
Pipelines scalaires

Daniel Etiemble
de@lri.fr

PERFORMANCE

- L'équation
$$\text{Temps exécution CPU} = \text{NI} * \text{CPI} * \text{T}_C$$

↓ ↓ ↓
Nombre d'instructions Cycles/ Instruction Temps de cycle
- Les composantes de la performance
 - Nombre d'instructions
 - Jeu d'instructions et compilateur
 - CPI
 - Microarchitecture
 - T_C
 - Technologie CMOS et Microarchitecture

L'exécution d'une instruction

- Les étapes fondamentales

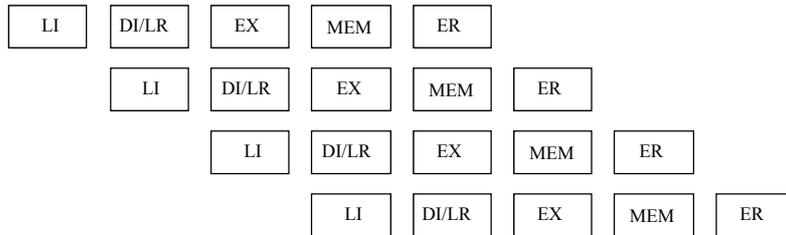
<i>Instructions UAL</i>	<i>Instructions Mémoire</i>	<i>Instructions Branchement</i>
Lecture instruction	Lecture instruction	Lecture instruction
Incrémentation CP	Incrémentation CP	Incrémentation CP
Décodage de l'instruction	Décodage de l'instruction	Décodage de l'instruction
Lecture des opérandes	Calcul de l'adresse	Calcul de l'adresse de
Exécution	mémoire	branchement
Ecriture du résultat	Accès mémoire	Exécution
	Rangement du résultat	

Les différentes étapes

- Instructions entières
LI/CP DI/LR EX ER
- Instructions flottantes
LI/CP DI/LR EX1 EX2 ... ER
- Instructions mémoire
LI/CP DI/LR CAAM ER
- Instructions de branchement
LI/CP DI/CAB/EX

Pipeline 1 instruction par cycle

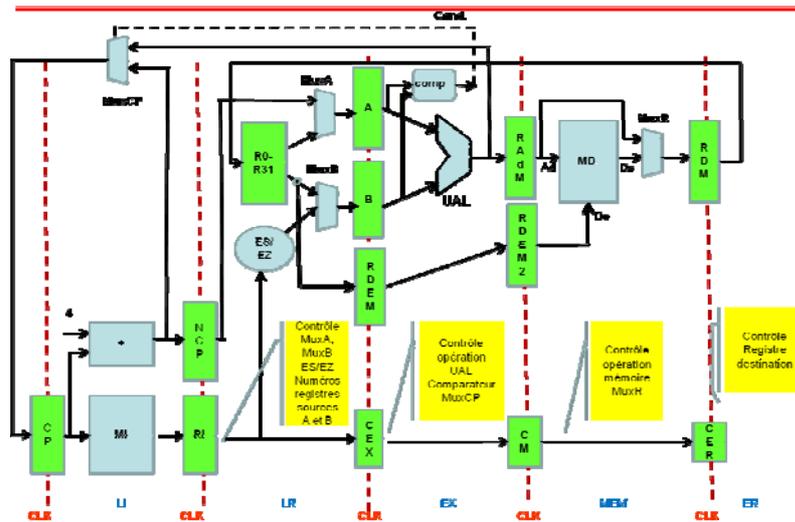
Pipeline R2000-R3000



Latence : 5 cycles

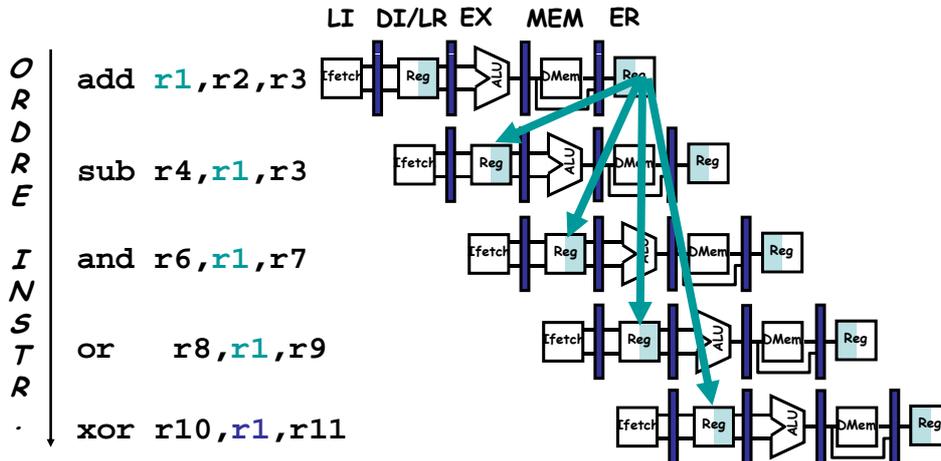
Débit : 1 instruction par cycle

Exécution scalaire MIPS (pipelinée)



Aléas de données

Temps (cycles d'horloge)

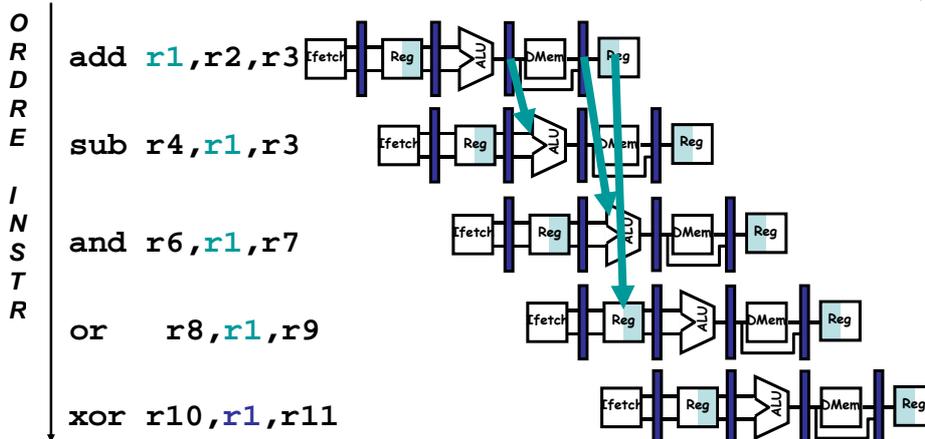


M2R NSI - SETI 2013-14

7

Envoi pour éviter les aléas

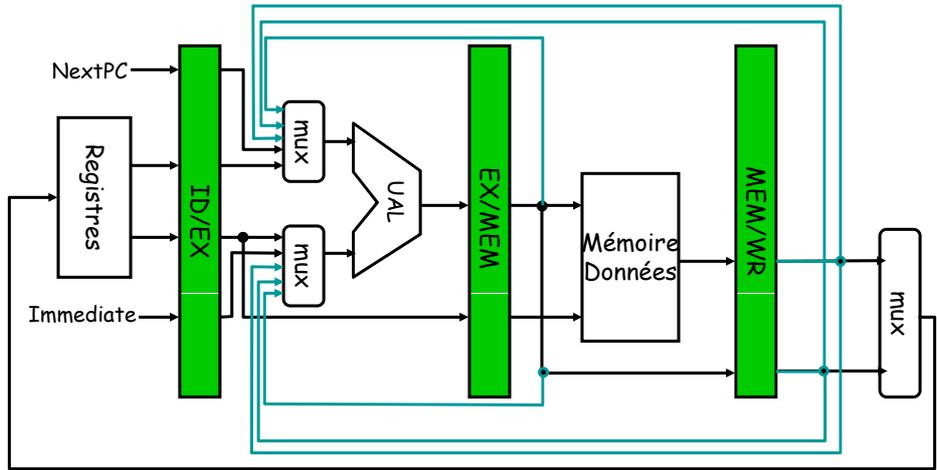
Temps (cycles d'horloge)



M2R NSI - SETI 2013-14

8

Matériel pour l'envoi

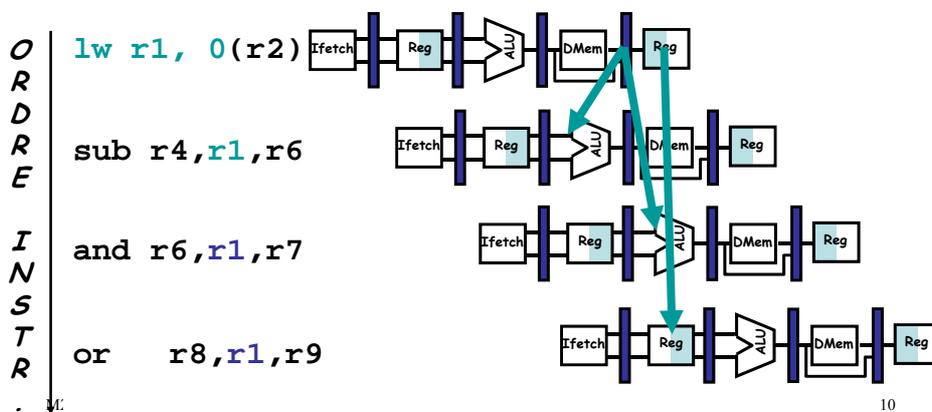


M2R NSI – SETI 2013-14

9

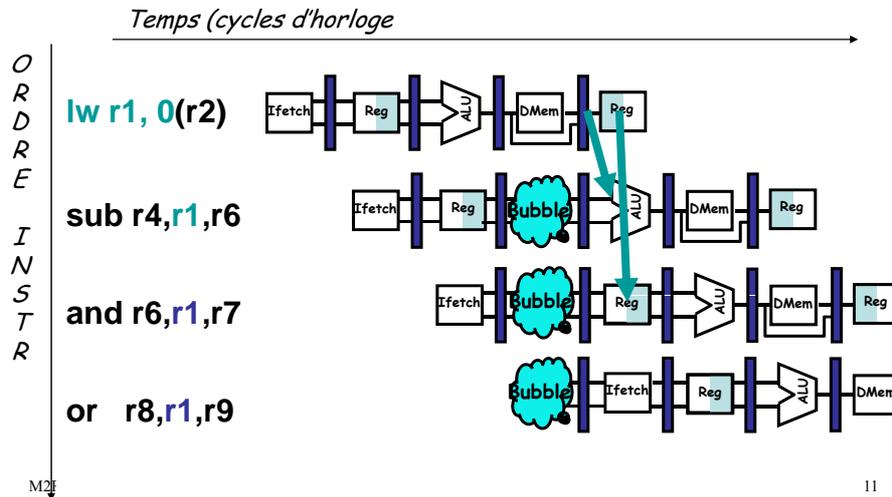
Aléas de données incontournables

Temps (cycles d'horloge)



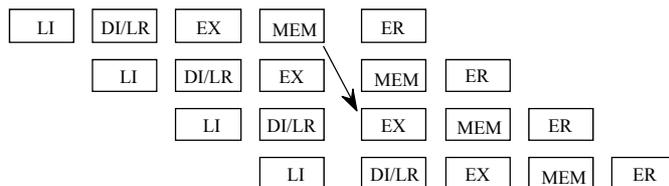
10

Aléas de données incontournables

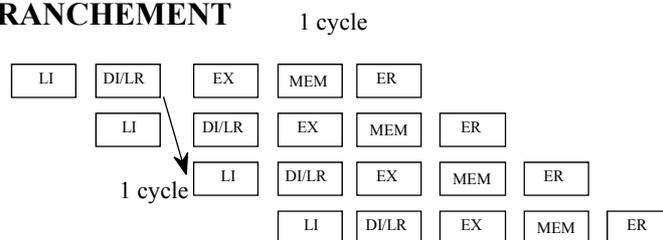


Les délais liés au pipeline

DELAI DE CHARGEMENT



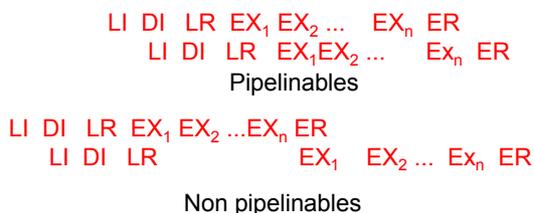
DELAI DE BRANCHEMENT



Plusieurs cycles pour l'étape EX

- Opérations entières

- Pipelinables
 - Multiplication
- Non pipelinable
 - Division



- Opérations flottantes

- Pipelinables
 - Addition/Soustraction
 - Multiplication
- Non pipelinable
 - Division
 - Racine carrée

Pentium 4 – Flottant double précision

	+-	*	/	√	+-	*	/	√
P4-x87	5	7	38	38	1	2	38	38
P4-SSE2	4	6	35		2	2	35	

Latence Débit
démarrage

La représentation flottante



$$N = -1^S \times 1, fraction \times 2^{PE - biais}$$

Si $0 < PE < PE_{max}$

NORMALISES

$$fraction = \sum_{i=1}^{i=k} 2^{-i}$$

PE = entier ≥ 0
 Biais = 127 (SP) ; 1023 (DP)
 S = bit de signe

N = 0 si PE = 0 et Fraction = 0
 N = ∞ si PE = PE max et Fraction = 0
 N = NaN si PE = PE max et Fraction $\neq 0$

$$N = -1^S \times 0, fraction \times 2^{1 - biais}$$

DENORMALISES

La multiplication flottante

- Les différentes étapes
 - Multiplication des mantisses ($PM = 1.f1 \times 1.f2$)
 - $1 \leq PM < 4$ car $1 \leq 1.f1 < 2$ et $1 \leq 1.f2 < 2$
 - Addition des Parties exposants
 - $PE = PE1 + PE2 - 127$
 - Renormalisation éventuelle
 - Si $PM \geq 2$, il faut faire $PM = PM/2$ (décalage) et $PE = PE + 1$
- Opération « longue »
 - Plusieurs cycles d'horloge
 - Pipelinable
 - Implémentation combinatoire (et non séquentielle)
 - La multiplication entière a les mêmes caractéristiques, sauf pour les processeurs de traitement du signal (1 cycle)

M2R NSI – SETI 2013-14

15

L'addition/soustraction flottante

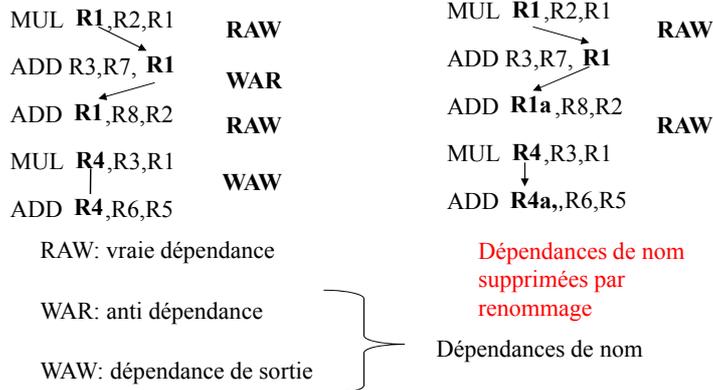
- Les différentes étapes
 - Comparer les parties exposant
 - Dénormiser la mantisse de l'opérande avec le plus petit exposant pour obtenir des parties exposant égales
 - Faire addition/soustraction des mantisses
 - Renormalisation éventuelle
 - Addition
 - $1 \leq AM < 4$ car $1 \leq 1.f1 < 2$ et $1 \leq 1.f2 < 2$
 - Si $AM \geq 2$, il faut faire $PM = PM/2$ (décalage) et $PE = PE + 1$
 - Soustraction
 - Le résultat est généralement dénormalisé
 - Recherche du premier 1 du résultat et renormalisation
- Opération « longue »
 - Plusieurs cycles d'horloge
 - Pipelinable

M2R NSI – SETI 2013-14

16

Les dépendances de données

Exemple:



M2R NSI – SETI 2013-14

17

Traitement des dépendances

- Contrôle des dépendances de données
 - Réalisé par matériel
 - Scoreboard
 - Tomasulo
- Suppression des dépendances de nom
 - Renommage de registres
 - Tomasulo
- Techniques logicielles pour supprimer les suspensions
 - Déroulage de boucle
 - Pipeline logiciel

M2R NSI – SETI 2013-14

18

Problème des exceptions/interruptions

- Exceptions
 - Situation où un évènement extérieur au CPU (demande d'interruption) ou interne au CPU (ex : division par 0, accès mémoire non aligné, interruptions logicielles...) provoque l'arrêt de l'exécution du programme et l'appel à une procédure de traitement de l'interruption
- Exceptions « propres »
 - Toutes les instructions **avant** celle ayant provoqué l'exception se terminent
 - Toutes les instructions **après** celle ayant provoqué l'exception n'ont pas commencé leur exécution
 - Pas de modification des registres ou de la mémoire.

M2R NSI – SETI 2013-14

19

Terminaison des instructions

- Pipeline et exceptions propres.
- Terminaison dans l'ordre des instructions
 - Les instructions multi-cycles obligent les instructions suivantes 1 cycle à attendre, même
 - s'il n'y a pas de dépendances de données
 - si elles ne provoquent pas d'exceptions
- Terminaison non ordonnées des instructions
 - Sans dépendance de données, si on autorise les instructions suivantes à se terminer, elles vont modifier les registres (et la mémoire)
 - Des exceptions « propres » sont alors impossibles (les instructions suivantes ne doivent pas avoir commencé)
- Exécution « spéculative » des instructions
 - Rangement temporaire des résultats des instructions
 - On ne modifie les registres et la mémoire que lorsqu'on est sûr qu'il n'y aura pas d'exception (instructions « garanties »)

LI DI LR EX₁ EX₂ ...EX_n ER
LI DI LR MEM ER

DIV (instruction multi-cycles
Instruction 1 cycle

M2R NSI – SETI 2013-14

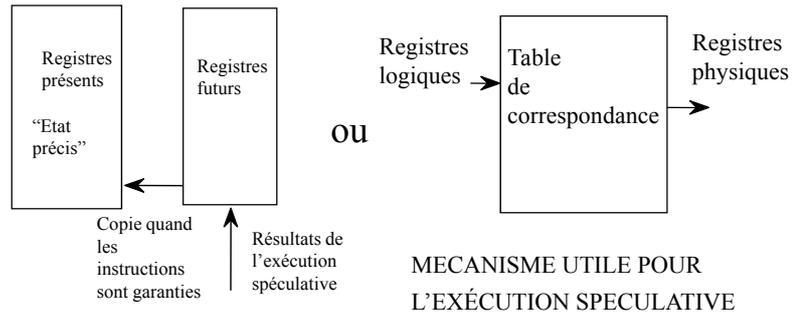
20

Renommage des registres

Renommage de registres

Registres logiques (Jeu d'instructions)

Registres physiques



M2R NSI – SETI 2013-14

21

Multiplication de matrices : SAXPY

IJK

```
for (i=0; i<N; i++)
  for (j=0; j<N; j++){
    x[i][j]=0;
    for (k=0; k<N; k++)
      x[i][j]+=y[i][k]*z[k][j];}
```

Produit scalaire

```
for (k=0; k<N; k++)
  r+=Y[k]*Z[k];
```

IKJ

```
for (i=0; i<N; i++){
  x[i][j]=0.0;
  for (k=0; k<N; k++)
    for (j=0; j<N; j++)
      x[i][j]+=y[i][k]*z[k][j];}
```

SAXPY ou DAXPY

```
for (j=0; j<N; j++)
  X[j]+=Y*Z[j];
```

M2R NSI – SETI 2013-14

22

Dépendances de données et suspensions

EXEMPLE

```
For (i=0; i<N; i++)
  Y[i]+= A*X[i];
```

SAXPY
DAXPY

Latence des instructions (cycles)

Dest.	Source		
	UAL	LD/ST (données)	Opérations FP
UAL	2	2	
LD/ST (adresses)	2	2	
ST (données)	1	1	4
Opérations flottantes		2	5

Performance SAXPY

Boucle non optimisée

Boucle	1	LF F1 , (R1)	; charge X(i)
	2	LF F2 , (R2)	; charge Y(i)
	3	FMUL F1 , F0 , F1	; a * X(i)
	4		
	5		
	6		
	7		
	8	FADD F2 , F2 , F1	; a * X(i) + Y(i)
	9	SUB R6 , R7 , R1	; compare i et N-1
	10	ADDI R1 , R1 ,8	; adresse X(i+1)
	11	ADDI R2 , R2 ,8	; adresse Y(i+1)
	12	SF F2 , -8(R2)	; range Y(i)
	13	BNE R6 , R0 , Boucle	;si I<N-1, branchement

13 cycles (4 cycles sont perdus)

Déroutage de boucle

Loop	1	LF F1 , (R1) ; charge X(i)	14	FADD F2 ,F2, F1 ; a * X(i) + Y(i)
	2	LF F3 , 8(R1) ; charge X(i+1)	15	FADD F4 ,F4, F3 ; a * X(i+1) + Y(i+1)
	3	LF F5 , 16(R1) ; charge X(i+2)	16	FADD F6 ,F6, F5 ; a * X(i+2) + Y(i+2)
	4	LF F7 , 24(R1) ; charge X(i+3)	17	FADD F8 ,F8, F7 ; a * X(i+3) + Y(i+3)
	5	LF F2, (R2) ; charge Y(i)	18	SF F2 , (R2) ; range Y(i)
	6	LF F4, 8(R2) ; charge Y(i+1)	19	SF F4 , 8(R2) ; range Y(i+1)
	7	LF F4, 16(R2) ; charge Y(i+2)	20	SF F6 , 16(R2) ; range Y(i+2)
	8	LF F4, 24(R2) ; charge Y(i+2)	21	SF F8 , 24(R2) ; range Y(i+3)
	9	FMUL F1 ,F0, F1 ; a * X(i)	22	ADDI R1,R1,32 ; adresse X(i+4)
	10	FMUL F3 ,F0, F3 ; a * X(i+1)	23	ADDI R2,R2,32 ; adresse Y(i+4)
	11	FMUL F5 ,F0, F5 ; a * X(i+2)	24	BNEQ R6, Loop ; si I<N-4, branch
	12	FMUL F7 ,F0, F7 ; a * X(i+3)		
	13	SUB R6,R7,R1 ; compare i et N-4		

**6 cycles/itération
au lieu de 13**

- * Plus de suspensions (4 cycles)
- * 1 cycle de gestion de boucle
(4 inst./4) au lieu de 4 (- 3 cycles)

```
For (i=0; i<N; i+=4) {
    Y[i]+=A*X[i];
    Y[i+1]+=A*X[i+1];
    Y[i+2]+=A*X[i+2];
    Y[i+3]+=A*X[i+3];
}
```

Pipeline logiciel

SAXPY PROLOGUE

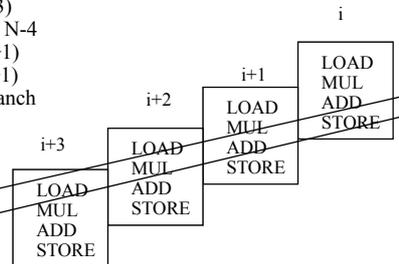
9 cycles (pas de suspension)

+ surcoût (prologue + épilogue)

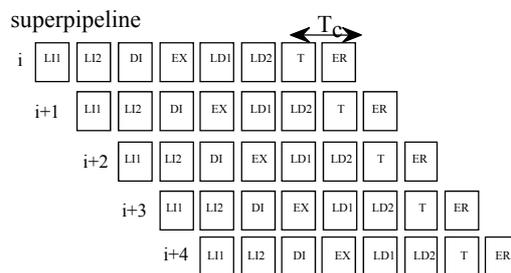
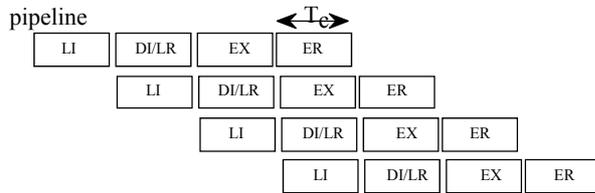
LOOP	1	SF F4 , 0(R2) ; range Y(i)
	2	FADD F4 ,F2, F3 ; a * X(i+1) + Y(i+1)
	3	FMUL F3 , F0, F1 ; a * X(i+2)
	4	LF F1 , 24(R1) ; charge X(i+3)
	5	LF F2, 24(R2) ; charge Y(i+3)
	6	SUB R6,R7,R1 ; compare i et N-4
	7	ADDI R1,R1,8 ; adresse X(i+1)
	8	ADDI R2,R2,8 ; adresse Y(i+1)
	9	BNEQ R6, LOOP ; si I<N-4, branch

EPILOGUE

**Boucle
pipelinée
par logiciel**



Approche superpipeline

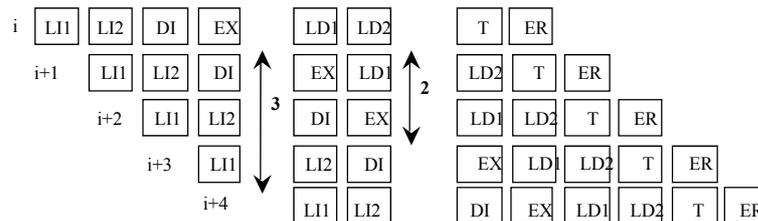


Les étages critiques
(accès cache) sont pipelinés

$$T_{cs} = T_c / 2$$

Superpipelines : chargements et branchements

Superpipeline MIPS R4000

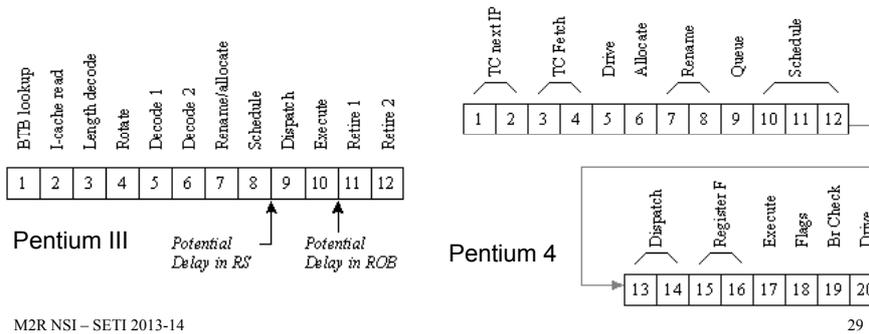


Délai
branchement

Délai
chargement

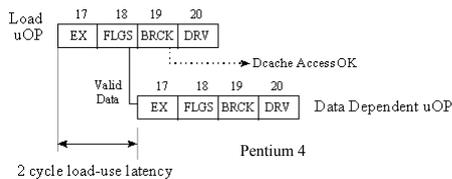
Pipelines Pentium III et Pentium 4

- Superpipeline : technique permettant d'utiliser des fréquences d'horloge élevée (2 à 3 GHz en 2003)



Latences chargement/branchement

Latence de chargement



Pénalité de mauvaise prédiction

Basic Pentium® III Processor Misprediction Pipeline									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fetch	Fetch	Decode	Decode	Decode	Rename	ROB Rd	Rdy/Sch	Dispatch	Exec

Basic Pentium® 4 Processor Misprediction Pipeline																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TC Next IP	TC Fetch	Drive/Alloc	Rename	Queue	Sch	Sch	Sch	Disp	Disp	RF	RF	Ex	Flags	Br CA	Drive				

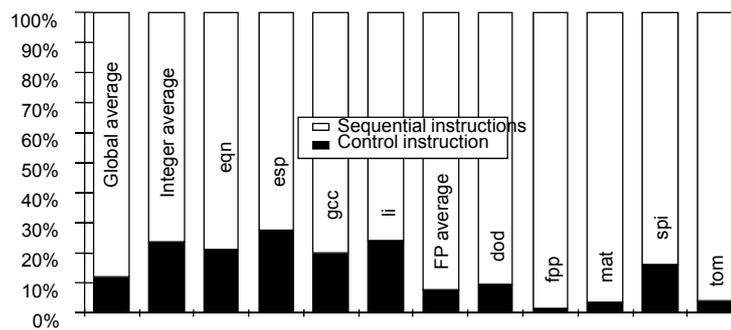
- Optimisation matérielle
 - Prédiction de branchement
- Optimisation programmeur/compilateur
 - Ordonnancement des instructions
 - Conversion SI
 - Utilisation des instructions de transfert conditionnel pour supprimer des branchements conditionnels

Caractéristiques des superpipelines



- **Avantages**
 - Simple extension du concept RISC
- **Inconvénients**
 - fréquence d'horloge plus élevée
 - circuits d'anticipation (forwarding) plus complexes
 - Délais de branchement et chargement plus élevés,
- **Remarque**
 - La compatibilité binaire doit être préservée : Pb des branchements retardés (SPARC, MIPS)

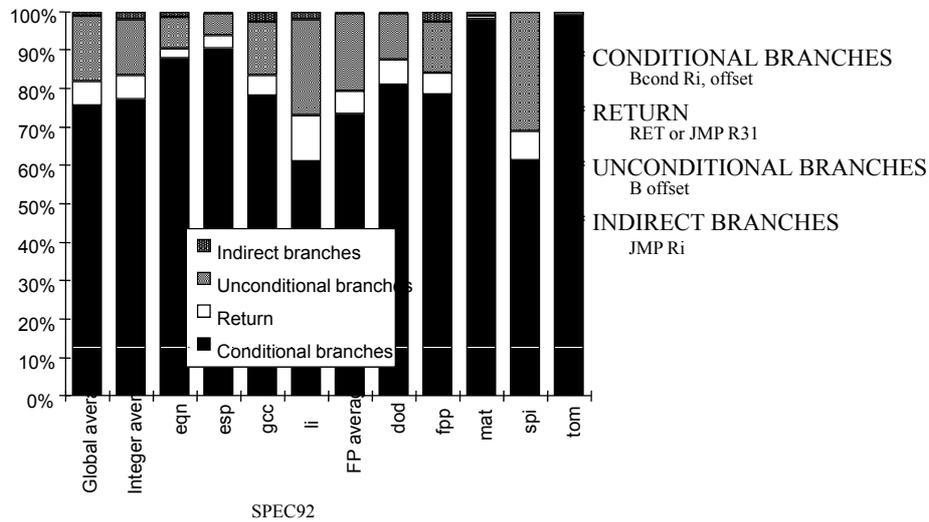
Les instructions de contrôle



SPEC92

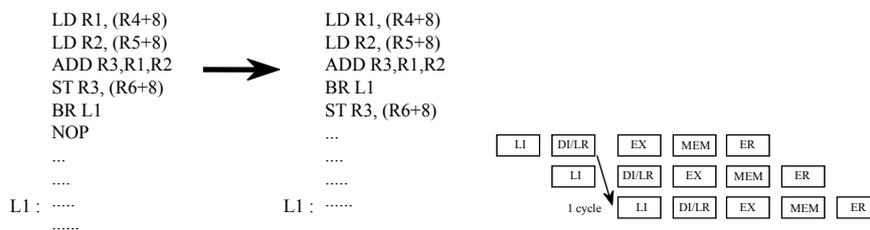
Yeh and Patt

Répartition des branchements



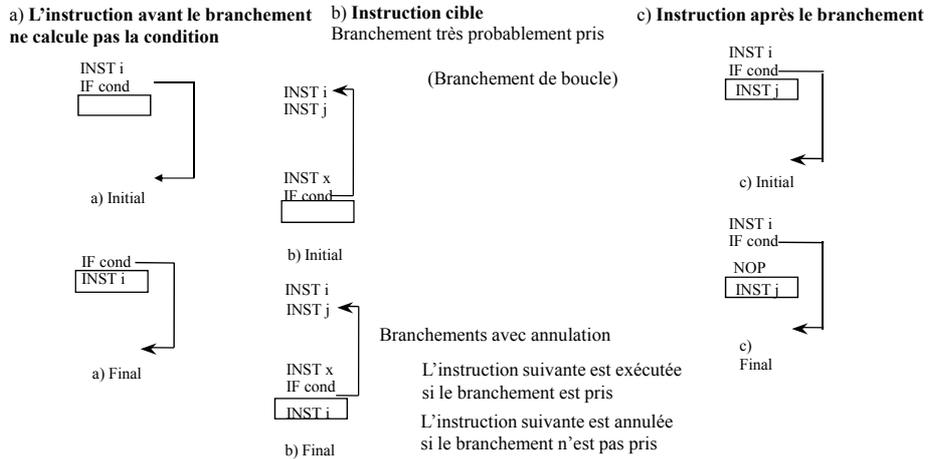
Techniques pour aléas de contrôle

- INSTRUCTIONS SAUT/BRANCHEMENT
 - Annulation par matériel de l'instruction qui suit.
 - Toute instruction de contrôle prend 2 cycles.
 - Insérer une instruction NOP
 - Branchements retardés
 - Réordonnancement par le compilateur



Les branchements conditionnels retardés

Schémas de réordonnancement

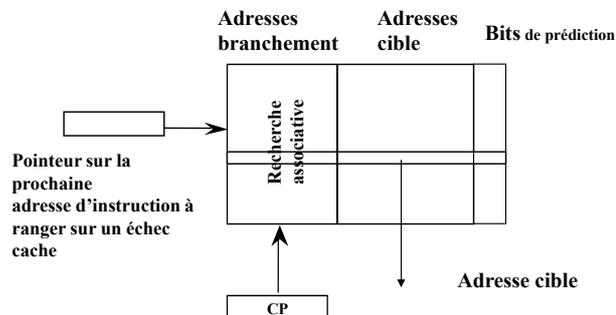


M2R NSI – SETI 2013-14

35

Les branchements non retardés (BTB)

- Les caches d'adresse de branchement (BTB ou BTC)



M2R NSI – SETI 2013-14

36

La prédiction de branchement

- Prédiction statique
 - Informations connues à la compilation
 - Branchements arrière pris (boucles)
 - Profilage des programmes
- Prédictions dynamiques
 - Prédicteurs locaux
 - Prédicteurs 1 bit et 2 bits
 - Prédicteurs globaux
 - Historique des branchements

Les prédicteurs dynamiques locaux

- Prédicteurs 1 bit et 2 bits

Compteur 1 bit ou 2 bits

1 bit : comportement dernier branchement

2 bits : automate

Prédiction du branchement

Prédiction des programmes flottants

- Exemple

```

FOR K = 1 to N
  FOR J = 1 to N
    C(J) = C(J) + A(K) x B(K,J)
  
```

Lk |
 | Lj |
 | |
 | BNEZ Rj, Lj
 |
 | BNEZ Rk, Lk

Chaque branchement est pris (n-1) fois et non pris 1 fois
 Prédicteur 1 bit : 2 mauvaises prédictions sur n
 Prédicteur 2 bits : 1 mauvaise prédiction sur n

Les branchements corrélés

- Exemple : eqntott (SPEC92)

```

if (aa==2)
  aa = 0 ;
if (bb==2)
  bb = 0 ;
if (aa != bb {

```

```

      SUBI   R3,R1,#2
b1    BNEZ  R3,L1
      ADD   R1,R0,R0
L1 :  SUBI   R3,R2,#2
b2    BNEZ  R3,L2
      ADD   R2,R0,R0
L2 :  SUB   R3,R1,R2
b3    BEQZ  R3,L3

```

b1 PRIS si aa ≠ 2

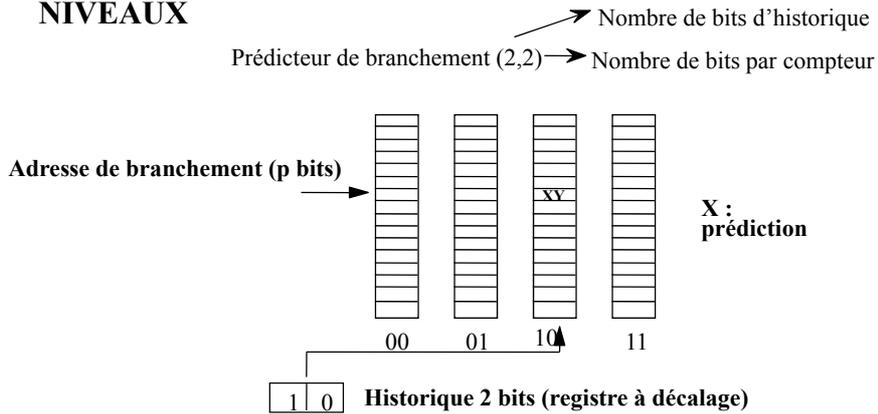
b2 PRIS si bb ≠ 2

b1 et b2 NON PRIS (aa = bb = 0) => b3 PRIS

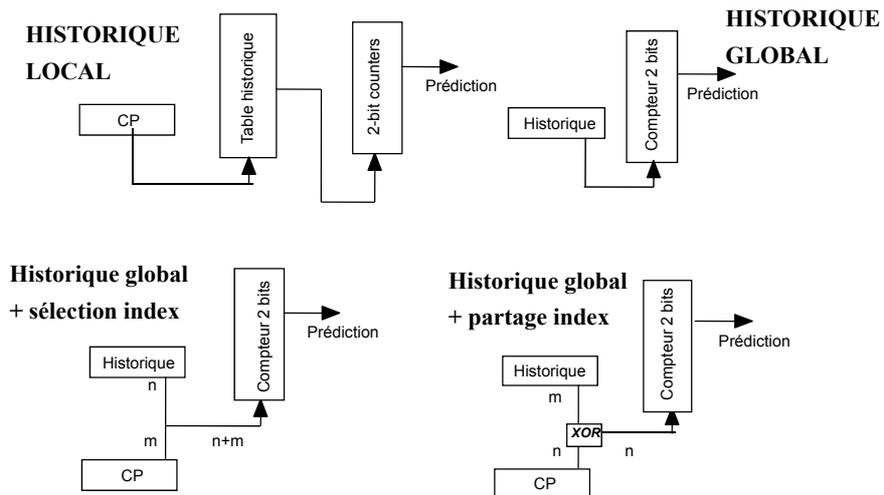
Corrélation entre les comportements de b1, b2 et b3

Les prédicteurs à deux niveaux

PREDICTEUR A 2 NIVEAUX

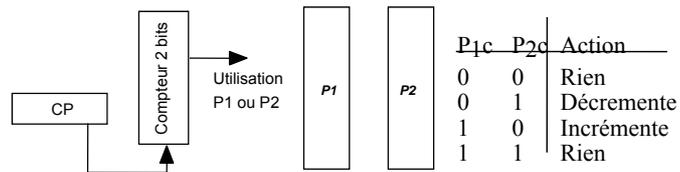


Local + Global



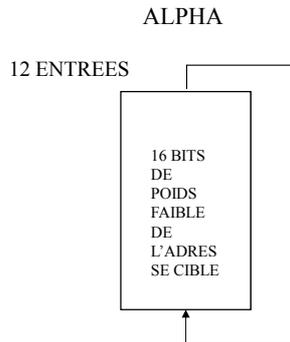
Les méta - prédicteurs

- Utilisation de deux prédicteurs différents
 - efficacité d'un prédicteur dépend de la nature du code
- Choix en dynamique du meilleur



Prédiction de l'adresse de retour

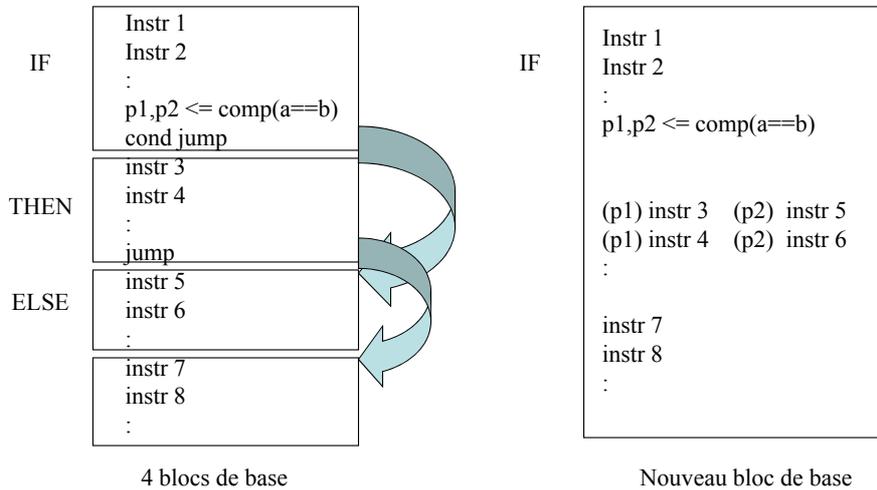
- Pile d'adresse de retour



Off.(15:14)	Cible prédite	Opération sur la pile
00	JMP	PC+4xdep(13:0)
01	JSR	PC+4xdep(13:0)
10	RET	Prediction stack
11	JSR	Prediction stack
	Co-routine	
		PUSH PC
		POP PC
		POP ET
		PUSH PC

Les adresses de retour dépendent de l'endroit d'où les procédures sont appelées. Elles sont donc difficilement prévisibles.

L'utilisation des prédicats



M2R NSI – SETI 2013-14

45

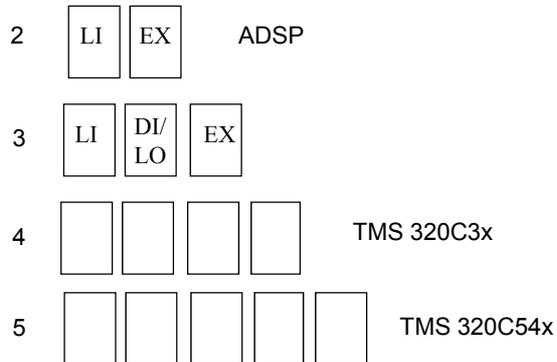
Les jeux d'instructions avec prédicat

- ARM
 - Processeur RISC 32 bits (non VLIW)
- C6x
 - Processeur VLIW traitement du signal (Texas)
- Trimedia
 - Processeur VLIW traitement du signal (Philips)
- IA64
 - Processeur Intel usage général

M2R NSI – SETI 2013-14

46

Les pipelines des DSP



M2R NSI – SETI 2013-14

47

Pipeline du C54x



- PR : calcul adresse de l'instruction
- LI : Lecture de l'instruction
- DI : Décodage de l'instruction
- CA : Calcul adresse de l'opérande
- LD : Lecture de l'opérande
- EX : Exécution

M2R NSI – SETI 2013-14

48

Pipeline du C6x (TI)

