

# Une (très) brève histoire du calcul du point de vue de la consommation énergétique

Jean-Michel Muller,  
CNRS, Laboratoire LIP  
Journée Calcul Sobre, Grenoble, 10 juin 2025



# On a toujours voulu moins consommer, mais pas toujours pour la même raison. . .

## ▶ Lampes à vide (→ 1960):

- très grosses machines, dégageant beaucoup de chaleur (comme nos modernes datacenters);
- la chaleur rend les **lampes très peu fiables**;
- Par contre: énergie pas chère. Et il y a tellement peu de machines:

*Thomas J. Watson, président d'IBM (1943): I think there is a world market for maybe 5 computers*

- ▶ microprocesseurs: réduction de la dimension des circuits → besoin de réduire la consommation des transistors sinon la **densité d'énergie par unité de surface** (voire de volume) explose;
- ▶ **autonomie** des dispositifs mobiles;
- ▶ **nos datacenters**: coût énergétique, forte chaleur à évacuer, impact environnemental. . .

# Calcul mental, mécanique?

Cerveau  $\approx$  23 watts, soit 20% de la puissance consommée par un corps humain.



Une addition = 230 Joules  
( $\rightarrow$  une carotte de 125g = 735 additions)

# Calcul mental, mécanique?



- ▶ Consommation ?
- ▶ La dépense énergétique vient des frottements qui dissipent l'énergie en chaleur (**irréversible**);
- ▶ S'il n'y avait absolument pas de frottement, ne fonctionnerait pas ?

# Les grandes étapes

- ▶ calcul électromécanique (Zuse Z3, Harvard Mark 1) 1940 → 1945: machines **très lentes et très fiables, peu gourmandes en énergie**;
- ▶ l'époque des lampes à vide 1945 → 1960 — une révolution, mais des **machines énormes et peu fiables**;
- ▶ les machines à transistors 1955 → 1970;
- ▶ les circuits intégrés, puis les microprocesseurs (Intel 4004: 1971);
- ▶ l'ordinateur personnel 1980 → ...;
- ▶ les dispositifs mobiles 2000 → ...
- ▶ l'ère des Data Centers.

# Le Z3 de Konrad Zuse (1941): relais électro-mécaniques



- ▶ relais électromécaniques;
- ▶ Turing-complet;
- ▶ virgule flottante de grande qualité;
- ▶ 1 tonne;
- ▶ 0.8 secondes/addition;
- ▶ 4000 Watts (deux fours électriques).

Une addition = 3200 Joules (une carotte = 53 additions)... nettement moins bien que le cerveau humain!

## Quelques autres réalisations de Zuse

- ▶ premier langage de «haut niveau»: le **Plankalkül** (1942–1946). (l'université libre de Berlin a écrit un compilateur en 2000);
- ▶ **Calculateurs S1 et S2**: aérodynamique de bombes à guidage (précurseurs des V1). Probablement récupérés par l'URSS en 1945 (→ 1ers missiles russes?);
- ▶ un des premiers à s'intéresser aux automates cellulaires;
- ▶ livre *Rechnender Raum* (l'espace informatique): un des premiers à formuler l'hypothèse que la réalité physique n'est qu'un vaste calcul.

```
P1 max3 (V0[:8.0], V1[:8.0], V2[:8.0]) => R0[:8.0]
max(V0[:8.0], V1[:8.0]) => Z1[:8.0]
max(Z1[:8.0], V2[:8.0]) => R0[:8.0]
END
P2 max (V0[:8.0], V1[:8.0]) => R0[:8.0]
V0[:8.0] => Z1[:8.0]
(Z1[:8.0] < V1[:8.0]) ? V1[:8.0] => Z1[:8.0]
Z1[:8.0] => R0[:8.0]
END
```



## Zuse était aussi un peintre



(bon... un peu kitsch quand même...)

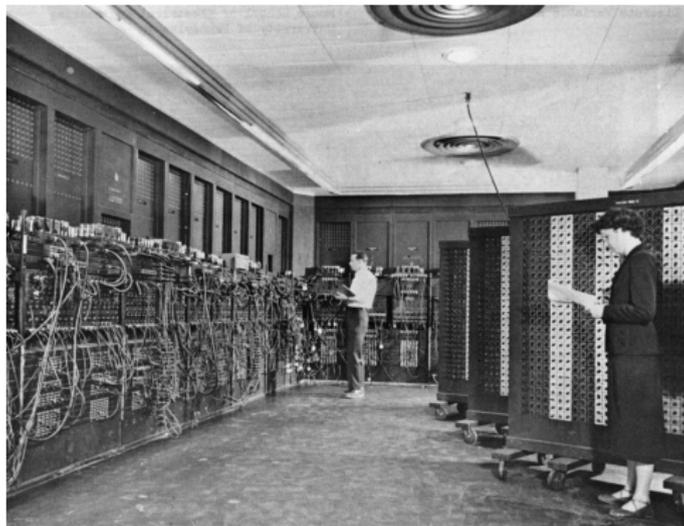
# Le Harvard Mark-1 (IBM, 1941)



- ▶ électromécanique;
- ▶ plus fiable que les premiers calculateurs électroniques;
- ▶ pas de sauts conditionnels;
- ▶ 4.5 tonnes;
- ▶ moteur électrique de 4000 W;
- ▶ addition: 0.3s;
- ▶ multiplication: 6s.

Une addition = 1200 Joules: 5 fois moins bien que le cerveau humain.

# Eniac (1945): électronique à tubes à vide



## Un monstre:

- ▶ 30 tonnes
- ▶ 5000 additions/sec., 330 multiplications/sec;
- ▶ consommation électrique 150kW;  
(habitation américaine moyenne: 1.2kW)

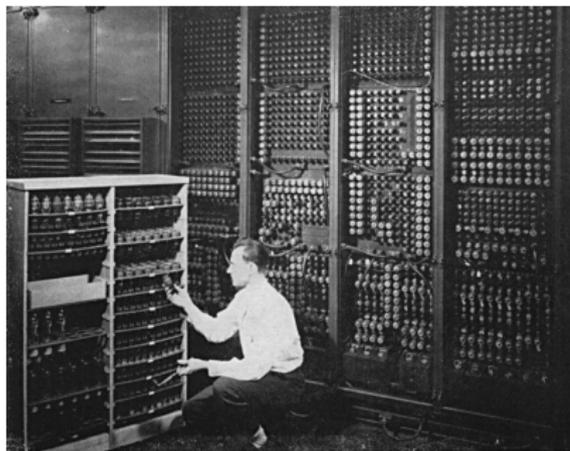
→ un village.

À sa mise en service: **general blackout** dans le quartier ouest de Philadelphie!

Une addition = 30 Joules... l'homme est battu!

(une carotte = 5600 additions: 7.6 fois mieux que l'humain)

# Changement d'un tube dans l'ENIAC



Replacing a bad tube meant checking among ENIAC's 19,000 possibilities.

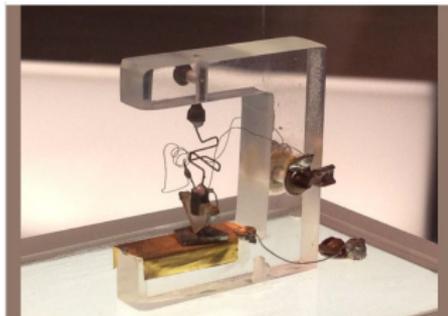


- ▶ tubes très sensibles à la chaleur;
- ▶ panne fréquente: un des 18000 tubes grille;
- ▶ MTBF: quelques heures au début.

# 1947: invention du transistor

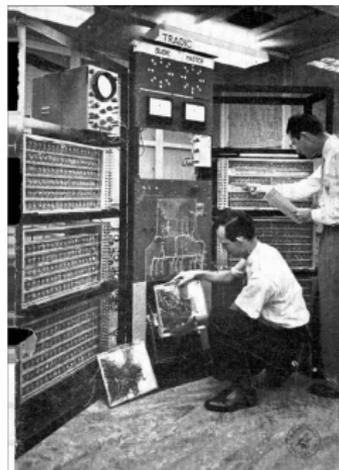
Par rapport aux tubes à vide:

- ▶ taille et poids réduits;
- ▶ plus faible consommation d'énergie;
- ▶ meilleure fiabilité et plus grande durée de vie
- ▶ coût de fabrication inférieur;
- ▶ vitesse de commutation plus élevée;
- ▶ un peu plus tard: intégration facile sur une puce de silicium.



# TRADIC – TRAnsistor DIgital Computer (1954)

- ▶ premier ordinateur entièrement à transistors;
- ▶ Laboratoires BELL, demande de l'US Air Force (but: calculateur embarqué dans des avions);
- ▶ **considérablement plus fiable que les machines à lampes;**
- ▶ **moins de 100W;**
- ▶ 700 transistors, 2000 diodes;
- ▶ 62500 additions/sec.
- ▶ 3000 multiplications/sec.



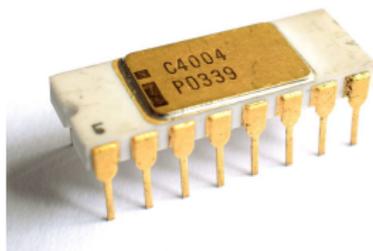
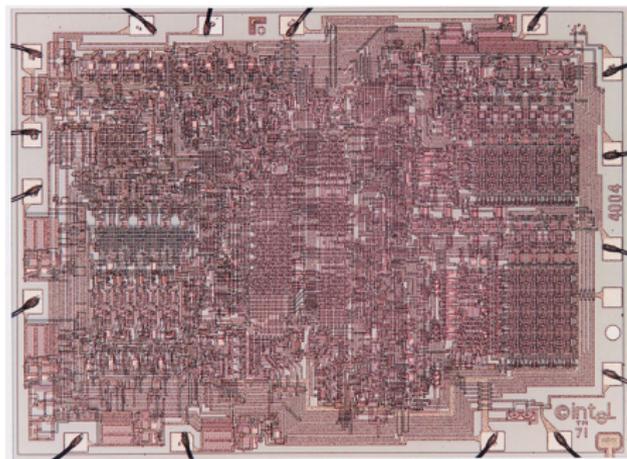
**Une addition =  $1.6 \times 10^{-3}$  Joules:** 18000 fois mieux que l'ENIAC.

# IBM 360/91 (1968)



- ▶ consommation: 74kW
- ▶ une addition =  $8.9 \times 10^{-3}$  Joules;
- 3400 fois mieux que l'Eniac;
- ▶ une carotte =  $1.8 \times 10^7$  additions
- 26000 fois mieux que l'humain.

# Une nouvelle ère: l'Intel 4004 (1971)



- ▶ 2300 transistors, quelques grammes;
- ▶ \$60;
- ▶ 0.5 W;
- l'informatique va commencer à devenir ubiquitaire;
- ▶ une addition (32 bits):  $4.16 \times 10^{-4}$  Joules  
presque 10 fois mieux que l'IBM 360/91.

# À peu près au même moment (en 1972)...

- ▶ **Cray 1:** 160 MFlops, 115 kW.  
(une addition =  $7.2 \times 10^{-7}$  Joules, soit 42 millions de fois mieux que l'Eniac)



- ▶ **La HP35 tue la règle à calcul.**  
(petit bug au départ:  $2.02 \ln e^x \rightarrow 2$ )

Début en douceur de la période "on a tous un dispositif de calcul dans la poche".



# Avec les circuits intégrés on entre dans la période des “lois d'échelle”

- ▶ loi de Moore (1965 puis 1975): le nombre de transistors des microprocesseurs double tous les deux ans;
- ▶ loi de Dennard: la consommation par unité de surface reste constante;
- loi de Koomey sur le nombre de calculs par unité d'énergie (voir + loin).
  
- ▶ dispositifs embarqués, puis laptops, puis... → mise en place de **stratégies pour consommer moins**:
  - ajustement dynamique de la fréquence, de la tension;
  - optimisation du jeu d'instruction (jeu réduit en général plus avantageux);
  - caches qui évitent d'aller chercher des données en mémoire sur une autre puce (même sans chercher la vitesse);
  - power gating: couper l'alimentation des parties inoccupées dans le processeur;
  - différents niveaux d'états de veille
  - ...

# Loi de Koomey (2010)

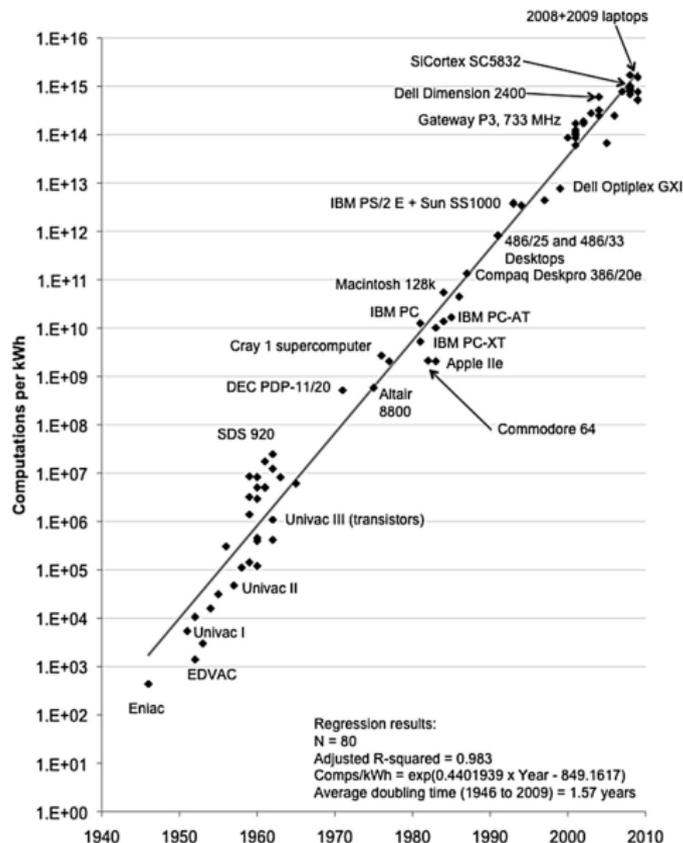
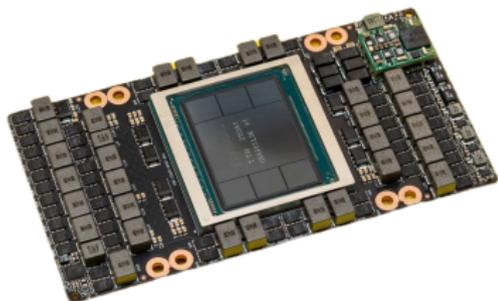


Figure 3. Computations per kilowatt-hour over time. These data include a range of computers, from PCs to mainframe computers and measure computing efficiency at peak performance. Efficiency

- ▶ # de calculs par Joule double tous les 1.57 ans de 1950 à 2009;
- ▶ depuis: doublement tous les 2 ans 1/4.

Est-ce que cela va durer ?

# GPU NVIDIA H100 (2022)



- ▶ 48 TFlops en FP32;
- ▶ **Consommation 700 W** (un peu moins qu'une petite friteuse);
- ▶ nb d'opérations/énergie amélioré d'un facteur  $2 \times 10^{12}$  depuis l'Eniac.



(une carotte =  $10^{15}$  additions)

# Ce qu'en disent les physiciens

- ▶ au niveau atomique les lois physiques sont réversibles;
- ▶ l'irréversibilité vient des phénomènes **dissipatifs**.



**Postulat:** irréversibilité **logique** (un ET par exemple) → irréversibilité **physique** (et donc dissipation d'énergie, création de chaleur).

(sinon, au moins en pensée, on pourrait déduire les entrées en utilisant les lois physiques)

# Principe de Landauer (1961)

- ▶ déduit de la formule de Boltzmann qui donne l'entropie;
- ▶ valable pour un calcul **irréversible** (une addition, un "et");
- ▶ pour un bit d'information perdu, énergie minimale dépensée

$$k \cdot T \cdot \log(2),$$

où

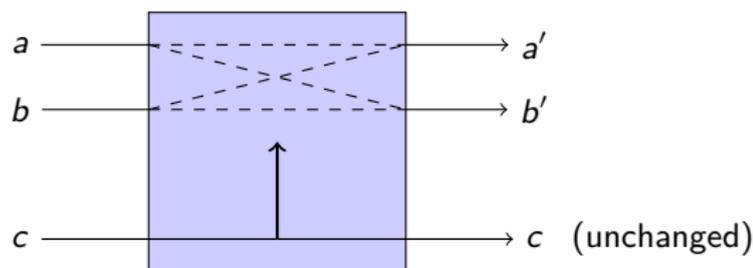
- $T$  est la température (absolue);
- $k \approx 1.28 \times 10^{-23} J/^{\circ}K$  est la constante de Boltzmann;
- par exemple, à une température de 20°C, donne environ  $2.8 \times 10^{-21} J/bit$ .  
c'est peu mais on est **plus près de cette limite que de l'Eniac**

Semble confirmé par des expériences réalisées en 2012, 2014 et 2016.

D'autres limites physiques ont été proposées (Feynmann).

# Calcul réversible

- ▶ Bennett (1973): on peut faire du calcul de manière (logiquement) réversible;
- ▶ Portes de Fredkin (1982):

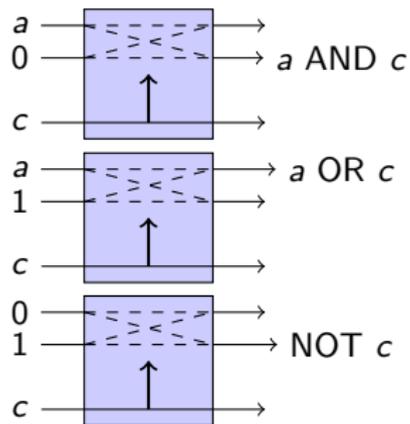


$$\text{si } c = 0 \text{ alors } \begin{cases} a' = a \\ b' = b \end{cases}$$

$$\text{sinon } \begin{cases} a' = b \\ b' = a \end{cases}$$

# Calcul réversible

On peut tout calculer avec des portes de Fredkin:



# Fredkin (1934–2023) était un personnage. . .

Wolfram a écrit un texte sur lui:

<https://writings.stephenwolfram.com/2023/08/>

[remembering-the-improbable-life-of-ed-fredkin-1934-2023-and-his-world-of-ideas-and-stories/](https://writings.stephenwolfram.com/2023/08/remembering-the-improbable-life-of-ed-fredkin-1934-2023-and-his-world-of-ideas-and-stories/)



- ▶ pilote de chasse;
- ▶ prof au MIT et businessman;
- ▶ propriétaire d'une île dans les caraïbes;
- ▶ automates cellulaires, time sharing, scanners de précision;
- ▶ désalinisation de l'eau de mer;
- ▶ physique du calcul;
- ▶ pancomputationaliste: au niveau le plus fondamental, tout est calcul;
- ▶ ...

# Feynmann: Portes de Fredkin réalisées avec des boules de billard (sans frottement)

FREDKIN GATE



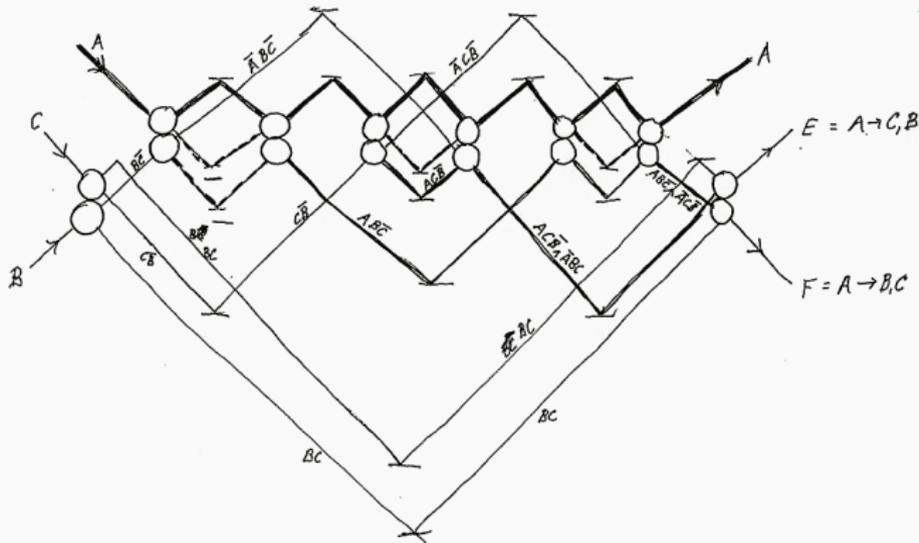
$$E = F = B \cdot C \text{ if } A = 0$$

$$E = F = \bar{B} \cdot C \cdot B \text{ if } A = 1$$

CHANNELS USED IF  $A = 1$   
MARKED BY HEAVY LINES

By FREDKIN BALLS.

No RECYCLING BALLS.



# Calcul réversible

Des pistes de calcul réversible sont à l'étude: CMOS adiabatique, et circuits supraconducteurs réversibles.

Ordinateur quantique ?



**Challenge:** que l'éventuel gain sur la consommation des portes logiques compense la dépense énergétique nécessaire pour isoler/refroidir le circuit.