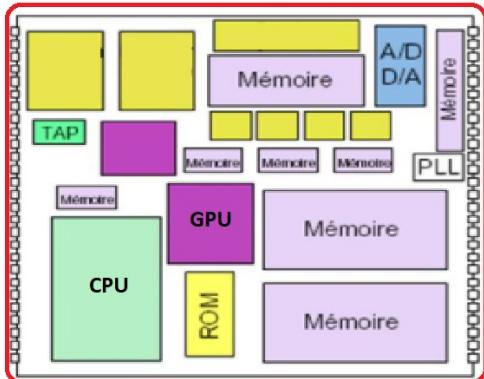
Certains constructeurs, tels que *Nvidia*, préfèrent produire leur propre processeur graphique, d'autres, comme *Samsung*, préfèrent prendre dans certains cas un processeur graphique de prestataire tiers ou d'ARM selon les modèles, et d'autres, comme *Apple*, modifient certains composants du microprocesseur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

7 Exercices

Exercice 5 : Compléter le schéma du *SoC* ci-dessous :



Exercice 6 : Parmi les images ci-dessus, la(les)quelle(s) représente(nt) un *SoC*.



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 : Exposés

Faire des recherches sur les composants suivants :

- ▷ *SoC BCM2711* (Raspberry Pi modèle 4), détailler les différents modules disponibles.
- ▷ A l'aide de recherches sur la 9e génération de processeurs Intel pour ordinateur, comparer avec le SoC d'un téléphone portable (caractéristiques de vitesse, taille, nombre de transistors...).
- ▷ *Snapdragon 855* de *Qualcomm*, détailler les différents modules disponibles.
- ▷ SoC équipant le premier *iPhone* en 2007 comparé avec les modèles d'*iPhone 5* (2012), *iPhone X* (2017), *iPhone 11* (2019) et *iPhone 15* (2023).
- ▷ SoC Samsung Exynos 7 dual (Samsung gear), détailler les différents modules disponibles.
- ▷ *Kirin 990*, détailler les différents modules disponibles.

Vous devrez réaliser une présentation que vous déposerez sur *Classroom*.

Ce travail de recherche sera présenté à l'oral (5 minutes par personne).

Exercice 10 : D'après le sujet Bac 2022, Nouvelle-Calédonie, J1, Ex. 2

Cet exercice porte sur l'architecture des ordinateurs et les protocoles réseau.

Partie 1 : Choix d'un serveur

Une microentreprise souhaite s'équiper d'un ordinateur pour héberger son site web. Elle hésite entre deux configurations : un ordinateur monocarte (SoC – System on Chip) Raspberry Pi (figure 1) ou un mini-PC (figure 2).



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)

- 1) Indiquer la quantité de mémoire vive du Raspberry Pi.
- 2) Indiquer la fonction principale du composant SSD (Solid State Drive).
- 3) Indiquer deux avantages d'un ordinateur monocarte (SoC) par rapport à un mini-ordinateur.

Exercice 11 : Sujets supplémentaires de type Bac

Faire un ou plusieurs exercices au choix parmi la liste ci-dessous :

- ▷ Sujet 1 - Bac 2021 - Exercice 5
- ▷ Sujet 2 - Bac 2021 - Exercice 5
- ▷ Sujet 3 - Bac 2021 - Exercice 3
- ▷ Sujet 6 - Bac 2021 - Exercice 4
- ▷ Sujet 10 - Bac 2021 - Exercice 1
- ▷ Sujet 2 - Bac 2022 - Exercice 3
- ▷ Sujet 3 - Bac 2022 - Exercice 3
- ▷ Sujet 4 - Bac 2022 - Exercice 2
- ▷ Sujet 6 - Bac 2022 - Exercice 5
- ▷ Sujet 7 - Bac 2022 - Exercice 5
- ▷ Sujet 10 - Bac 2022 - Exercice 5
- ▷ Sujet 1 - Bac 2022 - Exercice 2
- ▷ Sujet 13 - Bac 2022 - Exercice 5

Les corrigés sont disponibles [ici](#).