

Conception de circuits numériques et architecture des ordinateurs

Frédéric Pétrot



Année universitaire 2022-2023

Organisation du module

Généralités

- Matière nouvelle sans prérequis
- Technologique
- Peu formelle par rapport à la prépa
- Clivante selon les retours des anciens

Module bimestriel

- Très dense : 10,5h/semaine à l'edt pendant 6 semaines!
- Apprentissage efficace si mobilisé
- Second bimestre : C, CEP (même U.E.)

Évaluation

- 1 examen papier (2/3)
- 1 examen de TP (1/3)

Organisation interne

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">■ CM<ul style="list-style-type: none">■ prérequis : aucun■ forme : vidéos à regarder et QCM pour valider les acquis■ contenu : présentation des concepts, exemples illustratifs simples■ Permanence ou <i>office hours</i><ul style="list-style-type: none">■ temps d'échange avec les profs■ TD<ul style="list-style-type: none">■ prérequis : CM + QCM■ forme : travail en îlots ou TD classique, corrections fournies■ contenu : exercices de préparation, exercices, exercices pour aller plus loin■ TP<ul style="list-style-type: none">■ prérequis : CM + TD + préparation des TP■ forme : utilisation de matériel <i>ad-hoc</i>, possible avec prise usb■ contenu : utilisation d'outils de CAO, conception effective de matériel | <p style="margin: 0;">lundi 8h15-11h15</p> <p style="margin: 0;">lundi 11h15-12h45</p> <p style="margin: 0;">mardi/mercredi 14h-17h</p> <p style="margin: 0;">vendredi 14-17h/jeudi 9h45-12h45</p> |
|---|--|

Attention au rythme

Engagement impératif pour ne pas décrocher

Vos enseignants

Sont des enseignants chercheurs ⇒ pas des profs de lycée/prépa!

50% de leur temps consacré à autre chose que l'enseignement

Point d'entrée du cours :

<https://chamilo.grenoble-inp.fr/courses/ENSIMAG3MMARCH9>

- TD/TP physiquement dans nos locaux (si le variant *omicron* nous lâche la bride)
- utilisation Element/Riot pour discussion lors et en dehors des horaires TD/TP
- joignables sur prenom.nom@univ-grenoble-alpes.fr en dernier recours

Informatique : programmes s'exécutant sur des ordinateurs ou assimilés

Pourquoi des ordinateurs ?

"I think there is a world market for maybe five computers."

Thomas Watson, president of IBM, 1943

"There is no reason anyone would want a computer in their home."

Ken Olsen, founder of Digital Equipment Corporation, 1977

Technologie actuelle des ordinateurs

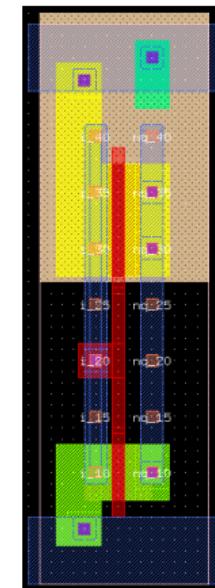
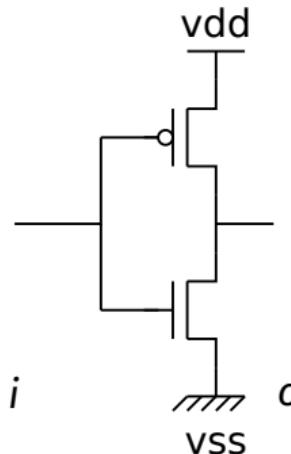
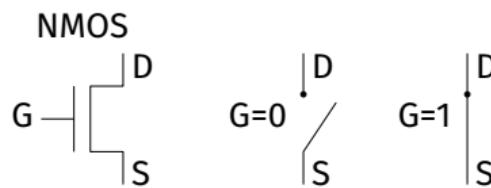
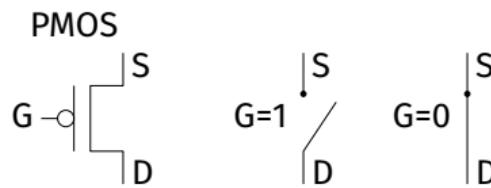
- construits à partir de composants électroniques faisant du calcul en *base deux*
chiffre binaire : {0, 1}
chiffre binaire = BIInary digIT = bit, peu élégant en français
chiffre binaire = CHIffre BinaiRE = chibre, pas mieux!^a
 - eux-mêmes construits à partir de transistors ayant un comportement d'interrupteur
 - eux-mêmes fabriqué à partir de silicium
- ⇒ une industrie construite sur du sable ... qui contrôle le monde

(c.f. http://www.universalis.fr/encyclopedie/C050038/CIRCUITS_INTEGRES.htm)

a. Copyright Florent de Dinechin, prof à l'INSA de Lyon.

Transistors MOS

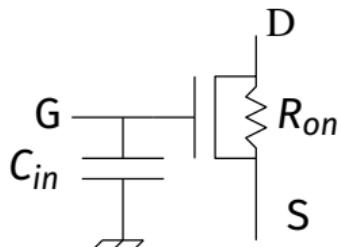
Schémas et masques utilisés pour la conception des circuits numériques :



Comportement électrique

Un transistor n'est hélas pas un interrupteur parfait!

Au second ordre :



- C_{in} : capacité de grille,
- R_{in} : résistance d'entrée $\sim \infty$
- R_{on} : résistance transistor fermé
- R_{off} : résistance ouvert $\sim \infty$
- causes de la non-instantanéité des transitions

Charge d'une capacité à travers une résistance :

$$V_{out} = V_{dd} \times (1 - e^{\frac{-t}{RC}})$$

Décharge d'une capacité à travers une résistance :

$$V_{out} = V_{dd} \times (e^{\frac{-t}{RC}})$$

CMOS : Complementary Metal Oxyde Semiconductor

Pourquoi le CMOS :

- transistors de dimensions très petites,
largeur minimal produite en masse pour la haute performance en 2020/2021 : 5 nm
 - TSMC – Apple A14/A15, Huawei Mate 40, HiSilicon Kirin 9000 – : 173 MTr/mm²
Apple M1 (16 Mrds de Trs) mesuré à 134 MTrs/mm² sur cette techno
 - Samsung – Exynos, Snapdragon 8xx, Nvidia Hopper – : 127 MTr/mm²
 - Intel arrive, ...
 - rayon atomique atome Si est ≈ 0.11 nm !
industrialisation du 3 nm prévue pour 2022 (TSMC) / 2023 (Samsung, Intel)
 - rendement de fabrication très élevé
 - évaluation de fonction simples en $\leq 10 \times 10^{-12}$ secondes
 - consommation $\leq 1 \times 10^{-15}$ joules / transition^a
 - nous permet de raisonner avec des zillions de 0 et de 1
- ⇒ CMOS : technologie numérique hyper-hégémonique

a. 1 joule est l'énergie fournie par une puissance de 1 watt pendant 1 seconde.

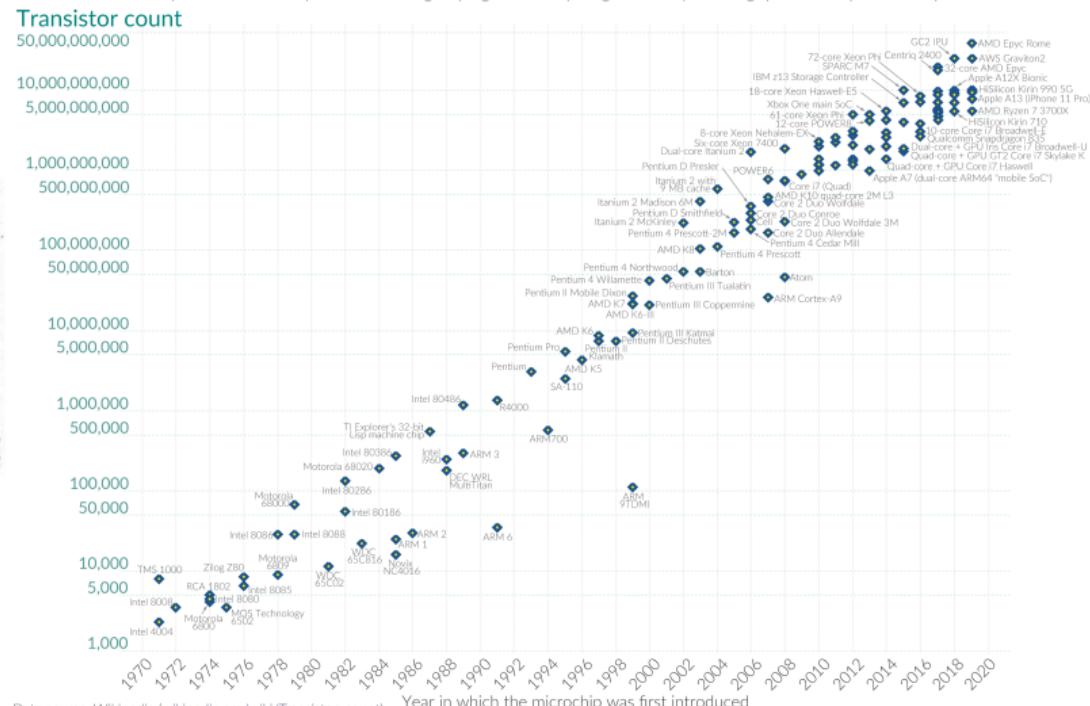
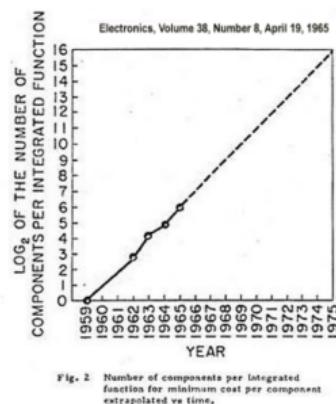
Loi de Moore : une prophétie auto-réalisatrice

« Le nombre de transistors intégrés sur une puce double tous les 18 mois »,
Gordon Moore, Intel, 1965

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Our World
in Data



Loi de Moore : une prophétie auto-réalisatrice

« Le nombre de transistors intégrés sur une puce double tous les 18 mois »,
Gordon Moore, Intel, 1965

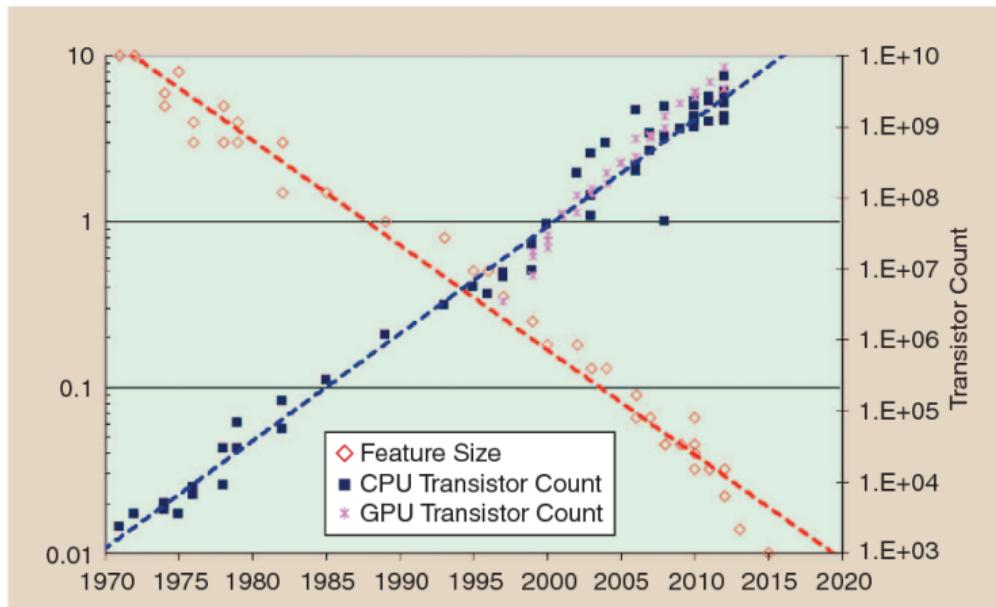
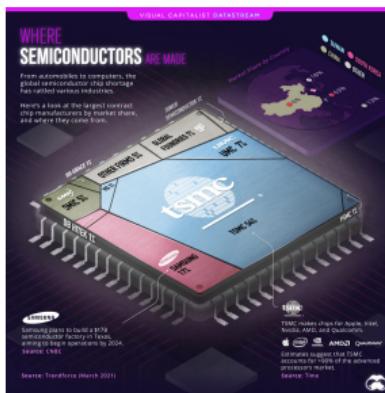


FIGURE 2. The silicon process technology trend showing the exponential growth in the CPU/

Importance du secteur



| 1Q21 Top 15 Semiconductor Sales Leaders (\$M, Including Foundries) | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|
| 1Q21 Rank | 1Q20 Rank | Company | Headquarters | 1Q20 | | 1Q20 | | 1Q21 | | 1Q21/1Q20 % Change |
| | | | | Total IC | |
| 1 | 3 | Intel | U.S. | 19,508* | 19,508* | 18,676 | 18,676 | 18,676 | 18,676 | -5% |
| 2 | 2 | Samsung | South Korea | 14,036 | 767 | 14,797 | 16,152 | 932 | 17,072 | +15% |
| 3 | 4 | TSMC (2) | Taiwan | 10,319 | | 10,311 | 12,911 | | 12,915 | +25% |
| 4 | 5 | SK Hynix | Korea | 5,048 | 210 | 6,040 | 6,040 | 305 | 6,345 | +5% |
| 5 | 6 | Micron | U.S. | 5,048 | | 4,004 | 5,480 | 5,580 | 5,580 | +1% |
| 6 | 7 | Qualcomm (2) | U.S. | 4,050 | | 4,050 | 6,281 | | 6,281 | +55% |
| 7 | 6 | Broadcom Inc. (2) | U.S. | 3,673 | 406 | 3,882 | 4,355 | 485 | 4,840 | +10% |
| 8 | 8 | NVIDIA (2) | U.S. | 3,170 | | 3,170 | 3,170 | | 3,170 | +0% |
| 9 | 8 | TI | U.S. | 2,974 | 190 | 3,164 | 3,793 | 235 | 4,028 | +7% |
| 10 | 16 | Mediatek (2) | Taiwan | 2,022 | | 2,022 | 3,849 | | 3,849 | +90% |
| 11 | 18 | AMD (2) | U.S. | 1,786 | | 1,786 | 3,445 | | 3,445 | +93% |
| 12 | 12 | Marvell | Europe | 1,570 | 875 | 1,570 | 1,570 | 1,003 | 1,570 | +100% |
| 13 | 10 | Qorvo | U.S. | 1,570 | | 1,570 | 2,770 | 3,080 | 3,080 | +100% |
| 14 | 14 | Apple* (2) | U.S. | 1,485 | 745 | 2,228 | 2,211 | 998 | 3,005 | +35% |
| 15 | 13 | Kioxia | Japan | 2,567 | | 2,567 | 2,585 | | 2,585 | +1% |

(1) Foundry (2) Fabless
Source: Company reports, IC Insights' Strategic Business database

*Custom processes/devices for internal use

Sources :

www.visualcapitalist.com/visualizing-the-global-semiconductor-supply-chain/
www.visualcapitalist.com/top-10-semiconductor-companies-by-market-share/
[www.bloomberg.com/news/articles/2021-04-08/
the-chip-industry-has-a-problem-with-its-giant-carbon-footprint](http://www.bloomberg.com/news/articles/2021-04-08/the-chip-industry-has-a-problem-with-its-giant-carbon-footprint)

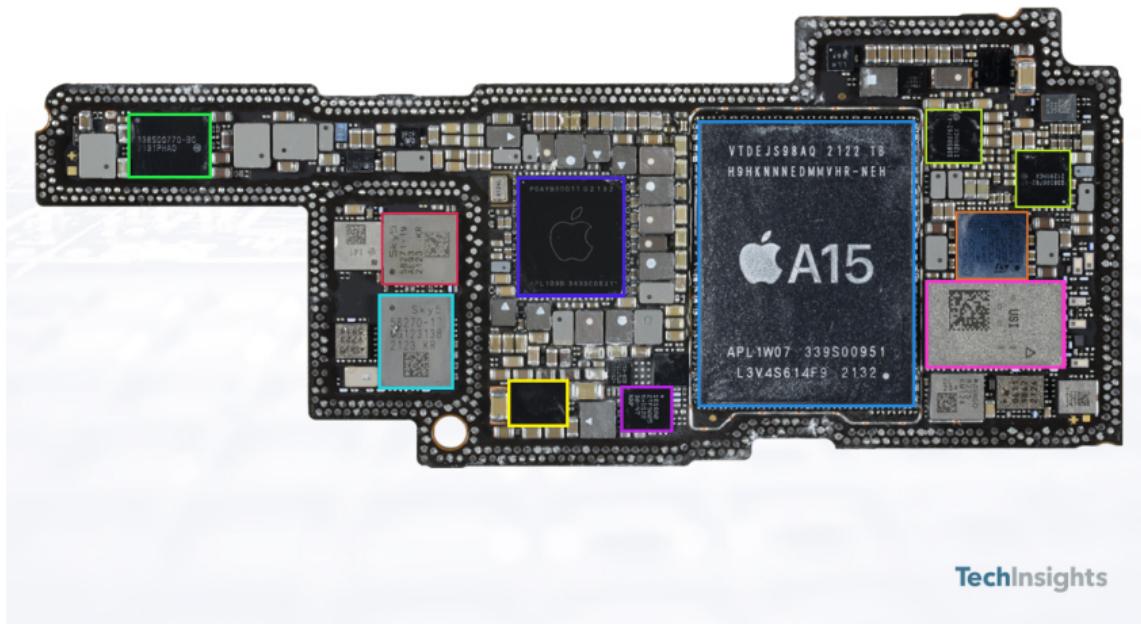
Ex : iPhone 13 Pro

Le produit : Q4 2021



Ex : iPhone 13 Pro

La carte électronique :



Ex : iPhone 13 Pro

Le SoC A15 (dévoilé le 14 septembre 2021)

silicium du circuit de calcul : 5nm, 107.7mm², ≈16 Milliards de transistors



semianalysis.com/

apple-a15-die-shot-and-annotation-ip-block-area-analysis/

6 cœurs ARMv8

- 2 cœurs haute performance
- 4 cœurs moins puissants, mais avec un meilleur ratio perf/watt

GPU à 5 cœurs

NPU à 16 cœurs

8 contrôleurs de DRAM externe

Ex : Processeur de PC

Intel Core-i9 à 16 cœurs par circuit intégré : ≈ 10 milliards transistors



À retenir

Pourquoi ces enseignements à l'Ensimag ?

Circuits numériques

- connaître les « briques » permettant de construire des machines programmables
 - pourquoi un ordinateur est-il relié à une prise ?
 - pourquoi ne va-t-il pas infiniment vite ?
- comprendre la « raison » derrière beaucoup de choses en informatique !
 - utilisation systématique du binaire, taille et représentation des nombres,
 - taille des mémoires/disques, complexité des calculs en 2^n ou $\log_2 n$, ...

Architecture des ordinateurs

- connaître la manière dont est structuré un ordinateur
- comprendre comment un ordinateur peut exécuter des programmes « pour de vrai »
- comprendre comment le logiciel peut exploiter au mieux le matériel