



Information, Calcul et Communication Module 3 : Systèmes

Information, Calcul et Communication Ordinateur à programme enregistré

Prs. P. Iene, W. Zwaenepoel, A. Ailamaki & P. Janson

La question de ce module

Comment **fonctionne** et de quoi est **fait** un ordinateur capable traiter de l'*information* avec des *algorithmes*?

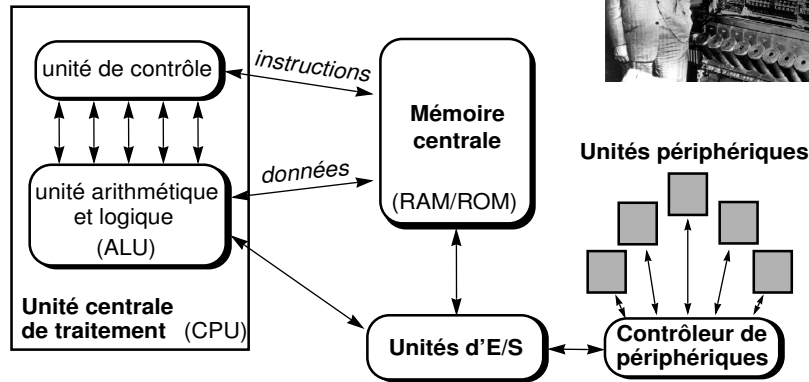
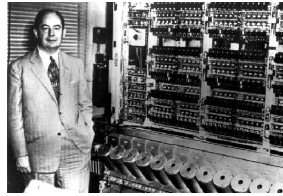
Les réponses de ce module

Comment fonctionne et de quoi est fait un ordinateur capable traiter de l'information avec des algorithmes ?

A base de trois technologies :

- ▶ Des **transistors** (pour le processeur et la mémoire vive)
 - ↳ Leçons 1 (Architecture) & 2 (Hiérarchie)
- ▶ Des **disques** et autres Flash (pour les mémoires mortes)
 - ↳ Leçons 2 (Hiérarchie) & 3 (Stockage)
- ▶ Des **réseaux** (pour les communications entre machines et utilisateurs)
 - ↳ Leçon 3 (Réseaux)

Architecture de von Neumann



Objectifs du cours d'aujourd'hui

Les objectifs de cette leçon sont de :

- ▶ expliquer comment l'on peut effectivement construire des machines pouvant exécuter des programmes (= traductions d'algorithmes)
- ▶ présenter avec quelle technologie les ordinateurs actuels sont construits
- ▶ présenter les deux principes permettant d'augmenter la rapidité de calcul de tels ordinateurs

La première question de cette leçon

- ▶ Maintenant que l'on a développé des algorithmes, comment peut-on **construire des systèmes pour les exécuter** ?

■ **Algorithme :**

Second degré
 entrée : b, c
 sortie : $\{x \in \mathbb{R} : x^2 + bx + c = 0\}$

$$\Delta \leftarrow b^2 - 4c$$

Si $\Delta < 0$
 afficher \emptyset

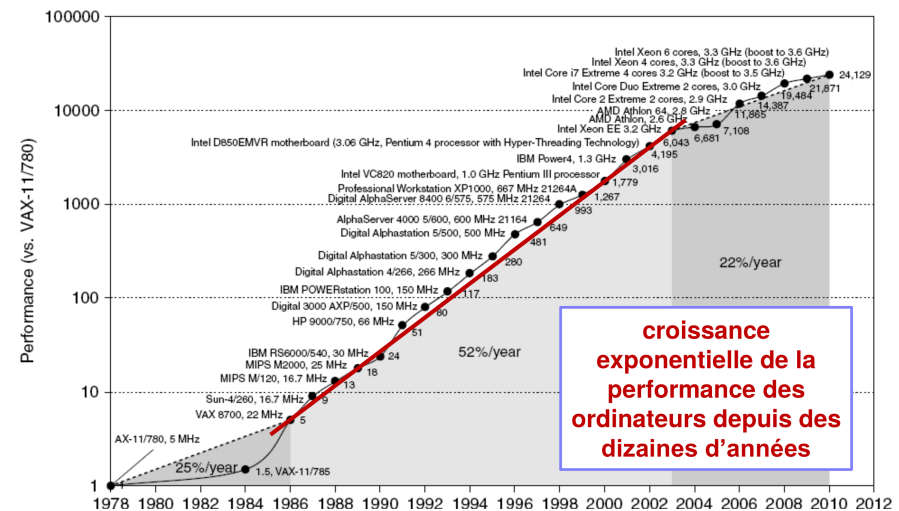
Sinon
 Si $\Delta = 0$
 $x \leftarrow -\frac{b}{2}$
 afficher x

Sinon
 $x_1 \leftarrow \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2}$
 $x_2 \leftarrow \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2}$
 afficher x_1 et x_2



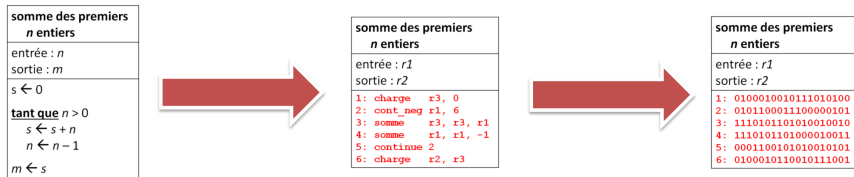
La deuxième question de cette leçon

- ▶ Comment peut-on rendre ces systèmes **plus rapides** ?



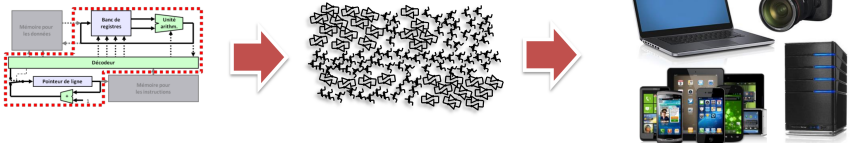
Source: Hennessy & Patterson, © MK 2011

Des algorithmes aux ordinateurs

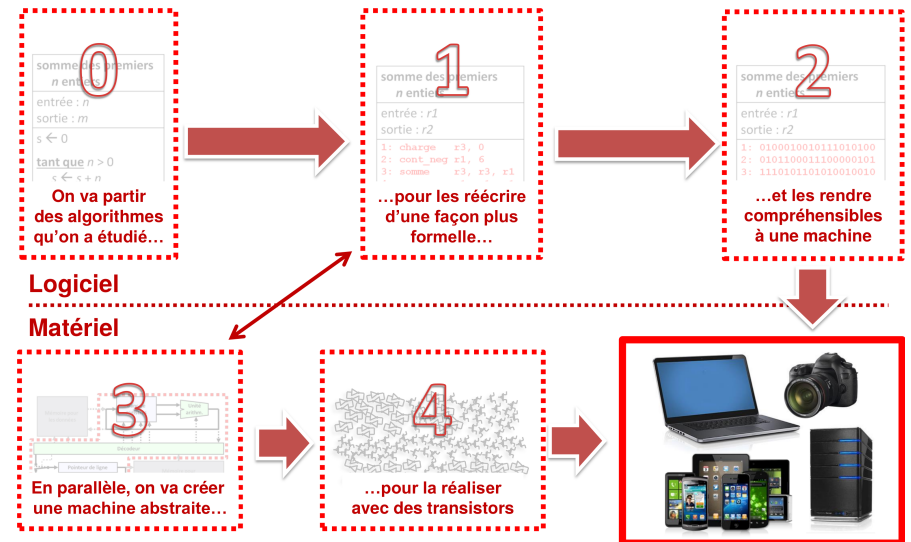


Logiciel

Matériel



Des algorithmes aux ordinateurs



Logiciel

Matériel



Un algorithme

Pour exprimer les algorithmes, nous avons dans le Module 1 utilisé un langage assez intuitif, proches des mathématiques et du langage naturel.

Considérons un exemple :

```

somme
entrée : n
sortie : S(n)

s ← 0
Tant que n > 0
  | s ← s + n
  | n ← n - 1
sortir : s
    
```



Ecriture plus contrainte

Pour *simplifier* en vue de construire une machine, essayons de réécrire cet algorithme de façon plus précise, avec **moins de libertés** (tout en gardant quelque chose de plus pratique/expressif qu'une table de transition d'une machine de Turing !)

Etape 1 : donner un sens concret à « **Sortir** » : affecter une variable

Etape 2 : restriction des noms de variables : r_1, \dots, r_6

```

somme
entrée : nr1
sortie : m = r2 = S(nr1)

sr3 ← 0
Tant que nr1 > 0
  | sr3 ← sr3 + nr1
  | nr1 ← nr1 - 1
Sortir : sm ← sr2 ← r3
    
```



Les registres

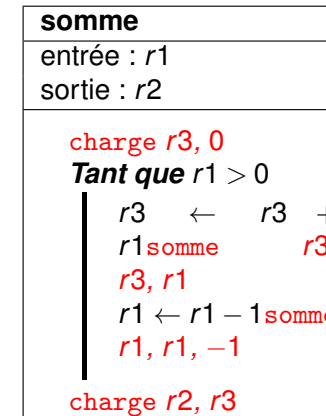
- ▶ On a besoin de mémoriser des valeurs
- ▶ Ces valeurs seront stockées dans ce qui est appelé des « **registres** » : réalisation concrète dans notre machine de la notion de variable
- ▶ On les représente simplement par $r1, \dots, r6$
- ▶ Nous essayerons d'en avoir qu'un petit nombre limité (de l'ordre de la dizaine)
- ▶ Pour de plus grosses données (tableaux, listes, ...) : mémoire *externe* : voir la leçon de la semaine prochaine

Ecriture plus contrainte (suite)

Etape 3 : identifions chacune des opérations nécessaires à notre machine en les nommant

3.1 : Par exemple l'affectation : *charge*

3.2 : Par exemple les opérations arithmétiques : *somme*



Les opérations ou « instructions »

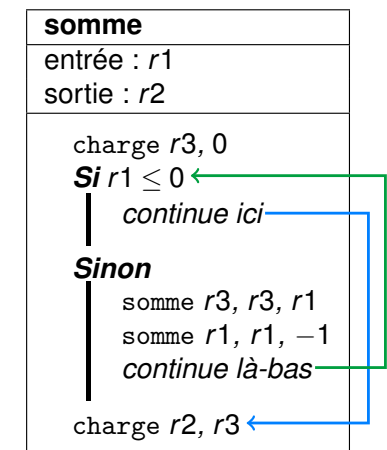
- ▶ On définit un nombre limité d'opérations ; p.ex.
 - ▶ *charge* pour l'assignation
 - ▶ *somme* pour l'addition
 - ▶ *soustrait* pour la soustraction
- ▶ Toutes les opérations ont un **résultat** et opèrent sur **une ou deux** valeurs ou **opérandes**, jamais plus
- ▶ Les opérandes sont soit des (contenus de) **registres**, soit des **constantes**
- ▶ On écrit ces opérations ainsi :
somme destination, operande1, operande2
 - ▶ Au lieu d'écrire $s \leftarrow s + n$, on écrit *somme* $r3, r3, r1$
 - ▶ Au lieu d'écrire $s \leftarrow 0$, on écrit *charge* $r3, 0$
 - ▶ Au lieu d'écrire $s \leftarrow c(a + b)$, on écrit
somme $r5, r6, r7$
multiplie $r5, r5, r8$

Ecriture plus contrainte (suite)

Etape 4 : réduisons les structures de contrôle à **une seule** : le branchement conditionnel

- ▶ Mais comment faire des boucles ?
- ▶ en ayant des **sauts** dans le programme :

C'est un peu plus « tordu », mais il est facile de se convaincre que c'est exactement la même chose



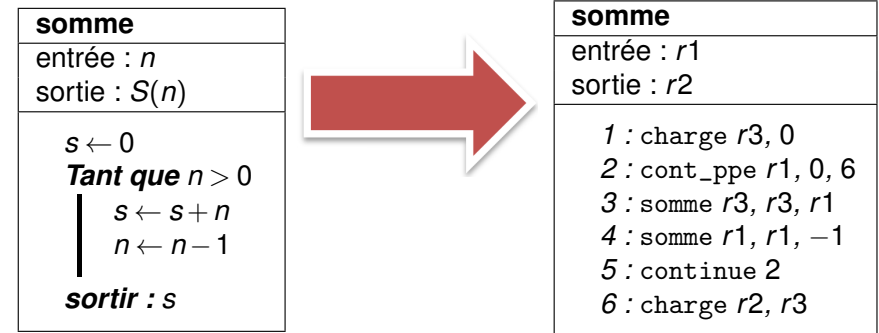
Numérotation des lignes

Pour spécifier les endroits des sauts (conditionnels ou non) :
on **numérote** les lignes

On a donc introduit des instructions supplémentaires :

- ▶ les **sauts conditionnels** : saute à la ligne indiquée si une condition est vérifiée ;
par exemple `cont_ppe`
- ▶ un **saut inconditionnel** : saute à la ligne indiquée
`continue`

Langage « Assembleur »



Exemple réel de langage assembleur

```
int somme(int n)
{
    int s(0);
    while (n > 0) {
        s += n;
        --n;
    }
    return s;
}
```

```
    movl    $0, -4(%rbp)
.L3:
    cmpl   $0, -20(%rbp)
    jle    .L2
    movl   -20(%rbp), %eax
    addl   %eax, -4(%rbp)
    subl   $1, -20(%rbp)
    jmp    .L3
.L2:
    movl   -4(%rbp), %eax
```

`g++ -S somme.cc -o somme.a`

« `movl` » c'est « charge »,
« `-4(%rbp)` » c'est « $r3$ », et « `-20(%rbp)` » c'est « $r1$ »,
« `cont_ppe` » s'écrit en fait sur deux lignes avec « `cmpl` » et « `jle` », etc.

(voir aussi <http://gcc.gnu.org/>)

Résumé à ce stade

- ▶ On écrit nos programmes comme des séquences d'actions appelées « **instructions** »
- ▶ La plupart de ces actions indiquent quelles valeurs donner à des variables à la suite d'opérations (p.ex., mathématiques comme somme)
- ▶ On utilise seulement un **jeu restreint d'opérations** préalablement définies (p.ex., on pourrait ne pas avoir de soustraction si on a l'opération d'addition `somme` et l'opération pour trouver l'opposé `oppose`)
- ▶ On utilise seulement quelques variables comme `r1`, `r2`, `r3`, etc. — on les appelle « **registres** »
- ▶ Certaines actions indiquent la séquence (p.ex., `continue`, si cette séquence est à suivre toujours, ou `cont_egal`, si elle est à suivre seulement dans certains cas) — on les appelle « **instructions de saut** »

Essays de créer une telle machine...

Algorithme :

```

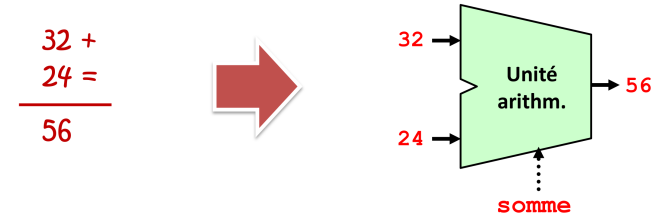
Second degré
entrée : b, c
sortie : { x ∈ ℝ : x² + b x + c = 0 }

Δ ← b² - 4 c
Si Δ < 0
  afficher 0
Sinon
  Si Δ = 0
    x ← -b/2
    afficher x
  Sinon
    x₁ ← (-b - √Δ) / 2
    x₂ ← (-b + √Δ) / 2
    afficher x₁ et x₂
    
```

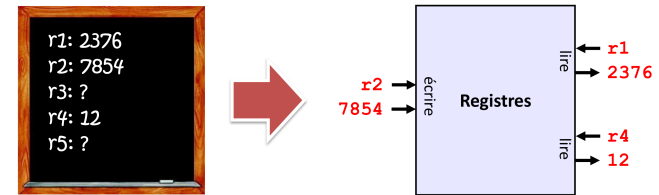


De quoi a-t-on besoin ?

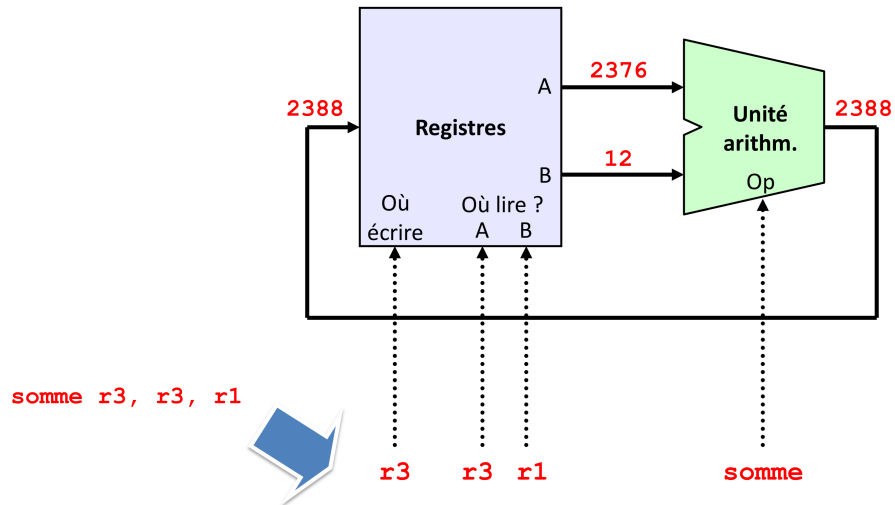
► L'**unité arithmétique** effectue les opérations arithmétiques



► Les **registres** mémorisent les opérandes et les résultats

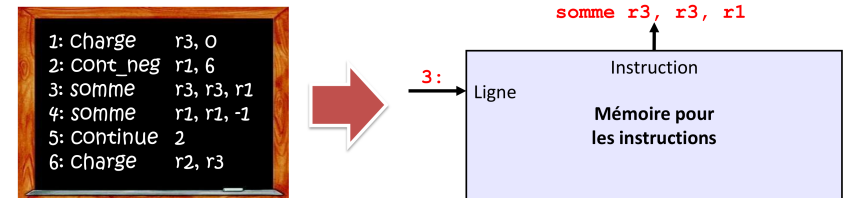


Le circuit pour les calculs



De quoi a-t-on encore besoin ?

► Le programme doit être enregistrer quelque part

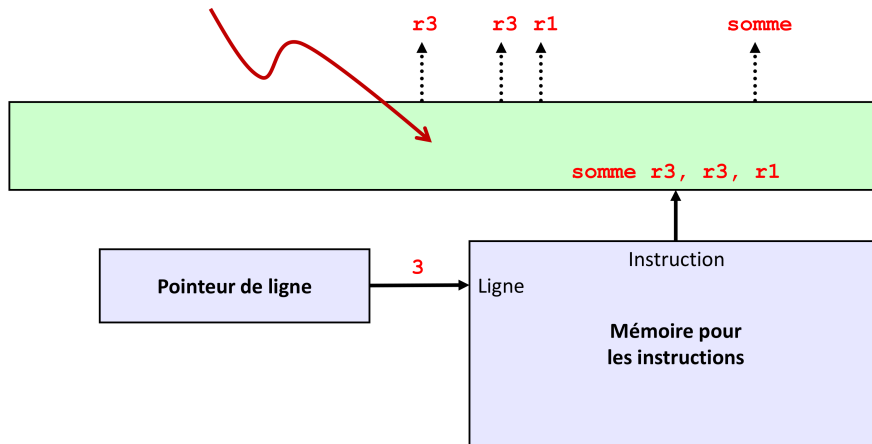


► Il faut pouvoir contrôler où on en est



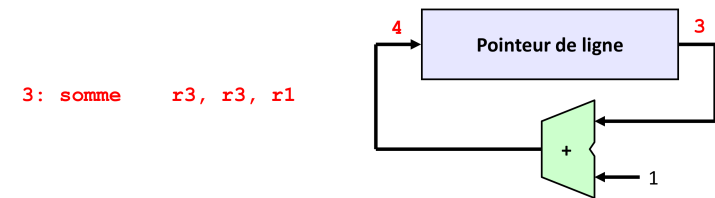
Une première partie pour contrôler le tout...

Un circuit assez simple qui répartit les éléments qui constituent une instruction

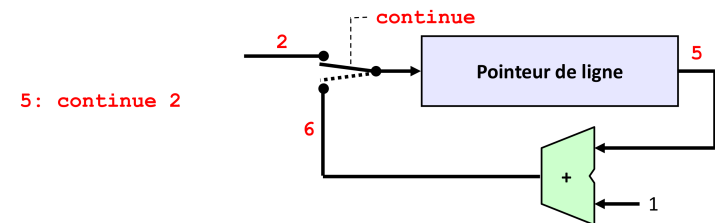


En cas de saut ?

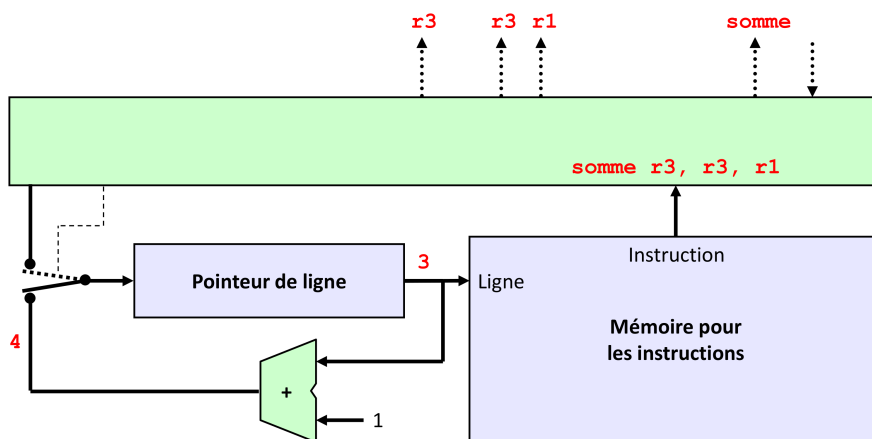
- ▶ La plupart du temps on passe simplement à la ligne suivante



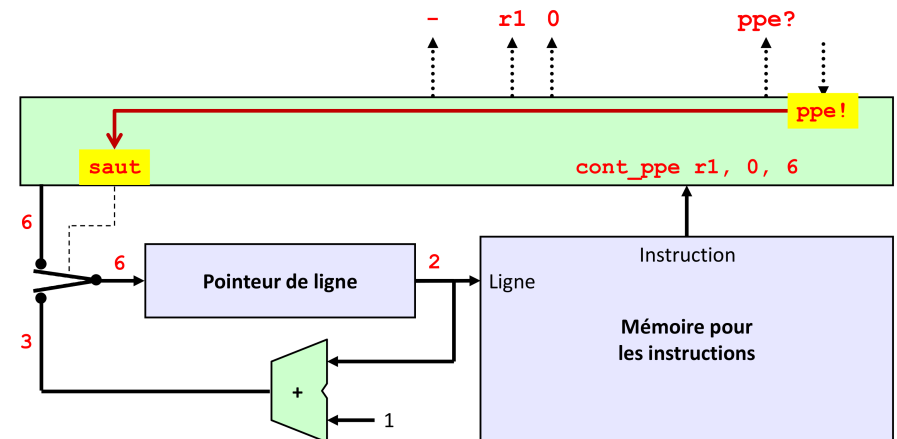
- ▶ Si on a une instruction de saut (p.ex. `continue`), on veut imposer une autre ligne



Le circuit pour le contrôle

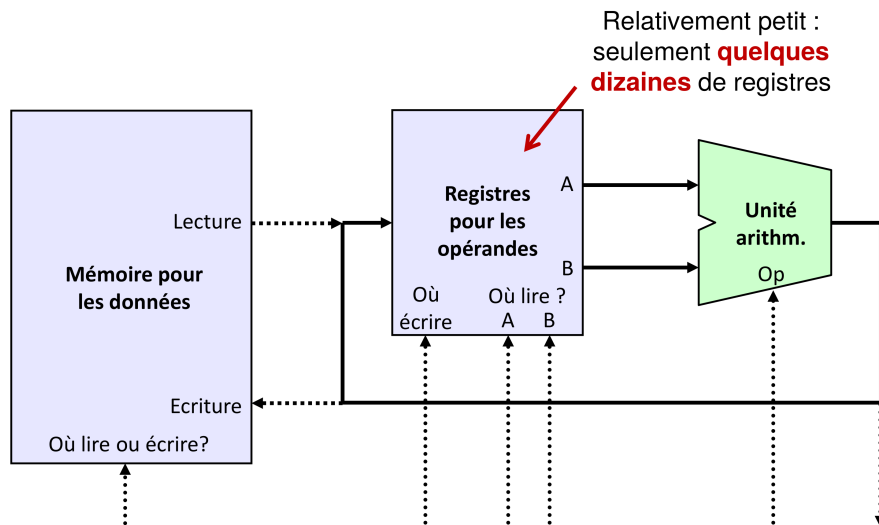


Le circuit pour le contrôle – en cas de saut

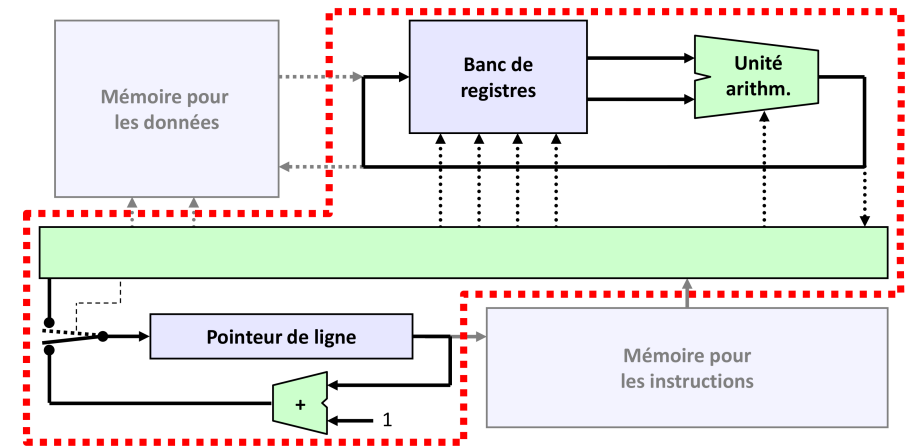


De quoi a-t-on encore besoin ?

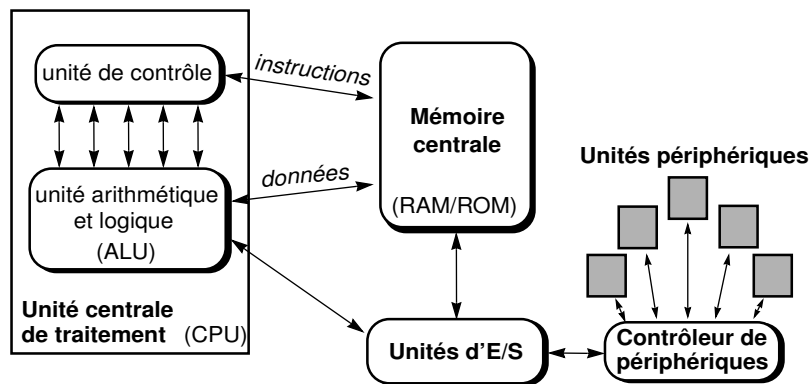
- ▶ d'une mémoire pour avoir plus de données



Un processeur !



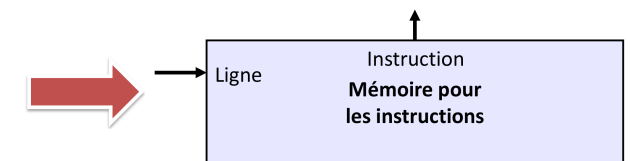
Lien avec l'architecture de von Neumann



Comment encoder les instructions ?

```

1: charge r3, 0
2: cont_ppc r1, 0, 6
3: somme r3, r3, r1
4: somme r1, r1, -1
5: continue 2
6: charge r2, r3
    
```



On peut inventer un encodage simple (voir leçon I.4) :

- ▶ quelques bits pour identifier l'*instruction*
p.ex. 8 bits si on a moins de 256 instructions
- ▶ quelques bits pour identifier les *opérandes* :
registres ou *constantes* ou *adresses* de lignes
p.ex. 5 bits pour les registres (\implies 32 registres max.)

Comment encoder les instructions ?

Au final chaque ligne du programme en assembleur peut être codée sur typiquement 32 ou 64 bits (alignement avec les « mots mémoire »)

Par exemple « somme r3, r3, r1 » pourrait être représenté sur 32 bits comme :

```
0001001000011000110000100000000
```

(compris comme :

```
00010010          00011  00011  00001  00000000
somme (avec 3 registres)  3      3      1  (inutilisé)
)
```

Encoder les instructions

```
1: charge r3, 0
2: cont_ppe r1, 0, 6
3: somme r3, r3, r1
4: somme r1, r1, -1
5: continue 2
6: charge r2, r3
```



```
1: 00000001000110000000000000000000
2: 00001011000010000000000000000110
3: 00010010000110001100001000000000
4: 00010011000010000111111111111111
5: 00001111000000000000000000000010
6: 00000010000100001100000000000000
```

Langage **assembleur**

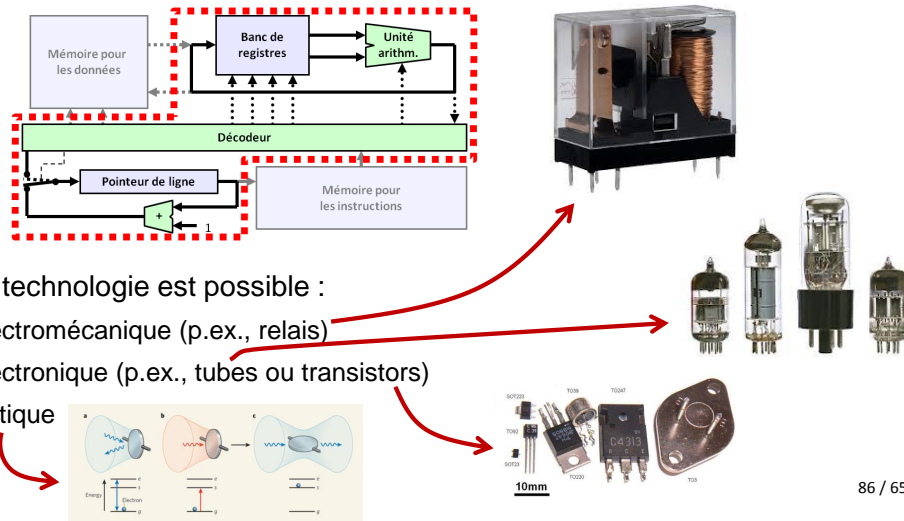
Langage **machine** (binaire)

Jusque-là, pas de choix technologique...

Une pile, deux niveaux de tension

Jusque-là, pas de choix technologique...

- ▶ Notre machine est parfaitement abstraite et totalement indépendante d'un choix d'implémentation
- ▶ Même l'encodage binaire n'est nullement une nécessité



- ▶ Toute technologie est possible :
 - Electromécanique (p.ex., relais)
 - Electronique (p.ex., tubes ou transistors)
 - Optique

Un interrupteur

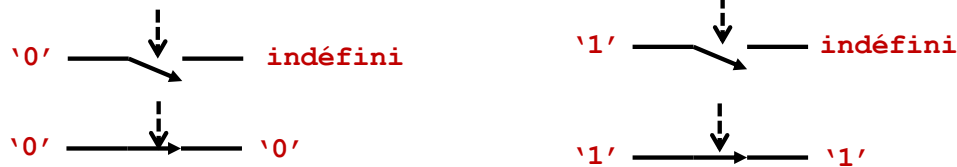
Ne propage rien s'il est ouvert



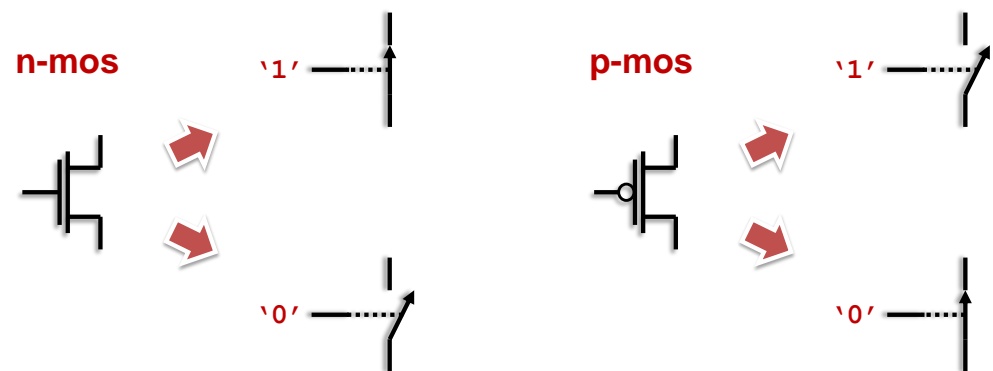
Propage son entrée s'il est fermé



Un transistor = un interrupteur contrôlé



Les transistors, des interrupteurs contrôlés

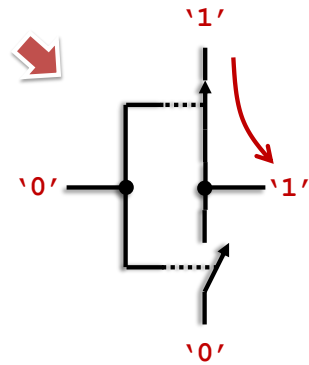
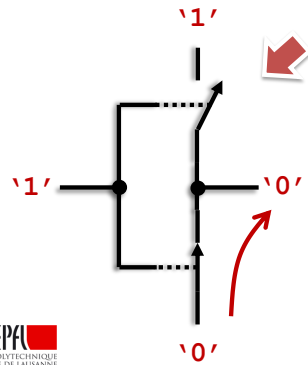
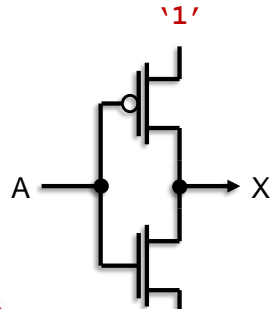


- ▶ Ils ne coûtent presque rien : un transistor pour faire un processeur moderne coûte entre 10^{-5} et 10^{-4} centimes (CHF, USD, EUR...)

Un inverseur (en CMOS)

Table de la vérité

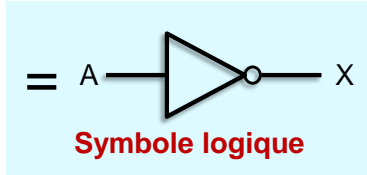
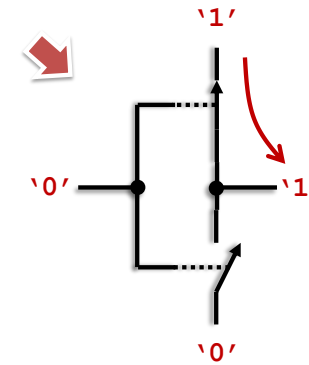
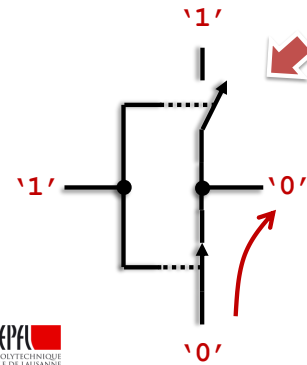
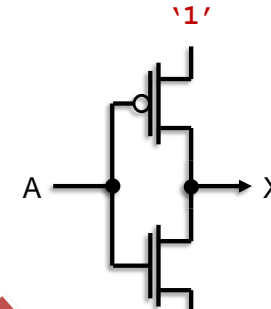
A	X
0	1
1	0



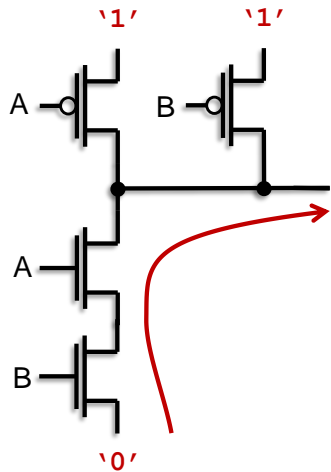
Un inverseur (en CMOS)

Table de la vérité

A	X
0	1
1	0



Un circuit « et » avec sortie inversée



A	B	A et B inversé
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

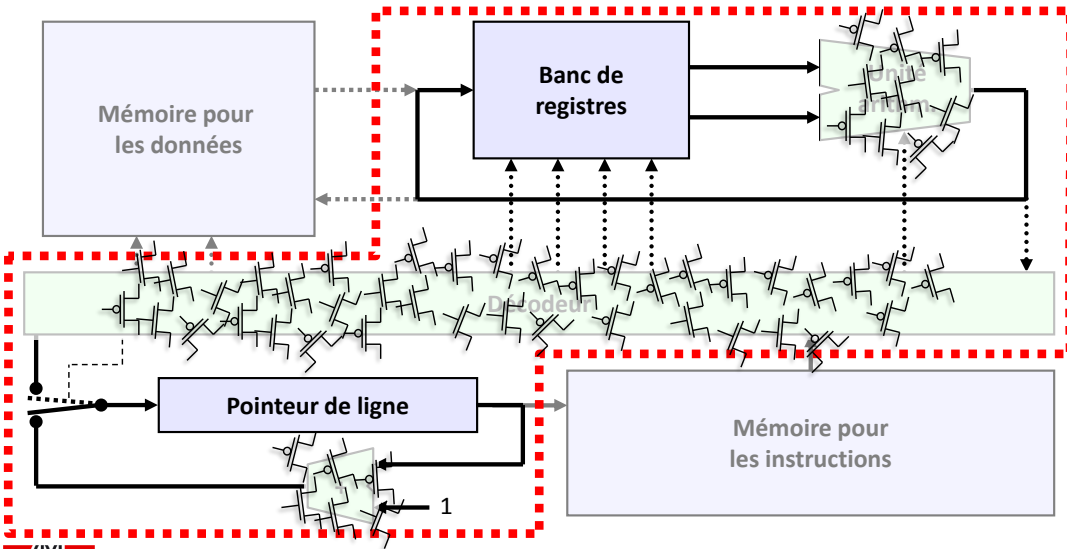
- ▶ La seule façon d'obtenir un '0' est de mettre deux '1' aux entrées A et B : la sortie est à '0' seulement si A **et** B sont à '1'

La table de vérité d'un circuit

- ▶ Résume la fonction d'un circuit
- ▶ Par exemple, pour un circuit avec 2 entrées et 1 sortie

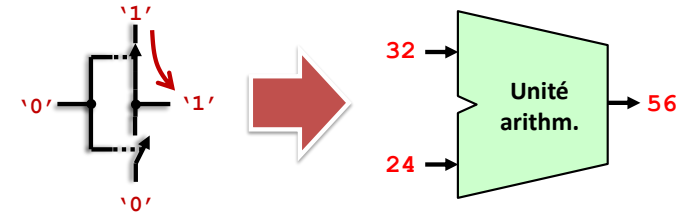
entrée 1	entrée 2	sortie
0	0	?
0	1	?
1	0	?
1	1	?

Et notre processeur, donc ?

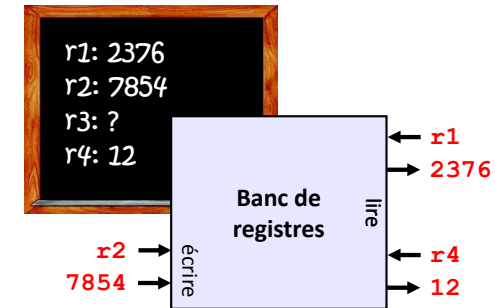
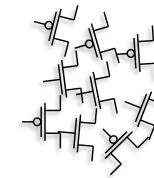


Peut-on aussi mémoriser l'information ?

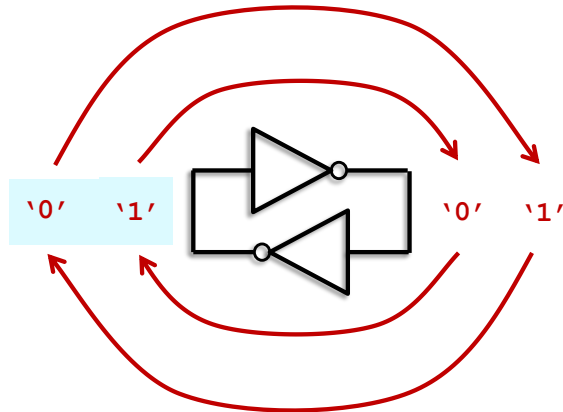
► Pour les calculs, tout va bien :



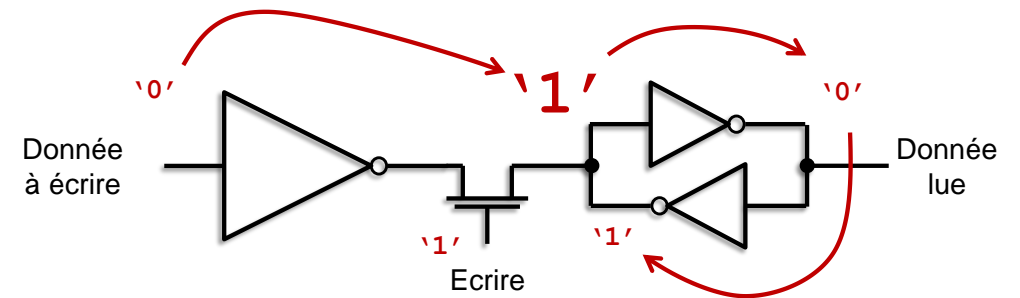
► Mais pour mémoriser ?!



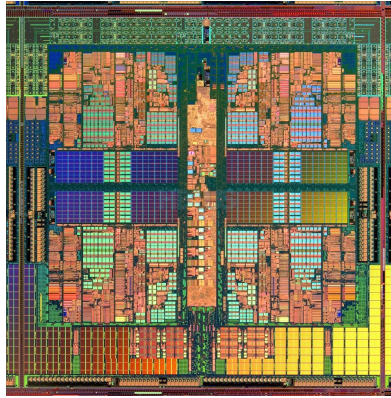
Un circuit assez particulier



Comment écrire cette mémoire ?

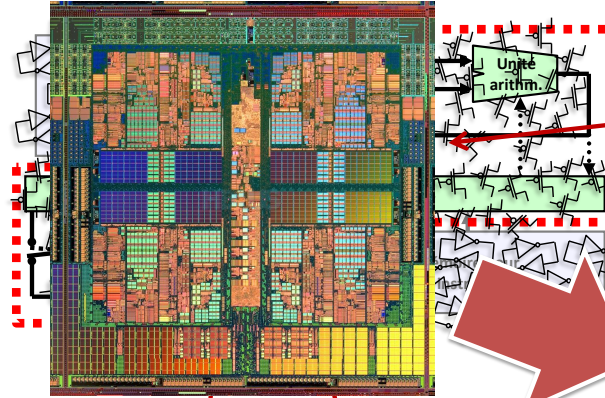


On a atteint notre but !



Circuit intégré VLSI
(aujourd'hui autour de
 10^8 - 10^9 transistors)

On a atteint notre but !



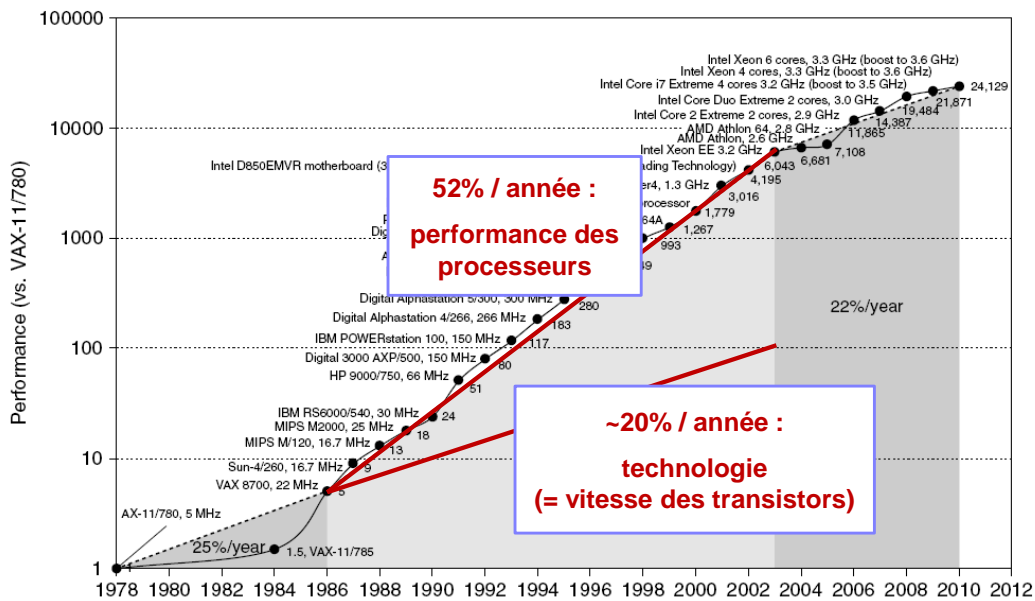
Circuit intégré VLSI
(aujourd'hui autour de
 10^8 - 10^9 transistors)

Architecture du
processeur

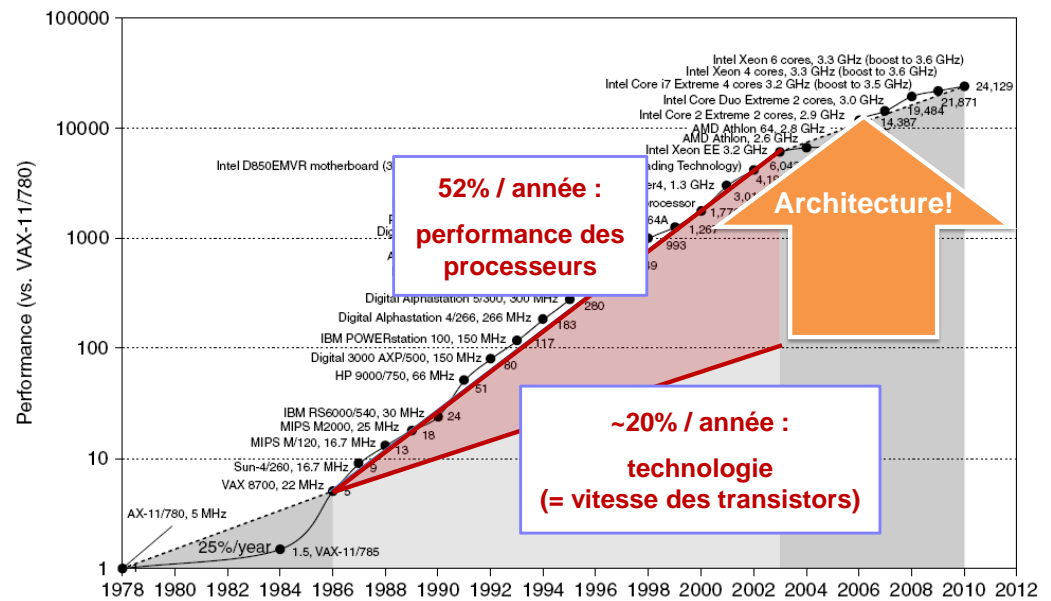
Circuit électronique



La croissance de la performance

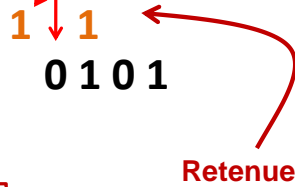


La croissance de la performance



Faire des sommes est facile...

$$\begin{array}{r}
 A \quad 0111010101100011010 + \\
 B \quad 1011100010111001011 = \\
 \hline
 \end{array}$$

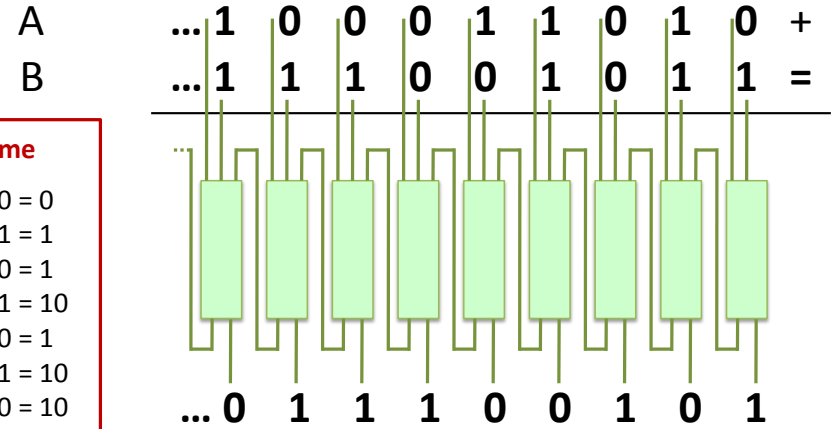


Sommes élémentaires

$$\begin{aligned}
 0 + 0 &= 0 \\
 0 + 1 &= 1 \\
 1 + 0 &= 1 \\
 1 + 1 &= 10 = 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 2_{10}
 \end{aligned}$$

156 / 65

Faire un circuit est aussi (relativement) facile...

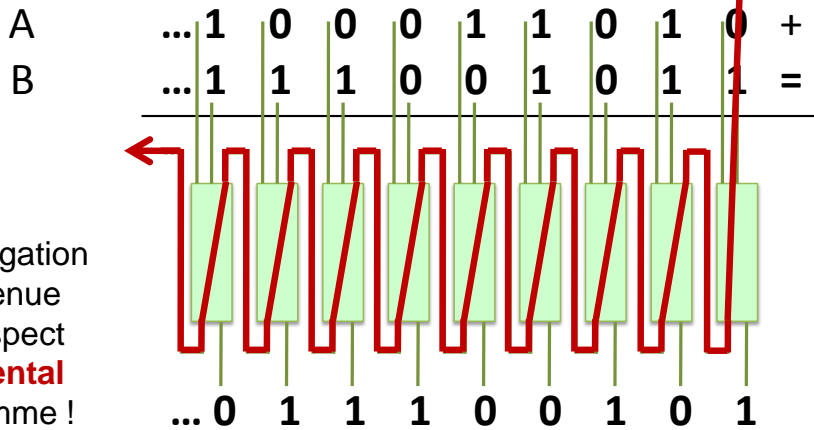


Somme

$$\begin{aligned}
 0 + 0 + 0 &= 0 \\
 0 + 0 + 1 &= 1 \\
 0 + 1 + 0 &= 1 \\
 0 + 1 + 1 &= 10 \\
 1 + 0 + 0 &= 1 \\
 1 + 0 + 1 &= 10 \\
 1 + 1 + 0 &= 10 \\
 1 + 1 + 1 &= 11
 \end{aligned}$$

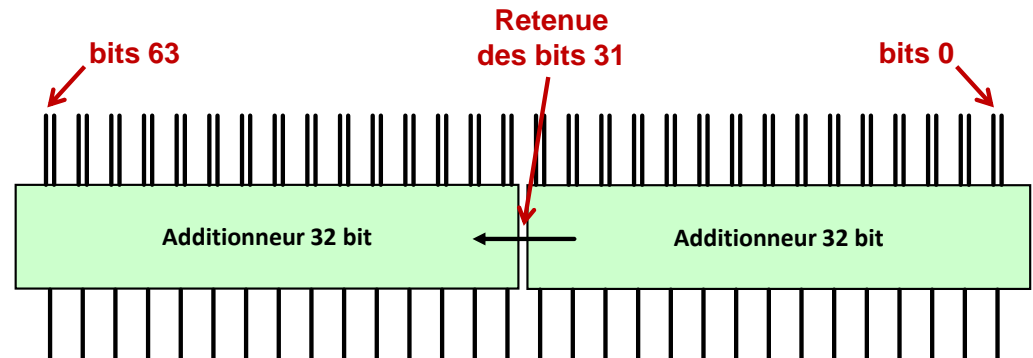
163 / 65

Mais ce circuit est lent !



► La propagation de la retenue est un aspect **fondamental** de la somme !

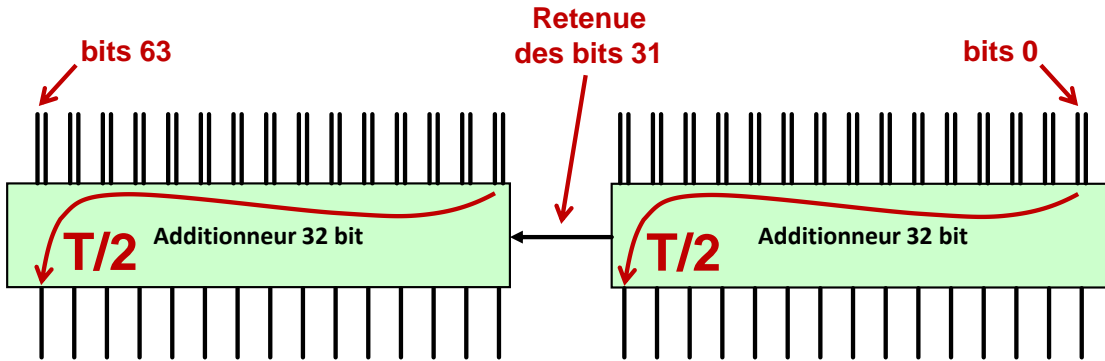
Peut-on faire mieux ?



166 / 65

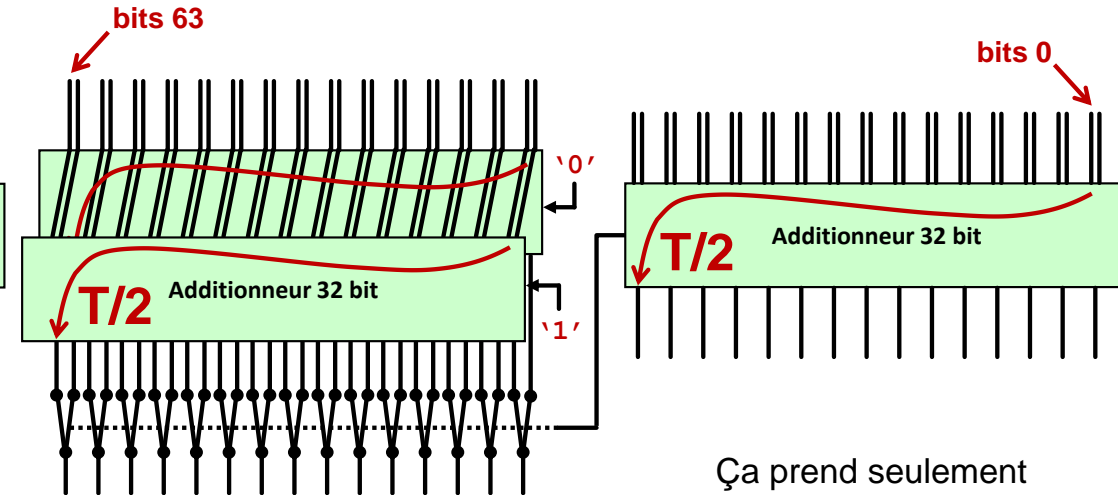
172 / 65

Peut-on faire mieux ?



On n'a **rien** gagné...

Peut-on faire mieux ?



Ça prend seulement **la moitié du temps** !

Le génie informatique (1)

- ▶ On peut profondément changer la performance du circuit sans en changer la fonctionnalité
- ▶ On peut investir plus de transistors et plus d'énergie pour obtenir des circuits très rapides
- ▶ On peut ralentir les circuits pour épargner de l'énergie

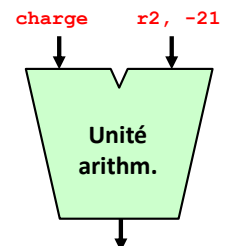
Ceci est un exemple de **synthèse logique** qui est une des branches de l'ingénierie informatique (**Computer Engineering**)

Notre processeur

```

103: charge    r1, 0
104: charge    r2, -21
105: somme      r3, r7, r4
106: multiplie r2, r5, r9
107: soustrais r8, r7, r9
108: charge    r9, r4
109: somme      r3, r2, r1
110: soustrais r5, r3, r4
111: charge    r2, r3
112: somme      r1, r2, -1
113: somme      r8, r1, -1
114: divise    r4, r1, r7
115: charge    r2, r4
    
```

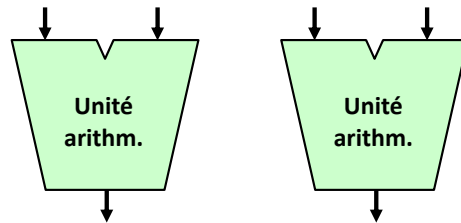
On exécute approximativement **une instruction** par cycle



Doubler le débit de notre processeur

```

103: charge    r1, 0
104: charge    r2, -21
105: somme      r3, r7, r4
106: multiplie r2, r5, r9
107: soustrais r8, r7, r9
108: charge    r9, r4
109: somme      r3, r2, r1
110: soustrais r5, r3, r4
111: charge    r2, r3
112: somme      r1, r2, -1
113: somme      r8, r1, -1
114: divise    r4, r1, r7
115: charge    r2, r4
    
```



5 / 65

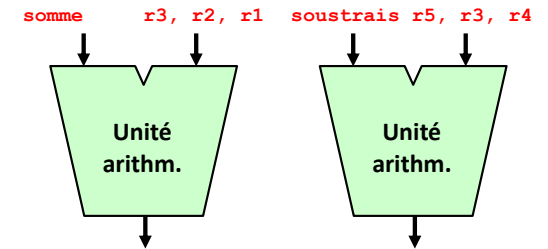
Doubler le débit de notre processeur

```

103: charge    r1, 0
104: charge    r2, -21
105: somme      r3, r7, r4
106: multiplie r2, r5, r9
107: soustrais r8, r7, r9
108: charge    r9, r4
109: somme      r3, r2, r1
110: soustrais r5, r3, r4
111: charge    r2, r3
112: somme      r1, r2, -1
113: somme      r8, r1, -1
114: divise    r4, r1, r7
115: charge    r2, r4
    
```

On exécute maintenant
deux instructions par cycle !

Problèmes ?!



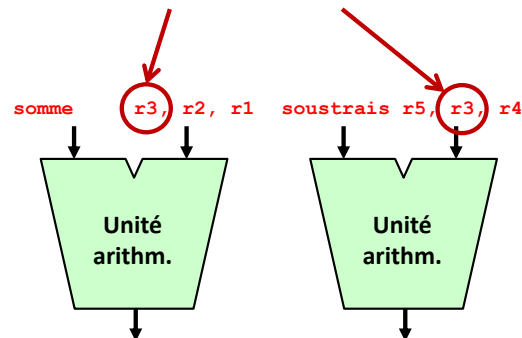
8 / 65

Doubler le débit de notre processeur

```

103: charge    r1, 0
104: charge    r2, -21
105: somme      r3, r7, r4
106: multiplie r2, r5, r9
107: soustrais r8, r7, r9
108: charge    r9, r4
109: somme      r3, r2, r1
110: soustrais r5, r3, r4
111: charge    r2, r3
112: somme      r1, r2, -1
113: somme      r8, r1, -1
114: divise    r4, r1, r7
115: charge    r2, r4
    
```

Le problème est que la deuxième
instruction a besoin d'une valeur
calculée par la première !
Si on ne fait pas attention,
le résultat sera faux !

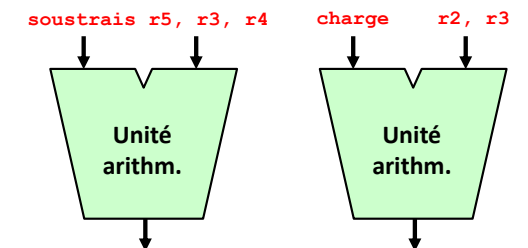


9 / 65

Doubler le débit de notre processeur

```

103: charge    r1, 0
104: charge    r2, -21
105: somme      r3, r7, r4
106: multiplie r2, r5, r9
107: soustrais r8, r7, r9
108: charge    r9, r4
109: somme      r3, r2, r1
110: soustrais r5, r3, r4
111: charge    r2, r3
112: somme      r1, r2, -1
113: somme      r8, r1, -1
114: divise    r4, r1, r7
115: charge    r2, r4
    
```

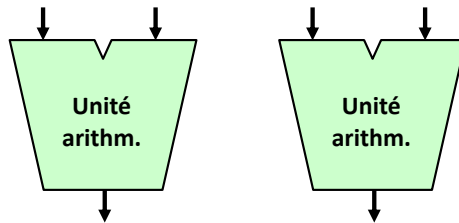


11 / 65

~~Double~~ le débit de notre processeur

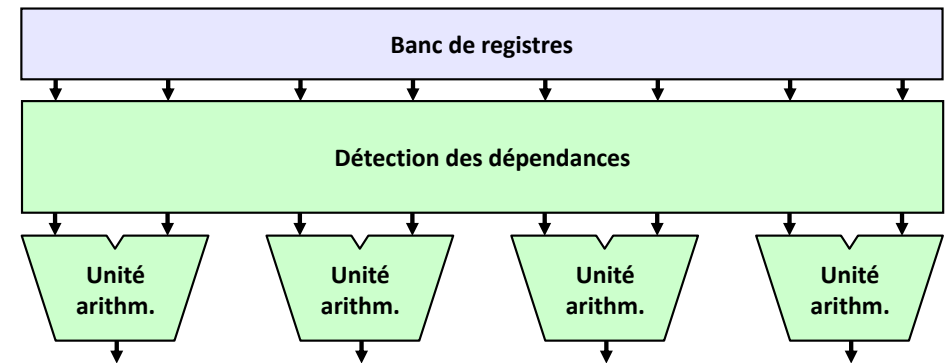
```
103: charge    r1, 0
104: charge    r2, -21
105: somme      r3, r7, r4
106: multiplie r2, r5, r9
107: soustrais r8, r7, r9
108: charge    r9, r4
109: somme      r3, r2, r1
110: soustrais r5, r3, r4
111: charge    r2, r3
112: somme      r1, r2, -1
113: somme      r8, r1, -1
114: divise    r4, r1, r7
115: charge    r2, r4
```

On exécute maintenant
approximativement
entre **une et deux instructions**
par cycle
et le résultat est correct !



12 / 65

Un processeur "superscalaire"



- ▶ Tous les processeurs modernes pour les ordinateurs portables et les serveurs sont de ce type
- ▶ De plus, ils réordonnent les instructions et en exécutent avant que ce soit sûr qu'elles doivent être exécutées (p.ex. après une instruction comme **cont_neg**)

Le génie informatique

- ▶ On peut modifier la structure du système pour exécuter les programmes plus rapidement
- ▶ On peut ajouter des ressources aux processeurs pour les rendre beaucoup plus rapides
- ▶ On peut utiliser des processeurs très élémentaires pour les rendre économiques et peu gourmands en énergie

On vient de voir un exemple d'**architecture des ordinateurs**, qui est une autre des branches du génie informatique (ou **Computer Engineering**)

14 / 65