

Numérique et sciences informatiques

Lycée Hoche

année scolaire 2025-2026

Contents

1	Introduction	2
2	Les circuits, de leur genèse à l'intelligence artificielle embarquée	2
	2.1 les fondements	2
	2.2 Le premier microprocesseur : le 4004 d'Intel4	3
3	Vers l'intégration du système minimum	4
	3.1 Le microcontrôleur : l'intégration du système minimum	5
4	Vers l'intégration maximale d'un système on chip ou SOC	6
	4.1 Le SoC : « Système on Chip »	6
	4.2 Toujours plus loin dans l'intégration	7
	4.3 Des puces multi technologies : les systèmes embarqués au CEA1	7
	4.4 La logique programmable	7
5	questions-réponses	9

1 Introduction

Ce document s'intéresse aux « circuits intégrés ». Sous ce vocable se cache la réalité matérielle qui permet la mise en œuvre des algorithmes sur des machines, ou systèmes de traitements de l'information. Le sujet est vaste, technique, et surtout passionnant et toujours en pleine évolution. Il décrit quelques pistes pour en découvrir les principaux aspects.

Ce document illustre en particulier les points suivants :

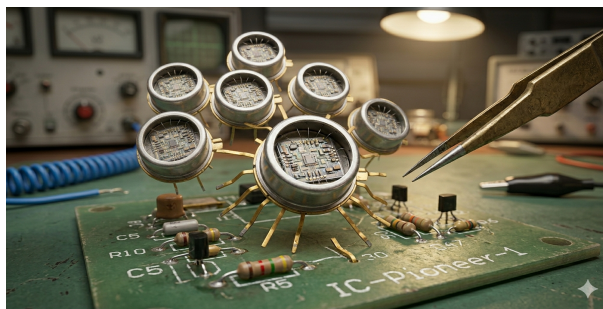
- la mise en évidence des grands axes de l'intégration des systèmes sur « puces » ;
- l'existence de nombreuses façons de résoudre un problème particulier allant de l'implantation matérielle sur silicium au programme exécuté par un microprocesseur en passant par une implantation en logique programmable ;
- les avantages et les inconvénients de chacune de ces technologies ou implémentations ;
- l'existence d'une dualité surface / vitesse ou espace / temps (si on veut calculer vite, on augmente alors la surface du circuit utilisé pour résoudre la fonction) ;
- l'existence d'une dualité hardware / software. En effet, pour résoudre un problème, tout n'est pas confié au programme principal ; au contraire, une répartition entre réalisation matérielle et réalisation logicielle est inévitable, ce qui pose la question de la frontière entre les deux ;
- la découverte au travers de la conception des circuits intégrés, numériques, des principes tels que diviser pour régner, qui s'impose également au plus bas niveau de la réalisation matérielle des circuits ou puces.

2 Les circuits, de leur genèse à l'intelligence artificielle embarquée

2.1 les fondements

Les premières cartes numériques

La numérisation de l'information, l'essor de la logique fondée sur une représentation avec deux états différents : vrai / faux, ouvert / fermé, oui / non, 1 / 0, ont tout d'abord été réalisés avec des systèmes électromécaniques puis avec des tubes électroniques ou « lampes ». Ces technologies ont été supplantées par l'invention du transistor à semi-conducteur en 1947, puis par l'implantation de quelques transistors dans un seul circuit appelé « intégré » en 1958.

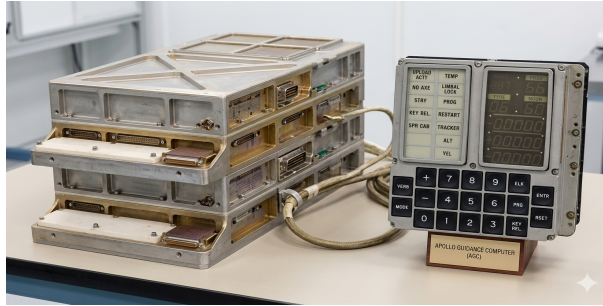


Ces premiers circuits, qui ne contiennent au départ que quelques portes logiques, sont assemblés ensemble sur des cartes électroniques pour réaliser des fonctions plus complexes et répondre aux besoins technologiques du moment. Au fur et à mesure des avancées technologiques, l'intégration est de plus en plus grande. Il apparaît alors des grandes lignes de circuits différents et complémentaires, à savoir :

- les circuits logiques combinatoires ou séquentiels ;
- les unités arithmétiques et logiques ou ALU ;
- les mémoires vives (volatiles) ou mortes (permanentes) ;
- les circuits analogiques.

Le calculateur AGC des missions Apollo1

Le calculateur de navigation du programme Apollo ou Apollo Guidance Computer : un calculateur complet réalisé uniquement avec des portes NOR à 3 entrées. Le programme Apollo a contribué à l'essor de l'informatique : le développement des programmes de navigation et de pilotage des vaisseaux Apollo voit apparaître la scission entre matériel et logiciel. Les méthodes de programmation et de test sont également en partie nées des exigences de fiabilité et de la complexité des logiciels développés pour le programme. Enfin, le projet lance l'utilisation des circuits intégrés, qui ont fait leur apparition en 1961. La NASA achète au début du programme 60 la production mondiale pour les besoins des ordinateurs des vaisseaux Apollo2.



Ce calculateur réalisé uniquement en circuits câblés démarre en 1ms ! La mémoire est réalisée en tores de ferrite entièrement connectées à la main par des ouvrières du textile.

Le système d'exploitation pouvait exécuter six tâches simultanément et gérer l'éjection de tâches moins prioritaires s'il était surchargé. L'AGC a été élaboré sous la supervision de l'équipe de Margaret Hamilton.

les portes logiques

Une étape de plus dans la course à la miniaturisation est visible dans l'intégration des UAL. L'UAL réalisée de manière « câblée », ici de manière définitive, est implantée directement dans le silicium de la puce. Ce circuit au cœur des calculs des cartes de commandes logiques réalise sur commande un panel d'opérations logiques ou arithmétiques. Nous retrouvons dans les cartes construites autour de ces UAL l'esprit de l'AGC vu plus haut, mais avec une intégration plus complète.

2.2 Le premier microprocesseur : le 4004 d'Intel4

Cinq années après l'exploit de la NASA, le premier microprocesseur apparaît créé par la société Intel.

Une brève description

Le 4004 d'Intel est le premier microprocesseur commercialisé, c'est-à-dire la première intégration réussie de toutes les fonctions d'un processeur sur un seul et unique circuit intégré.

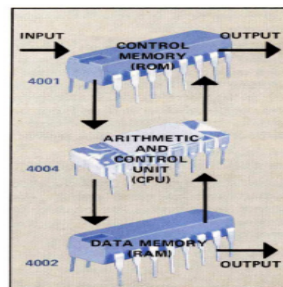


Il est d'abord produit en exclusivité pour l'industriel qui a commandité son développement, Busicom, en mars 1971. Après avoir fait lever la clause d'exclusivité, Intel annonce sa commercialisation le 15 novembre 1971.

La documentation technique de ce composant est disponible sans difficulté sur internet et peut être qualifiée d'historique. Son analyse offre beaucoup d'informations intéressantes.

Le sigle ROM signifie Read Only Memory. Cette mémoire ne peut pas être programmée par l'utilisateur. Il est donc impossible d'en fixer le contenu interne, donc d'y mettre son code programme. Celui-ci ne peut qu'être implanté au moment de la fabrication du circuit. La souplesse ne viendra qu'avec l'évolution des technologies.

Malgré une intégration plus grande, le 4004 ne peut fonctionner seul. Il est associé au minimum à un circuit contenant le programme en mémoire morte, le 4001 une ROM, et à un circuit assurant la mémoire vive pour stocker les données fugitives non permanentes ainsi qu'une interface vers d'autres éléments, le 4002.



Quelques éléments de ses performances

Le résumé de ses performances est indiqué dans la documentation technique. Citons :

- microprocesseur 4 bits ;
- un jeu de 45 instructions différentes ;
- calcul en binaire et en décimal ;
- additionne deux nombres de 8 chiffres en $850 \mu s$;
- un temps de cycle de $10,8 \mu s$.

Si nous comparons avec les éléments fournis dans la vidéo de présentation de l'AGC de la NASA, nous y trouvons que celui-ci réalise une addition en $22,7 \mu s$. En simplifiant, nous observons que la logique en opérateurs câblés est plus rapide qu'une logique microprogrammée.

C'est pourtant celle-là qui va s'imposer, pour plusieurs raisons : l'intégration toujours plus grande élargit à l'infini les possibilités du couple matériel / logiciel, les vitesses de calcul sont toujours de plus en plus grandes, avec cependant des problèmes d'échauffement toujours plus compliqués à gérer.

Mais, à technologies similaires, une logique spécialisée réalisée directement gravée sur une puce, ou bien dans des puces configurables présentées plus loin, est toujours beaucoup plus rapide qu'une logique à base du couple logiciel / matériel.

Les grandes parties constituantes des microprocesseurs

(voir programme de première)

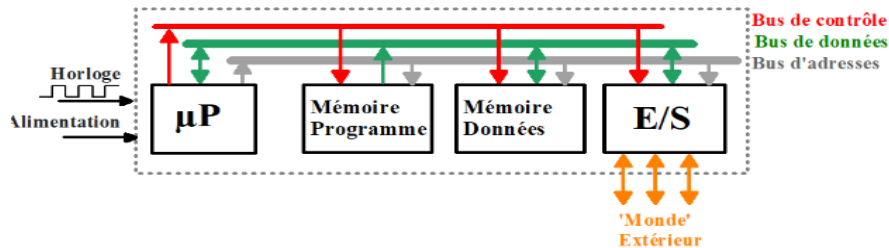
3 Vers l'intégration du système minimum

Aucun microprocesseur ne peut fonctionner seul. Ces circuits ne contiennent que quelques registres de mémoires en interne pour y stocker les résultats immédiats des calculs. De plus, ils ne possèdent aucun accès vers l'extérieur, mis à part l'accès à leur espace d'adresses mémoires.

Pour pouvoir fonctionner, cet espace d'adressage est rempli avec d'autres circuits : des mémoires vives pour les données fugitives et mortes (au sens de permanentes même après la mise hors tension du circuit) pour le programme, des gestionnaires de périphériques d'entrées sorties, des horloges, pour réaliser ce qu'on appelle un système minimum.

La mémoire de données et la mémoire de programme sont dans le même espace mémoire du microprocesseur. C'est l'architecture de Von Neumann. Le microprocesseur contrôle l'ensemble du fonctionnement et l'échange des informations en utilisant des liaisons appelées BUS.

- Le bus de contrôle : il contient tous les signaux nécessaires au fonctionnement des échanges entre les circuits.
- Le bus d'adresses : il permet au microprocesseur d'envoyer une adresse pour rechercher une information dans l'un des circuits connectés dans son espace mémoire. Cette information peut-être une micro-instruction de la mémoire programme, une donnée dans la mémoire de données ou bien une donnée du système de gestion des entrées sorties E/S.
- Le bus de données : il permet le transit de l'information entre le circuit adressé via le bus d'adresses et le microprocesseur.



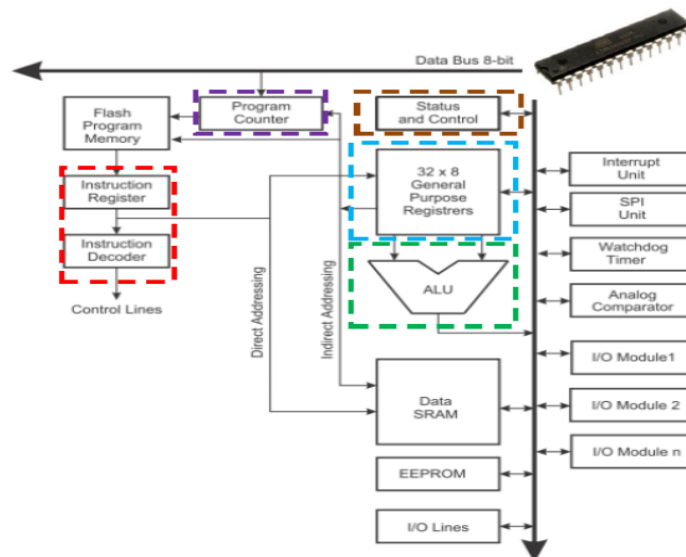
Ce système minimum, comme nous l'avons vu avec le processeur 4004, peut être réalisé en interconnectant plusieurs circuits sur une même carte. Les progrès de l'intégration permettent d'intégrer l'ensemble de ce système minimum sur une seule puce qui s'appelle un **microcontrôleur**.

3.1 Le microcontrôleur : l'intégration du système minimum

Le microcontrôleur est l'intégration du système minimum sur une seule puce, dans un seul circuit intégré. Les conséquences immédiates sont :

- la réduction de la taille des circuits imprimés sur lesquels sont interconnectés les différents composants d'un système ;
- la réduction des coûts de fabrication des cartes.

Un exemple : le block diagramme du microcontrôleur AVR ATMEGA328



Ce microcontrôleur 8 bits possède 32 registres 8 bits d'usage général, ce qui facilite la compilation des programmes écrits en langage C.

La plupart de ses instructions sont exécutées en un seul cycle d'horloge. Il possède une mémoire FLASH10 (EEPROM) pour le programme entre 4ko et 32ko11.

Une mémoire FLASH permet la sauvegarde de données utilisateur.

En reprenant le découpage fonctionnel du processeur 4004 (p.11), on voit bien toutes les parties intégrées supplémentaires dans ce microcontrôleur.

Résumé des caractéristiques

L'ATmega328 cœur de la carte Arduino Uno

- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 4/8/16/32K Bytes of In-System Self-Programmable Flash program memory (ATmega48P/88P/168P/328P)
 - 256/512/512/1K Bytes EEPROM (ATmega48P/88P/168P/328P)
 - 512/1K/1K/2K Bytes Internal SRAM (ATmega48P/88P/168P/328P)
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/100 years at 25°C⁽¹⁾
- High Performance, Low Power AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 131 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 20 MIPS Throughput at 20 MHz
 - On-chip 2-cycle Multiplier



Les familles des microcontrôleurs se développent intensivement, fondées sur leurs racines, les microprocesseurs. Les catalogues des fabricants s'enrichissent de multiples déclinaisons avec, dans chacune des familles, plus ou moins de mémoire, plus ou moins de périphériques intégrés...

Néanmoins, mis à part la gestion de l'alimentation et les convertisseurs analogiques- numériques et/ou numériques-analogiques parfois présents, ces puces restent de nature numérique. La prochaine évolution dans la ligne de l'intégration maximale est l'incorporation de multiples technologies toujours à l'intérieur d'une seule puce.

Concevoir sur une seule puce un circuit de gestion d'un téléphone mobile intégrant les aspects analogiques avec le traitement de la voix, le codage et le cryptage réalisés en numérique, la gestion de l'écran, mais également la liaison radio et l'accès au réseau GSM, ou bien un circuit de télé HD unique dans une télévision n'est plus impossible : ce sont les circuits SoC ou PSoC.

4 Vers l'intégration maximale d'un système on chip ou SOC

4.1 Le SoC : « Système on Chip »

Pour simplifier les coûts, les concepteurs de circuits électroniques recherchent en permanence l'intégration maximale. L'objectif est d'implanter toutes les fonctions d'un système sur une seule puce. La difficulté provient alors de la diversité des technologies qui doivent cohabiter, sans interférer les unes avec les autres, sur la même puce. Ces technologies peuvent être (liste non exhaustive) :

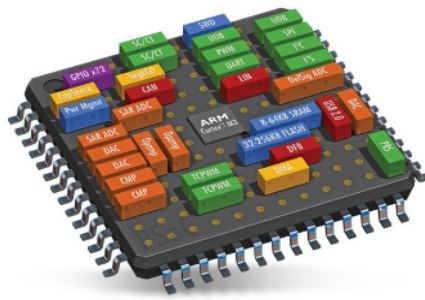
- des fonctions d'électronique analogique ;
- des fonctions d'électronique de puissance ;
- des fonctions de communication, d'accès aux réseaux, au Bluetooth ;
- accès à l'IoT Internet des Objets.

Ces systèmes se rencontrent dans l'informatique embarquée, embedded, c'est-à-dire dans les systèmes de traitement de l'information qui agissent en toute autonomie, enfouies à l'intérieur de nos objets du quotidien. La possibilité d'avoir une puce versatile dans tous les domaines diminue la taille des systèmes, augmente l'intégration des cartes ainsi que la fiabilité. Toutes les fonctions usuellement rencontrées dans ces circuits sont implantées autour d'un cœur 32-bit ARM Cortex-M3 et sont ainsi entièrement pilotables par le programme implanté sur la puce. Voici quelques fonctions parmi les centaines implantables :

- une commande directe d'afficheur LCD « customisée » sans circuits additionnels ;
- une détection d'appui sur un clavier statique fonctionnant par effet capacitif ;
- un bloc de filtrage numérique ;
- des ressources analogiques, convertisseurs CAN, CNA, comparateur de tensions ;
- des blocs de logiques programmables¹² permettant de configurer en « hardware » des fonctions

numériques additionnelles complexes ;

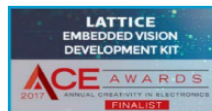
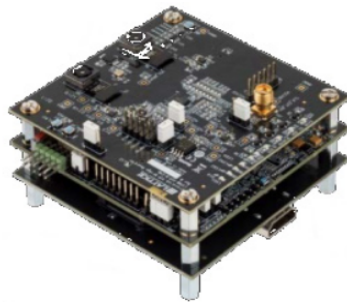
- une gestion avancée de l'alimentation fonctionnant entre 0,5V et 5V ;
- un routage complet en interne des broches d'entrées sorties



4.2 Toujours plus loin dans l'intégration

Intégrer des algorithmes d'intelligence artificielle

La tendance aujourd'hui consiste à réaliser les calculs au plus proche des capteurs. Des algorithmes comme les réseaux de neurones sont intégrés directement dans des puces programmables de type FPGA. Ces réseaux sont préalablement entraînés.



Key features

- ECP5 FPGA consuming under 1 W of power consumption
- Flexible video connectivity with support for MIPI CSI-2, eDP, HDMI, GigE Vision, USB 3.0, and more

4.3 Des puces multi technologies : les systèmes embarqués au CEA1

Les systèmes embarqués confèrent des fonctions « intelligentes » à de nombreux produits de notre quotidien : dispositifs mobiles, appareils ménagers, automobiles, stimulateurs cardiaques et caméras intelligentes...

Dans un avenir proche, ils devraient jouer un rôle de premier plan dans l'Internet des objets, afin de permettre à des milliards d'objets dans le monde de communiquer entre eux, sans fil, via Internet. Le défi consiste aujourd'hui à intégrer les systèmes embarqués dédiés sur une seule puce assurant la connectivité, le traitement des données, la gestion de la consommation d'énergie et la génération de signaux.

Pour relever ce défi, le CEA a créé la plateforme Conception et systèmes embarqués.

Avec ses 3000 m² de locaux, ses 280 collaborateurs et plusieurs dizaines de millions d'euros d'équipements en CAO, la plateforme Conception et systèmes embarqués n'a pas d'équivalent dans la recherche française. Elle propose à ses partenaires industriels (STMicroelectronics, EADS, Schneider Electric, Delphi, PME...) de réaliser des circuits intégrés spécifiques à forte valeur ajoutée : architecture en rupture, miniaturisation poussée, faible consommation, performances de haut niveau...

Les circuits intégrés sont étudiés sur place, des spécifications de départ aux tests finaux sur prototypes. Une trentaine de brevets est déposée chaque année pour protéger leur conception et leur fabrication.

<https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/nouvelles-technologies/conception-systemes-embarques.aspx>

4.4 La logique programmable

L'apport de la vitesse et d'une interprétation hardware

Les circuits de logique programmable permettent l'implantation d'algorithmes de toutes natures qui sont alors exécutés dans une « puce » dédiée. Ces algorithmes sont d'abord transformés en schémas

logiques par des analyses logicielles spécifiques à partir d'une description dans un langage de haut niveau. Le fonctionnement (traitement des informations) est alors semblable à celui d'une carte électronique (réalisée avec des portes et circuits logiques), et ne s'apparente plus à un fonctionnement programmé.

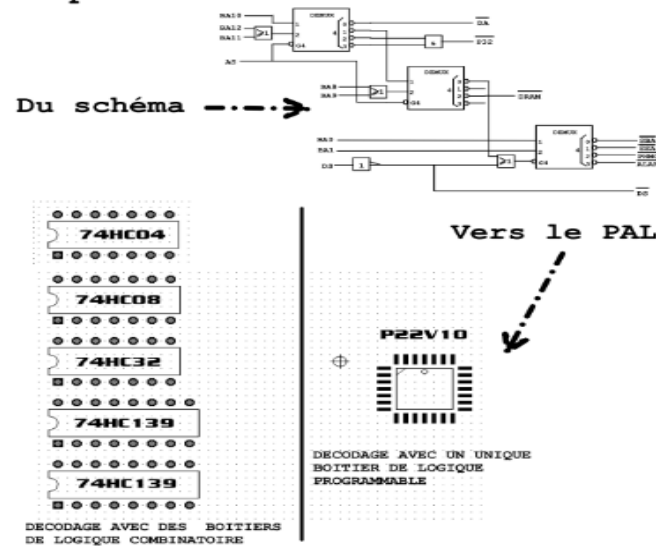
Cette approche a pour avantage la rapidité du calcul logique dans des circuits logiques interconnectés.

Une rapidité de conception, une rapidité de mise en œuvre

La logique programmable déclinée avec des circuits de différentes tailles permet de répondre rapidement à la conception d'un nouveau design. En effet, la réalisation d'un nouveau processeur par les fondeurs¹⁴ est un processus très lourd et très long. Ce processus est incompatible avec certains besoins du marché. De plus, elles peuvent être facilement reconfigurées pour s'adapter aux évolutions des besoins et contraintes du marché, le time to market.

Ces circuits de logique programmable sont de différentes natures et complexités. Pour en comprendre le fonctionnement, nous nous intéressons à des exemples simples illustrant les principes mis en œuvre, le passage à l'échelle étant une affaire de spécialiste.

Synthèse d'un schéma logique complexe :

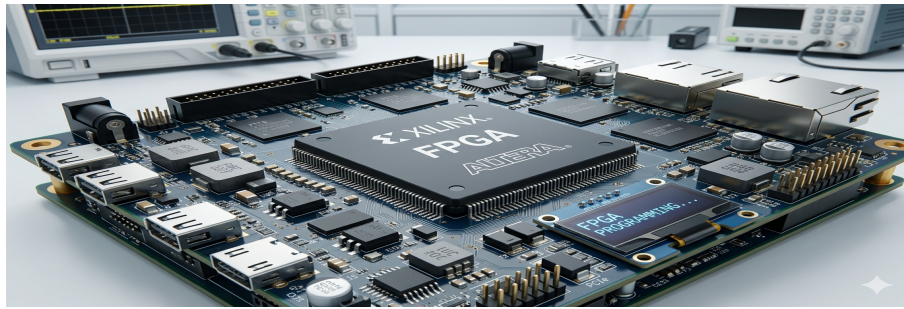


Rappelons simplement que le point d'entrée pour ce flux de conception est un programme décrivant l'ensemble du projet numérique à implanter, programme écrit à l'aide de langages dédiés de description hardware, VHDL ou VERILOG.

Ces langages proches dans leurs apparences du langage C par exemple sont d'un abord assez simple. Avec certains outils, c'est un schéma logique interconnectant des « boîtes » de haut niveau qui est directement saisi par l'utilisateur puis automatiquement interprété et implanté dans la puce cible.

Dans certains circuits, les PSoC de Cypress, les blocs de logique programmable sont très puissants et surtout très transparents pour l'utilisateur, qui peut ainsi augmenter les ressources numériques de son chip selon ses besoins (ressources réalisées matériellement donc très rapides, contrairement à des fonctions émulées par logiciel).

Les FPGA¹⁵, qui sont les plus gros circuits de logique programmable, permettent de synthétiser des cœurs de microprocesseurs. Nous avons vu plus haut dans ce document l'intégration de réseaux de neurones dans des circuits de ce type.



5 questions-réponses

1. À partir du site

<http://villemin.gerard.free.fr/Multimed/Gravure.htm>

répondre aux questions ci-dessous :

Combien de transistors sont intégrés dans les super-puces en 2017 ?

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 ?

Quel autre fabricant, concurrent de Samsung, investi dans une usine capable de graver en 5 nanomètres ?

2. *La famille core i9 d'Intel:*

<https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/products/processors/core/x-series/i9-10980xe.html>

À partir des informations données sur la page du constructeur Intel pour son microprocesseur de la famille i9, répondre aux questions ci-dessous : Quelle est la technologie de ce processeur ?

Donner la définition d'un cœur. Que représente la fréquence de base de 3.00 GHz ?

Que représente la PDT ?

Quelle est la relation entre la fréquence de base et le PDT ?

Quelle est la capacité mémoire maximum possible pour ce processeur ?

Évolution des technologies Par quel terme désigne-t-on un fabricant de circuits électroniques ?

Quelle finesse de gravure la société TSMC (Taiwan) prépare-t-elle dans sa nouvelle usine ?