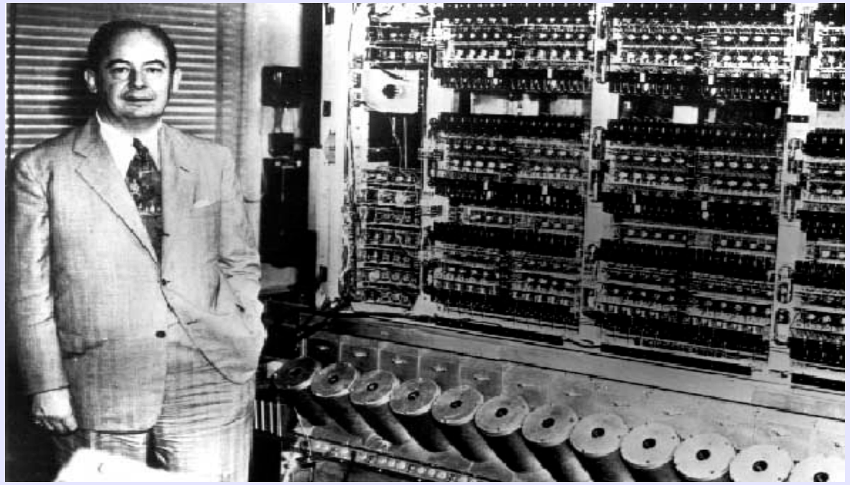
  

Information, Calcul et Communication

Module 3 : Systèmes

Information, Calcul et Communication

Ordinateur à programme enregistré

Paolo Ienne

La première question de cette leçon

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

☞ **Algorithme** :

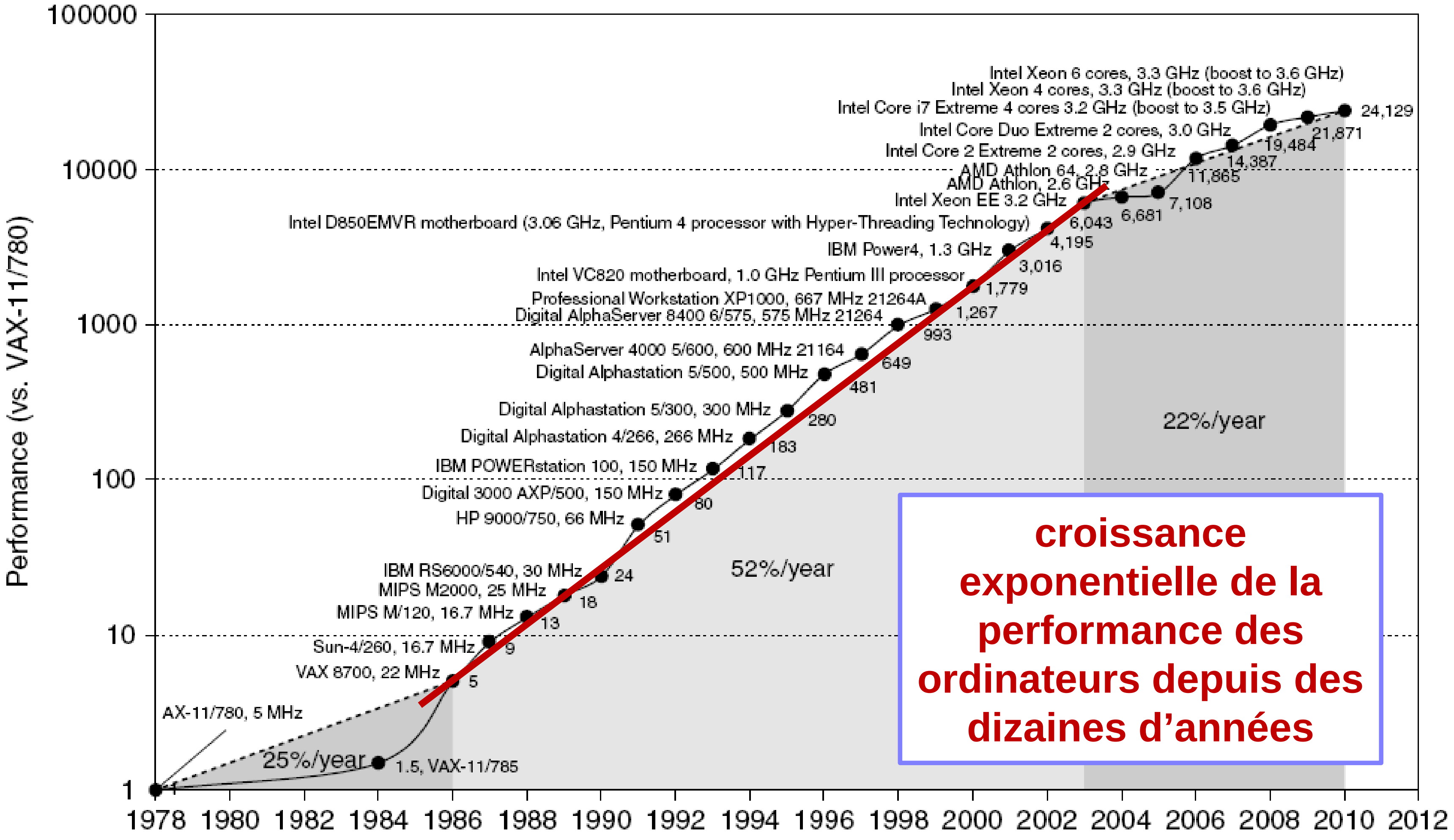
Second degré

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

Le deuxième question de cette leçon

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



Source: Hennessy & Patterson, © MK 2011

Des algorithmes aux ordinateurs

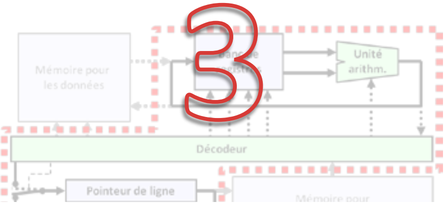
On va partir des algorithmes qu'on a étudié…

…pour les réécrire d'une façon plus formelle…

…et les rendre compréhensibles à une machine

Logiciel

Matériel



En parallèle, on va créer une machine abstraite…

…pour la réaliser avec des transistors

Comment écrit-on un algorithme ?

somme des premiers *n* entiers
entrée : n *entier positif*   sortie : m

s ← 0
 	
 <u>tant que</u> $n > 0$
     $s \leftarrow s + n$
     $n \leftarrow n - 1$
 	
 $m \leftarrow s$

- Pour exprimer l'idée d'un algorithme, dans le Module 1 on a utilisé une sorte de « langage » intuitif, parfois proche du langage naturel

Essayons de le réécrire avec moins de liberté

On a besoin de mémoriser des valeurs

on va se restreindre à des symboles comme **r1**, **r2**, **r3**,…

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

Les « registres »

- On appelle les variables « registres »
- On les représente par **`r1`**, **`r2`**, **`r3`**,…
- On remplace tous les noms arbitraires de nos variables par ces nouveaux noms

  - Au lieu d’écrire *n* on écrit **`r1`**
  - Au lieu d’écrire *m* on écrit **`r2`**
  - Au lieu d’écrire *s* on écrit **`r3`**

Continuons…

somme des premiers *n* entiers
entrée : n sortie : m

$s \leftarrow 0$
 	
<u>**tant que**</u> $n > 0$
    $s \leftarrow s + n$
    $n \leftarrow n - 1$
 	
$m \leftarrow s$

On a besoin d'assigner des nouvelles valeurs à ces symboles suite à des opérations

on va écrire cela
d'une façon très régulière

P.ex.,
« `somme r1, r1, r3` »
pour signifier $r1 \leftarrow r1 + r3$

Les opérations ou « instructions »

- On définit un **nombre limité** d'opérations; p.ex.
  - **`charge`** pour l'assignation (= affectation)
  - **`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 registres soit des constantes** (p.ex., 73)
- 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

a *b*

```
somme r5, r6, r7
multiplie r5, r5, r8
```

c

s

Un langage un peu moins vague ?

somme des premiers *n* entiers	**somme des premiers *n* entiers**
entrée : *n* sortie : *m*	entrée : *r1* sortie : *r2*

$s \leftarrow 0$
 	
<u>**tant que**</u> $n > 0$
$s \leftarrow s + n$
$n \leftarrow n - 1$
 	
$m \leftarrow s$
	`charge r3, 0`
	
	`??!?!`
	
	`somme r3, r3, r1`
	`somme r1, r1, -1`
	
	`charge r2, r3`

…et d'autres moins évidentes !

Quelques transformations sont très simples…

Peut-être peut-on faire quelques modifications…

somme des premiers *n* entiers
entrée : n *entier positif* 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 : n *entier positif* sortie : m

$s \leftarrow 0$
 	
tant que $n > 0$
 	
    $s \leftarrow s + n$
    $n \leftarrow n - 1$
 	
$m \leftarrow s$

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

Peut-être peut-on faire quelques modifications…

somme des premiers n entiers
entrée : n *entier positif* 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 : n *entier positif* sortie : m

$s \leftarrow 0$
 	
si $n = 0$ **continue ici**
 	
    $s \leftarrow s + n$
    $n \leftarrow n - 1$
continue ici
 	
$m \leftarrow s$

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

Quelques nouvelles instructions

somme des premiers *n* entiers

entrée : n *entier positif*

sortie : m

1: $s \leftarrow 0$

2: si $n = 0$ continue ici

3: sinon

4: $\quad s \leftarrow s + n$

5: $\quad n \leftarrow n - 1$

6: continue ici

7: $m \leftarrow s$

On doit spécifier les destinations de ces « continue ici »

au lieu des flèches, on peut utiliser les numéros de ligne: **1**, **2**, **3**,…

Quelques nouvelles instructions

On a besoin de spécifier que l'exécution ne continue pas à la ligne suivante

somme des premiers *n* entiers
entrée : *n* *entier positif* sortie : *m*
1: $s \leftarrow 0$ 2: si $n = 0$ continue ici 3: sinon 4: $s \leftarrow s + n$ 5: $n \leftarrow n - 1$ 6: continue ici 7: $m \leftarrow s$

on introduit une nouvelle action/instruction « `continue 2` » pour signifier continue ici

Quelques nouvelles instructions

somme des premiers *n* entiers

entrée : *n* *entier positif*
sortie : *m*

1: $s \leftarrow 0$
2: **si** $n = 0$ **continue ici**
3: **sinon**
4: $\quad s \leftarrow s + n$
5: $\quad n \leftarrow n - 1$
6: **continue ici**
7: $m \leftarrow s$

On doit pouvoir réagir à des conditions

on introduit des actions/instructions conditionnelles comme « `cont_nul r1, 7` » pour signifier
si **r1** *est nul* **continue ici**

Les instructions « de saut »

- La famille des instructions du type `continue` spécifie que la prochaine instruction à exécuter **n'est pas à la ligne suivante** mais à la ligne spécifiée dans l'instruction
- On définit un **nombre limité** de tests possibles; p.ex.
  - `continue 7` pour le saut vers la ligne 7 sans conditions
  - `cont_egal r1, r2, 14` pour le saut vers la ligne 14 si `r1` est égal à `r2`
  - `cont_nul r1, 12` pour le saut vers la ligne 12 si `r1` est nul
  - `cont_neg r1, 31` pour le saut vers la ligne 31 si `r1` < 0
- Toutes ces instructions ont **jusqu'à deux opérandes et une ligne de destination**

  - Au lieu d'écrire **continue ici** on écrit `continue 2`
  - Au lieu d'écrire **si** *n* = 0 **continue ici** on écrit `cont_nul r1, 6`

Un langage un peu moins vague !

somme des premiers *n* entiers
entrée : *n* sortie : *m*

$s \leftarrow 0$
 	
si $n = 0$ continue ici
sinon
    $s \leftarrow s + n$
    $n \leftarrow n - 1$
continue ici
 	
$m \leftarrow s$

Maintenant, tout marche !

somme des premiers *n* entiers
entrée : *r1* sortie : *r2*

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

Et celui-là, où est-il passé ?!

Petit résumé…

- 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 des variables comme **`r1`**, **`r2`**, **`r3`**, etc.—on les appelle **« registres »**
- Certaines actions indiquent un *branchement* (p.ex., **`continue`**, si ce branchement est inconditionnel, ou **`cont_nul`**, si il est à suivre seulement dans certains cas)—on les appelle **« instructions de saut »**

EPFL

Est-ce que cela nous rapproche du but ?

somme des premiers *n* entiers
entrée : *r1* *entier positif* sortie : *r2*

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

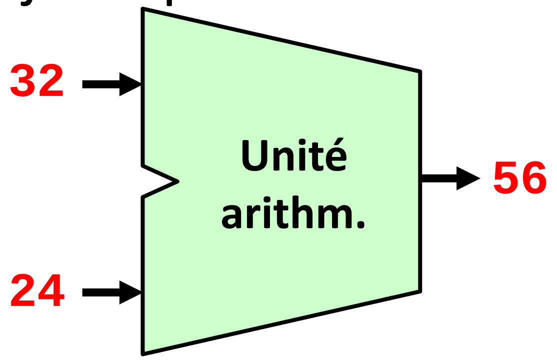
Langage assembleur

Essayons de créer une telle machine…

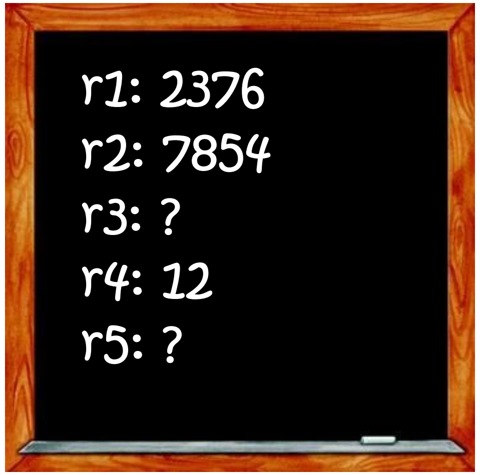
De quoi a-t-on besoin ?

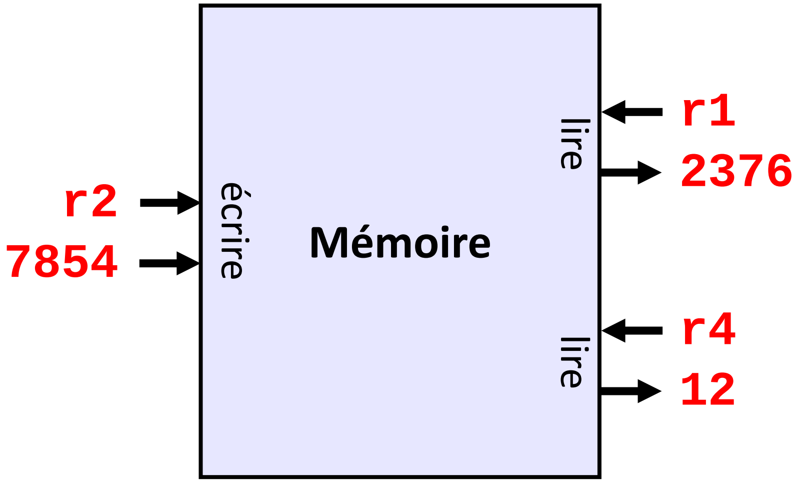
- Pour les calculs (somme, etc.) on a besoin d'un objet capable de les effectuer

32 +
24 =
56

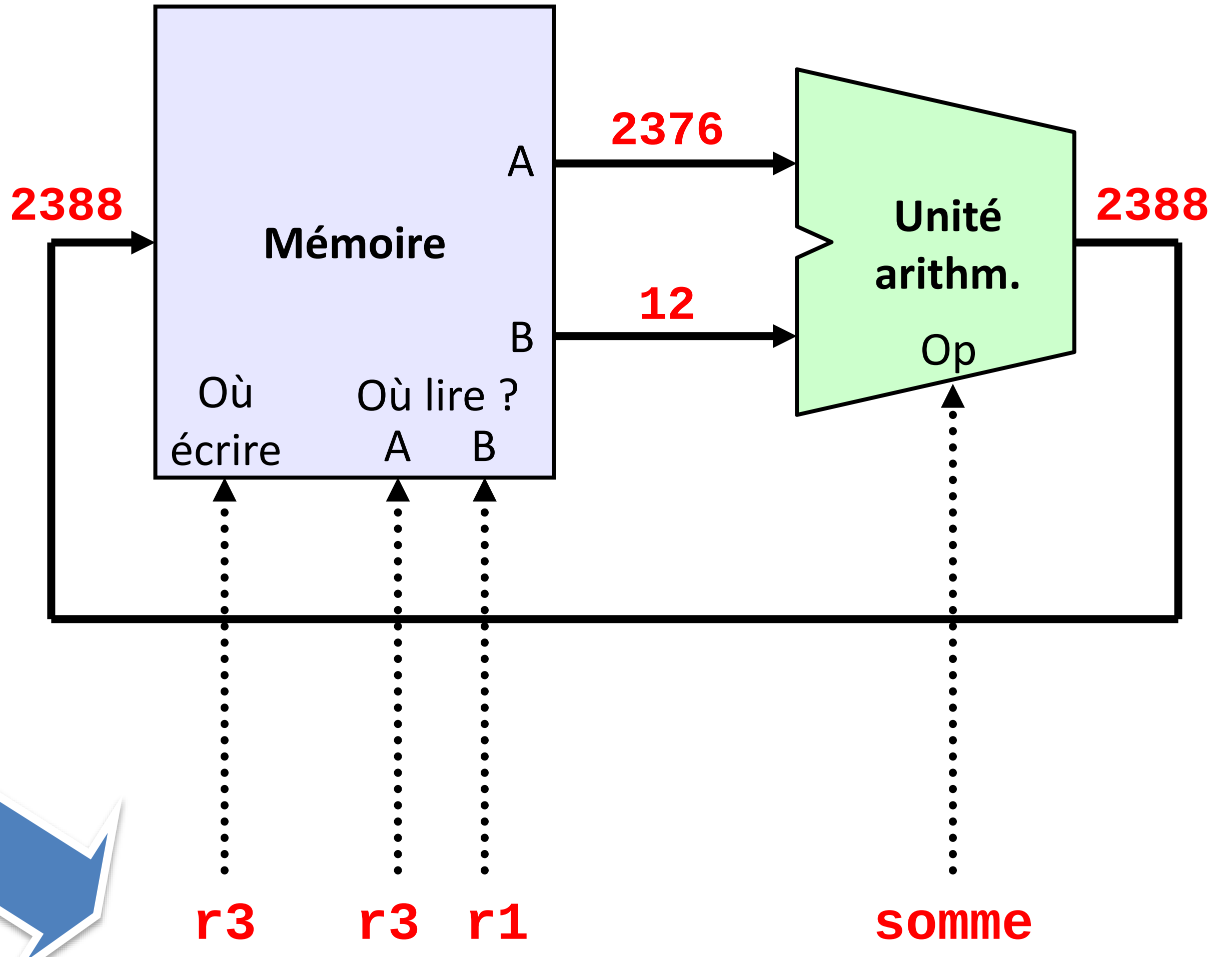


- Les calculs ont besoin d'opérandes et il faut les mémoriser quelque part





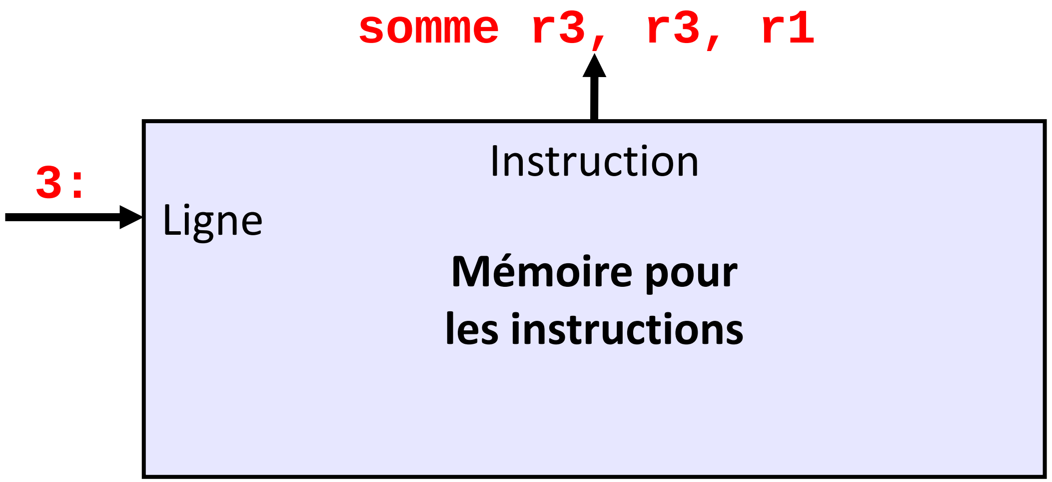
Le circuit pour les données



somme r3, r3, r1

De quoi a-t-on encore besoin ?

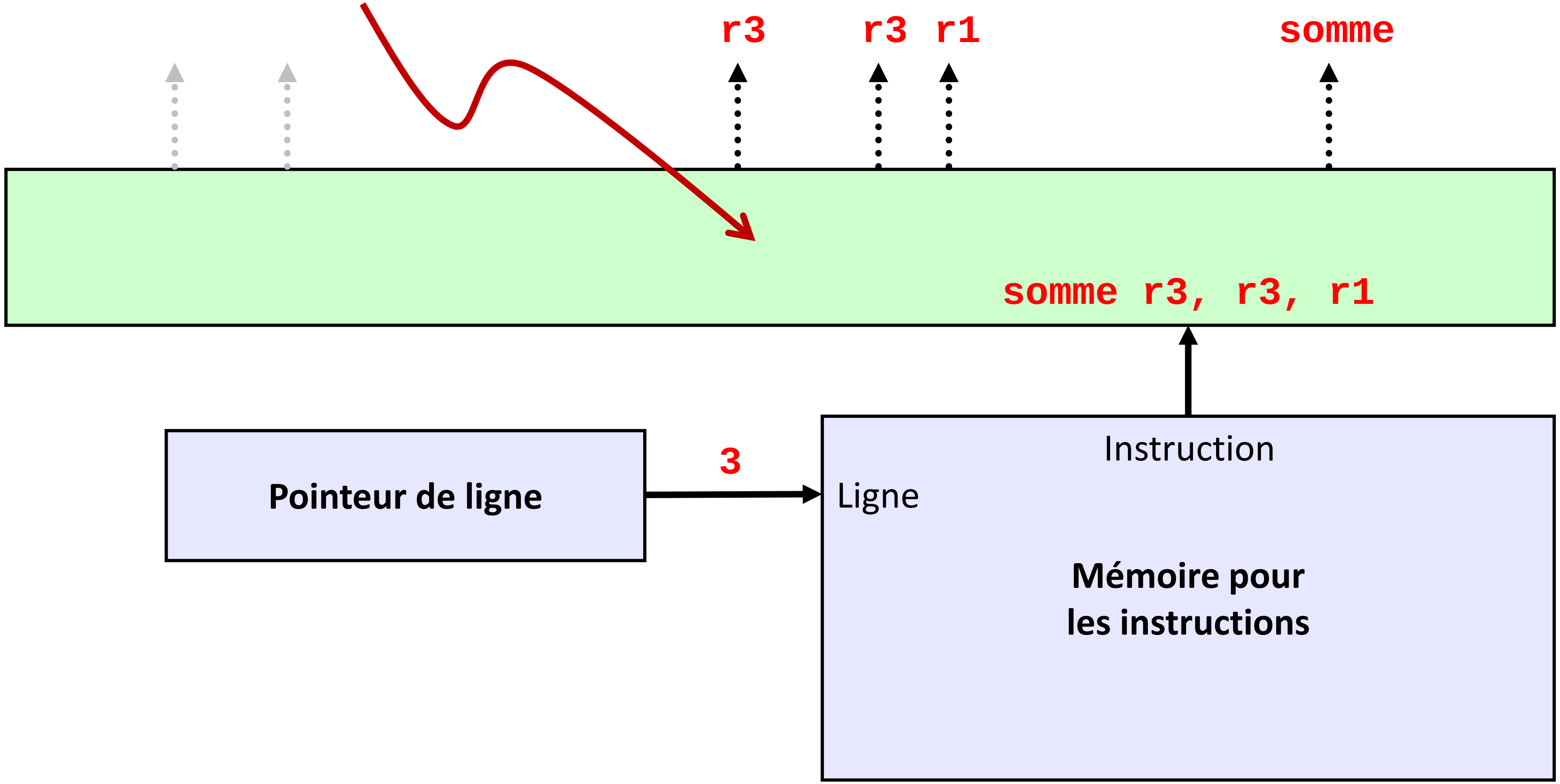
- On doit mettre notre programme en assembleur quelque part



- Il faut savoir où on en est

Un première partie pour contrôler le tout…

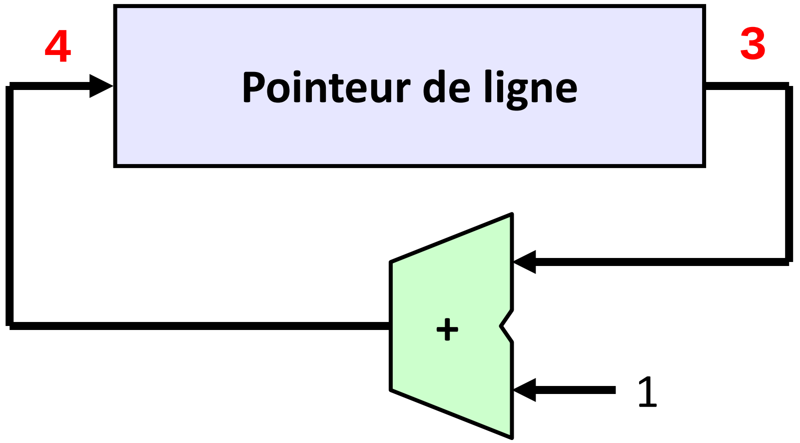
Un circuit assez simple qui répartit les éléments qui constituent une instruction



De quoi a-t-on encore besoin ?

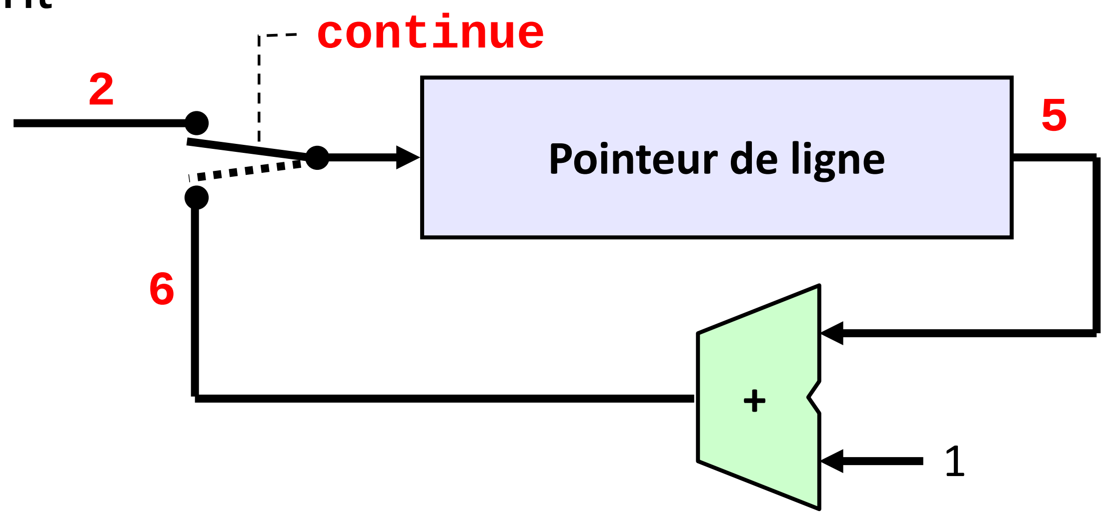
- Normalement on veut passer d'une ligne à la suivante

`3: somme    r3, r3, r1`

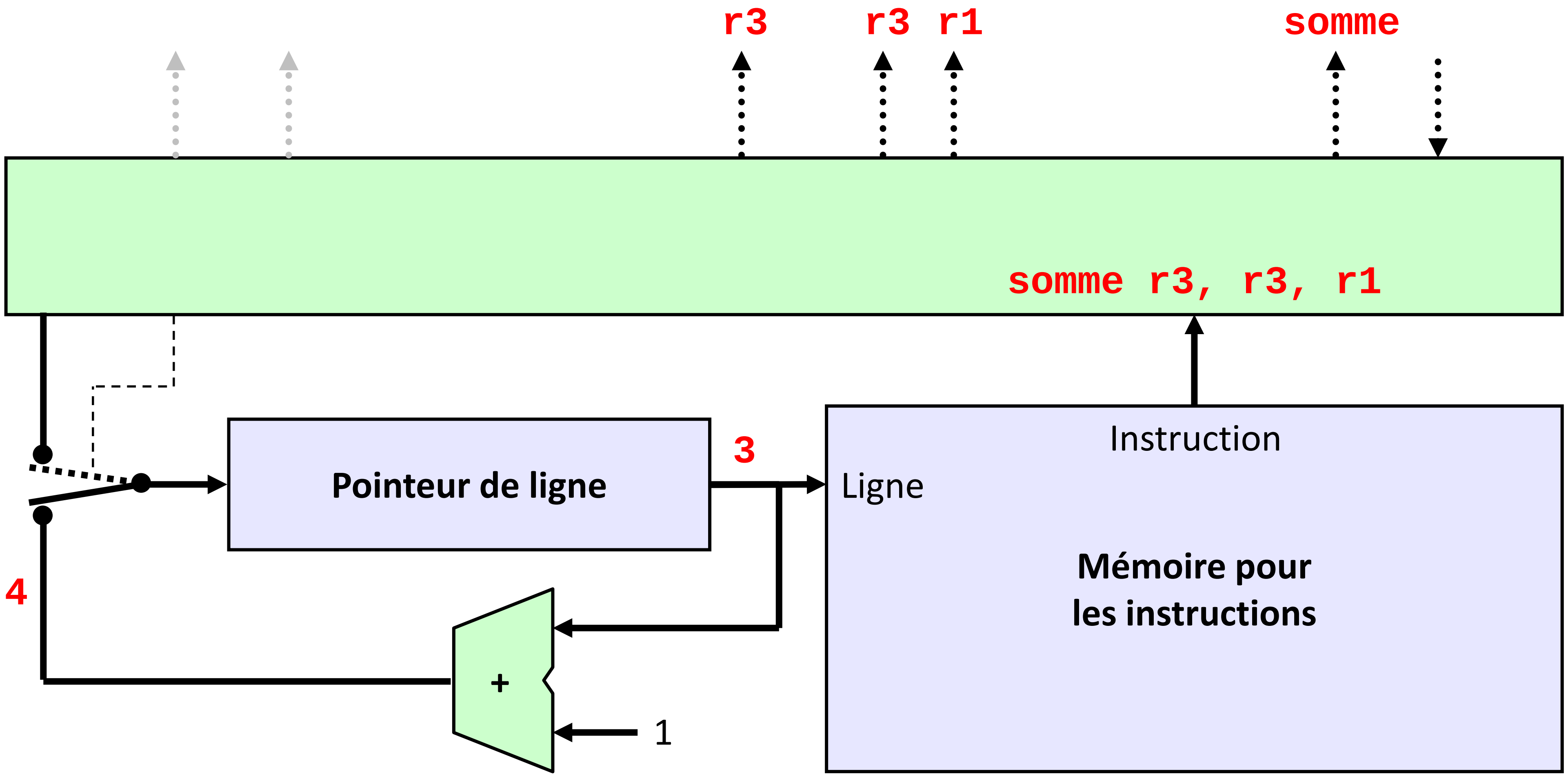


- Si on a une instruction `continue`, on veut imposer une autre ligne à lire prochainement

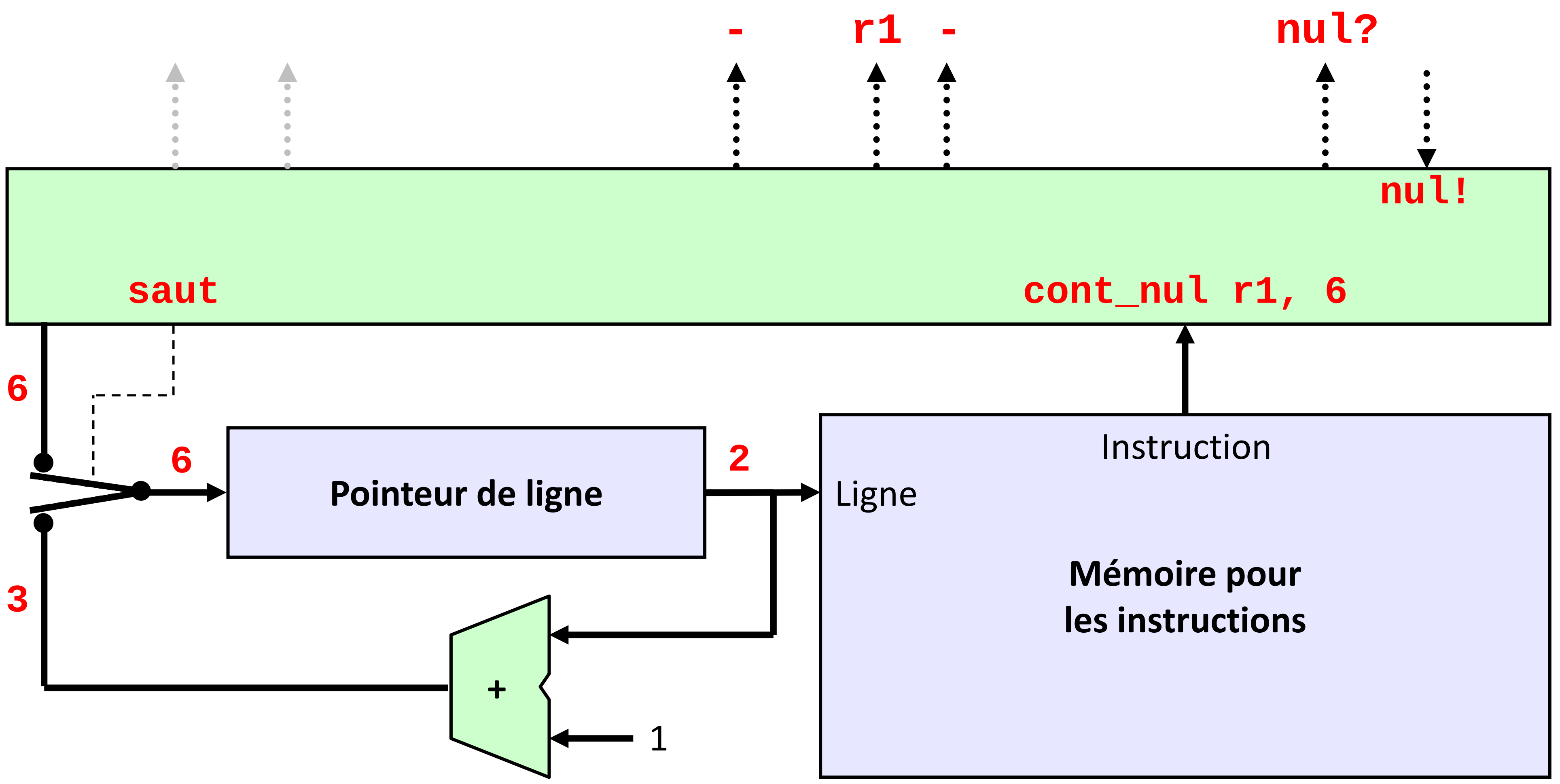
`5: continue 2`



Le circuit pour le contrôle

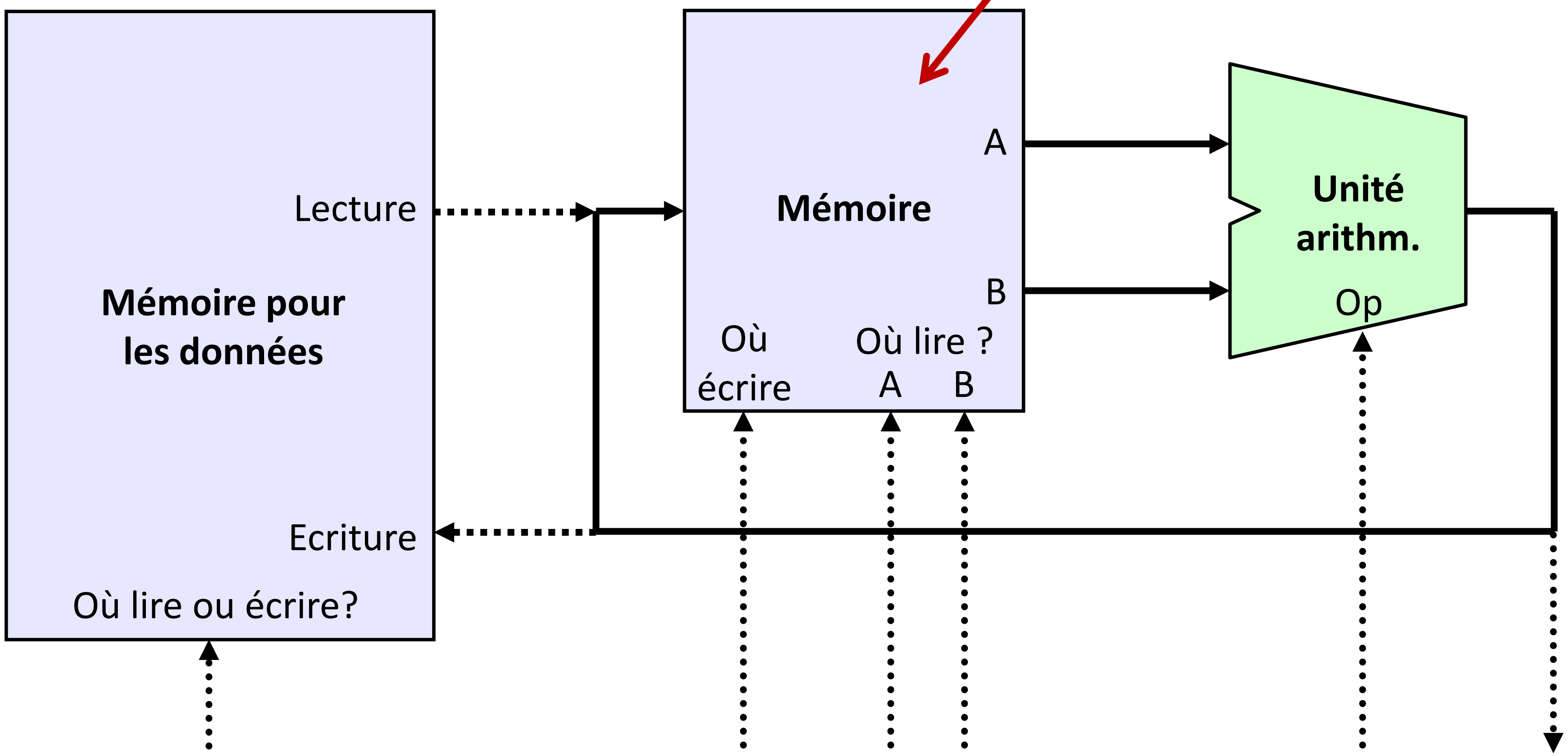


En cas de saut ?

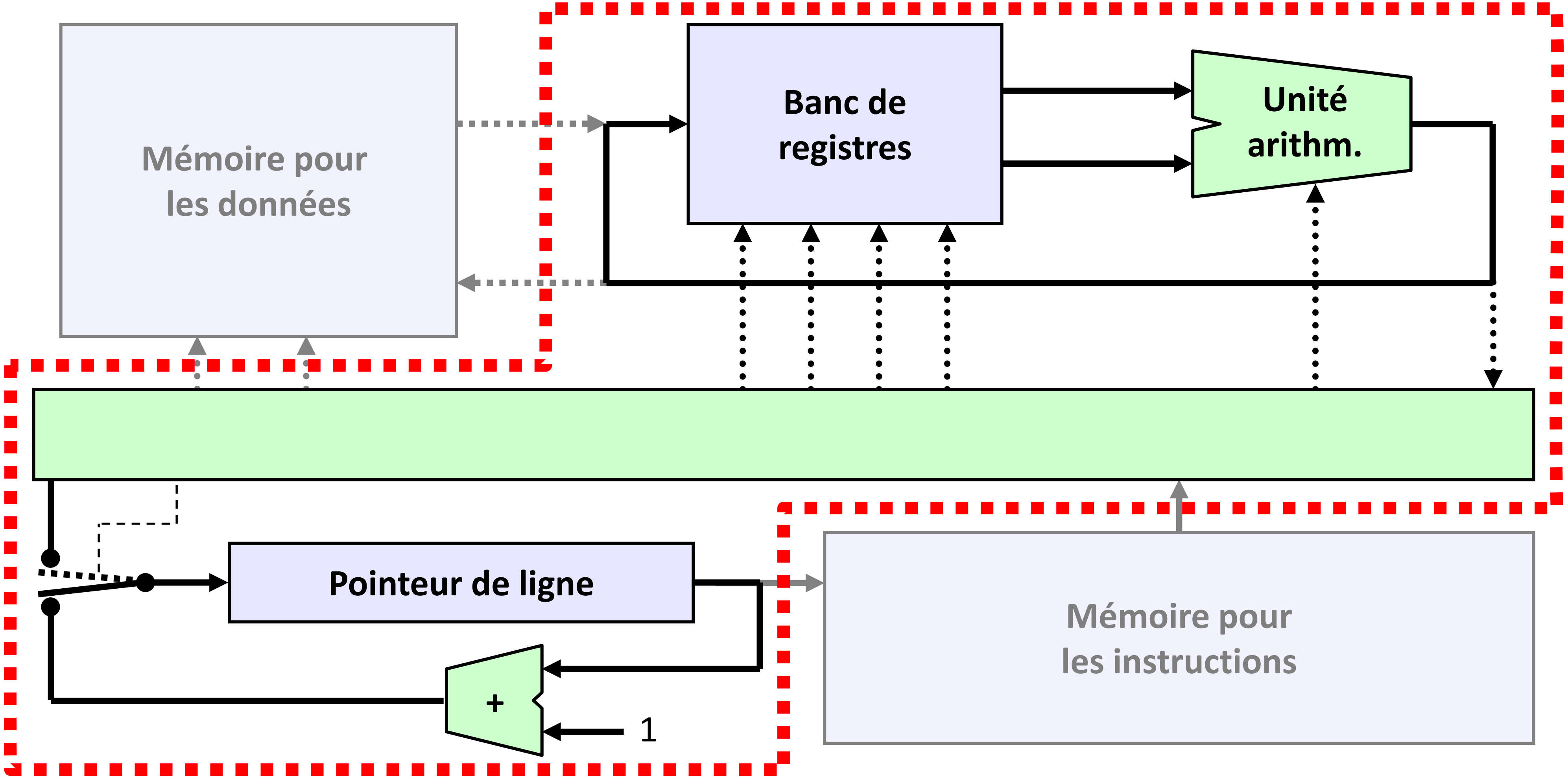


Une mémoire pour avoir plus de données

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

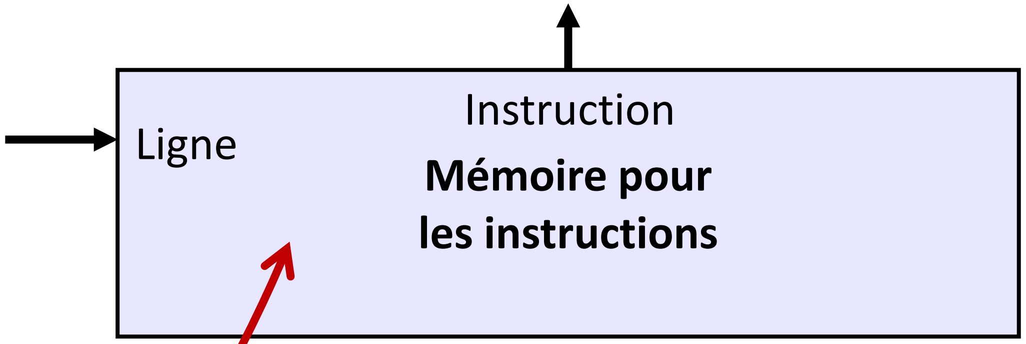


Un processeur !



Comment encoder les instructions ?

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



- On peut inventer un encodage simple (v. module 1, leçon 1) :
  - Quelques bits pour identifier l'opération (p.ex., si on a 256 opérations possibles, 8 bits sont suffisants)
  - Quelques bits pour identifier les registres (p.ex., si on a 32 registres, 3 x 5 bits = 15 bits)
  - Et ainsi de suite pour le reste…
- Peut-être peut-on s'en sortir avec 32 ou 64 bits comme pour un entier typique

? somme r3, r3, r1

`000000000 00010010 00011 00011 00001`

La valeur **592,993** représente l'instruction `somme r3, r3, r1`

Encoder les instructions

somme des premiers *n* entiers

entrée : *r1*
sortie : *r2*

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

Langage assembleur

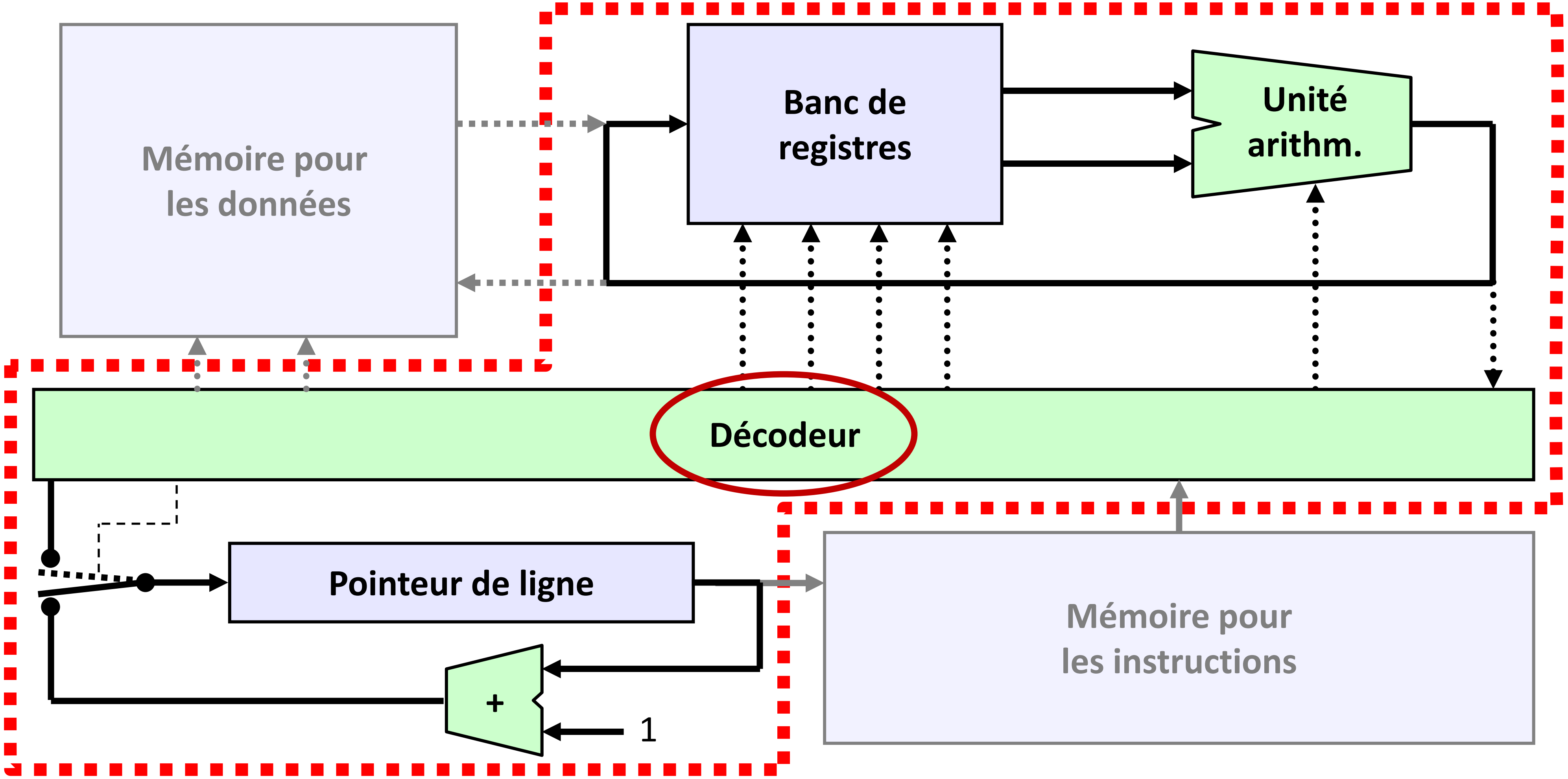
somme des premiers *n* entiers

entrée : *r1*
sortie : *r2*

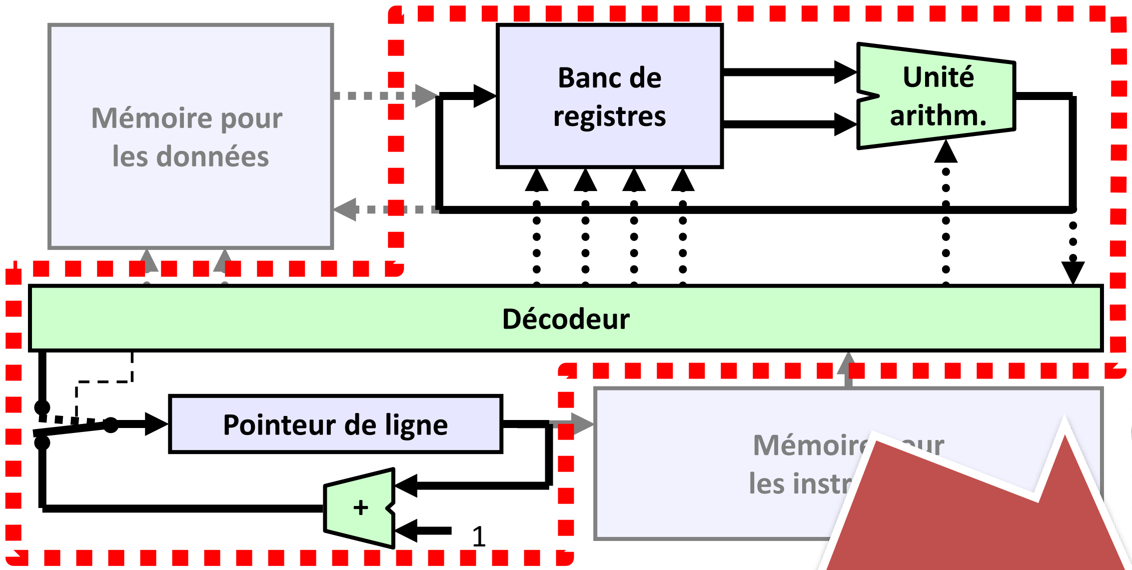
```
1: 0100010010111010100
2: 0101100011100000101
3: 1110101101010010010
4: 1110101101000010011
5: 0001100101010010101
6: 0100010110010111001
```

Langage machine en binaire

Un processeur !



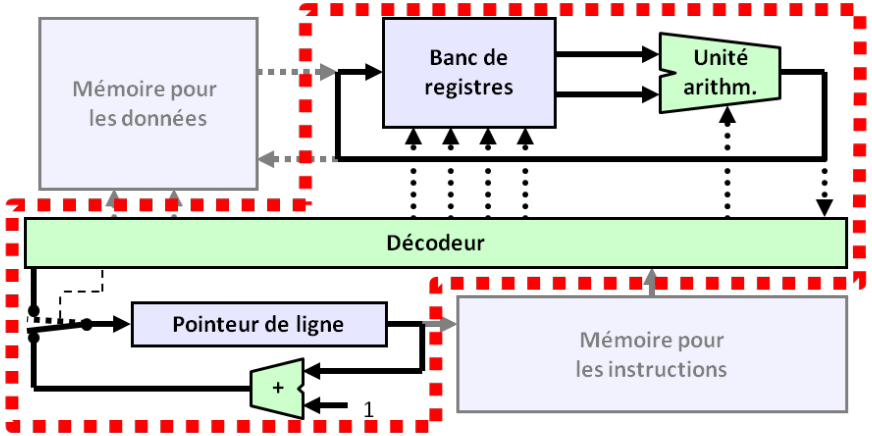
On s'en approche…



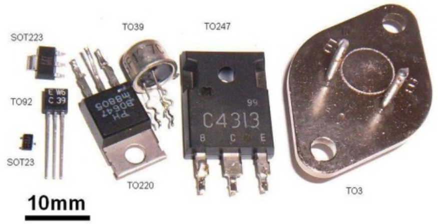
Architecture du processeur

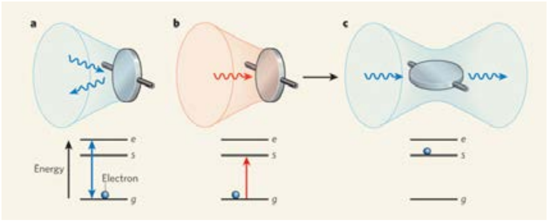
Jusque-là, pas de choix technologique…

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

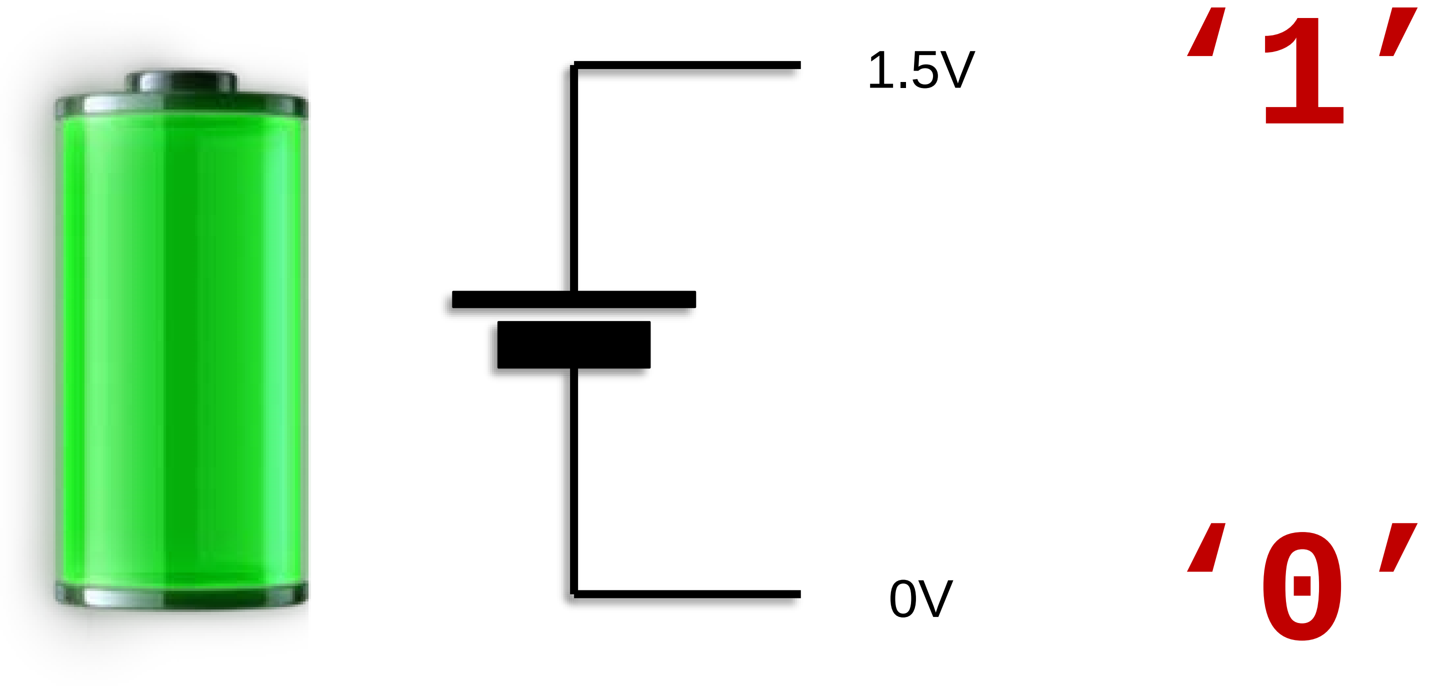


- Toute technologie est possible :
  - Electromécanique (p.ex., relais)
  - Electronique (p.ex., tubes ou transistors)
  - Optique



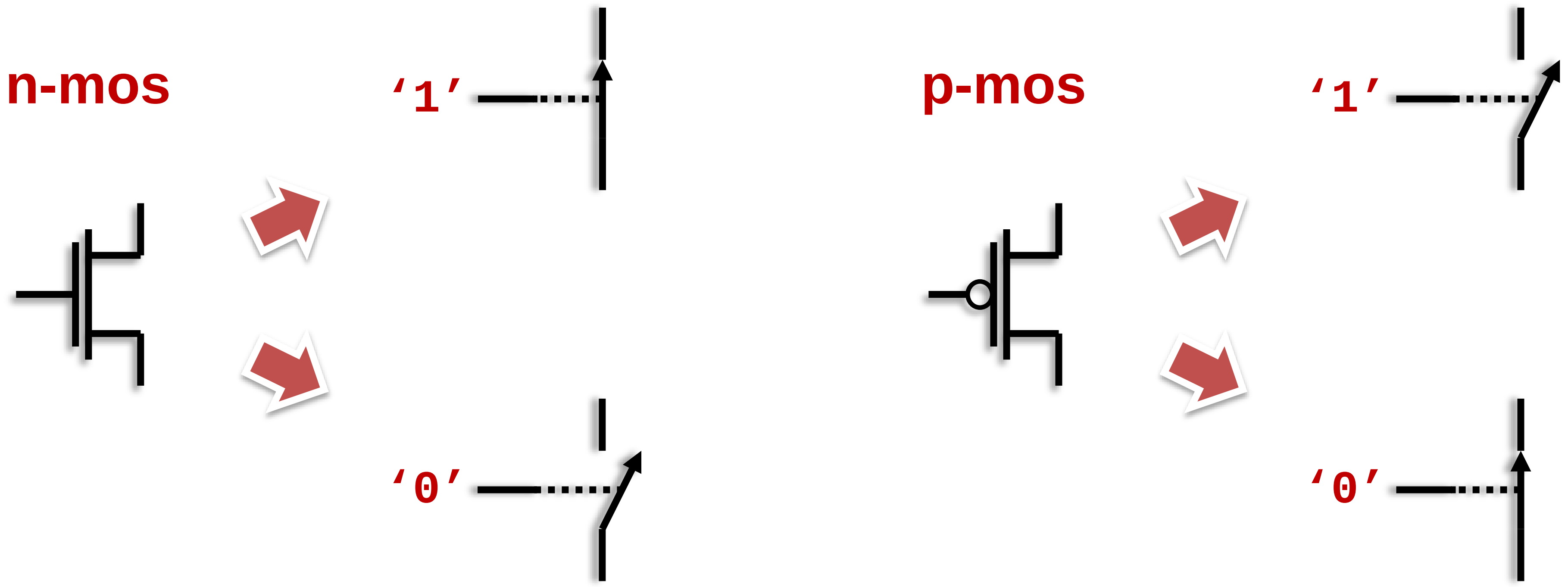


Une pile, deux niveaux de tension



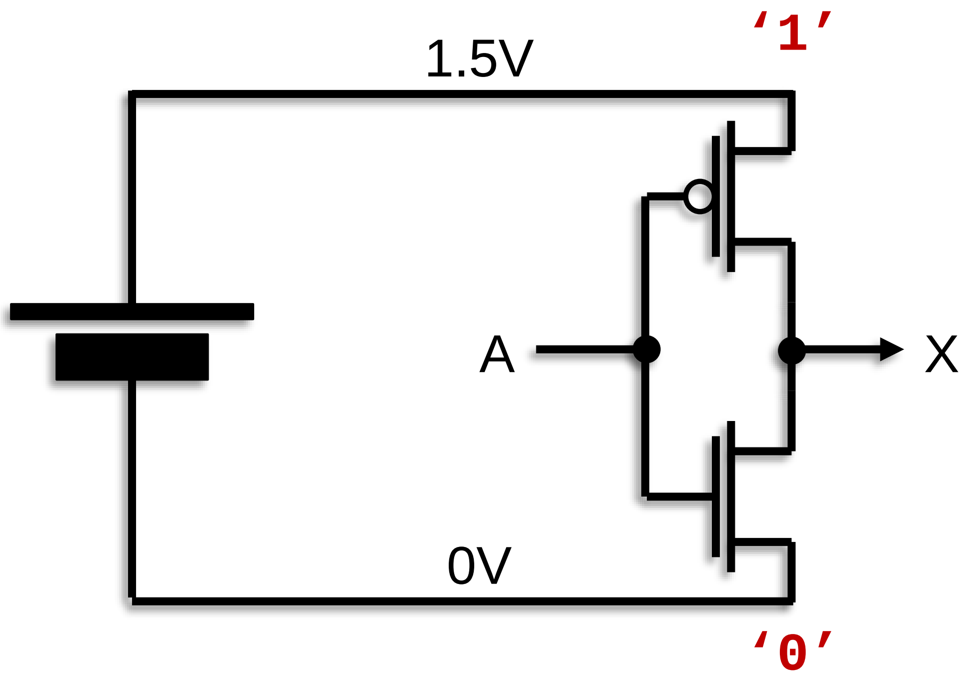
- Très bien adaptés à représenter l'information de manière binaire

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…)

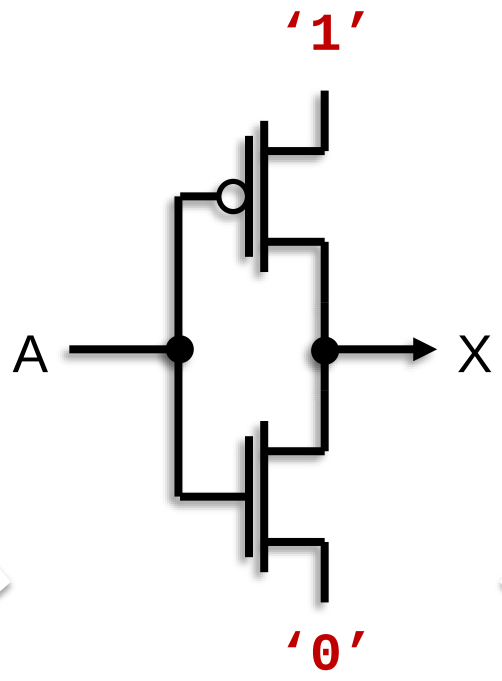
Un inverseur (en CMOS)

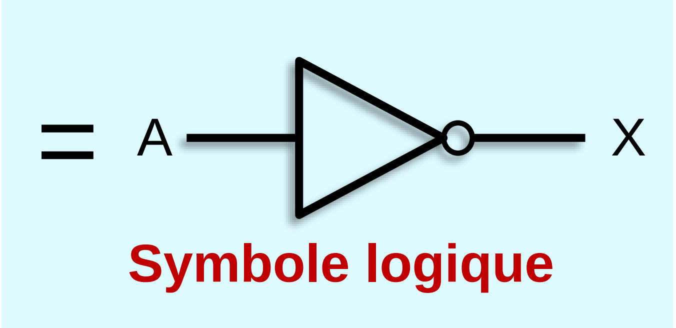


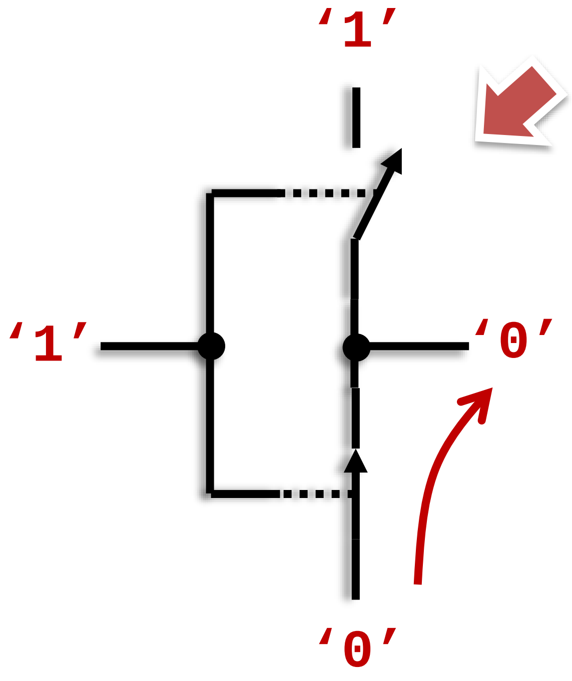
Un inverseur (en CMOS)

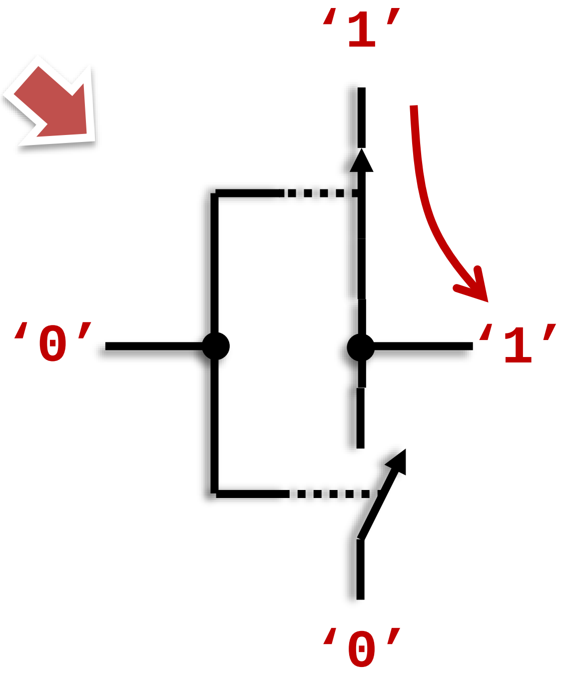
Table de la vérité

A	X
0	1
1	0

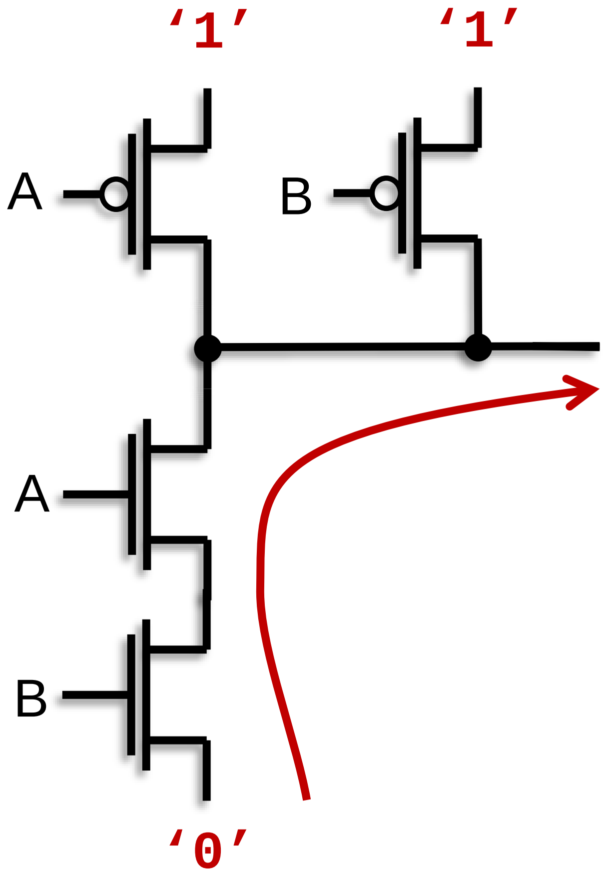








Un circuit « et » avec sortie inversée

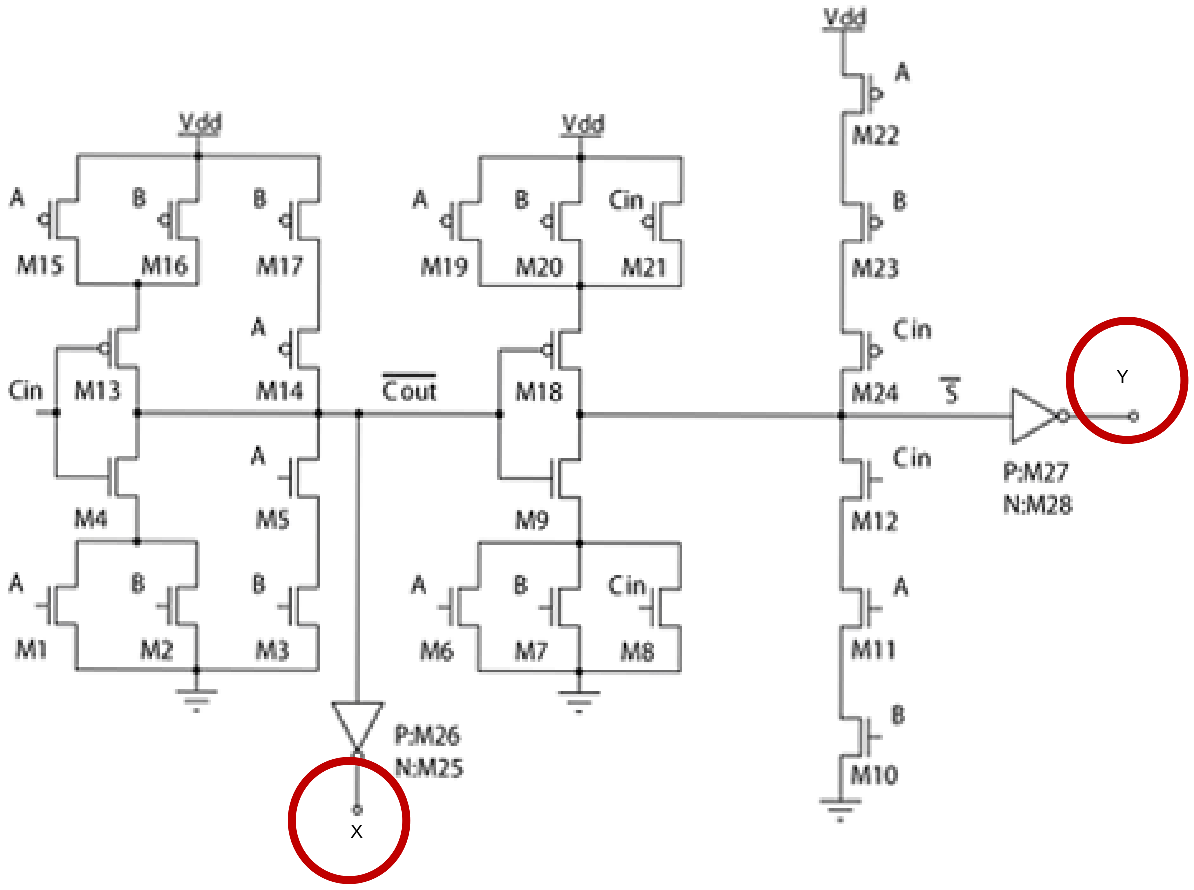


A	B	A et B inversé
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- 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 n'importe quelle fonction !

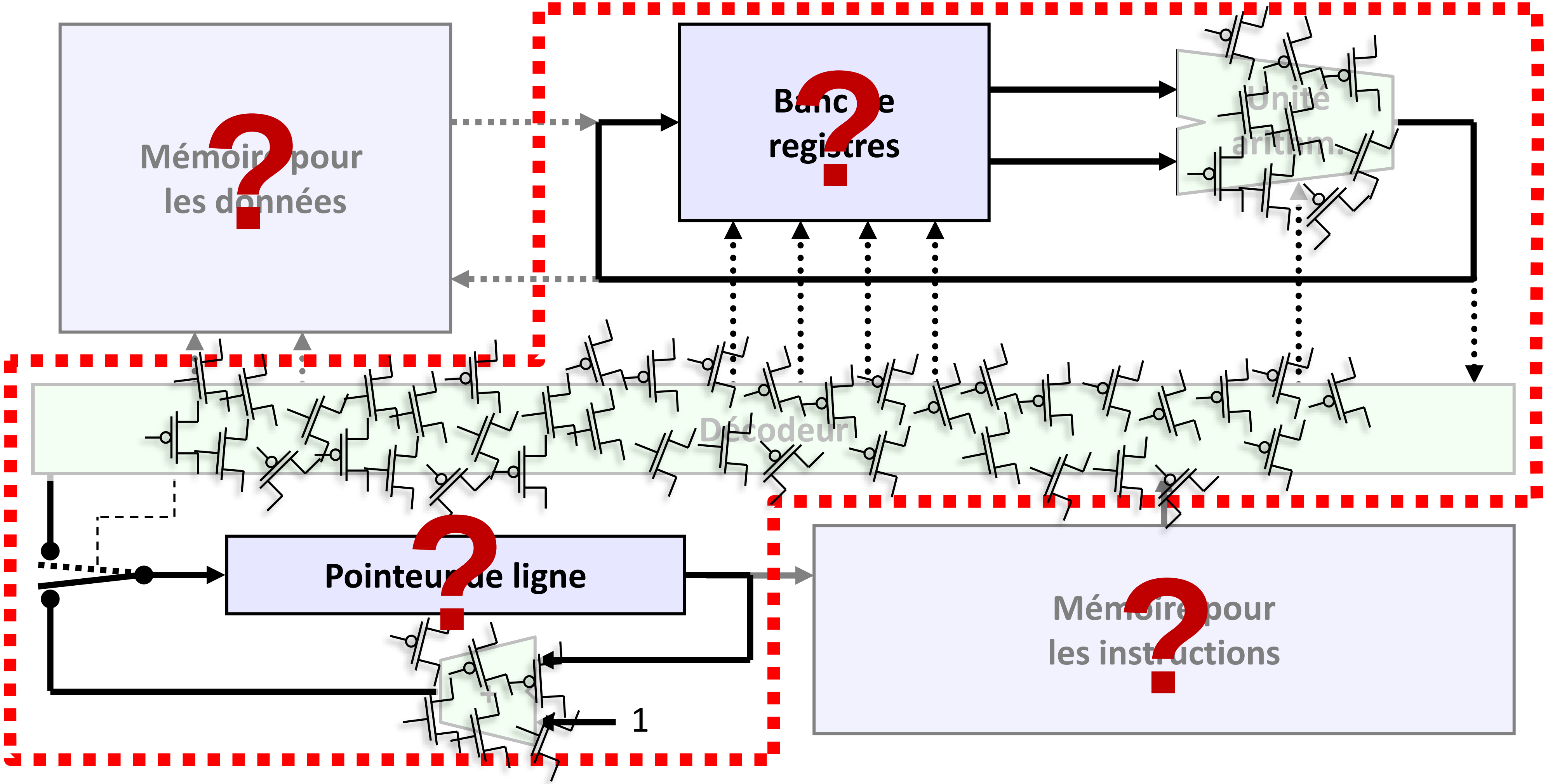
A	B	C	XY
0	0	0	00
0	0	1	01
0	1	0	01
0	1	1	10
1	0	0	01
1	0	1	10
1	1	0	10
1	1	1	11



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

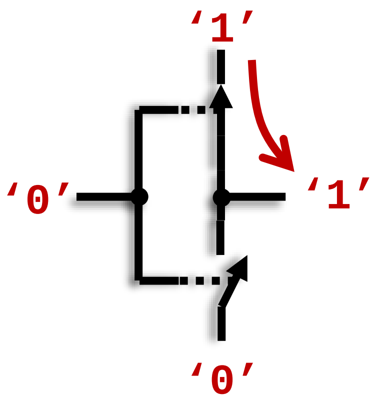
Addition !

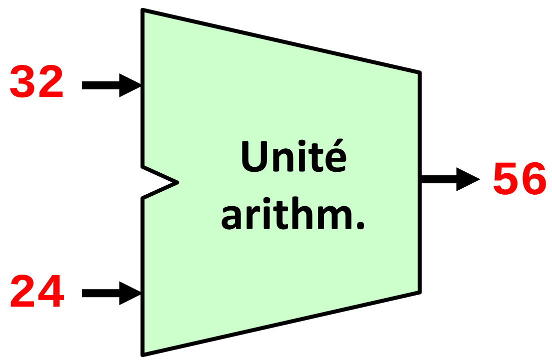
Et notre processeur, donc ?



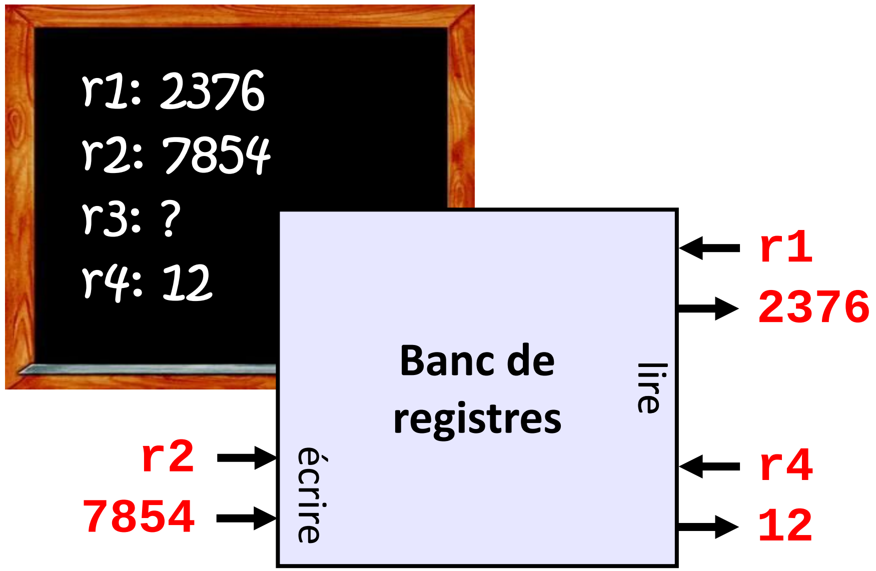
Peut-on aussi mémoriser l’information ?

- Pour les calculs, tout va bien :

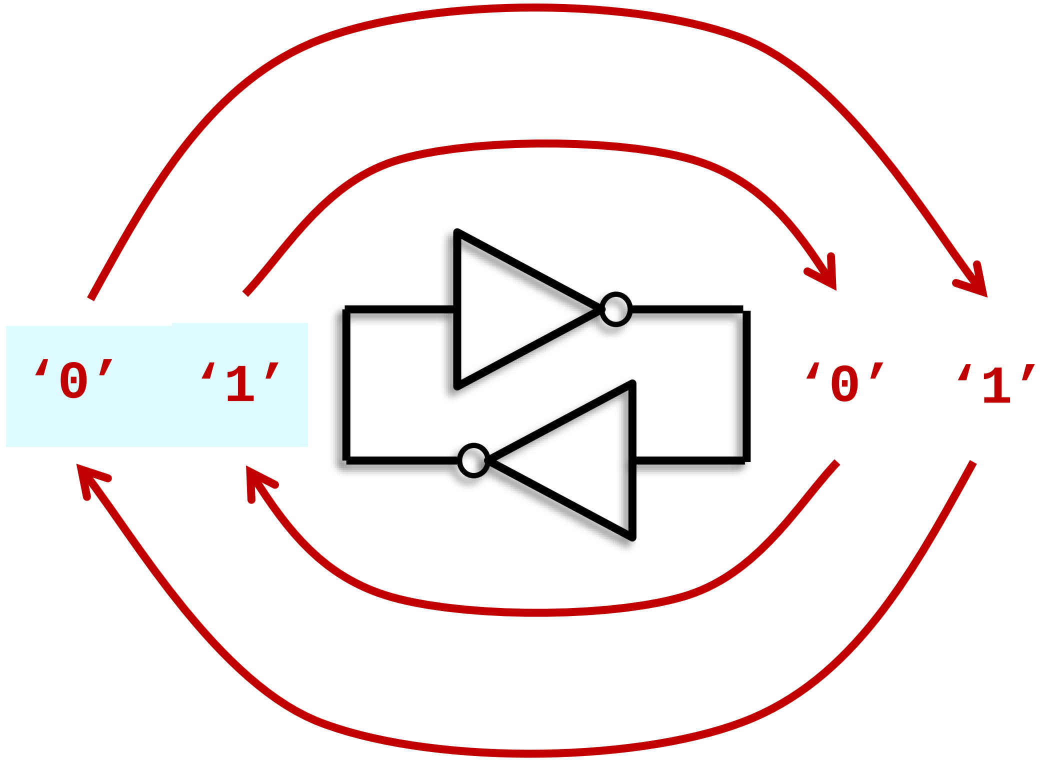




- Mais pour mémoriser ?!

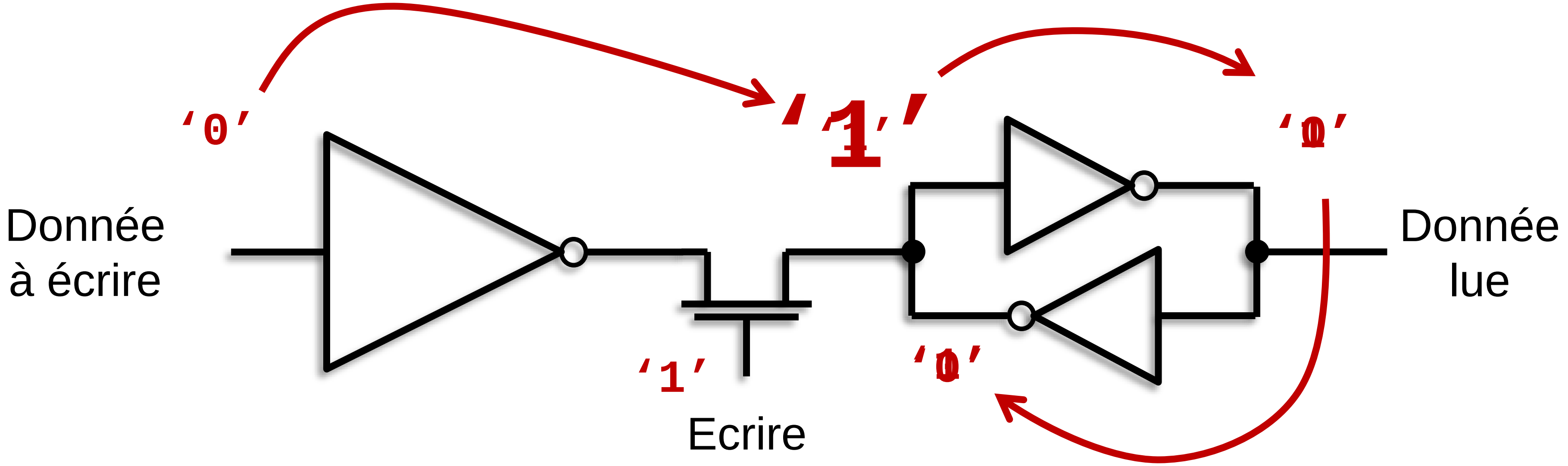


Un circuit assez particulier

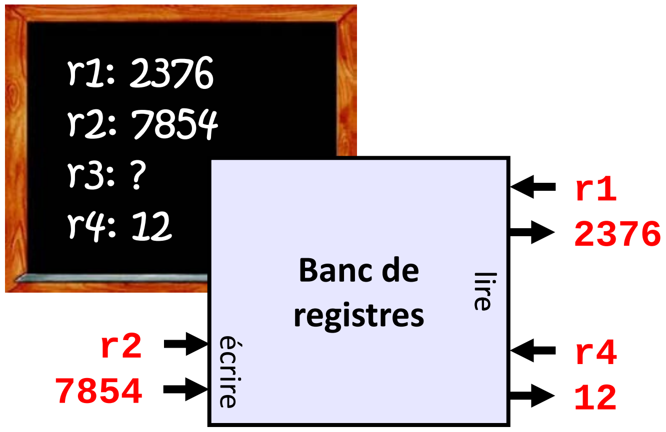


- Un circuit « bistable » c.à.d. qui peut être dans un parmi deux états parfaitement stables ➔ **un élément mémoire !**

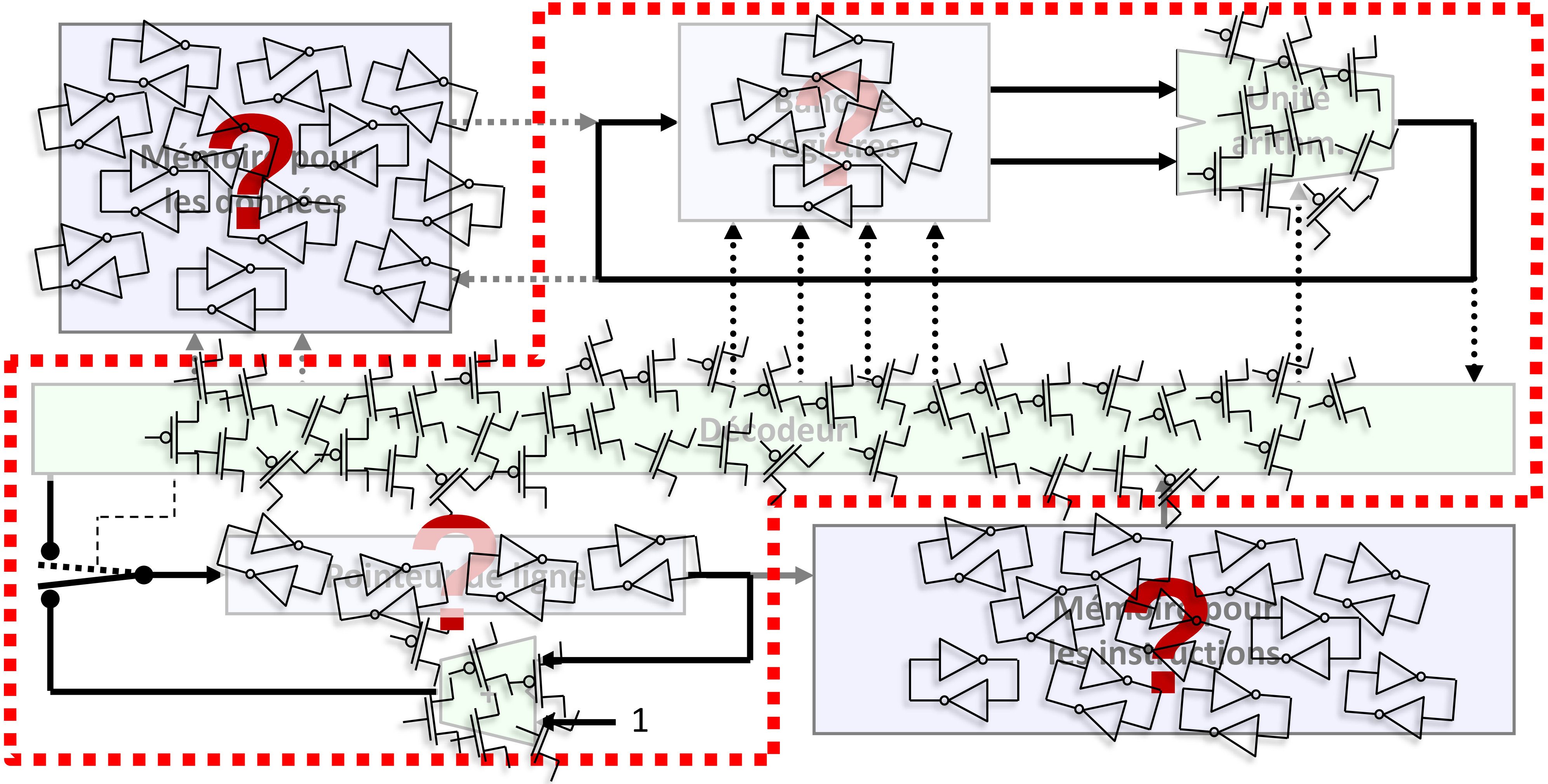
Comment écrire cette mémoire ?



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

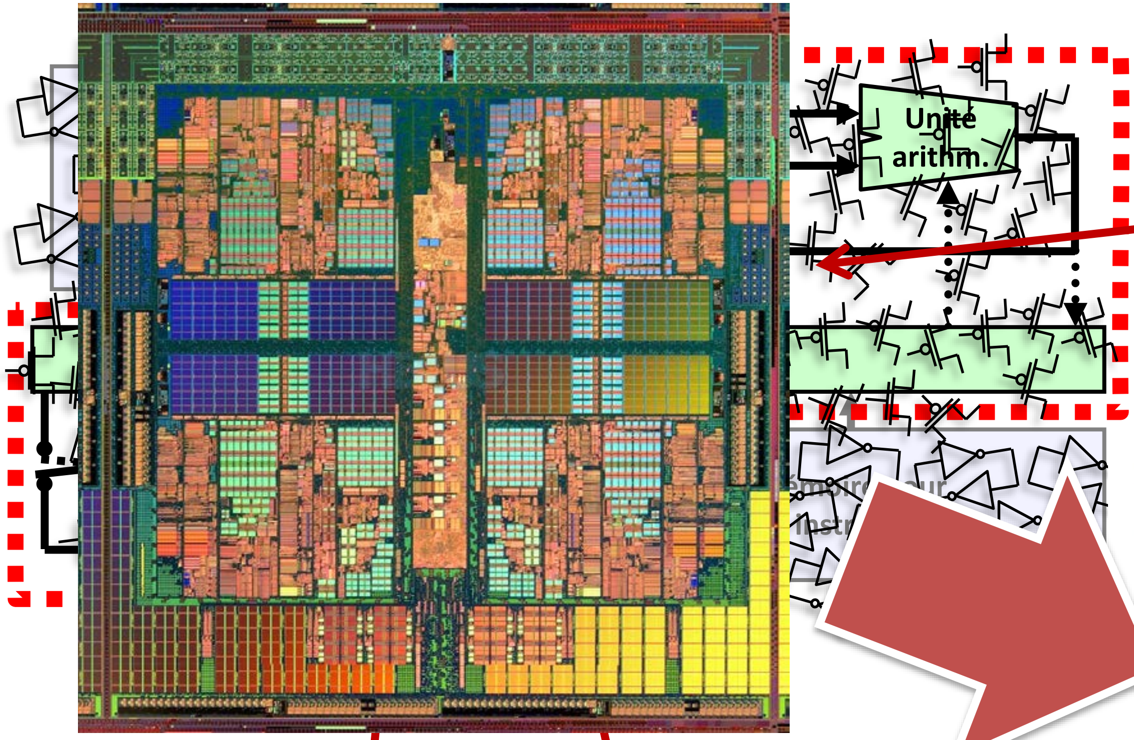


Maintenant on sait tout faire !



EPFL

On a atteint notre but !

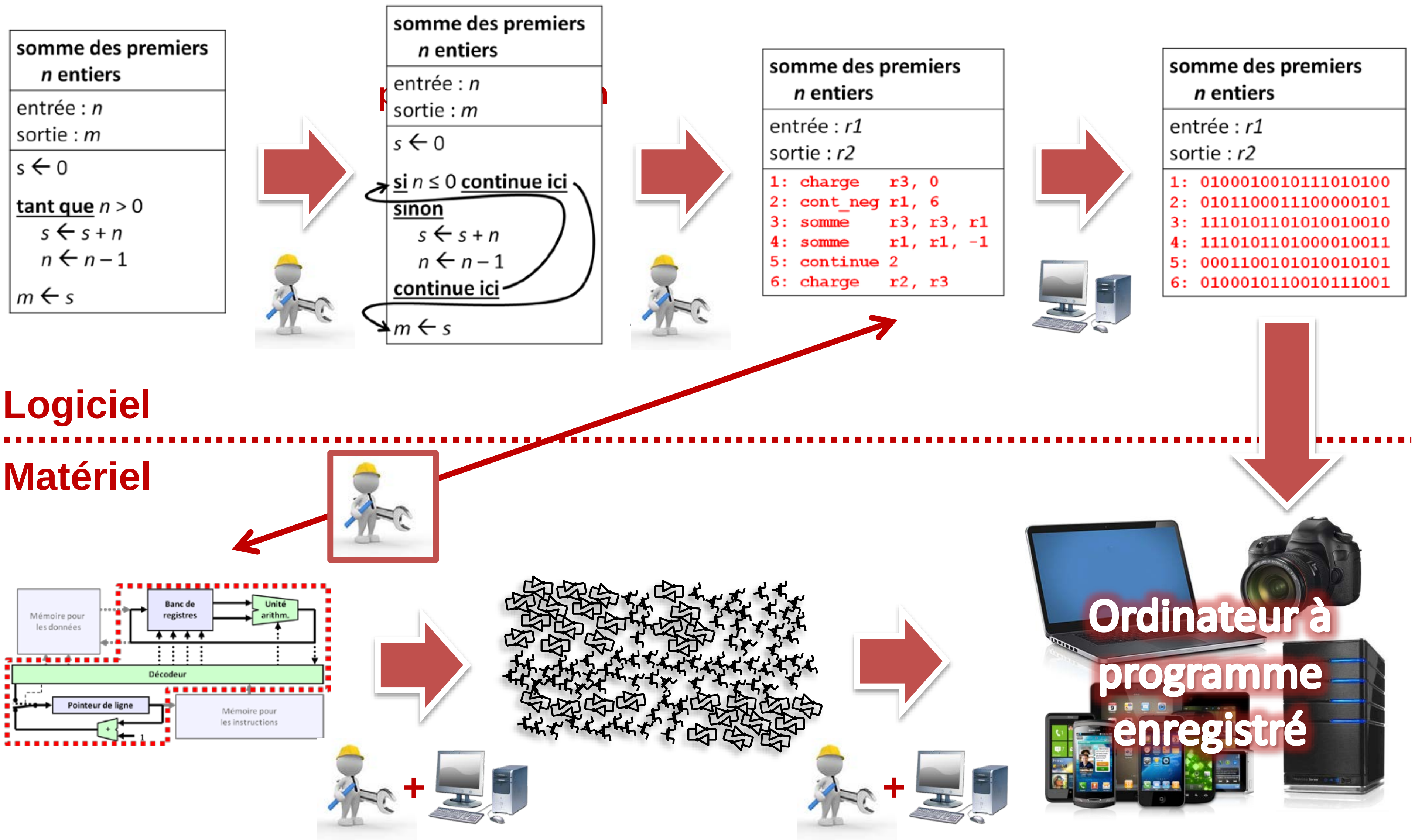


Circuit intégré VLSI (aujourd'hui autour de 10^8-10^9 transistors)

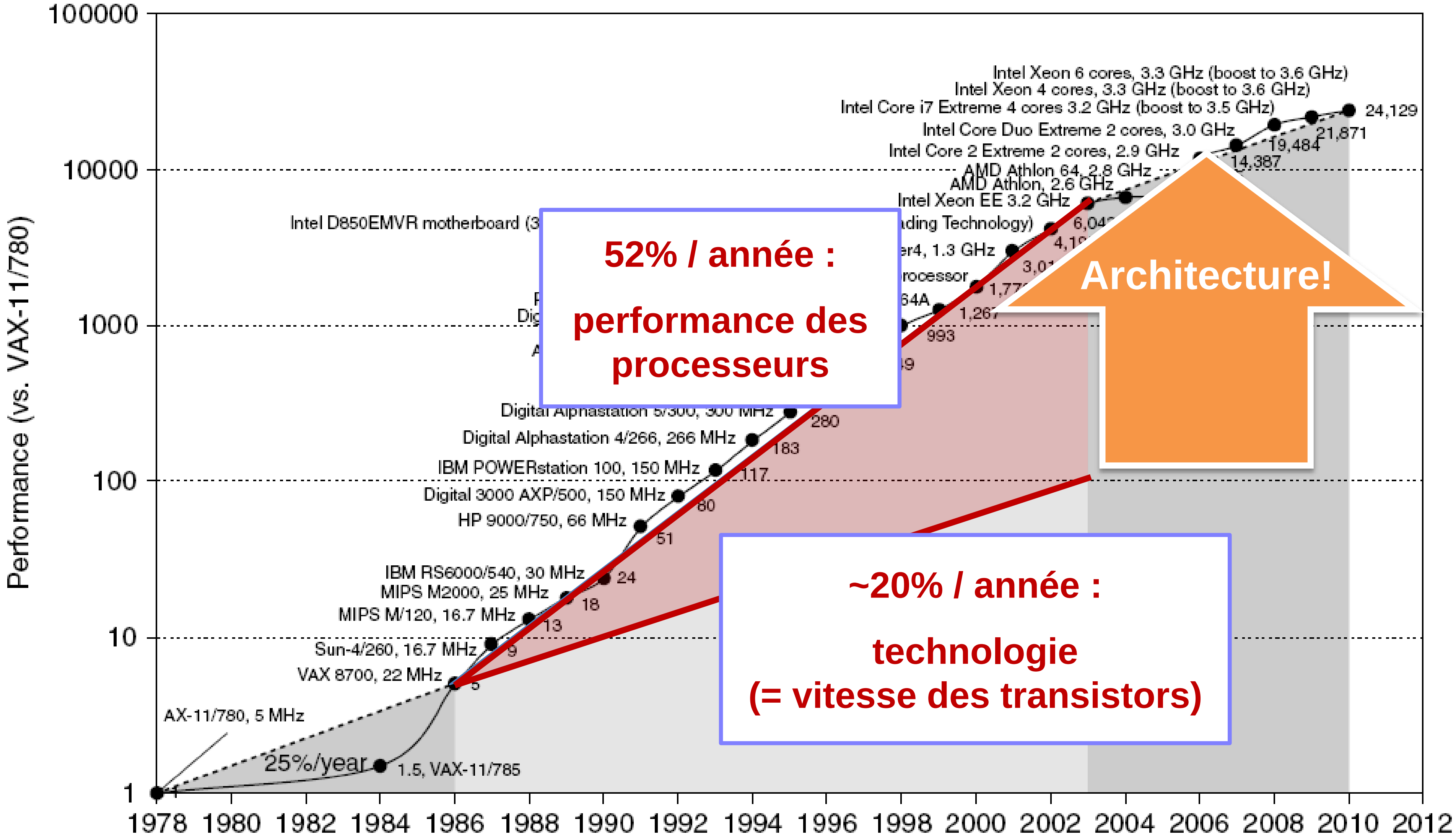
Architecture du processeur

Circuit électronique

Des algorithmes aux ordinateurs



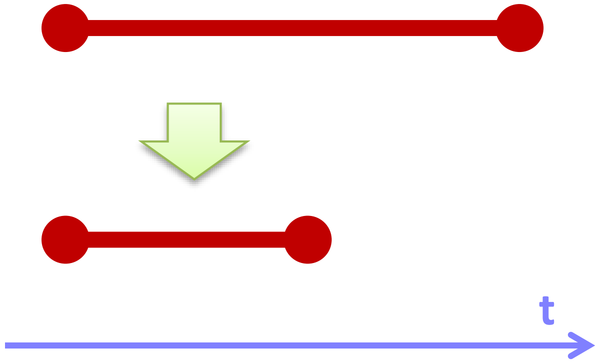
La croissance de la performance



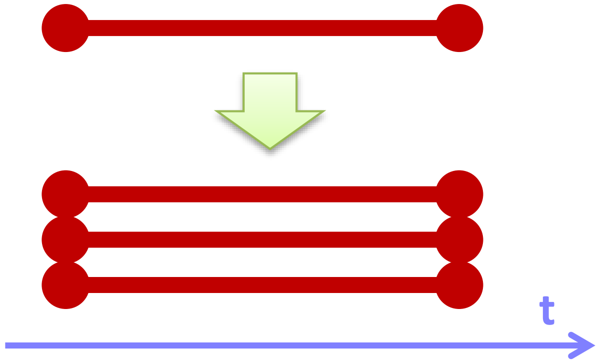
Source: Hennessy & Patterson, © MK 2011

Augmenter la performance ?

= Réduire le délai
temps d'attente pour obtenir un résultat



= Augmenter le débit
nombre de résultats dans l'unité de temps



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…

A	0 1 1 1 0 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 0	+
B	1 0 1 1 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 1 1	=

Retenue

Sommes élémentaires

0 + 0 = 0

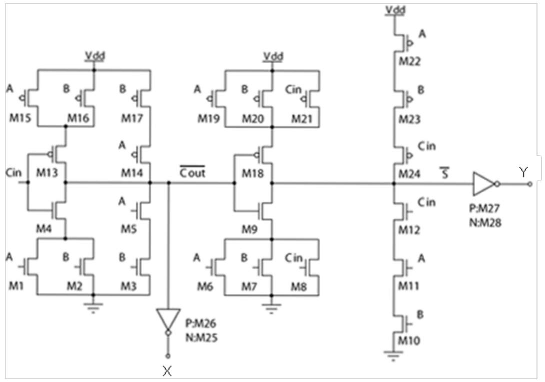
0 + 1 = 1

1 + 0 = 1

1 + 1 = 10 = $1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 2_{10}$

Faire un circuit est au

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



A ... 1 0

B ... 1 1

Somme

0 + 0 + 0 = 0

0 + 0 + 1 = 1

0 + 1 + 0 = 1

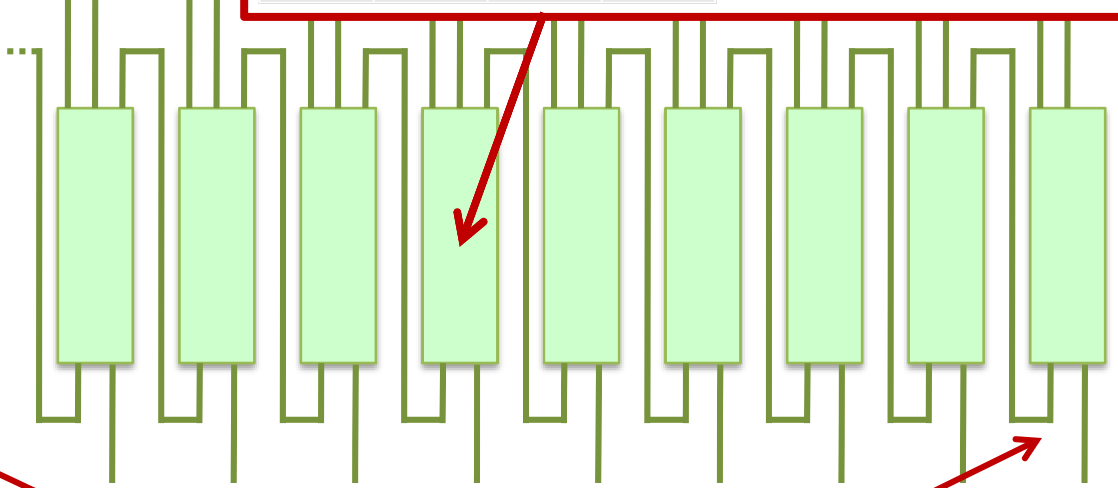
0 + 1 + 1 = 10

1 + 0 + 0 = 1

1 + 0 + 1 = 10

1 + 1 + 0 = 10

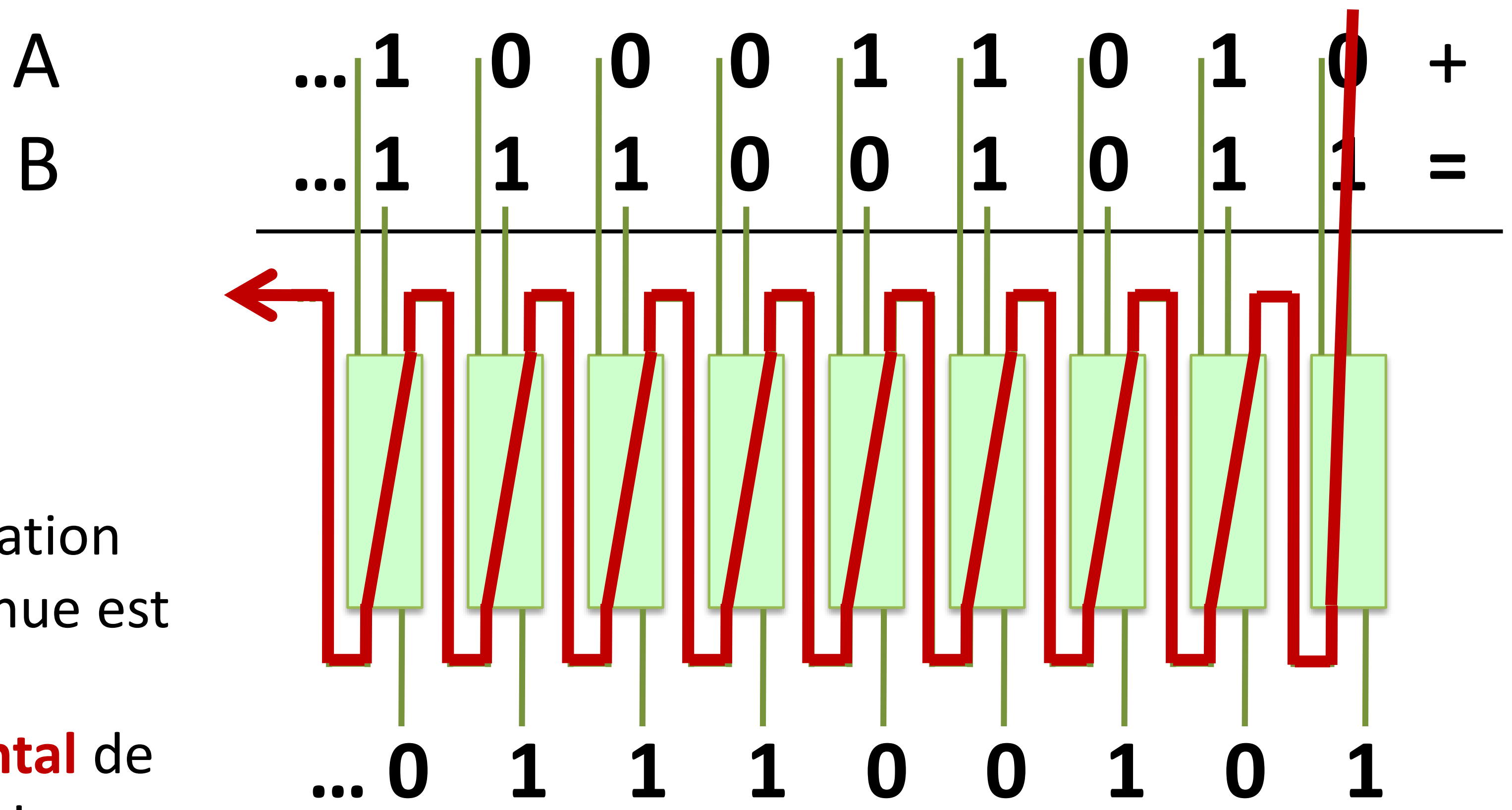
1 + 1 + 1 = 11



... 0 1 1 1 0 0 1 0 1

Il faut ajouter aussi la retenue

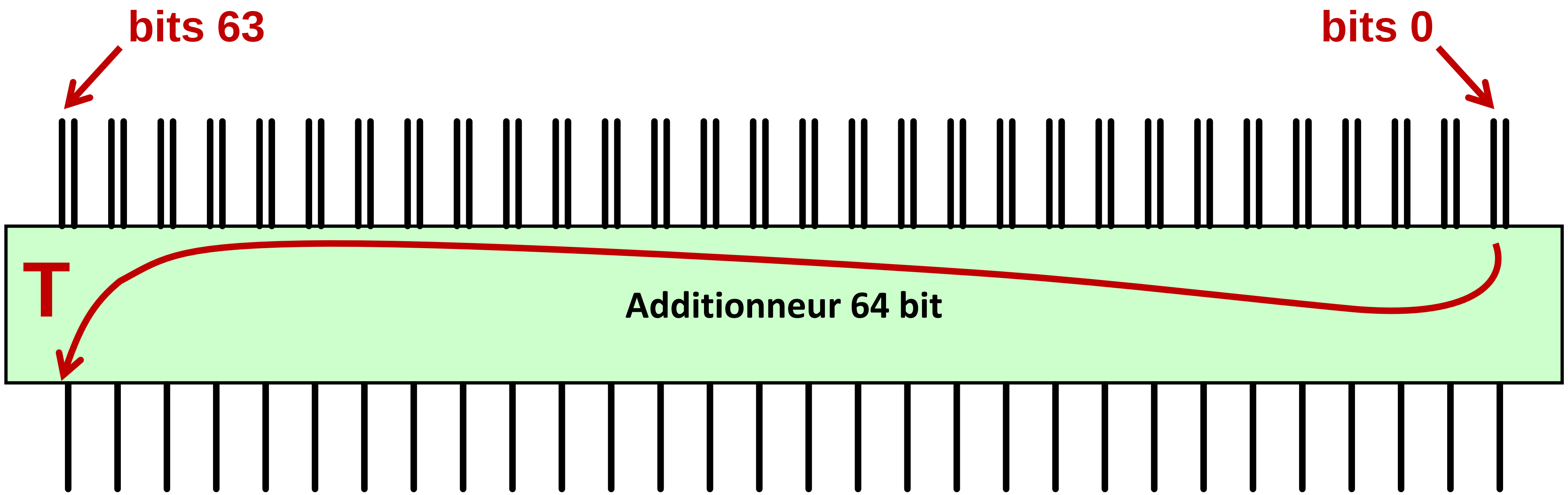
Mais ce circuit est lent !



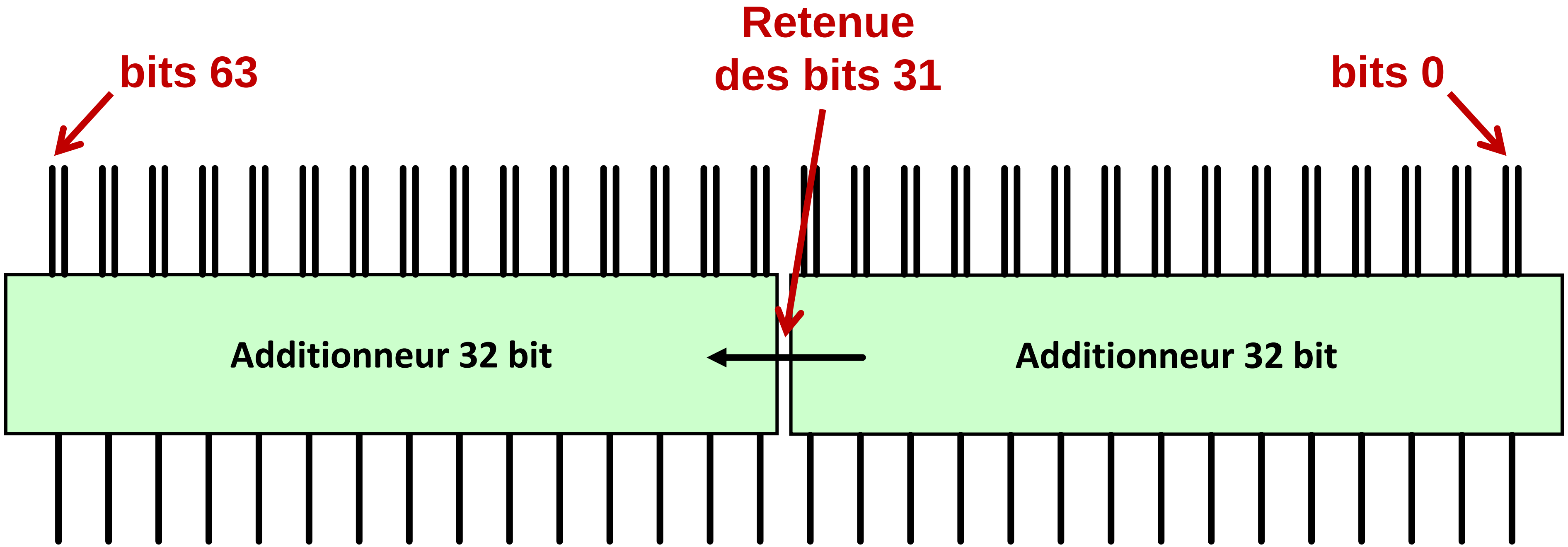
- La propagation de la retenue est un aspect **fondamental** de la somme !

- A la base, le **délai** d’un additionneur est donc **proportionnel au nombre de bits à additionner**

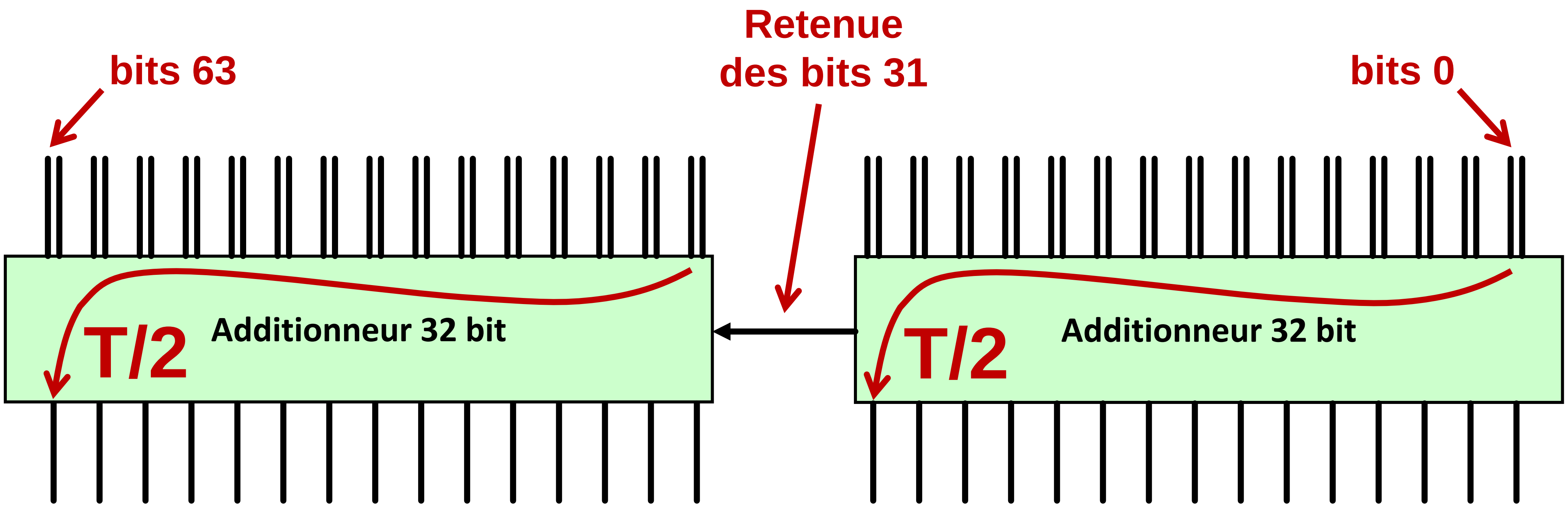
Peut-on faire mieux ?



Peut-on faire mieux ?

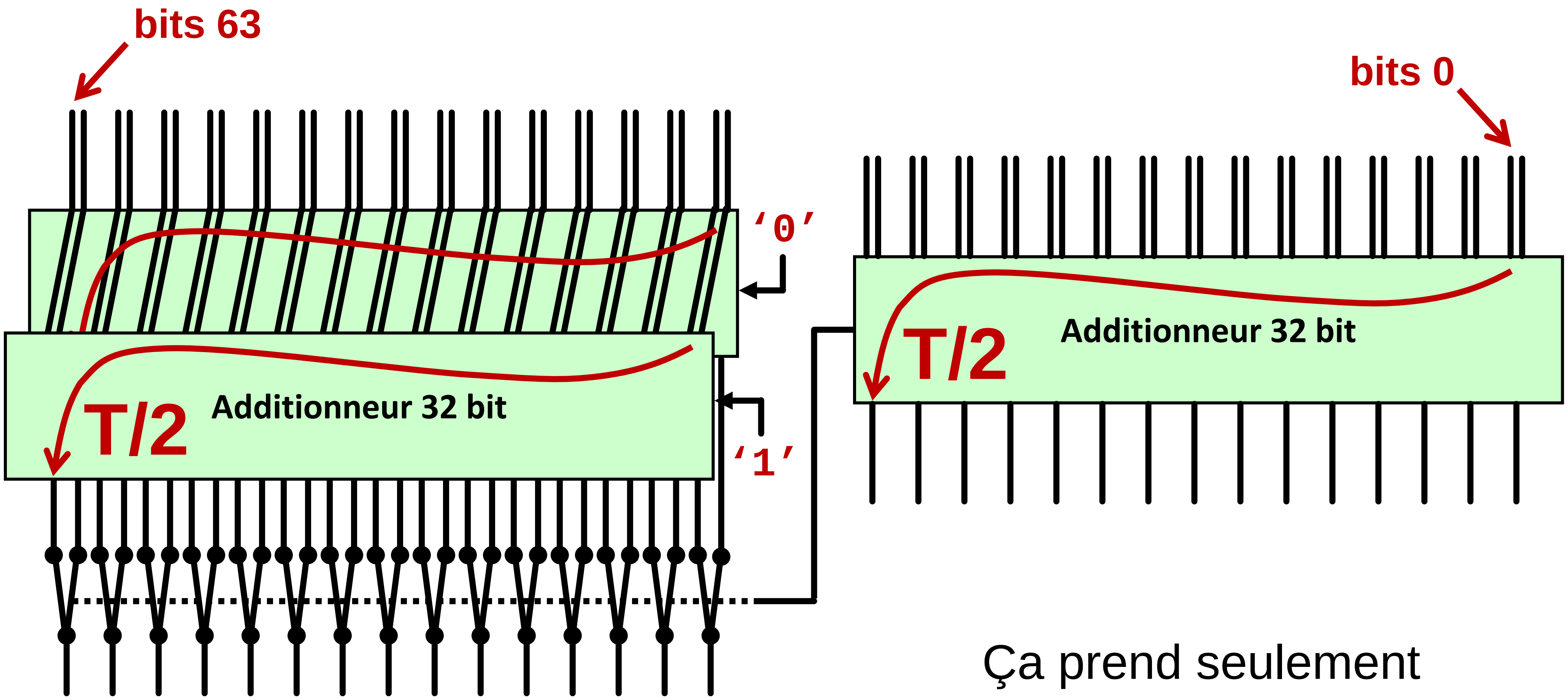


Peut-on faire mieux ?



On n’a **rien** gagné…

Peut-on faire mieux ?



Ça prend seulement
la moitié du temps !

Le génie informatique

- On peut changer profondément le 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

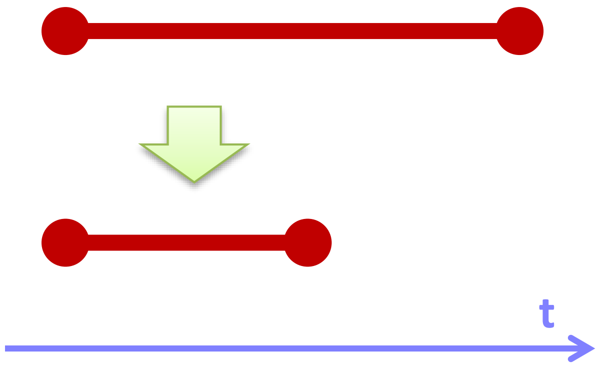
On vient de voir un exemple de **synthèse logique**, qui est une des branches du génie informatique (ou **Computer Engineering**)

EPFL

Augmenter la performance ?

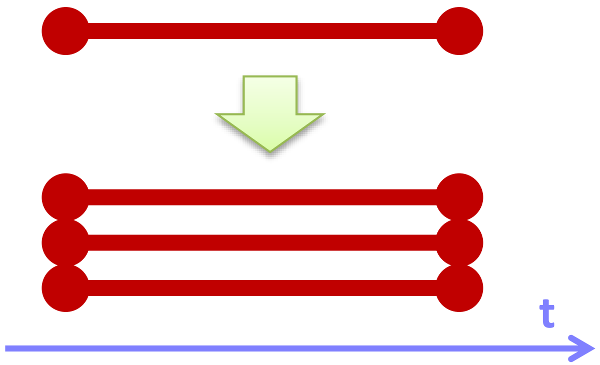
= Réduire le délai

temps d'attente pour obtenir un résultat



= Augmenter le débit

nombre de résultats dans l'unité de temps



Deux exemples simples d'amélioration de la performance :

1. Au niveau du circuit

   Réduire le délai d'un additionneur

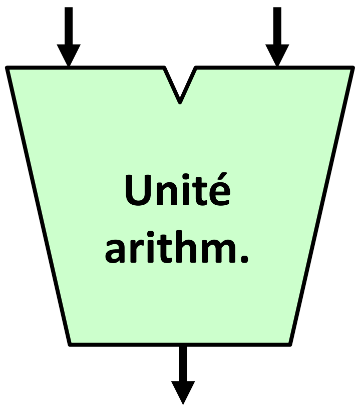
2. Au niveau de la structure du processeur

   Augmenter le débit d'instructions

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



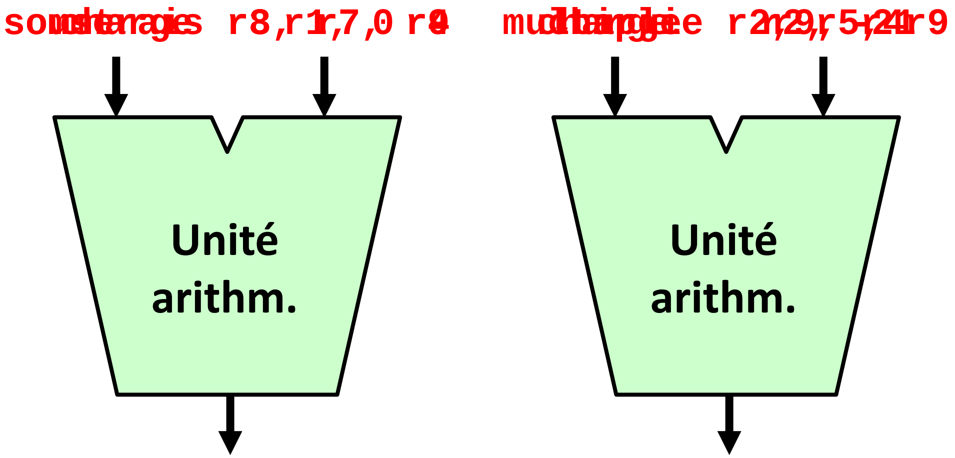
Comment faire mieux ?

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 exécute maintenant approximativement **deux instructions** par cycle !

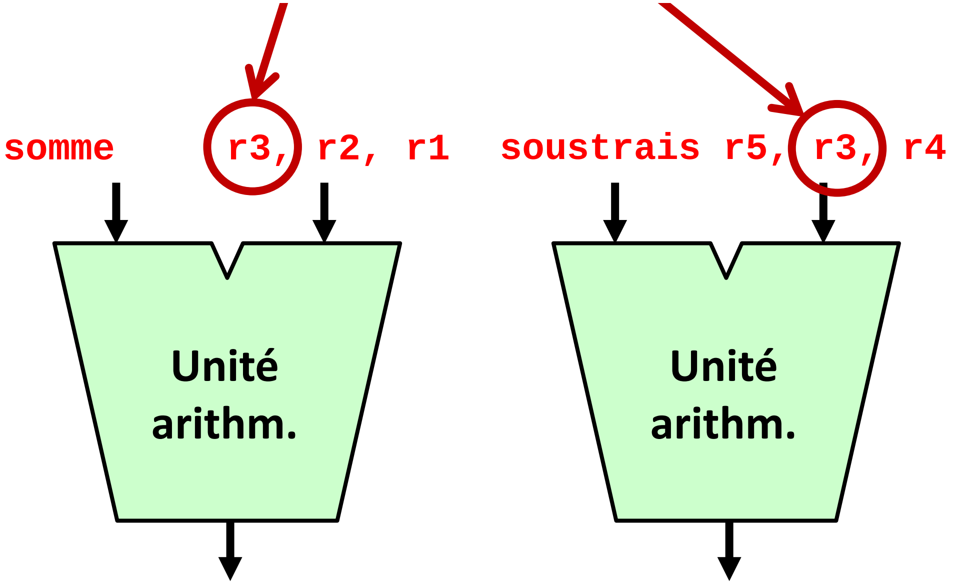
Problèmes ?!



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
```

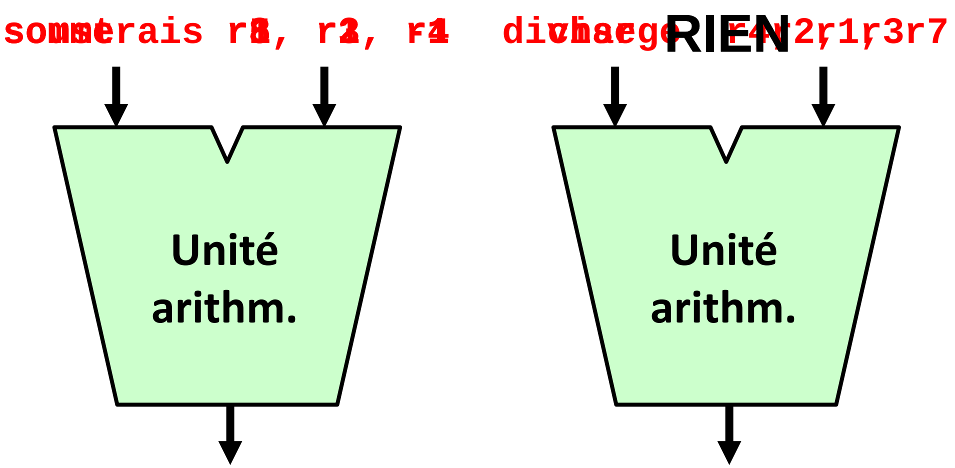
Le problème est que la deuxième instruction a besoin d'une valeur calculée par la première !
Si on ne fait pas attention, **le résultat sera faux** !



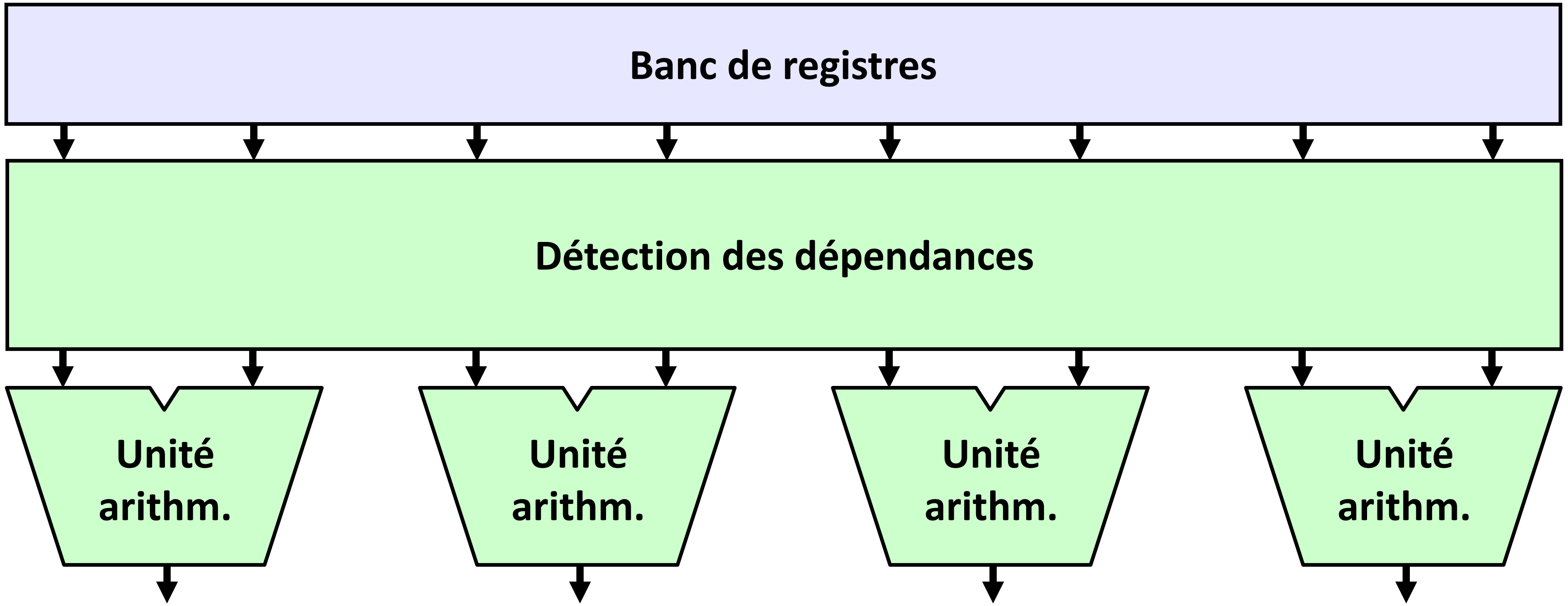
~~Doubler le débit de notre processeur~~

```
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 approximativement
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 réordonnancent les instructions et en exécutent avant que ce soit sûr qu’elles doivent être exécutées (p.ex. après une instruction comme `cont_nul`)

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**)

Des algorithmes aux ordinateurs