

Information, Calcul et Communication

Module 3 : Systèmes

Information, Calcul et Communication Ordinateur à programme enregistré

Prs. P. lenne, 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* ?

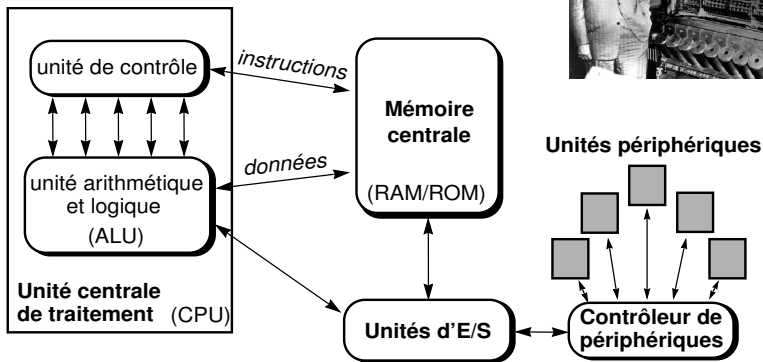
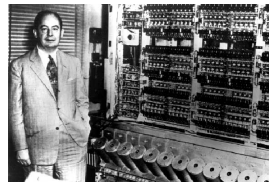
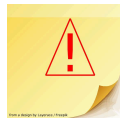
Les réponses de ce module

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

À 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 : $\{x \in \mathbb{R} : x^2 + b x + c = 0\}$

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

Si $\Delta < 0$

afficher $\emptyset$

Sinon

Si $\Delta = 0$

$x \leftarrow -\frac{b}{2}$

afficher x

Sinon

$x_1 \leftarrow \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2}$

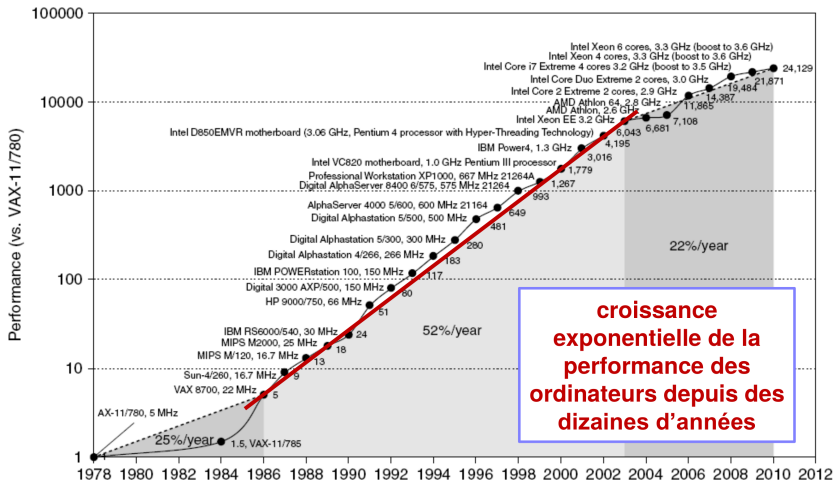
$x_2 \leftarrow \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2}$

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

somme des premiers n entiers entrée : n sortie : m $s \leftarrow 0$ tant que $n > 0$ $s \leftarrow s + n$ $n \leftarrow n - 1$ $m \leftarrow s$



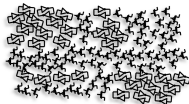
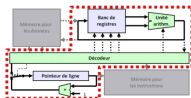
somme des premiers n entiers entrée : $r1$ sortie : $r2$ 1: charge $r3, 0$ 2: cont_neg $r1, 6$ 3: somme $r3, r3, r1$ 4: somme $r1, r1, -1$ 5: continue 2 6: charge $r2, r3$



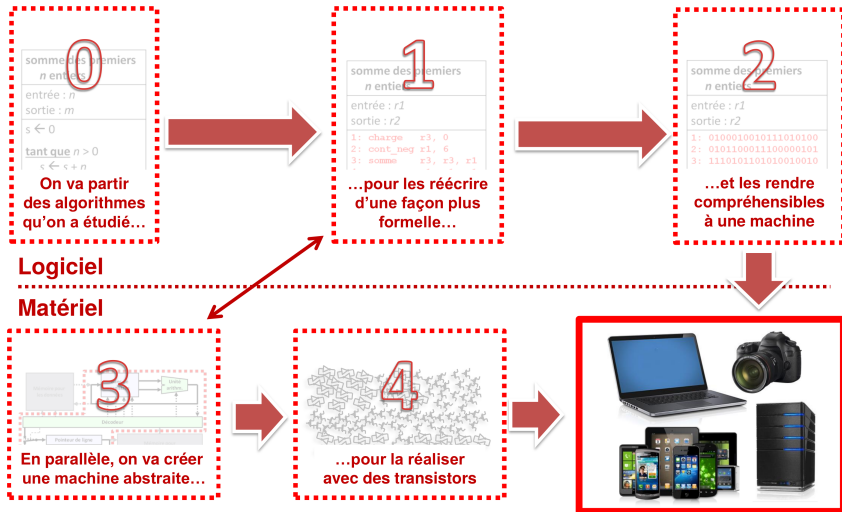
somme des premiers n entiers entrée : $r1$ sortie : $r2$ 1: 0100010010111010100 2: 0101100011100000101 3: 1110101101010010010 4: 1110101101000010011 5: 0001100101010010101 6: 0100010110010111001
--

Logiciel

Matériel



Des algorithmes aux ordinateurs



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 : $S(n)$
$s \leftarrow 0$ Tant que $n > 0$ $s \leftarrow s + n$ $n \leftarrow n - 1$ 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 : $r1$, ..., $r6$.

somme
entrée : $r1$
sortie : $m = r2 = S(r1)$
$r3 \leftarrow 0$ Tant que $r1 > 0$ $r3 \leftarrow r3 + r1$ $r1 \leftarrow r1 - 1$ $r2 \leftarrow r3$

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 $r1$, ..., $r6$.
- ▶ Nous essayerons d'en n'avoir qu'un petit nombre limité (de l'ordre de la dizaine ; tout au plus quelques dizaines sur les machines modernes).
- ▶ Pour de plus grosses données (tableaux, listes, etc.) : 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*

somme
entrée : <i>r1</i> sortie : <i>r2</i>
<i>charge r3, 0</i> Tant que <i>r1 > 0</i> <i>somme r3, r3, r1</i> <i>somme r1, r1, -1</i> <i>charge r2, r3</i>

Les opérations ou « instructions »



- ▶ On définit un nombre limité d'opérations ; p.ex.
 - ▶ `charge` pour l'assignation ;
 - ▶ `somme` pour l'addition ;
 - ▶ `soustrais` 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, operand1, operand2`

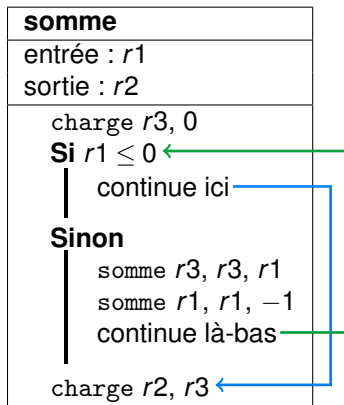
- ▶ Au lieu d'écrire $s \leftarrow s + n$, on écrit `somme r3, r3, r1`
- ▶ Au lieu d'écrire $s \leftarrow 0$, on écrit `charge r3, 0`
- ▶ Au lieu d'écrire $s \leftarrow c(a + b)$, on écrit
`somme r5, r6, r7`
`multiplie r5, r5, r8`

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 exacte-
ment 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 »

somme
entrée : n sortie : $S(n)$
$s \leftarrow 0$ Tant que $n > 0$ $s \leftarrow s + n$ $n \leftarrow n - 1$ sortir : s



somme
entrée : $r1$ sortie : $r2$
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 $r2, r3$

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.godbolt.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 où continuer dans la séquence (p.ex., `continue`, si cet endroit est toujours le même, ou `cont_TEST`, s'il ne faut y aller que dans certains cas) — on les appelle « **instructions de saut** »

Essayons de créer une telle machine...

Algorithme :

Second degré

entrée : b, c

sortie : $\{x \in \mathbb{R} : x^2 + b x + c = 0\}$

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

Si $\Delta < 0$

afficher $\emptyset$

Sinon

Si $\Delta = 0$

$x \leftarrow -\frac{b}{2}$

afficher x

Sinon

$x_1 \leftarrow \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2}$

$x_2 \leftarrow \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2}$

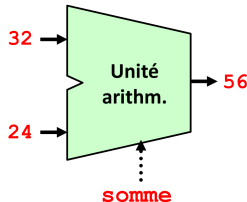
afficher x_1 et x_2



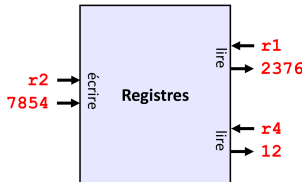
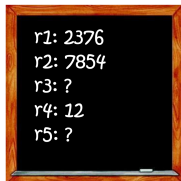
De quoi a-t-on besoin ?

- ▶ L'**unité arithmétique et logique** (ALU) effectue les opérations arithmétiques

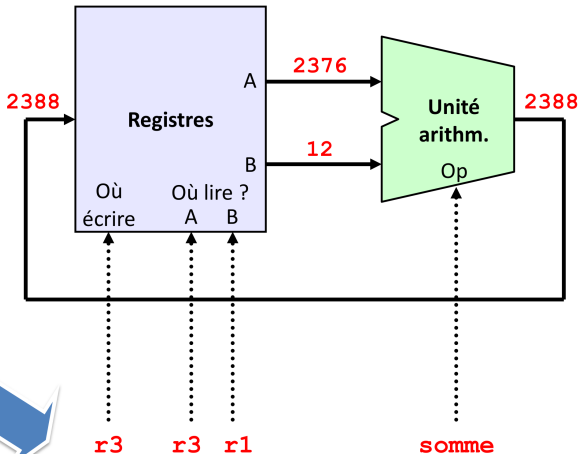
$$\begin{array}{r} 32 + \\ 24 = \\ \hline 56 \end{array}$$



- ▶ Les **registres** mémorisent les opérandes et les résultats



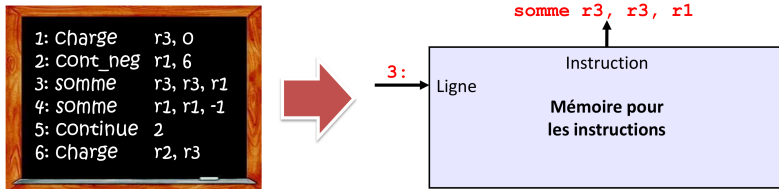
Le circuit pour les *calculs*



somme r3, r3, r1

De quoi a-t-on encore besoin ?

- ▶ Le programme doit être enregistré quelque part

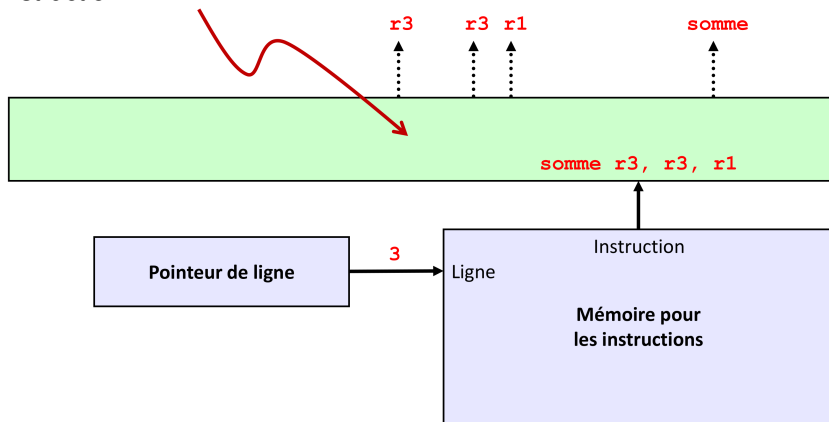


- ▶ Il faut pouvoir contrôler où on en est



Une première partie pour contrôler le tout...

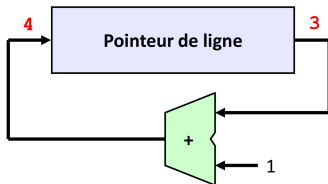
Un circuit assez simple qui répartit les éléments qui constituent une instruction



En cas de saut ?

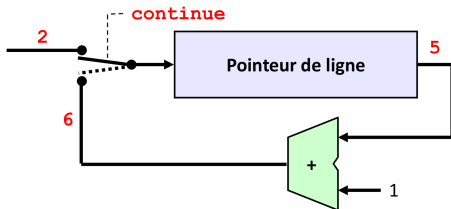
- ▶ La plupart du temps on passe simplement à la ligne suivante

3: somme r3, r3, r1

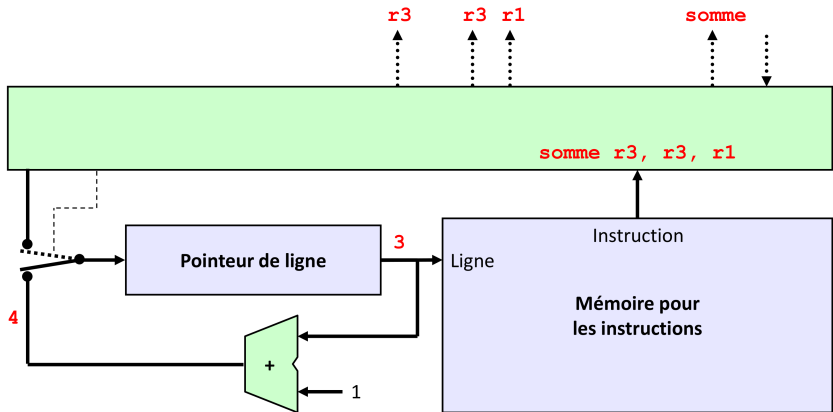


- ▶ Si on a une instruction de saut (p.ex. `continue`), on veut imposer une autre ligne

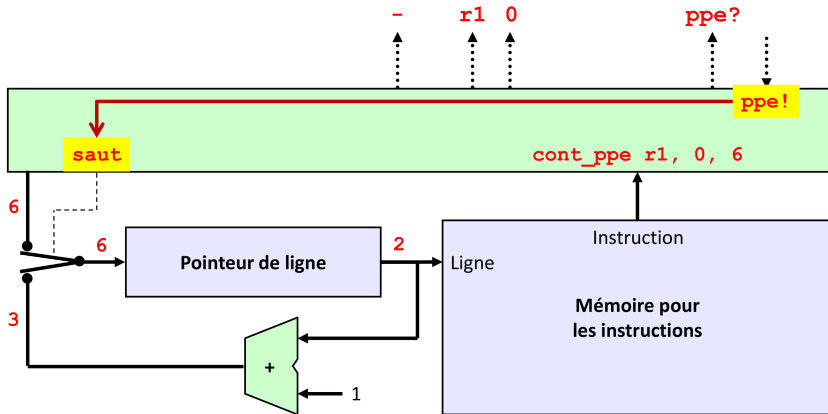
5: continue 2



Le circuit pour le contrôle



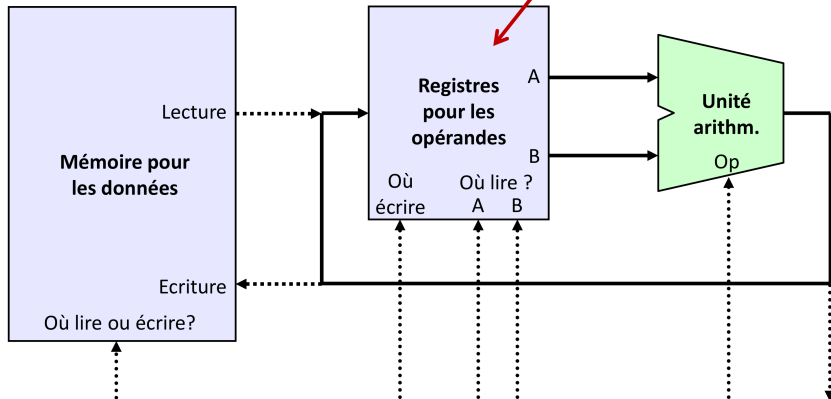
Le circuit pour le contrôle – en cas de saut



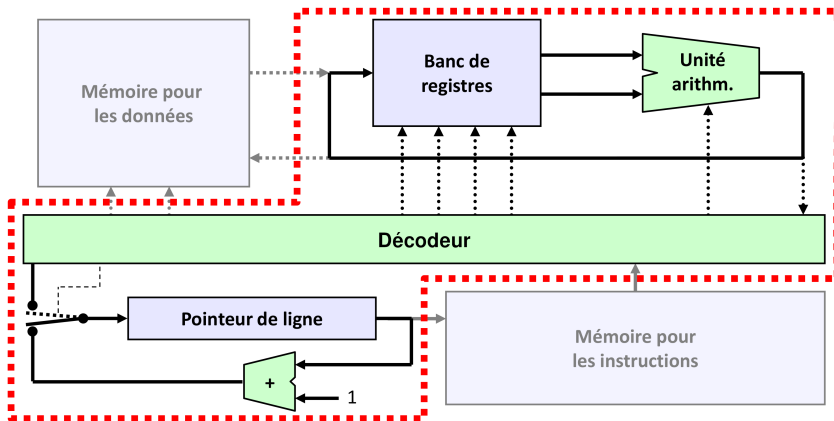
De quoi a-t-on encore besoin ?

- D'une mémoire pour avoir plus de données :

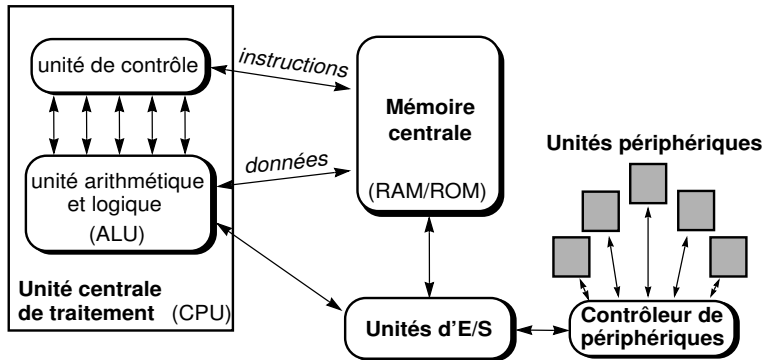
Relativement petit :
seulement **quelques**
dizaines de registres



Un processeur ! (CPU)

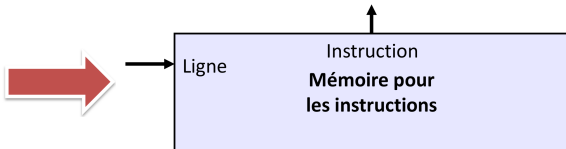


Lien avec l'architecture de von Neumann



Comment 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
```



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 ($\Rightarrow$ 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 représentée 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
```



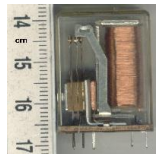
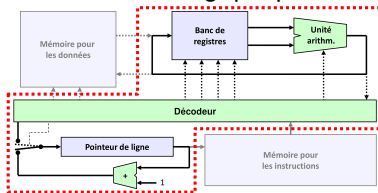
```
1: 00000001000110000000000000000000
2: 00001011000010000000000000000110
3: 00010010000110001100001000000000
4: 00010011000010000111111111111111
5: 00001111000000000000000000000010
6: 00000010000100001100000000000000
```

Langage **assembleur**

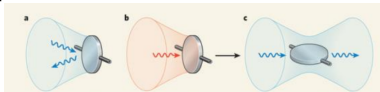
Langage **machine** (binaire)

Technologie ?

- ▶ Notre machine est parfaitement abstraite et totalement indépendante du choix technologique pour son implémentation.



- ▶ Même l'encodage binaire n'est nullement une nécessité !
- ▶ Toute technologie est possible :
 - ▶ Électromécanique (p.ex. relais)
 - ▶ Électronique (p.ex. tubes ou transistors)
 - ▶ Optique



Un interrupteur

Ne propage rien s'il est ouvert

'0' ———→ indéfini

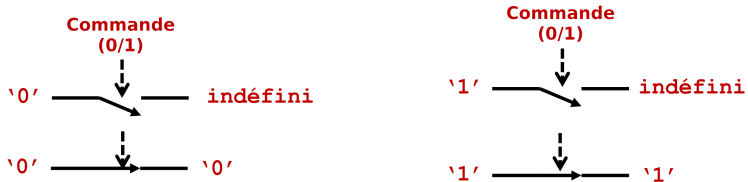
'1' ———→ indéfini

'0' ———→ '0'

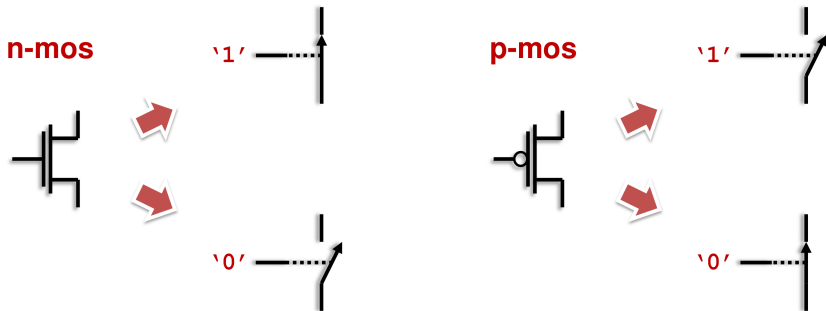
'1' ———→ '1'

Propage son entrée s'il est fermé

Transistors = interrupteur contrôlé (1/2)

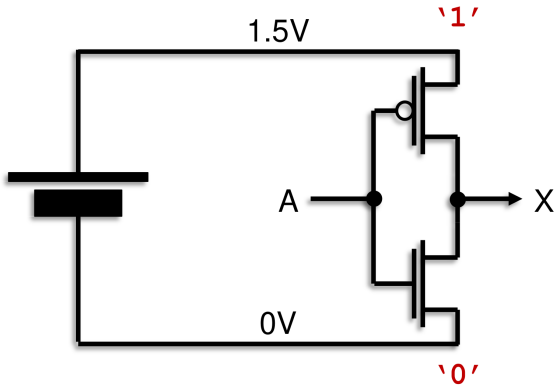


Transistors = interrupteur contrôlé (2/2)



- 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)

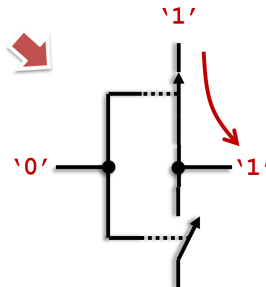
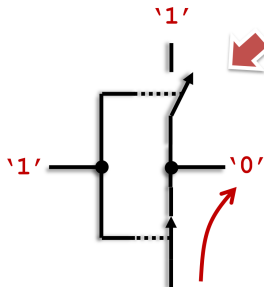
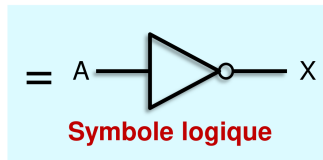
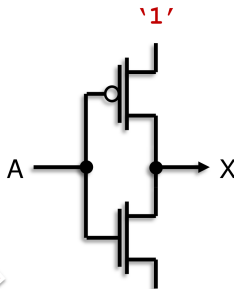


Un inverseur (en CMOS)

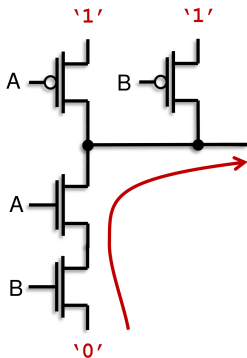


Table de la vérité

A	X
0	1
1	0



Un circuit « et » avec sortie inversée

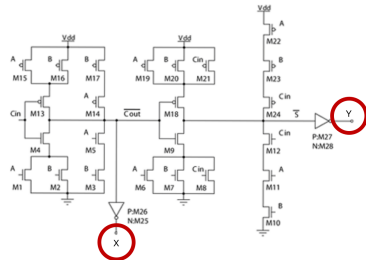


A	B	A et B inversé
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- 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'

On peut réaliser beaucoup de fonctions !

A	B	C	XY
0	0	0	00
0	0	1	01
0	1	0	01
0	1	1	10
1	0	0	01
1	0	1	10
1	1	0	10
1	1	1	11



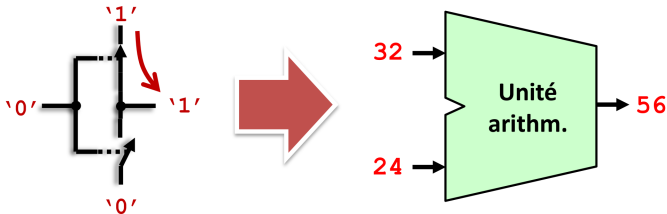
Les sorties XY sont la somme
(en représentation binaire)
des trois bits A, B et C à l'entrée



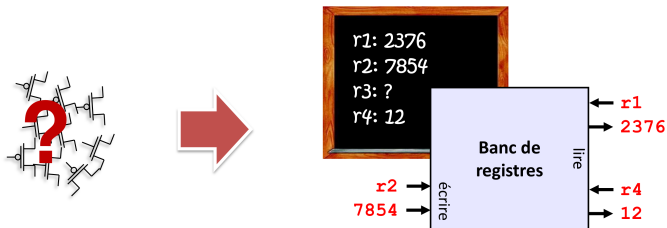
Addition !

Peut-on aussi mémoriser l'information ?

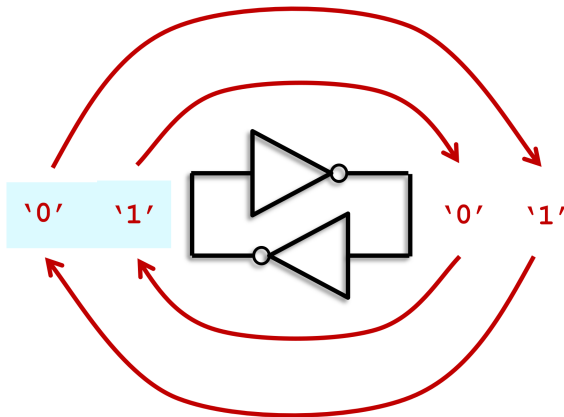
- Pour les calculs, tout va bien :



- Mais pour mémoriser ?...

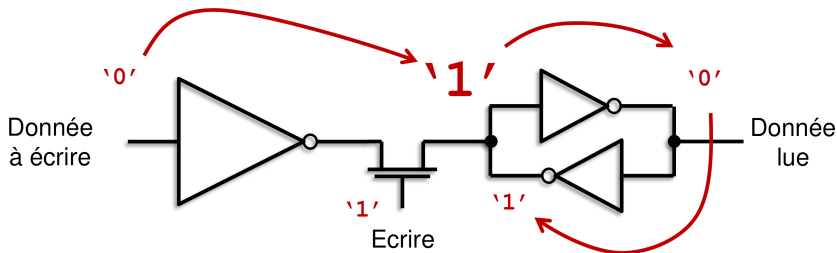
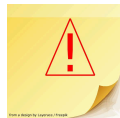


Un circuit assez particulier

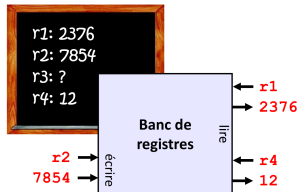


- Un circuit « bistable » c.-à-d. qui peut être dans un parmi deux états parfaitement stables
 👉 **un élément mémoire !**

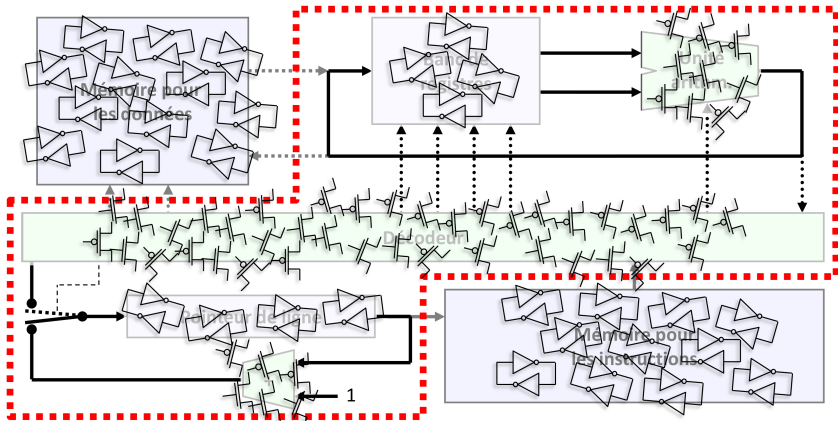
Comment écrire dans cette mémoire ?



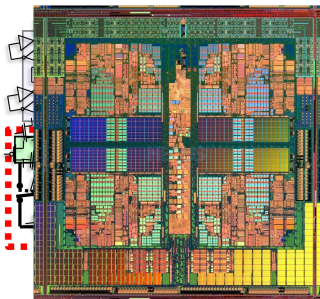
- ▶ Avec quelques transistors, on a un circuit mémoire parfait pour notre processeur



Maintenant on sait tout faire !

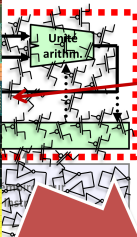


On a atteint notre but !



Architecture du
processeur

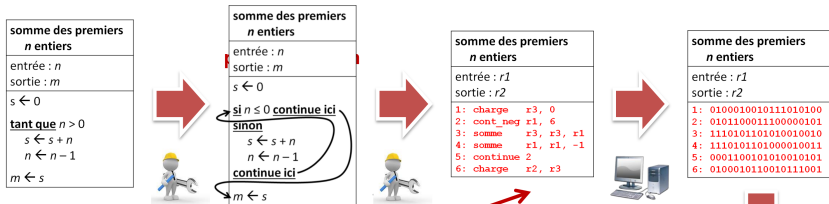
Circuit électronique



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



Des algorithmes aux ordinateurs

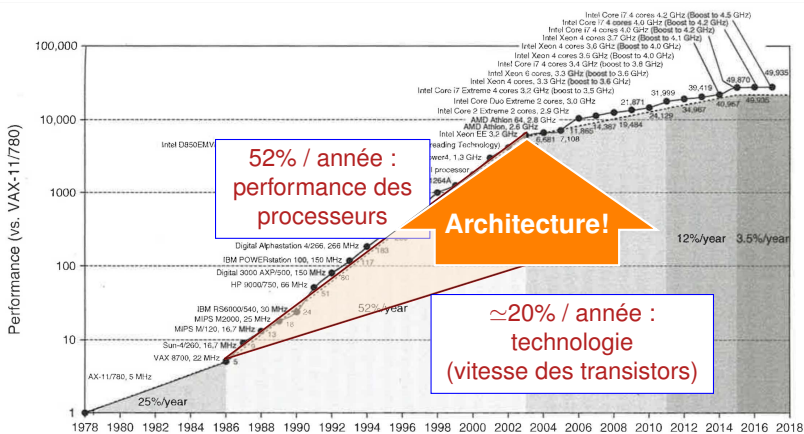


Logiciel

Matériel



La croissance de la performance



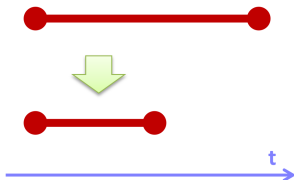
From: *Computer architecture : a quantitative approach*, Sixth edition,
John L. Hennessy & David A. Patterson, page 3, Morgan Kaufmann (Elsevier), 2017.

Augmenter la performance ?



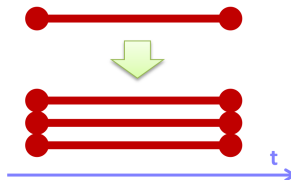
= Réduire le délai

temps d'attente pour obtenir un résultat



= Augmenter le débit

nombre de résultats dans l'unité de temps



À suivre : deux exemples simples d'amélioration de la performance :

1. Au niveau du circuit

Réduire le délai d'un additionneur

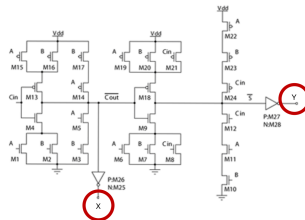
2. Au niveau de la structure du processeur

Augmenter le débit d'instructions

Faire des sommes est facile... (1/2)

sur 1 bit (**avec la retenue!**) :

A	B	C	XY
0	0	0	00
0	0	1	01
0	1	0	01
0	1	1	10
1	0	0	01
1	0	1	10
1	1	0	10
1	1	1	11



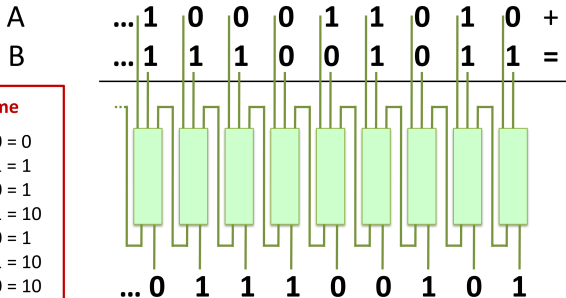
Les sorties XY sont la somme
(en représentation binaire)
des trois bits A, B et C à l'entrée



Addition !

Faire des sommes est facile... (2/2)

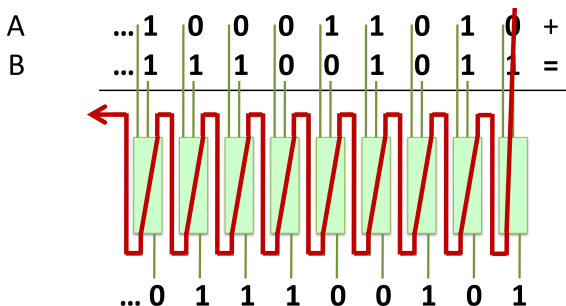
sur n bits :



Somme

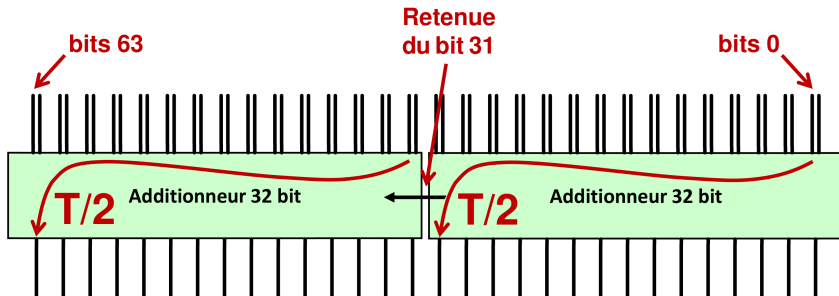
$0 + 0 + 0 = 0$
 $0 + 0 + 1 = 1$
 $0 + 1 + 0 = 1$
 $0 + 1 + 1 = 10$
 $1 + 0 + 0 = 1$
 $1 + 0 + 1 = 10$
 $1 + 1 + 0 = 10$
 $1 + 1 + 1 = 11$

Mais ce circuit est lent !



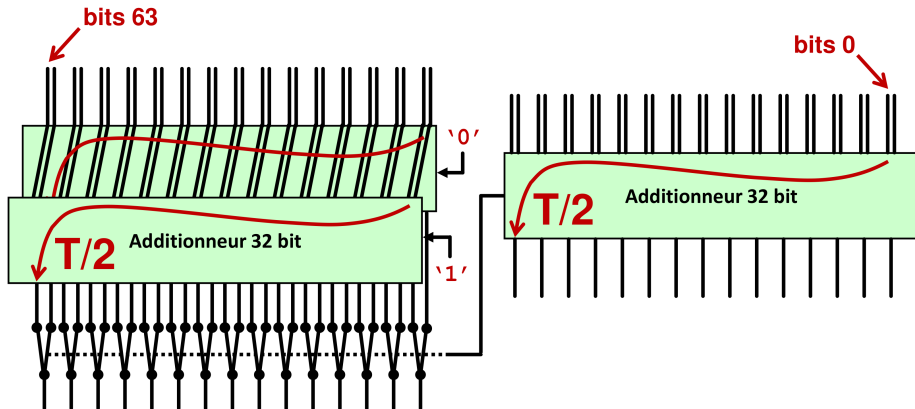
La propagation de la retenue est un aspect fondamental de la somme : ainsi implémenté, le **délai** d'un additionneur est donc *proportionnel au nombre de bits à additionner*.

Peut-on faire mieux ?



On n'a rien gagné : $T/2 + T/2 = T$

Peut-on faire mieux ?



Là on a **divisé le temps par 2** !..
...mais augmenté le travail/l'énergie par 1.5

Ingénierie informatique (1/2)

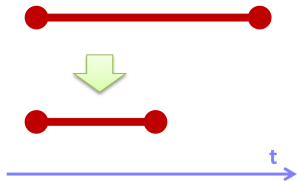
- ▶ On peut profondément changer la performance du circuit sans en changer la fonctionnalité.
- ▶ On peut investir plus de transistors et plus d'énergie pour obtenir des circuits très rapides.
- ▶ On peut ralentir les circuits pour épargner de l'énergie.

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

Augmenter la performance ?

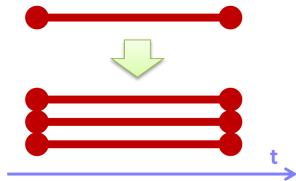
= Réduire le délai

temps d'attente pour obtenir un résultat



= Augmenter le débit

nombre de résultats dans l'unité de temps



À suivre : le second exemple simple d'amélioration de la performance :

- Au niveau du circuit

Réduire le délai d'un additionneur



Au niveau de la structure du processeur

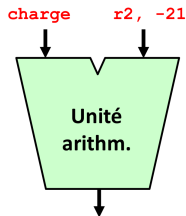
Augmenter le débit d'instructions

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

Comment faire mieux ?

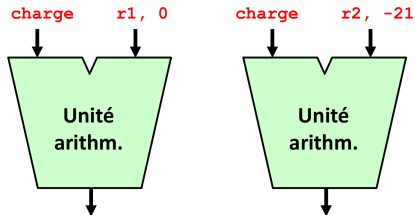


Doubler le débit de notre processeur ?

```
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 peut maintenant **exécuter deux instructions** par cycle !

Problèmes ?

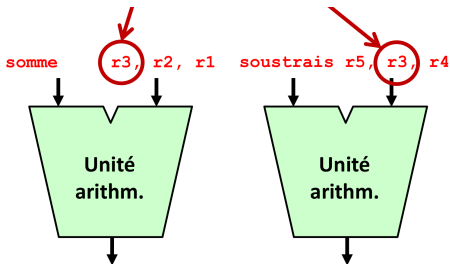


Doubler le débit de notre processeur ?

```
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 peut maintenant **exécuter deux instructions** par cycle !

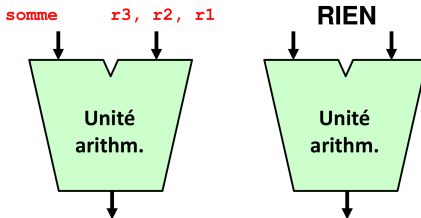
Problèmes ?



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
```

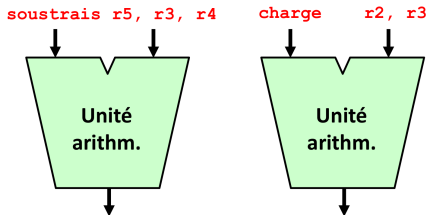
Solution : retarder l'exécution de certaines instructions :



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
```

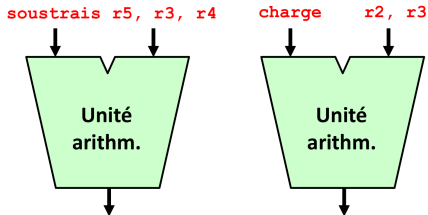
Solution : et n'exécuter en parallèle que des instructions indépendantes :



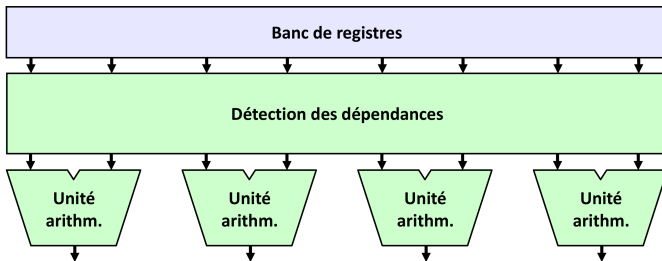
~~Doubler le débit de notre processeur~~

```
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
entre une et deux instructions
par cycle...
...et le résultat est correct.



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`).

Ingénierie informatique (2/2)

- ▶ 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.

Ceci est un exemple d'**architecture des ordinateurs** qui est une autre branche de l'*ingénierie informatique* (*Computer Engineering*)

Ce que j'ai appris aujourd'hui

Dans ce cours, vous avez vu

- ▶ les principes de fonctionnement des ordinateurs actuels
- ▶ basés sur l'**architecture de von Neumann** :
 - ▶ processeur (CPU) ;
 - ▶ mémoire ;
 - ▶ périphériques ;
- ▶ comment un ordinateur traduit un langage de programmation dans ses instructions internes (compilation en langage machine) ;
- ▶ les compromis nécessaires entre performances et énergie consommée :
 - ▶ jouer sur le **délai** ;
 - ▶ et le **débit** (parallélisme).