

Consommation énergétique des calculateurs numériques : technologies d'implantation et architectures matérielles

Frédéric Pétrot



Année universitaire 2022-2023

Calcul

$x + y, x \times y, \frac{x}{y}, \sqrt[n]{x}, \sin(x), \int_{-\infty}^{\infty} \dots dx, \dots$

Séquencement

- ordre d'exécution des calculs
- récupération des données d'entrée et production de données de sortie
- mémorisations intermédiaires

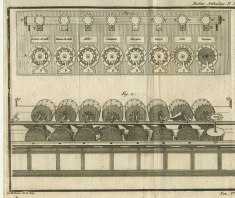
Abaque : outil servant à faire du calcul

- boulier : XIII^{ème} siècle



DocteurCosmos — Travail personnel, CC BY 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3885764>

- Pascaline : XVII^{ème} siècle



Œuvres de Blaise Pascal, Chez Detune, La Haye

Séquencement des calculs

- métier à tisser : XVIIIème siècle



Métier à tisser de Basile Bouchon, Musée des Arts et Métiers.

Utilisation de cartes perforées pour définir les motifs tissés, activation manuelle ou pédestre

- Zuse 3 : XXème siècle



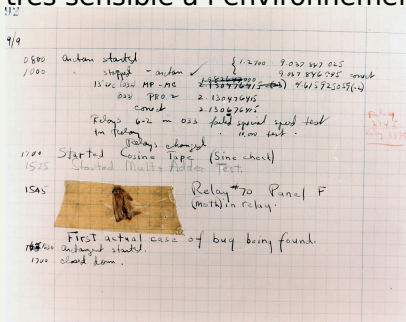
Réplique du Zuse 3 au Deutsches Museum de Munich.

2600 relais, 5 à 10 Hz, 1 tonne, 4 kW, *Turing complete*

Brève histoire du calcul automatisé III

Limitations

- dextérité de l'utilisateur : fréquence $\ll 10$ Hz
- fatigue des matériaux : plasticité imparfaite
usure à l'usage, par ex. 50 k commutations pour relais électro-mécaniques
très sensible à l'environnement



- énergie énorme pour déplacer les « éléments »

Brève histoire du calcul automatisé IV

Caractéristiques des premiers ordinateurs des années 1940

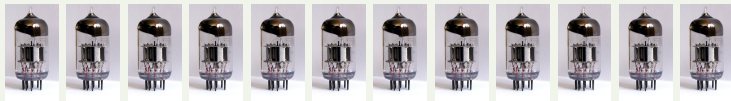
Nom	Pays	Lancement	Système de nombres	Mécanique	Programmation	Turing-complet
Zuse Z3	Allemagne	Mai 1941	Binaire virgule flottante	Électromécanique	Programmation à base de rubans perforés	Oui
Atanasoff-Berry Computer	États-Unis	1942	Binaire	Électronique	Non programmable	Non
Colossus Mark 1	Royaume-Uni	Février 1944	Binaire	Électronique	Programmation à base de câblage et de commutateurs	Non
Harvard Mark I - IBM ASCC	États-Unis	Mai 1944	Décimal	Électromécanique	Programmation à base de rubans perforés	Non
Colossus Mark 2	Royaume-Uni	Juin 1944	Binaire	Électronique	Programmation à base de câblages et de commutateurs	Non
Zuse Z4	Allemagne	Mars 1945	Binaire virgule flottante	Électromécanique	Programmation à base de rubans perforés	Oui
ENIAC	États-Unis	Juillet 1946	Décimal	Électronique	Programmation à base de câblages et de commutateurs	Oui
Small-Scale Experimental Machine (Baby)	Royaume-Uni	Juin 1948	Binaire	Électronique	Programme stocké dans un tube de Williams	Oui
Modified ENIAC	États-Unis	Septembre 1948	Décimal	Électronique	Programmation à base de câblages et de commutateurs et d'un système primitif de ROM	Oui
EDSAC	Royaume-Uni	Mai 1949	Binaire	Électronique	Programme stocké dans une mémoire à ligne de délai	Oui
Manchester Mark I	Royaume-Uni	Octobre 1949	Binaire	Électronique	Programme stocké dans un tube de Williams et dans un tambour magnétique	Oui
CSIRAC	Australie	Novembre 1949	Binaire	Électronique	Programme stocké dans une mémoire à ligne de délai	Oui

Ordinateurs des années 40 (source Wikipedia)

Tubes à vide

ENIAC : 18.000 tubes

Problèmes : taille, poids, mise en route, tension d'alimentation ($> 100\text{ V}$),
consommation, fiabilité



Transistor bipolaire

Transistor (*transfer resistor*)

Semi-conducteur inventé en 1947

Prix Nobel à Bardeen, Shockley et Brattain en 1956

Radio en 1954

Ordinateurs en 1957

Circuit intégré en 1958

Propriétés \Rightarrow petit, léger, fiable, mise en route quasi instantanée, faible tension d'alim (≈ 10 V)

fonctionnement polarisé \Rightarrow consommation relativement élevée



Transistor MOS

Inventé en 1959 (Atalla and Kahng) : Metal Oxyde Semiconductor

2 types : NMOS et PMOS, grille 20 μm en 59, 10 μm en 1960

Intérêts :

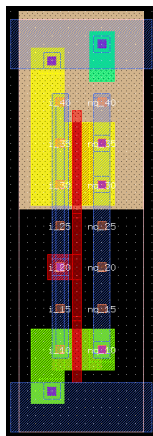
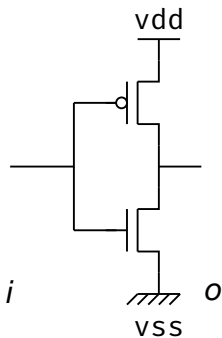
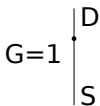
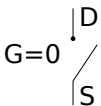
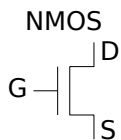
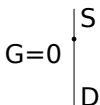
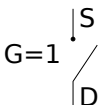
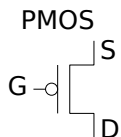
- facilité d'intégration (circuits « intégrés ») \Rightarrow beaucoup sur un chip
- logique complémentaire NP \Rightarrow pas de consommation statique
- (en revanche plus lent que le bipolaire à l'époque)
- fonctionnement comme interrupteur permet d'implanter efficacement les fonctions booléennes

Le Graal pour le concepteur de systèmes numériques !

Premiers usages sur batterie dès les années 70 : calculatrices, montres

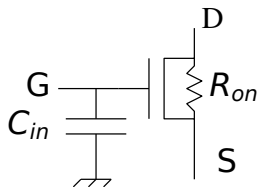
Transistors N/P MOS et logique complémentaire

Schémas et masques utilisés pour la conception des circuits numériques :



Un transistor n'est hélas pas un interrupteur parfait !

Au second ordre :



- C_{in} : capacité de grille,
 R_{in} : résistance d'entrée $\rightsquigarrow \infty$
- R_{on} : résistance transistor fermé
 R_{off} : résistance ouvert $\rightsquigarrow \infty$
- 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 :

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

Puissance consommée

$$\begin{aligned}P &= P_{\text{statique}} + P_{\text{dynamique}} \\P_{\text{statique}} &= V \times I_{\text{fuites}} \\P_{\text{dynamique}} &= \alpha C \times V^2 \times f\end{aligned}$$

Technos anciennes ($> 65 \text{ nm}$) $P_{\text{statique}} \approx 0$

Technos avancées ($< 10 \text{ nm}$) $P_{\text{statique}} \approx P_{\text{dynamique}}$

Réduire la conso dynamique :

- réduire $V \Rightarrow$ technologue
- réduire $f \Rightarrow$ architecte/système d'exploitation
- réduire $\alpha \Rightarrow$ architecte/programmeur

f dépend de $V \Rightarrow$ plus V est élevé, plus f peut l'être

Puissance : métrique instantanée

Puissance mesurée en Watt :

« En mécanique, le watt est la puissance développée par une force de 1 newton se déplaçant sur une distance de 1 mètre pendant 1 seconde. »

« En électricité, le watt est l'unité de puissance d'un système débitant ou absorbant une intensité de 1 ampère sous une tension de 1 volt. »

Énergie

$$E = \int_0^t P(t)dt$$

Énergie en Joules (ou KWh pour la production)

Intégration de la puissance (instantanée) sur un temps donné \Rightarrow

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

CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor

Pourquoi le CMOS :

- transistors de dimensions très petites, largeur minimale produite en masse pour la haute performance en 2022/2023 : 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, ..., 7 nm industrialisé

rayon atomique atome Si est ≈ 0.11 nm !

début industrialisation du 3 nm en 2022 (TSMC) / 2023 (Samsung)

- rendement de fabrication très élevé
- évaluation de fonction simples en $\leq 10 \times 10^{-12}$ secondes
- consommation $\leq 1 \times 10^{-15}$ joules / transition
- nous permet de raisonner avec des zillions de 0 et de 1

⇒ CMOS : technologie numérique hyper-hégémonique

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."

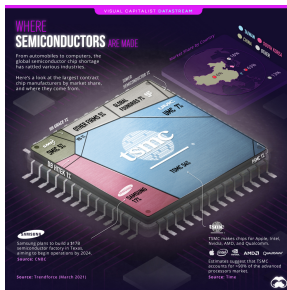
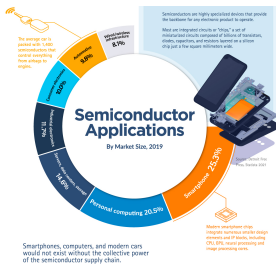
Ken Olsen, founder of Digital Equipment Corporation, 1977

Technologie actuelle des ordinateurs

- construits à partir de composants électroniques faisant du calcul en base *deux*
chiffre binaire : $\{0, 1\}$
chiffre binaire = Binary digIT = bit, peu élégant en français
 - 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)

Importance du secteur



Top Semiconductor Companies' Revenue					
Change versus prior quarter in local currency					
Rank	Company	\$Billion 2Q22	Reported 2Q22	Guidance 3Q22	Comments on 3Q22 revenue
1	Samsung SC	22.6	6.1%	n/a	PC & mobile demand weak
2	Intel	15.3	-16.5%	1.2%	PC market weak
3	SK Hynix	11.0	13.6%	n/a	PC & smartphone declining
4	Qualcomm (IC)	9.4	-1.8%	4.5%	reduced handset demand
5	Micron	8.6	11.0%	-21%	lower demand for PC & smartphone
6	Broadcom	8.5	4.5%	5.2%	growth in data centers
7	Nvidia	6.7	-19%	-12%	decline in gaming
8	AMD	6.6	11.3%*	2.3%	data center up, PC down
9	MediaTek	5.3	9.1%	-5.0%	smartphone demand down
10	TI	5.2	6.4%	-2.3%	weak personal electronics demand
11	Infinion	3.9	9.7%	7.8%	growth in industrial power control
12	STMicro	3.8	8.2%	10.5%	growth in automotive & industrial
13	NXP	3.3	5.6%	3.4%	growth in automotive & industrial
14	Analog Devices	3.1	4.6%	1.3%	growth in automotive & industrial
15	Kioxia	2.8	-6.7%	n/a	weak demand in PC & smartphone
Total of above			-1%		
Memory Cos. (US\$)			3%	n/a	Samsung, SK Hynix, Micron, Kioxia
Non-Memory Cos.			-3%	1%	

* 2Q22 growth due to Xilinx acquisition

Sources :

www.visualcapitalist.com/visualizing-the-global-semiconductor-supply-chain/

www.semiconductorintelligence.com/semiconductor-boom-in-2021

4ème type de bien le plus échangé dans le monde ! †

†. Après le pétrole brut, les pièces auto, et le pétrole raffiné.

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

Transistor count

50,000,000,000

10,000,000,000

5,000,000,000

1,000,000,000

500,000,000

100,000,000

50,000,000

10,000,000

5,000,000

1,000,000

500,000

100,000

50,000

10,000

5,000

1,000

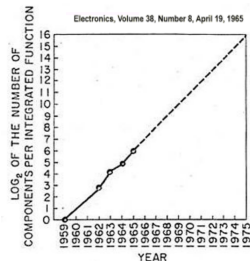
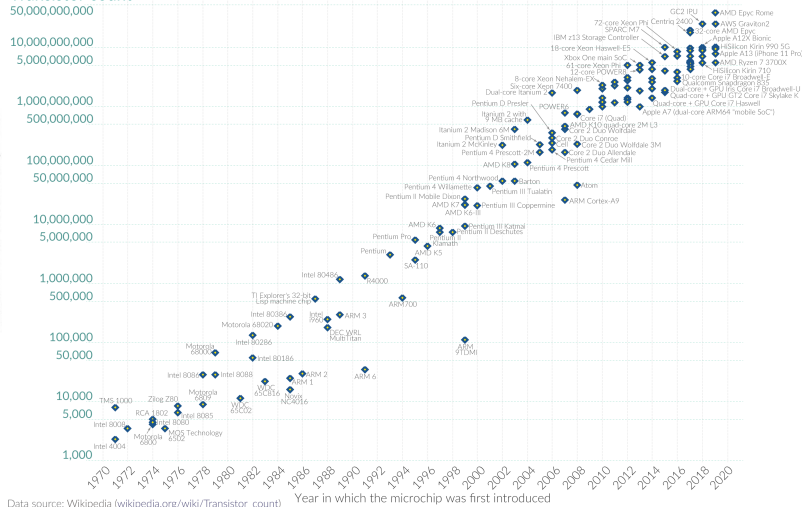


Fig. 2 Number of components per integrated function for minimum cost per component extrapolated vs time.



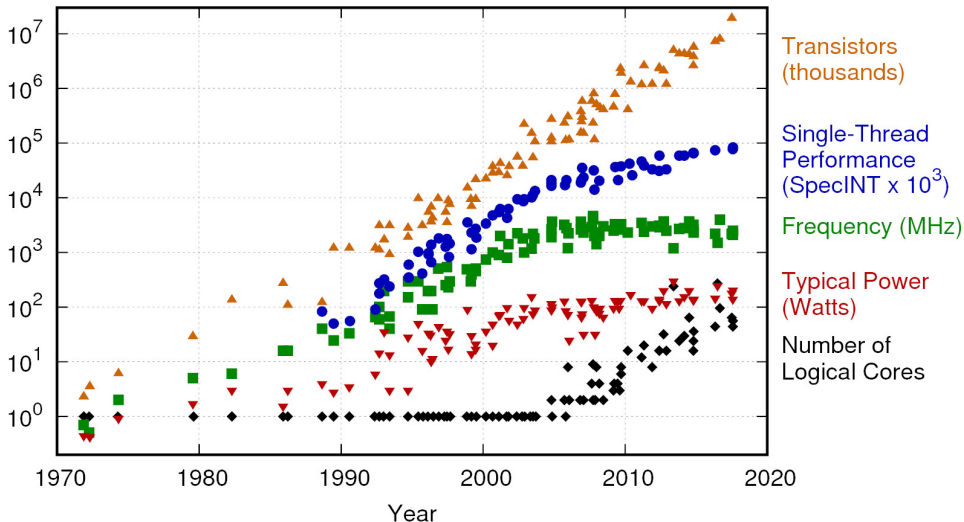
Data source: [Wikipedia \(wikipedia.org/wiki/Transistor_count\)](https://www.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser

Loi de Moore : une prophétie auto-réalisatrice

42 Years of Microprocessor Trend Data



Original data up to the year 2010 collected and plotted by M. Horowitz, F. Labonte, O. Shacham, K. Olukotun, L. Hammond, and C. Batten
New plot and data collected for 2010-2017 by K. Rupp

Processeur de PC, à usage général

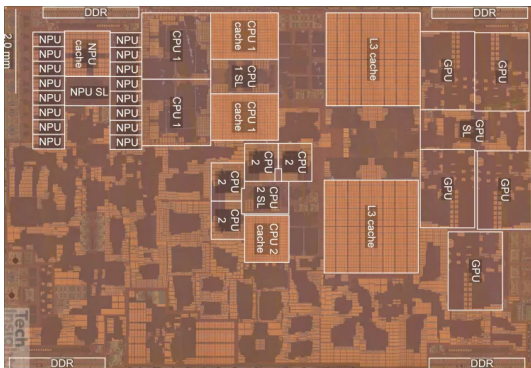
Intel Core-i9 à 16 cœurs par circuit intégré : ≈10 milliards transistors



Puissance consommée : 125 W base, 253 W turbo

SoC de téléphone portable, à usage spécifique ... ou pas !

Le SoC A15 (dévoilé le 14 septembre 2021)
silicium du circuit de calcul : 5nm, 107.7mm², ≈16 Milliards de transistors



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

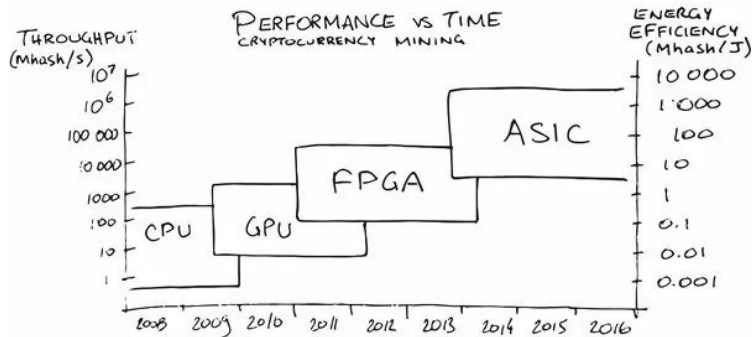
8 contrôleurs de DRAM externe
Entre 3 W et 7 W suivant les workloads

semianalysis.com/

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

Différences technologiques I

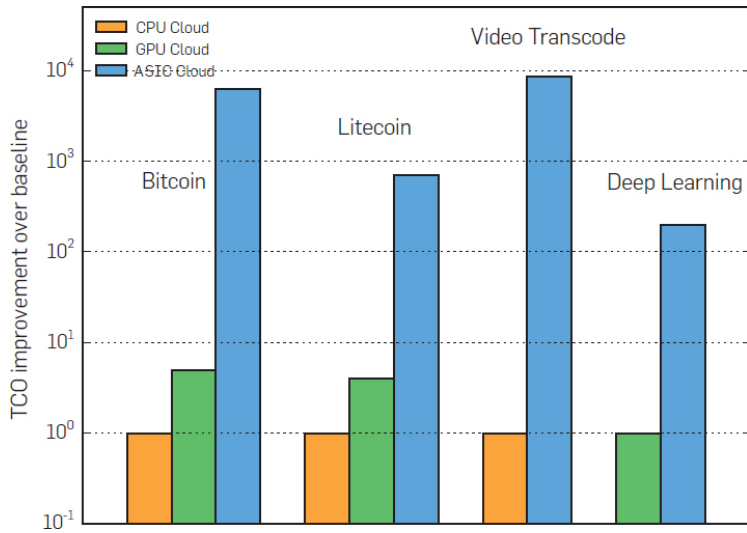
ASIC vs FPGA vs ASIP vs GPP (source : bitcoinwiki.org)



« As of August 2022, published estimates of the total global electricity usage for crypto-assets are between 120 and 240 billion kilowatt-hours per year, a range that exceeds the total annual electricity usage of many individual countries, such as Argentina or Australia. » (source : [whitehouse.gov](https://www.whitehouse.gov))

À présent il faut lancer le mining sur les machines des autres pour que ce soit rentable, ...

Différences technologiques II



(source : ASIC Clouds : Specializing the Datacenter for Planet-Scale Applications, Taylor et al., Communications of the ACM, 2020)

La clef est la spécialisation du hardware !

⇒ calcul numérique : unités de calcul flottant (FPU)

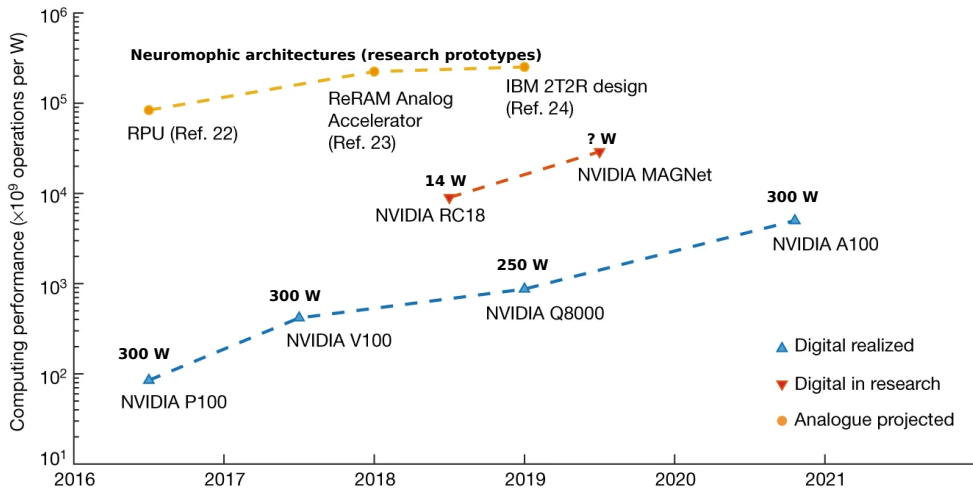
⇒ flux audio/vidéo sur mobile et desktop : codec audio/video (MPEG, H26x)

⇒ réseaux de neurones : multiplication de matrices (GEMM), calcul tensoriel (GEMM)

⇒ « petits » et « gros » processeurs côte à côte (big.LITTLE de ARM par ex.)

Exemple GPU pour ML

b Hardware development



Mehonic, A., Kenyon, A.J. Brain-inspired computing needs a master plan. Nature 604, 255-260 (2022).

<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04362-w>

Entraînement sur gros NN

NVidia MegatronLM

- utilisation de 45 Teraoctets de données
- sur 512 V100 NVIDIA GPUs pendant 9 jours
- $512 \times 300 \times 9 \times 24 = 33177$ kWh
7× l'énergie dépensée par une famille française en moyenne sur l'année !
(4590 kWh)

Carbon Emissions and Large Neural Network Training, David Patterson et al,
<https://arxiv.org/pdf/2104.10350.pdf>

Types de données

Virgule flottante

- IEEE 754 binary32, binary64, même binary128
- facile d'utilisation pour le programmeur, quoi que, ...^a
- matériel très très complexe

a. What every computer scientist should know about floating-point arithmetic, D Goldberg - ACM computing surveys, 1991.

Virgule fixe

- entiers
- matériel usuel + décalages
- prise de tête pour l'algorithmicien
doit définir la dynamique et la précision de ses calculs
mais faisable en pratique pour de nombreuses applications
par ex. traitement du signal et de l'image
- très utilisé en circuit/processeur spécialisé
- ignoré de la majorité des programmeurs, ...

La suite dans l'autre prez et au tableau !