

ARCHI – Architecture des ordinateurs

Sylvain Brandel

2025 – 2026

sylvain.brandel@univ-lyon1.fr

Partie 8

MÉMOIRE CACHE PIPELINE

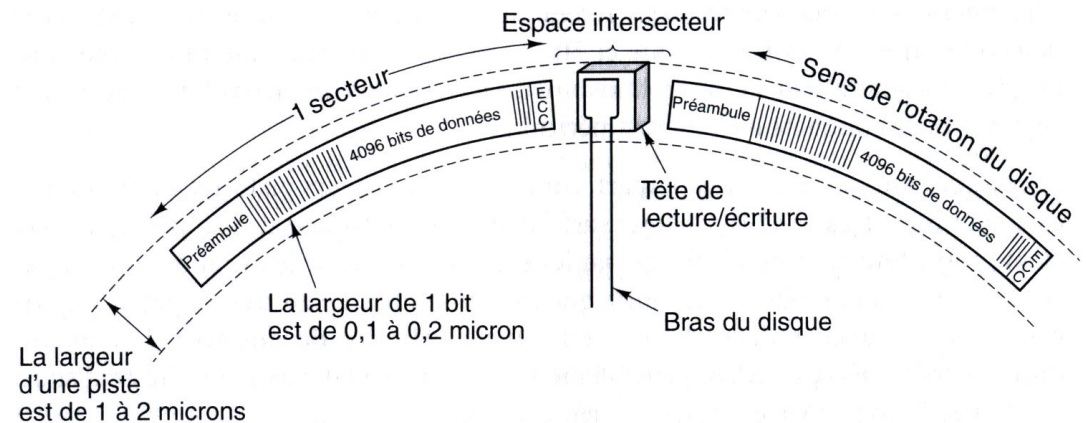
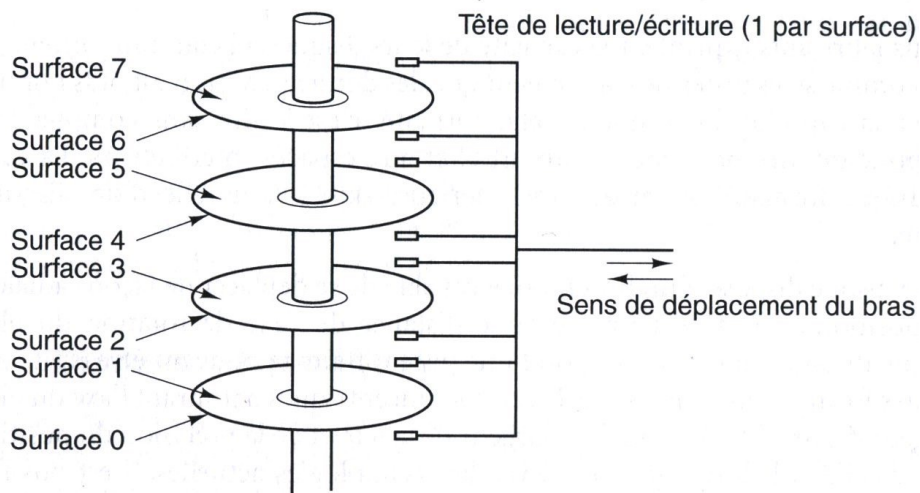
Hiérarchie mémoire

- Mémoires principales
 - Registres
 - Cache
 - RAM
- Mémoires secondaires
 - Supports magnétiques
 - HD (Hard Disc)
 - Disquettes, bandes magnétiques ...
 - Supports optiques
 - CD-ROM (Compact Disc ROM), CD-RW (ReWritable)
 - DVD (Digital Versatil Disc)
 - HD-DVD (High Density) / BD (Blu-ray Disc)
 - Mémoires flash
 - Clés usb
 - SSD (Solid Stack Drive)

Hiérarchie mémoire

Support	Temps d'accès	Débit	Capacité
Registres	1 ns	-	kio
RAM	5 – 50 ns	1 – 20 Gio/s	Gio
SSD	0,1 ms	30 Mio/s – 3 Gio/s	Tio
HD	3 – 20 ms	10 – 300 Mio/s	Tio
CD	120 ms	1 – 8 Mio/s	650 Mio
DVD	140 ms	2 – 22 Mio/s	4,6 – 17 Gio
BD		36 – 72 Mio/s	7,5 – 128 Gio

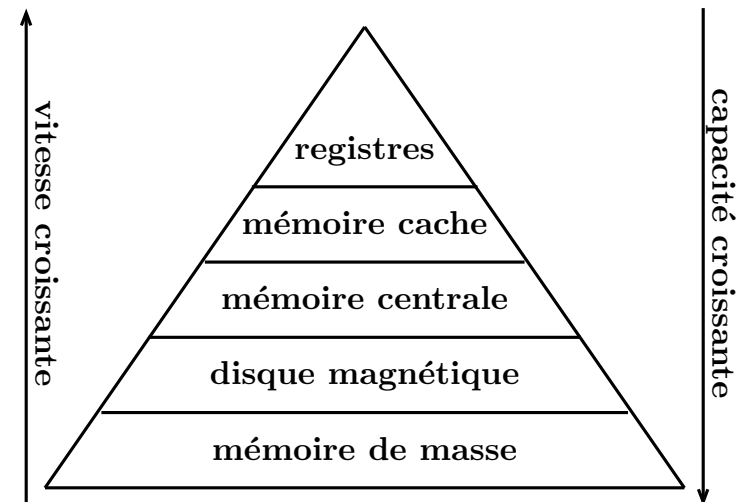
- Ex : disque dur



Hiérarchie mémoire

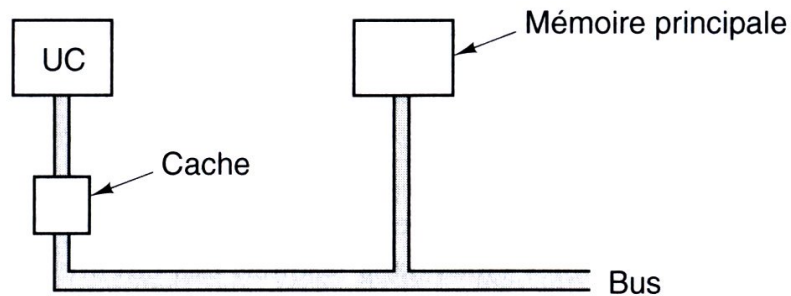
Support	Temps d'accès	Débit	Capacité
Registres	1 ns	-	kio
Cache	2 – 3 ns		Mio
RAM	5 – 50 ns	1 – 20 Gio/s	Gio
SSD	0,1 ms	30 Mio/s – 3 Gio/s	Tio
SSD	3 – 20 ms	10 – 300 Mio/s	Tio
CD	120 ms	1 – 8 Mio/s	650 Mio
DVD	140 ms	2 – 22 Mio/s	4,6 – 17 Gio
BD		36 – 72 Mio/s	7,5 – 128 Gio

- Cache : stockage des mots
les plus souvent accédés
- Compromis à trouver :
 - Vitesse ↑ → coût ↑
 - Capacité ↑ → temps d'accès ↑



Mémoire cache

- Deux exemples d'organisation :
 - Cache à correspondance directe
 - Cache associatif
- On suppose un seul niveau de cache



- Lors d'un accès mémoire :
 - Donnée présente dans le cache → UCT y accède directement
 - Donnée absente du cache → chargement dans le cache puis accès

Mémoire cache

Cache à correspondance directe

Ex : ordinateur avec

- RAM :
 - 4 Gio : 2^{32} octets adressables par octet
 - Divisée en blocs de taille fixe appelés **lignes de cache**
 - 1 ligne $\rightarrow 2^5 = 32$ octets
 - Mémoire $\rightarrow 2^{27}$ lignes de cache
 - Chaque **ligne de cache** identifiée par un entier sur 27 bits
- **Mémoire cache** :
 - 64 kio : 2^{11} entrées de 32 octets
- « Mapper » 2^{11} entrées sur 2^{27} lignes de cache :
- À partir d'une adresse n d'une donnée d en RAM
 - $\rightarrow n$ appartient à quelle ligne de cache ?
 - $\rightarrow d$ doit être rangée dans quelle entrée du cache ?

Mémoire cache

Cache à correspondance directe

- Décomposition d'une adresse n en RAM :

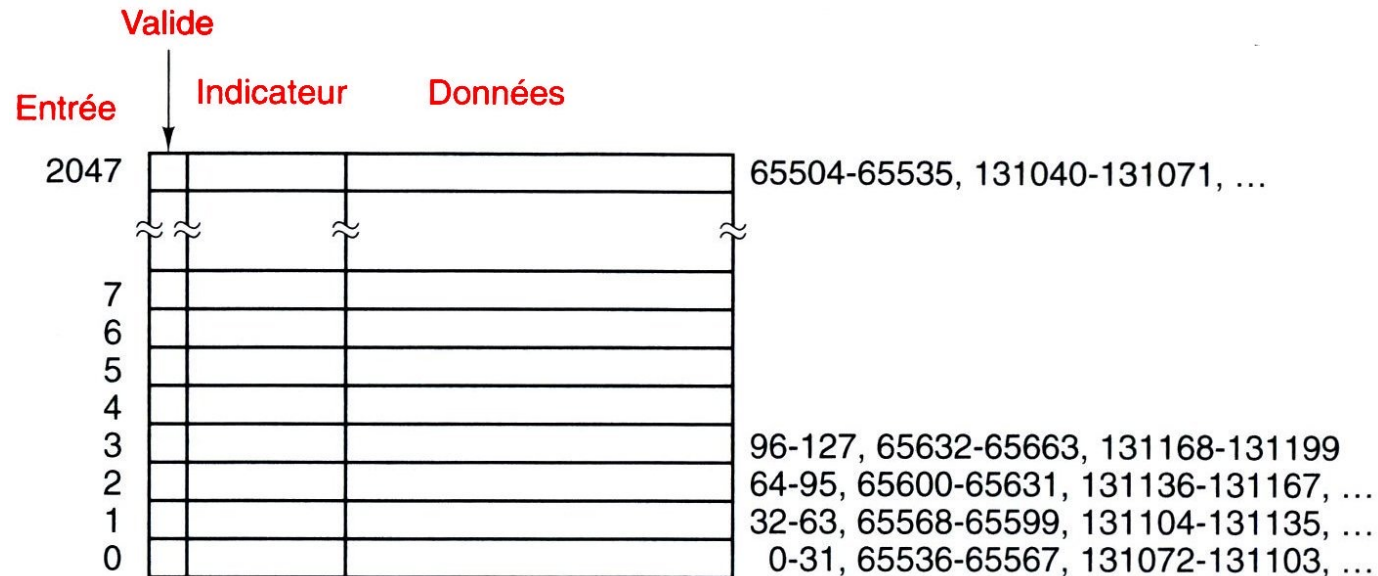
16 bits (31 – 16)	11 bits (15 – 5)	5 bits (4 – 0)
Indicateur	Entrée	Octet

- Indicateur + Entrée (27 bits) : identification de chaque ligne de cache
 - Entrée (11 bits) : identification d'une entrée du cache
 - Octet (5 bits) : identification d'un des 32 octets d'une ligne ou d'une entrée
-
- Toutes les lignes avec même Entrée → même entrée du cache
 - Toutes les lignes avec même Indicateur → consécutives en RAM

Mémoire cache

Cache à correspondance directe

- Organisation de la mémoire **cache** :



- Une ligne est stockée dans l'entrée correspondant à son **Entrée**
- Indicateur** correspond à **Indicateur** : ligne de cache d'origine en RAM
- Valide** indique si l'entrée contient des données cohérentes cache / RAM
- Données** contient la copie d'une ligne de cache

Mémoire cache

Cache à correspondance directe

- **Lecture** d'un octet en RAM adressé par **Indicateur Entrée Octet**
 - **Entrée** → entrée du cache
 - Si **Indicateur** = **Indicateur**
 - cache hit : lecture de l'octet dans le cache
 - à l'adresse **Entrée**
 - et à la position **Octet** dans **Données**
 - Si **Indicateur** != **Indicateur**
 - cache miss : la ligne accédée est copiée de la RAM vers le cache
- **Écriture** : cohérence entre cache et RAM ? 2 stratégies
 - Immédiate : MàJ simultanée cache et RAM → plus d'intérêt du cache
 - Différée : écriture dans la RAM quand éviction du cache
 - Si la ligne écrite est dans le cache → MàJ du cache et **Valide** ← 0
 - Sinon chargement dans le cache → MàJ du cache et **Valide** ← 0

Mémoire cache

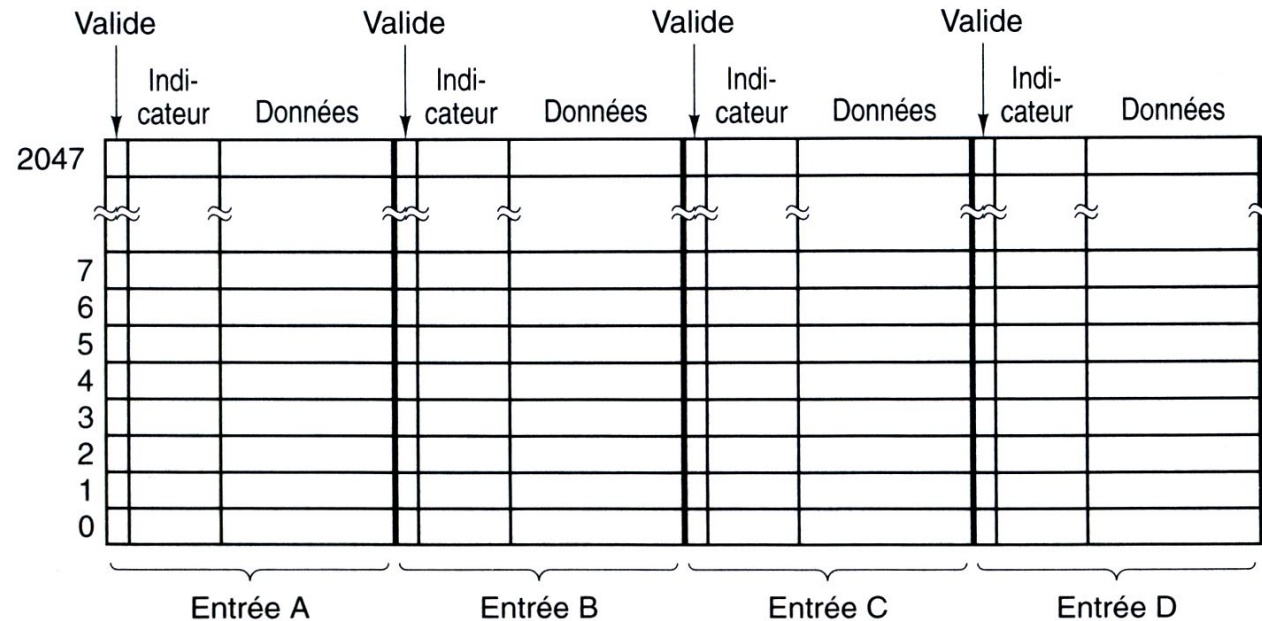
Cache à correspondance directe

- Principe de **localité**
 - **Localité temporelle** : une case mémoire utilisée le sera à nouveau
 - **Localité spatiale** : si on utilise la case n , on utilisera $n + 1, n + 2 \dots$
 - Le programmeur doit respecter ce principe
 - Ex. précédent, accès intensif à l'adresse 0 et à l'adresse 65536
 - Même champ **Entrée**
 - Conflits permanents sur l'entrée 0
- ⇒ Cache associatif : $n \geq 2$ lignes pour chaque **Entrée**

Mémoire cache

Cache associatif

- Ex : $n = 4$



- Nouveau problème : quelle ligne remplacer dans le cache ?
 - Aléatoire
 - FIFO (First In First Out)
 - LRU (Least Recently Used)
 - ...
- ⇒ On trouvera toujours des algorithmes qui mettront le cache en défaut

Mémoire cache

- Programmer en fonction du cache
- Ex : produit matriciel $C = A \times B$

$$C_{i,j} = \sum_{k=1}^N A_{i,k} \times B_{k,j}$$

```
double A[M][N];
double B[N][M];
double C[M][M];

for (int i=0; i<M; i=i+1)
    for (int j=0; j<M; j=j+1) {
        C[i][j] = A[i][0] * B[0][j];
        for (int k=1; k<N; k=k+1)
            C[i][j] = C[i][j] + A[i][k] * B[k][j];
    }
```

Mémoire cache

A : 2 lignes et 3 colonnes
B : 3 lignes et 2 colonnes
C : 2 lignes et 2 colonnes

B[0][0] B[0][1]
B[1][0] B[1][1]
B[2][0] B[2][1]

A[0][0] A[0][1] A[0][2] C[0][0] C[0][1]
A[1][0] A[1][1] A[1][2] C[1][0] C[1][1]

En mémoire :

A[0][0] A[0][1] A[0][2] A[1][0] A[1][1] A[1][2]
B[0][0] B[0][1] B[1][0] B[1][1] B[2][0] B[2][1]
C[0][0] C[0][1] C[1][0] C[1][1]

Mémoire cache

- ijk (naif)

```
double A[N][N];
double B[N][N];
double C[N][N];

for (int i=0; i<N; i=i+1)
    for (int j=0; j<N; j=j+1)
        for (int k=0; k<N; k=k+1)
            C[i][j] = C[i][j] + A[i][k] * B[k][j];
```

```
(i, j, k)
(0, 0, 0) C[0][0] = C[0][0] + A[0][0] * B[0][0];
(0, 0, 1) C[0][0] = C[0][0] + A[0][1] * B[1][0];
(0, 0, 2) C[0][0] = C[0][0] + A[0][2] * B[2][0];
(0, 1, 0) C[0][1] = C[0][1] + A[0][0] * B[0][1];
(0, 1, 1) C[0][1] = C[0][1] + A[0][1] * B[1][1];
(0, 1, 2) C[0][1] = C[0][1] + A[0][2] * B[2][1];
(1, 0, 0) C[1][0] = C[1][0] + A[1][0] * B[0][0];
(1, 0, 1) C[1][0] = C[1][0] + A[1][1] * B[1][0];
(1, 0, 2) C[1][0] = C[1][0] + A[1][2] * B[2][0];
(1, 1, 0) C[1][1] = C[1][1] + A[1][0] * B[0][1];
(1, 1, 1) C[1][1] = C[1][1] + A[1][1] * B[1][1];
(1, 1, 2) C[1][1] = C[1][1] + A[1][2] * B[2][1];
...
```

Mémoire cache

- **kji**

```
double A[N][N];
double B[N][N];
double C[N][N];

for (int k=0; k<N; k=k+1)
    for (int j=0; j<N; j=j+1)
        for (int i=0; i<N; i=i+1)
            C[i][j] = C[i][j] + A[i][k] * B[k][j];
```

(i, j, k)	
(0, 0, 0)	C[0][0] = C[0][0] + A[0][0] * B[0][0];
(1, 0, 0)	C[1][0] = C[1][0] + A[1][0] * B[0][0];
(0, 1, 0)	C[0][1] = C[0][1] + A[0][0] * B[0][1];
(1, 1, 0)	C[1][1] = C[1][1] + A[1][0] * B[0][1];
(0, 0, 1)	C[0][0] = C[0][0] + A[0][1] * B[1][0];
(1, 0, 1)	C[1][0] = C[1][0] + A[1][1] * B[1][0];
(0, 1, 1)	C[0][1] = C[0][1] + A[0][1] * B[1][1];
(1, 1, 1)	C[1][1] = C[1][1] + A[1][1] * B[1][1];
(0, 0, 2)	C[0][0] = C[0][0] + A[0][2] * B[2][0];
(1, 0, 2)	C[1][0] = C[1][0] + A[1][2] * B[2][0];
(0, 1, 2)	C[0][1] = C[0][1] + A[0][2] * B[2][1];
(1, 1, 2)	C[1][1] = C[1][1] + A[1][2] * B[2][1];
...	

Mémoire cache

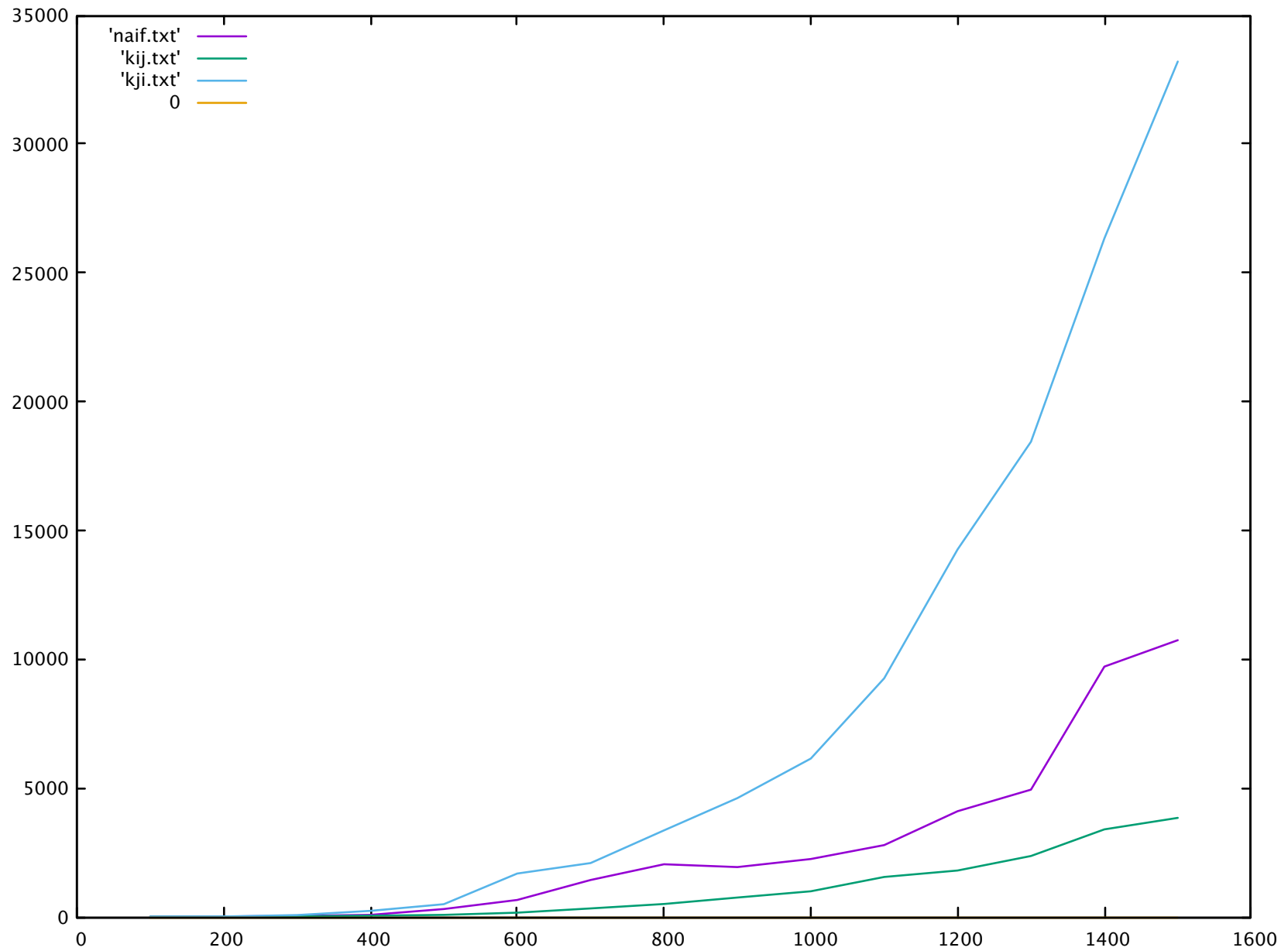
- kij

```
double A[N][N];
double B[N][N];
double C[N][N];

for (int k=0; k<N; k=k+1)
    for (int i=0; i<N; i=i+1)
        for (int j=0; j<N; j=j+1)
            C[i][j] = C[i][j] + A[i][k] * B[k][j];
```

(i, j, k)	
(0, 0, 0)	$C[0][0] = C[0][0] + A[0][0] * B[0][0];$
(0, 1, 0)	$C[0][1] = C[0][1] + A[0][0] * B[0][1];$
(1, 0, 0)	$C[1][0] = C[1][0] + A[1][0] * B[0][0];$
(1, 1, 0)	$C[1][1] = C[1][1] + A[1][0] * B[0][1];$
(0, 0, 1)	$C[0][0] = C[0][0] + A[0][1] * B[1][0];$
(0, 1, 1)	$C[0][1] = C[0][1] + A[0][1] * B[1][1];$
(1, 0, 1)	$C[1][0] = C[1][0] + A[1][1] * B[1][0];$
(1, 1, 1)	$C[1][1] = C[1][1] + A[1][1] * B[1][1];$
(0, 0, 2)	$C[0][0] = C[0][0] + A[0][2] * B[2][0];$
(0, 1, 2)	$C[0][1] = C[0][1] + A[0][2] * B[2][1];$
(1, 0, 2)	$C[1][0] = C[1][0] + A[1][2] * B[2][0];$
(1, 1, 2)	$C[1][1] = C[1][1] + A[1][2] * B[2][1];$
...	

Mémoire cache



Parallélisme d'instruction

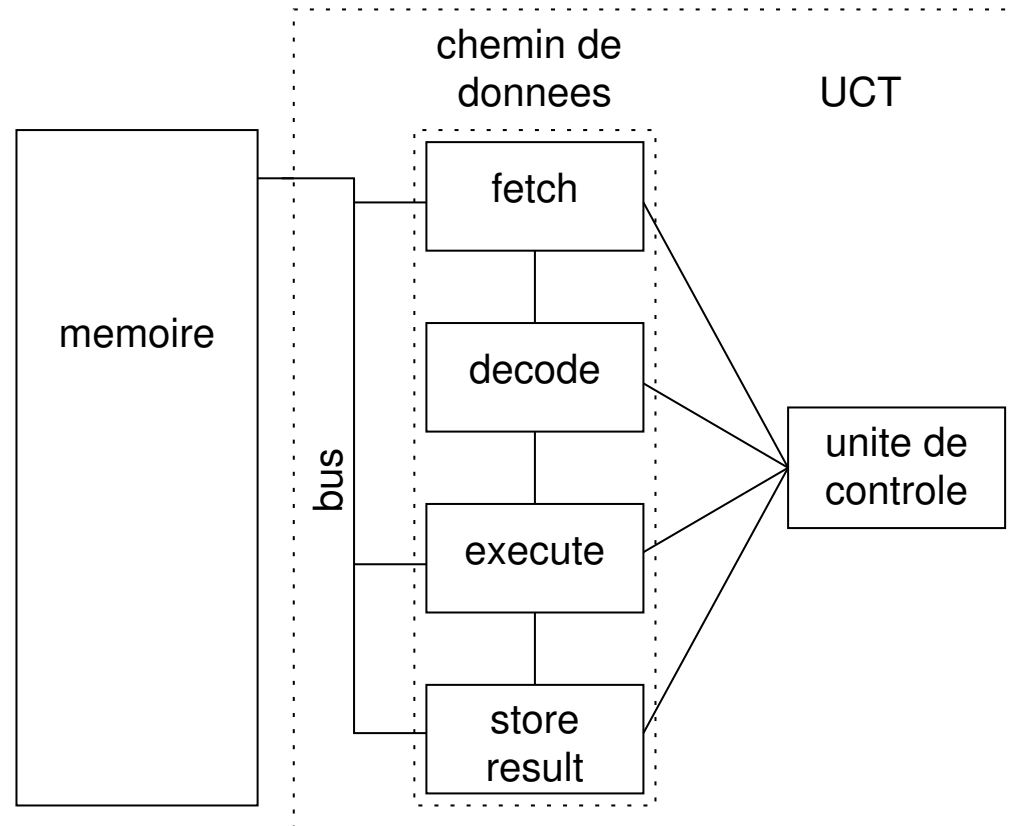
Pipeline

- Cycle d'instruction typique :
 - **FETCH** : chargement de l'instruction depuis la RAM
 - **DECODE** : décodage de l'instruction
 - **EXECUTE** : exécution de l'instruction
 - **STORE RESULT** : stockage des résultats en RAM
- Chaque phase : un ou plusieurs cycles d'horloge
- **Supposons** chaque instruction découpée en 4 phases,
et chaque phase = 1 cycle d'horloge :
 1. FE
 2. DE
 3. EX
 4. SR

Parallélisme d'instruction

Pipeline

- Exemple d'organisation



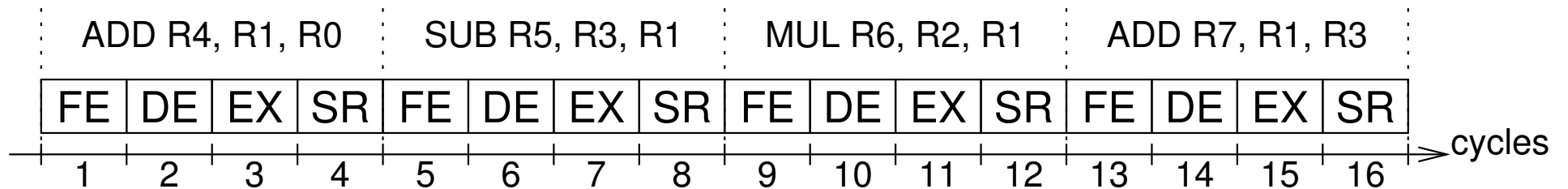
Parallélisme d'instruction

Pipeline

- Exemple

ADD R4, R1, R0	; R4 <- R1 + R0
SUB R5, R3, R1	; R5 <- R3 - R1
MUL R6, R2, R1	; R6 <- R2 * R1
ADD R7, R1, R3	; R7 <- R1 + R3

- Exécution séquentielle : UC active FE → DE → EX → SR dans l'ordre

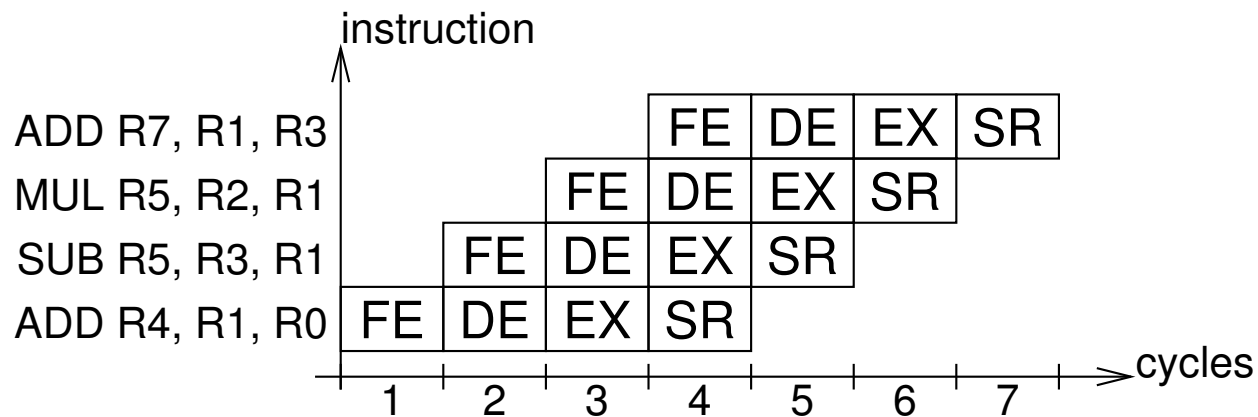


→ 16 cycles

Parallélisme d'instruction

Pipeline

- Si l'UC active les 4 unités du chemin de données à chaque cycle
→ Pipeline de 4 étages
 - Cycle 1 : Instr. 1 – phase FE
 - Cycle 2 : Instr. 1 – phase DE et Instr. 2 – phase FE
 - ...



→ 7 cycles (dans un monde idéal)

Parallélisme d'instruction

Dépendances entre instructions

- Mais pas toujours possible de terminer l'exécution d'une instruction à chaque cycle :
 - Latence d'accès à la mémoire (défaut de cache par ex.)
 - Dépendance entre instructions :
 - Dépendance de données
 - Dépendance de noms
 - Dépendance de contrôle
- **Dépendance de données :**
 - Une instruction j dépend d'une instruction i si i produit un résultat qui est opérande source de j
 - Exemple

ADD R2, R0, R1
ADD R3, R2, R1

La 2^{de} instr. ne peut commencer sa phase EX que quand la 1^{ère} a fini SR

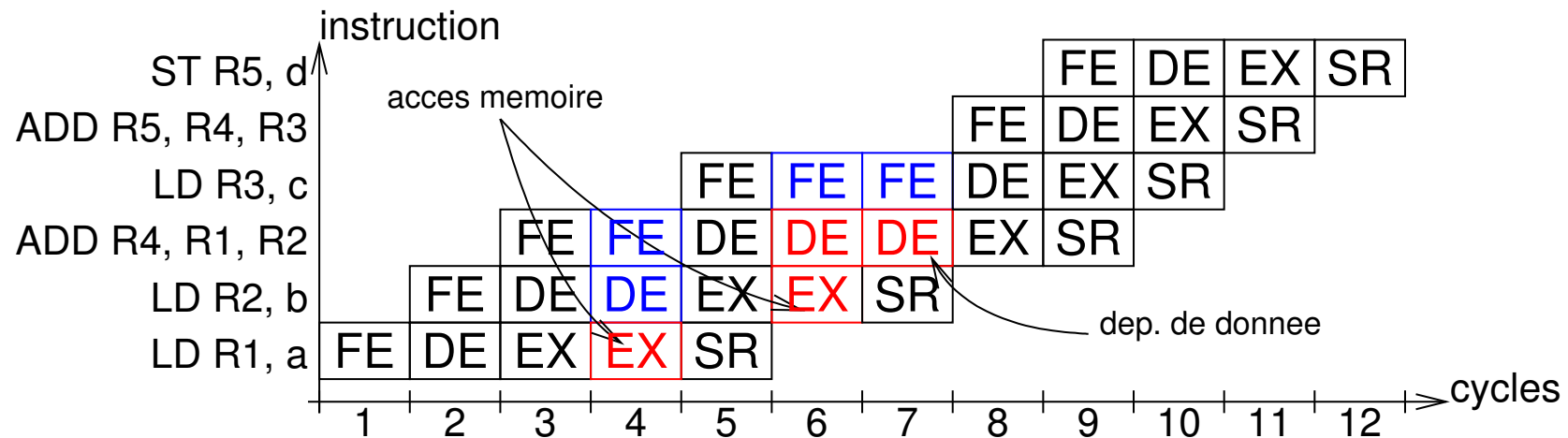
Parallélisme d'instruction

Dépendances entre instructions

- Dépendance de données

- Exemple

LD R1, a	; R1 <- mem[a]
LD R2, b	; R2 <- mem[b]
ADD R4, R1, R2	; R4 <- R1+R2
LD R3, c	; R3 <- mem[c]
ADD R5, R4, R3	; R5 <- R4+R3
ST R5, d	; mem[d] <- R5



→ 12 cycles sur cet exemple

Parallélisme d'instruction

Dépendances entre instructions

- **Dépendance de nom**

- Deux instructions utilisent le même registre ou emplacement mémoire sans circulation de données

→ **renommage**

- **Exemple**

```
LD R1, a
ADD R1, R1, 1
ST R1, aa
LD R1, b
ADD R1, R1, 1
ST R1, bb
```

→

```
LD R1, a
LD R2, b
ADD R1, R1, 1
ADD R2, R2, 1
ST R1, aa
ST R2, bb
```

- **Renommage**

- Par le programmeur
- À la compilation ou à l'assemblage
- Par le processeur (renommage de registre)

Parallélisme d'instruction

Dépendances entre instructions

- **Dépendance de contrôle**
 - Conditionné par une instruction de branchement
- **Exemple**

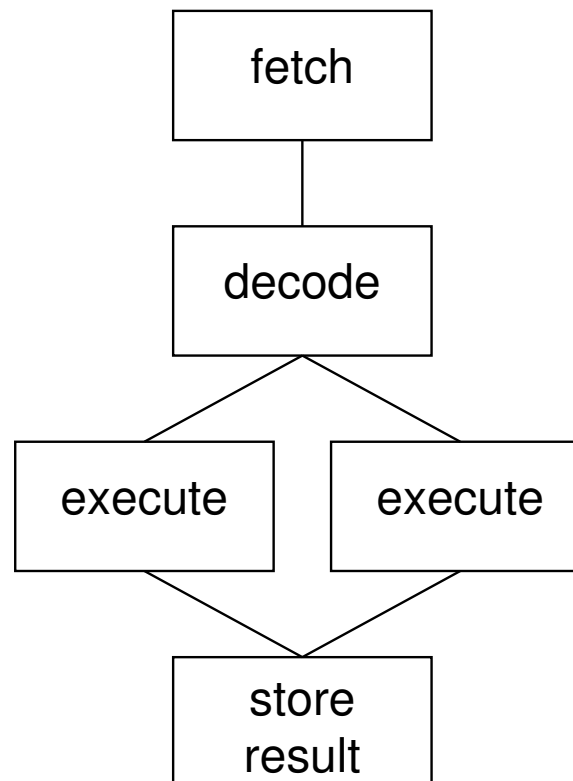
```
add:   ADD R2,R0,0
loop:  NOT R3,R1
      ADD R3,R3,1
      ADD R3,R2,R3
      BRp endl ; branchement de sortie de boucle
      LDR R3,R2,0
      ADD R3,R3,1
      STR R3,R2,0
      ADD R2,R2,1
      BR loop ; branchement vers le début de boucle
endl:  RET
```

- **Solutions**
 - Retarder instructions précédent le branchement
 - **Prédiction de branchement** → automates

Parallélisme d'instruction

Parallélisme d'instruction

- Pipelines : parallélisme partiel
- Exécution superscalaire :
 - FE capable de charger deux instructions à chaque cycle
 - DE sélectionne deux instructions dont les opérandes sont prêts
 - Deux unités EX → exécutions de deux instructions en parallèle

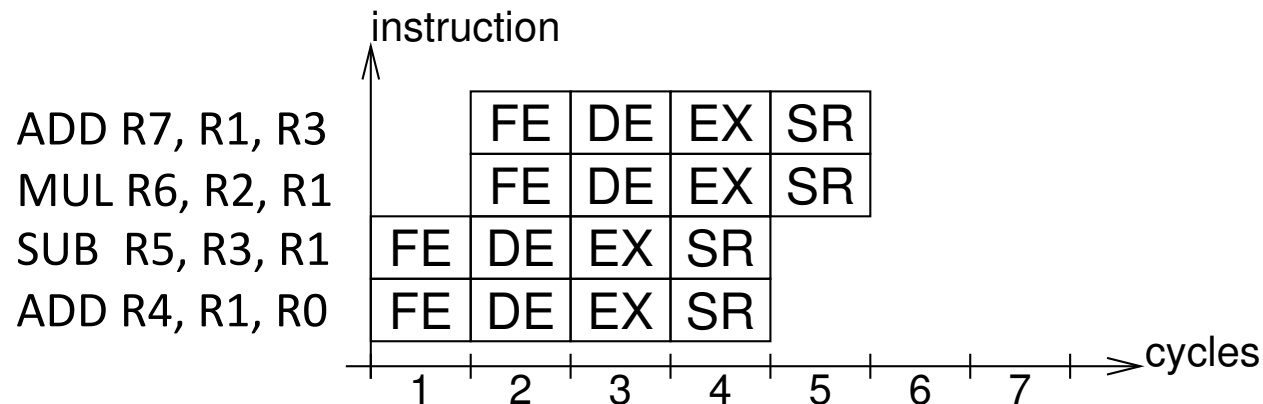


Parallélisme d'instruction

Parallélisme d'instruction

- Exécution superscalaire
- Exemple (très favorable)

ADD R4, R1, R0 ; R4 ← R1 + R0
SUB R5, R3, R1 ; R5 ← R3 - R1
MUL R6, R2, R1 ; R6 ← R2 * R1
ADD R7, R1, R3 ; R7 ← R1 + R3



→ 5 cycles (au lieu de 7)

Pour conclure

- **CISC** : Complex Instruction-Set Computer
 - Taille d'instruction variable
 - Instructions plus complexes à disposition
 - Ex. x86, 11/780 (VAX), 68k (Motorolla)
- **RISC** : Reduced Instruction-Set Computer
 - Taille d'instruction fixe, 3 opérandes, 0 mémoire (sauf lecture et écriture)
 - Cycle d'exécution simple et prévisible
 - Ex. MIPS, Alpha, PowerPC, Sparc, 88k (Motorolla), ARM, LC-3
- Et donc, CISC ou RISC ?