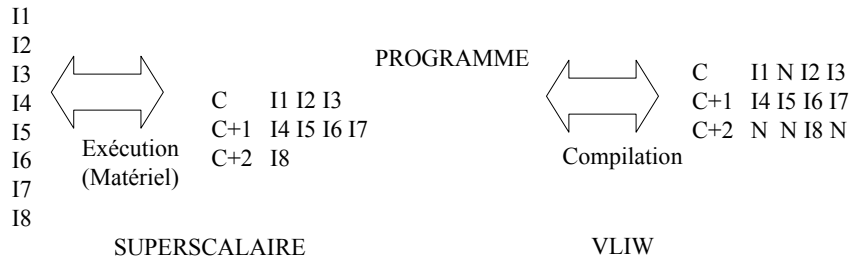

Parallélisme d'instructions : Superscalaires versus VLIW

Daniel Etiemble
de@lri.fr

Résumé

- Lancement statique ou dynamique
- Superscalaires
 - Contrôle des dépendances
 - Exécution non ordonnée des instructions
- VLIW
 - Processeurs
 - Trimedia
 - C6x
 - IA-64
 - Pipeline logiciel

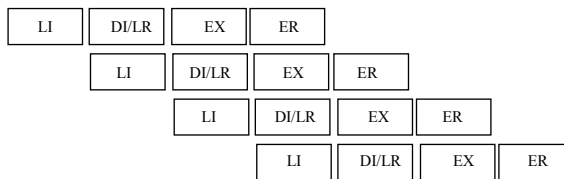
Processeurs : superscalaire/VLIW



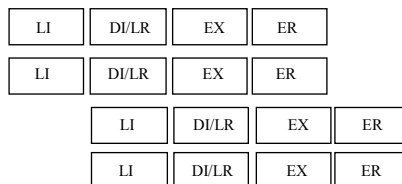
- **Superscalaire**
 - Le matériel est responsable à l'exécution du lancement parallèle des instructions
 - Contrôle des dépendances de données et de contrôle par matériel
- **VLIW**
 - Le compilateur est responsable de présenter au matériel des instructions exécutables en parallèle
 - Contrôle des dépendances de données et de contrôle par le compilateur

Principes des superscalaires

pipeline



superscalaire

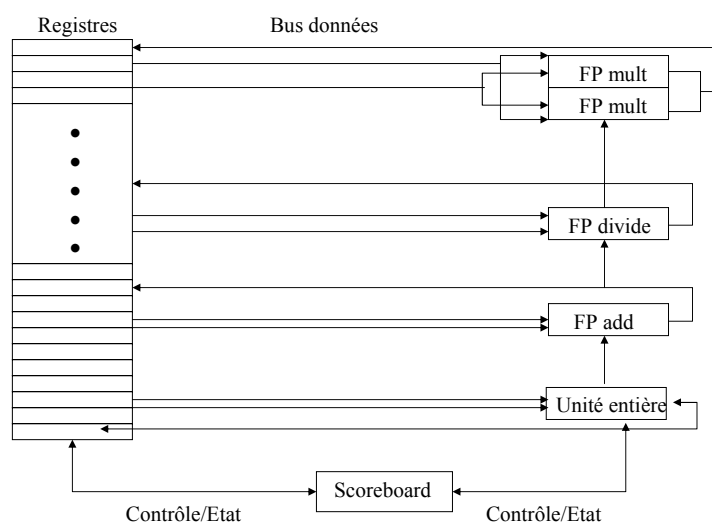


Superscalaire de degré n :
n instructions par cycle

Le contrôle des aléas

- Contrôle des dépendances de données
 - Réalisé par matériel
 - Tableau de marques (Scoreboard)
 - Tomasulo
- Existe à la fois pour les processeurs scalaires (à cause des instructions multi-cycles) et les processeurs superscalaires (problèmes accentués)

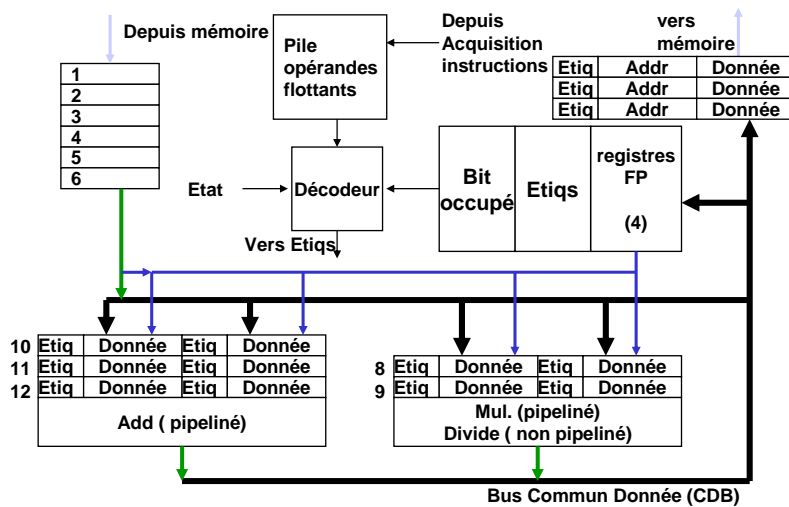
Le tableau de marques



Les trois étapes du « tableau de marques »

1. Etat de l'instruction : indique la phase en cours de l'instruction
 1. Lancement
 2. Lecture des opérandes
 3. Exécution
 4. Ecriture du résultats
2. Etat des unités fonctionnelles : indique l'état de l'unité fonctionnelle (UF). Il y a 9 champs dans chaque unité fonctionnelle
 - Occupé : indique si l'unité est occupée ou non.
 - Op : Opération à réaliser dans l'unité (par ex: + ou -)
 - Fi : Registre destination
 - Fj, Fk : Numéros des registres source
 - Qj, Qk: Unités fonctionnelles qui alimentent les registres sources Fj, Fk
 - Rj, Rk : Drapeaux indiquant quand Fj, Fk sont prêts
3. Etat des registres résultat : indique quelle unité fonctionnelle écrira dans chaque registre, s'il y a une écriture. Un blanc indique qu'aucune instruction en cours n'écrira dans ce registre.

Le contrôle des aléas : Tomasulo



Les composantes des stations de réservation

- Les stations de réservation
 - Op : opération à effectuer dans l'unité (par ex: + or –)
 - Vj, Vk : valeurs des opérandes source
 - Les tampons de rangement ont un champ V : le résultat à ranger
 - Qj, Qk : Stations de réservation alimentant les registres source (valeur à écrire)
 - Note : Pas de drapeaux Prêt comme dans le tableau de marques ; Qj, Qk=0 => prêt
 - Les tampons de rangement ont seulement Qi pour la SR produisant le résultat
 - Occupé : indique que la station de réservation ou l'UF est occupée
- Banc de registre et tampon de rangement
 - Qi : champ étiquette
 - occupé : actuellement utilisé
- Etat des résultats dans les registres :
 - Indique quelle unité fonctionnelle va écrire dans chaque registre. Un blanc lorsque aucune instruction en cours n'écrira dans le registre.

Les trois étapes de l'algorithme de Tomasulo

- 1. Lancement : obtenir l'instruction de la file des instructions flottantes (dans l'ordre)
 - Si une station de réservation est disponible (pas d'aléa structurel), le contrôle lance l'instruction et envoie les opérandes (renomme les registres) depuis le banc de registres (si les opérandes y sont) à la SR. Autrement, suspension à cause de l'aléa structurel
- 2. Exécution : opération sur les opérandes (EX) (peut être non ordonné)
 - Quand les deux opérandes sont prêts, exécution
 - S'ils ne sont pas prêts, attendre le résultat sur le Bus Commun de Données (CDB)
 - Les chargements effectuent ces deux étapes
 - Traite les aléas RAW
- 3. Ecriture du résultat : termine l'exécution (ER) (peut être non ordonné).
 - Ecrire sur le CDB pour toutes les unités en attente. Marquer la SR comme disponible.
 - Le renommage évite les aléas WAW et WAR.
- Les bus
 - Bus de données normaux : données + destination (bus "vers")
 - Bus commun de données : données + source (bus "depuis")
 - 64 bits de données et 4 bits pour l'adresse source de l'Unité Fonctionnelle
 - Ecriture si l'Unité Fonctionnelle espérée est là (produit le résultat)
 - Effectue la diffusion

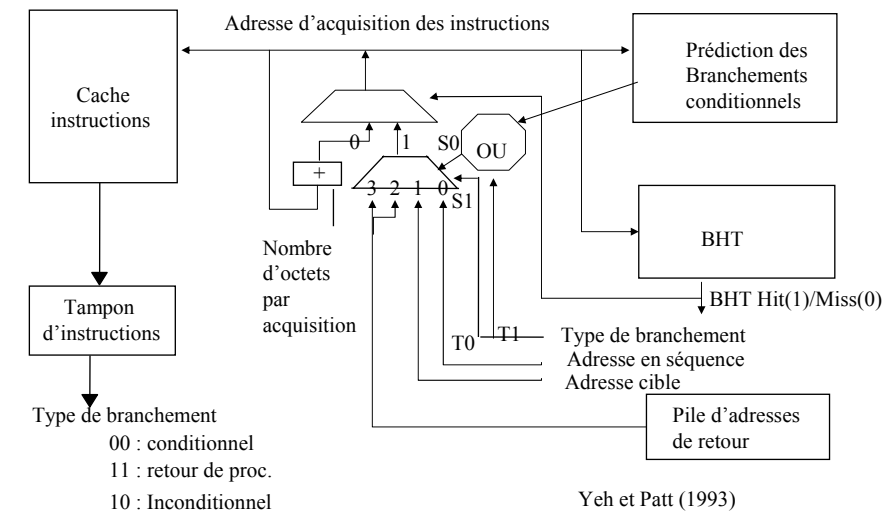
Problèmes liés aux superscalaires

- Nombre d'instructions lues
- Types d'instructions exécutables en parallèles
- Politique d'exécution
 - Exécution dans l'ordre
 - Exécution non ordonnée
- Dépendances de données
- Branchements

Problèmes superscalaires (2)

- Coût matériel accentué
 - Plusieurs accès aux bancs de registres
 - Plusieurs bus pour les opérandes et les résultats
 - Circuits d'envoi (forwarding) plus complexes
- Davantage d'unités fonctionnelles avec latences différentes
 - plusieurs fonctions (Entiers, Flottants, Contrôle)
 - plusieurs unités entières
- Plusieurs instructions exécutées simultanément
 - Débit d'instructions plus important
 - Débit d'accès aux données plus important
 - Problème des sauts et branchements accentués

L'acquisition des instructions



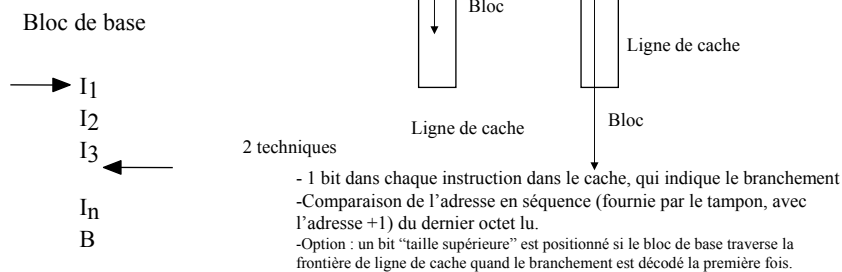
M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

13

Acquisition superscalaire

- Indexation du BTB-BHT
 - avec l'adresse du branchement (CPU scalaire)
 - avec l'adresse d'une instruction qui domine le branchement

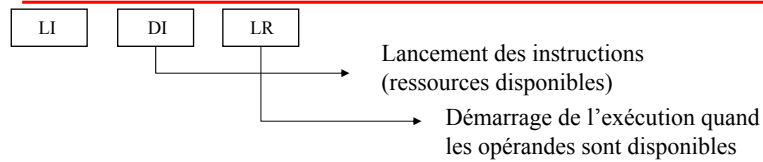


M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

14

Exécution superscalaire



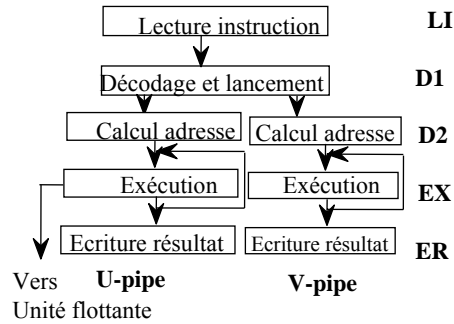
- Exécution dans l'ordre
 - Acquisition par groupe d'instructions
 - Traitement du groupe suivant quand toutes les instructions d'un groupe ont été lancées et démarrées.
- Exécution non ordonnée
 - Acquisition des instructions par groupe, rangées dans un tampon
 - Exécution non ordonnée des instructions, en fonction du flot de données
 - Fenêtre d'instructions liée à la taille du tampon.

Exécution superscalaire x86

- Exécution directe du code x86
 - Pentium
- Traduction dynamique du code x86 en instructions de type RISC
 - Pentium Pro et successeur
 - AMD K6 et K7
- Emulation : traduction dynamique en code VLIW
 - Transmeta

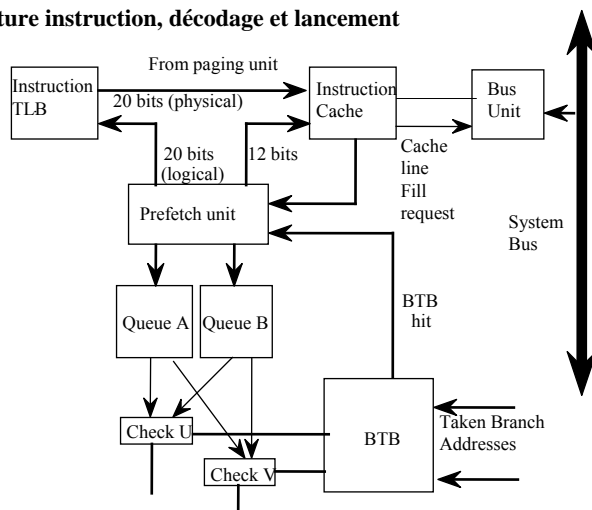
Exécution dans l'ordre : le Pentium

Deux pipelines U et V



Pentium

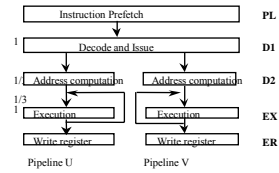
Lecture instruction, décodage et lancement



Pentium : phase exécution

• REGLES

- Seules les instructions simples peuvent être appariées
- Quand une instruction est suspendue dans U, l'autre est suspendue dans V
- Quand une instruction est suspendue dans V, l'autre peut continuer, mais aucune autre instruction ne peut entrer dans EX avant que les précédentes n'aient atteint ER → Exécution au rythme de la plus lente.
- Quand deux instructions ont MEM pour destination, deux cycles supplémentaires sont nécessaires (5 au total)



mov reg, reg/mem/imm : 1
 mov mem, reg/imm : 1
 alu mem, reg/imm : 1/2/1
 alu mem, reg/imm : 3
 inc reg/mem : 1/3
 dec reg/mem
 push reg/mem : 1/2
 pop reg/mem
 lea reg, mem
 jmp/call/jcc near : 1/2
 nop : 1

Exécution dans l'ordre (21164)

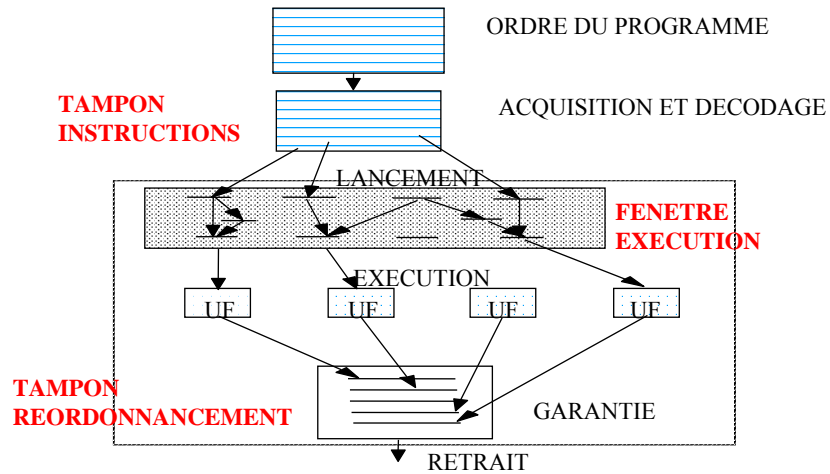
- 4 instructions acquises par cycle
- 4 pipelines indépendants

- 2 entiers
- 2 flottants

E0	E1	FA	FM
LD	LD	FADD	FMUL
ST	IBR	FDIV	
UAL	Jump	FBR	
CMOV	UAL		
COMP	CMOV		
	COMP		

- 1 groupe de 4 instructions considéré à chaque cycle
 - si les 4 instructions se répartissent dans E0, E1, FA et FM, elles démarrent leur exécution. Sinon, certaines utilisent les cycles suivants jusqu'à ce que les 4 aient démarré.
 - Les 4 suivantes sont traitées quand les 4 précédentes ont démarré.

Exécution non ordonnée

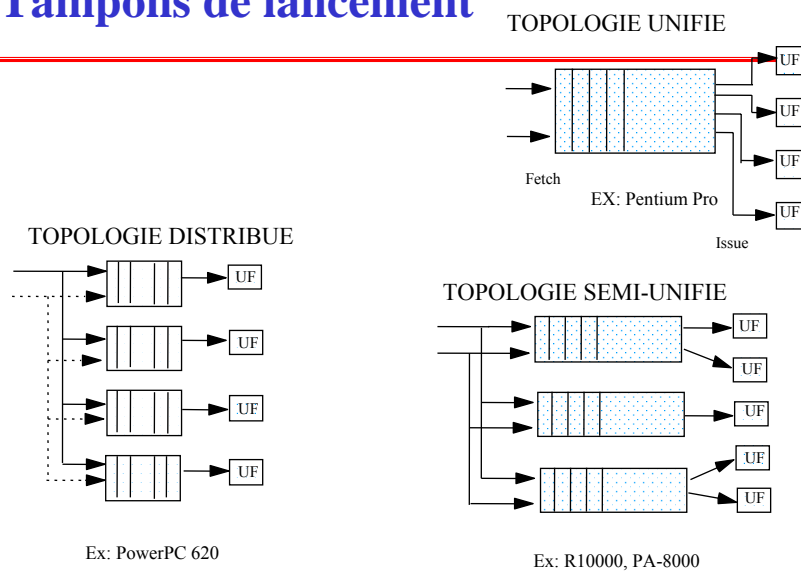


M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

21

Tampons de lancement



M1 Informatique
2005-2006

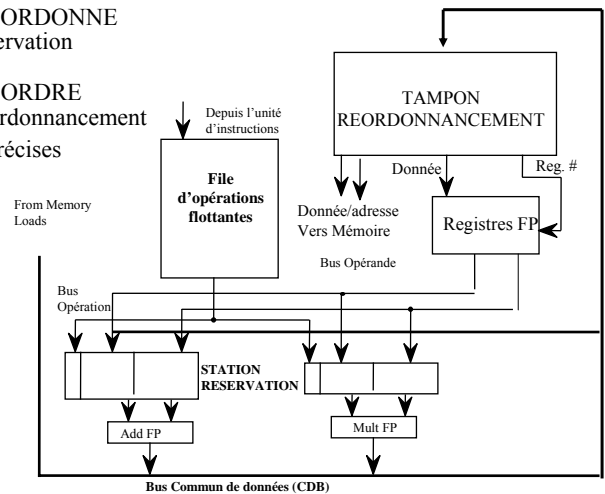
Architectures avancées
Daniel Etiemble

22

Stations de réservation + Tampon de réordonnement

EXECUTION NON ORDONNE
Stations de réservation

RETRAIT DANS L'ORDRE
Tampon de réordonnement
Interruptions précises



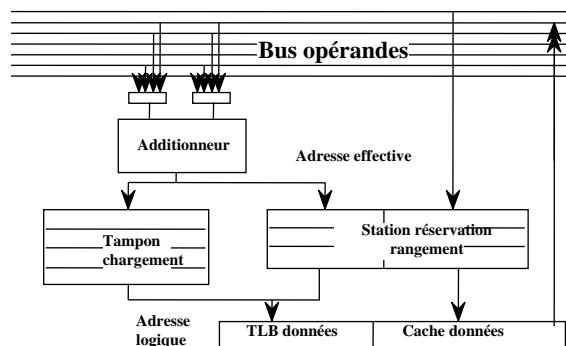
M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

23

Les unités mémoire

Les unités Chargement-Rangement (*Load Store*)



M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

24

UNITES *LOAD-STORE*

- LES ACCES MEMOIRE SONT CRITIQUES POUR LA PERFORMANCE
 - *Unités spécifiques chargement-rangement, avec stations de réservation*
- Les instructions mémoire sont dans un tampon lorsqu'elles attendent le cache ou la mémoire. L'instruction est lancée et l'exécution continue.
- Les chargements succédant à un rangement en attente sont réordonnés
 - Quand une instruction de rangement attend un opérande dans une station de réservation, le chargement suivant peut précéder le rangement et accéder au cache
 - Un comparateur d'adresses vérifie les aléas d'adresses possibles
 - Si l'adresse du chargement est identique à l'adresse du rangement en attente (l'opérande est dans la station de réservation), le chargement accède directement à l'opérande dans la station de réservation.
- Avantages
 - Les latences de chargement diminuent
 - Dans les petites boucles, recouvrement entre les rangements (i) et les chargements(i+1).

Caches non bloquants

- Pour permettre l'exécution non ordonnée des instructions, le processeur doit pouvoir continuer à exécuter des Loads alors qu'un Load précédent a provoqué un défaut de cache.
- Un cache non bloquant permet plusieurs accès cache simultanés, et notamment de traiter des succès pendant le traitement d'un échec.

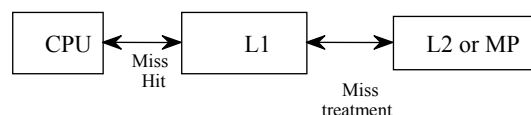
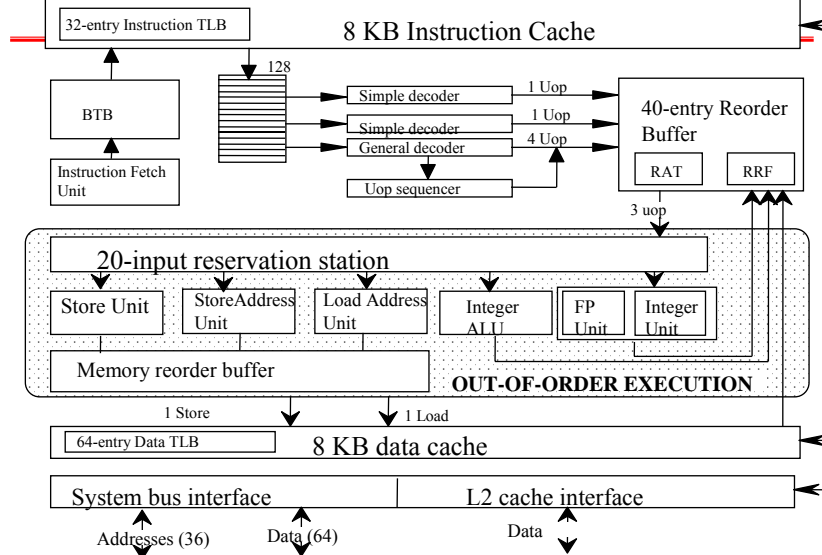


Schéma fonctionnel du Pentium Pro



M1 Informatique
2005-2006

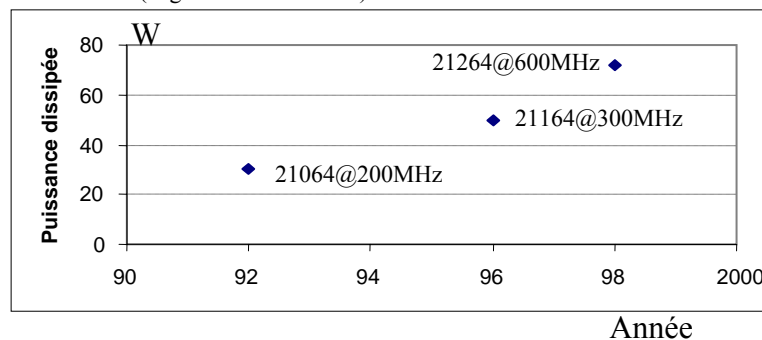
Architectures avancées
Daniel Etiemble

27

Evolution de la puissance dissipée

• Exemple des processeurs Alpha

- 21064 (degré 2 - dans l'ordre)
- 21164 (degré 4 - dans l'ordre)
- 21264 (degré 4 - non ordonné)



M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

28

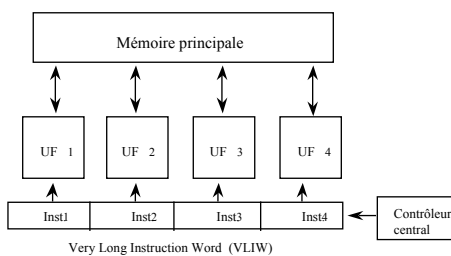
du R5000 au R10000

DIMINUSHING RETURN

Caractéristique	R10000	R5000	Différence
Fréquence	200 MHz	180 MHz	équivalent
CMOS	0.35/4M	0.35/4M	
Cache	32K/32K	32K/32K	
Étages pipeline	5-7	5	
Modèle	Non ordonné	Dans l'ordre	
Lancement	4	1 + FP	
Transistors	5.9 millions	3.6 millions	+64%
Taille	298 mm ²	84 mm ²	
Développement	300 h x a	60 h x a	
SPECint95	10.7	4.7	+128%
SPECfp95	17.4	4.7	+270%
Power	30W	10W	200%
SPEC/Watt	0.36/0.58	0.47/0.47	-31%/23%

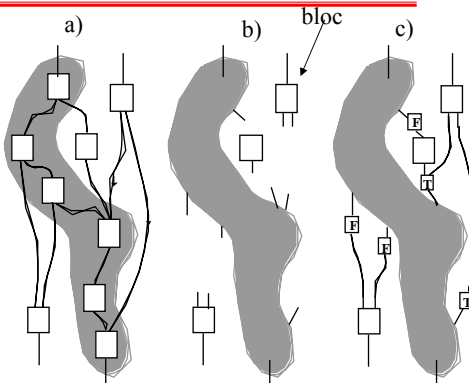
ARCHITECTURE VLIW

- PRINCIPE
 - Plusieurs unités fonctionnelles
 - ORDONNANCEMENT STATIQUE (compilateur)
 - Aléas de données
 - Aléas de contrôle
 - Exécution pipelinée des instructions
 - Exécution parallèle dans N unités fonctionnelles
- Tâches du compilateur
 - Graphe de dépendances locales : Bloc de base
 - Graphe de dépendance du programme : Ordonnement de traces
- Pour:
 - Matériel simplifié (contrôle)
- Contre:
 - La compatibilité binaire entre générations successives est difficile ou impossible



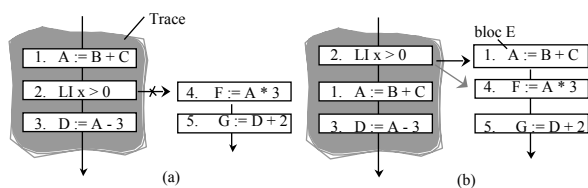
VLIW: “Ordonnancement de traces”

- Ordonnancement des blocs de base
- Ordonnancement à travers les blocs
 - Sélectionner une trace
 - Optimiser la trace, avec les problèmes d’entrée et sortie de la trace
 - Ajouter des blocs pour connecter les autres chemins à la trace
 - Sortant de la trace
 - Entrant dans la trace

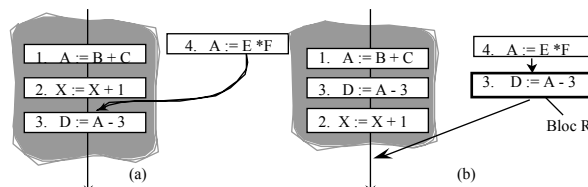


VLIW: “Ordonnancement de traces”

Blocs sortant de la trace

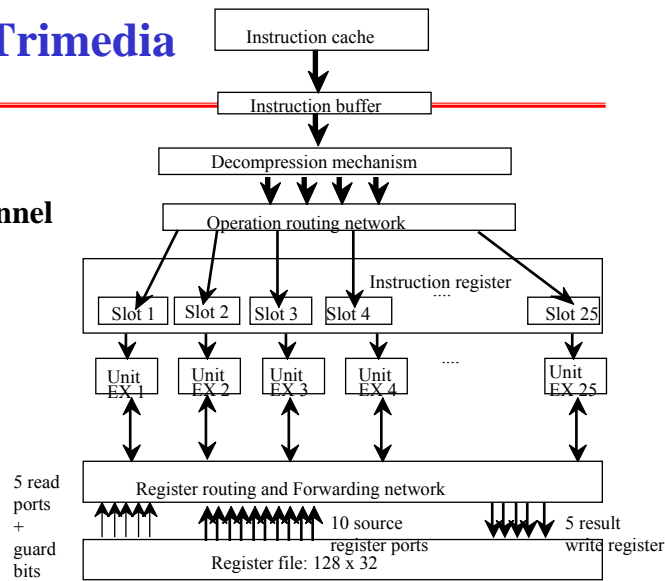


Blocs entrant dans la trace



VLIW - Trimedia (Philips)

Schéma fonctionnel

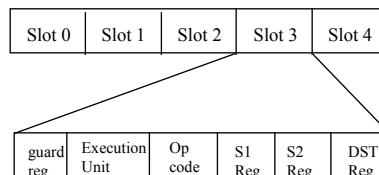


Jeu d'instructions Trimédia

- VLIW : 5 instructions de n bits
- 128 registres généraux
 - $r0 = 0$
 - $r1 = 1$
- Exécution conditionnelle de toute instruction, avec spécification d'un registre général contenant le prédicat (vrai si 1; faux si 0)

VLIW: Trimedia (Philips)

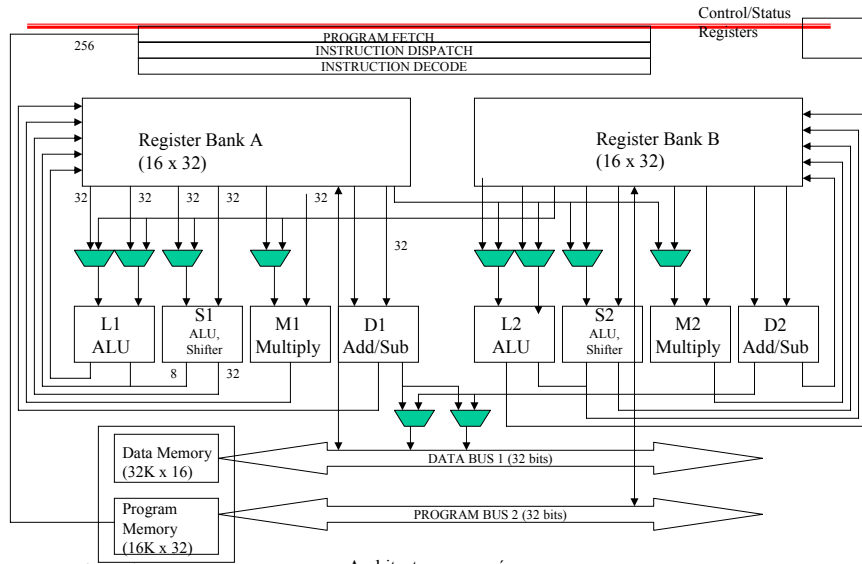
- Format d'instructions
 - Registres de garde : indiquent si l'opération est exécutée (opérations conditionnelles)
 - Techniques de compression
 - Supprimer les NOP des opérations non utilisées
 - Branchements retardés
 - 3 cycles
- Objectifs
 - VLIW + DSP
 - Multimédia



Jeu d'instructions C6x

- VLIW : 8 x 32 bits
- Instructions 32 bits, correspondant à 4 x 2 unités fonctionnelles
 - voir schéma fonctionnel
- 2 ensemble A et B de 16 registres généraux
- Instructions à exécution conditionnelle
 - 5 registres généraux A1, A2, B0, B1, B2 peuvent contenir la condition
 - différent zéro
 - égal 0

Schéma fonctionnel du C6x



M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

37

Modes d'adressage

Type d'adressage	No modification	Préincrément ou Décrement du registre adresse	Postincrément ou Décrement du registre adresse
Registre Indirect	*R	*++R *--R	*R++ *R--
Registre + déplacement	*+R[ucst5] *-R[ucst5]	*++R[ucst5] *--R[ucst5]	*R++[ucst5] *R--[ucst5]
Base + Index	*+R[offsetR] *-R[offsetR]	*++R[offsetR] *--R[offsetR]	*R++ *R--

M1 Informatique
2005-2006

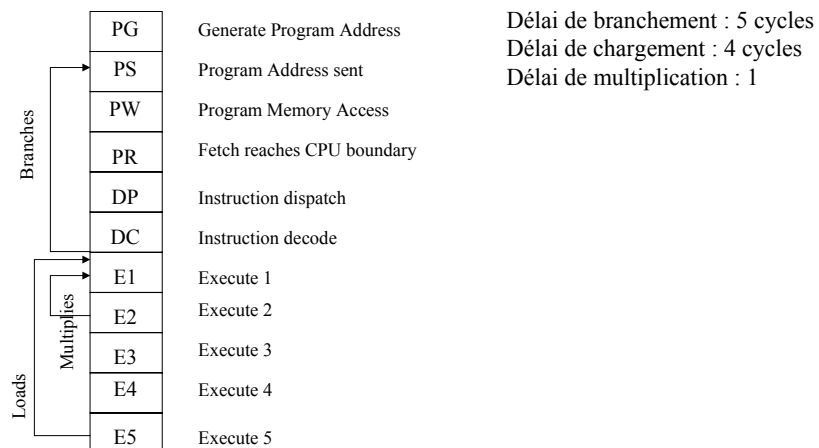
Architectures avancées
Daniel Etiemble

38

Instructions et unités fonctionnelles

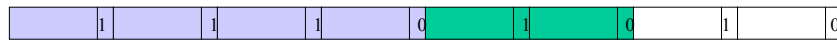
.L Unit		.M Unit	.S Unit		.D Unit
ABS	SADD	MPY	ADD	MVKH	ADD
ADD	SAT	SMPY	ADDK	NEG	ADDA
AND	SSUB	MPYH	ADD2	NOT	LD mem
CMPEQ	SUB		AND	OR	LD mem (15 bit) (D2)
C.PGT	SUBC		B disp	SET	MV
CMPGTU	XOR		B IRP	SHL	NEG
CMPLT	ZERO		B NRP	SHR	ST mem
CMPLTU			Breg	SHRU	ST mem (15 bit) (D2)
LMBD			CLR	SSHL	SUB
MV			EXT	SUB	SUBA
NEG			EXTU	SUB2	ZERO
NORM			MVC (S2)	XOR	
NOT			MV	ZERO	
OR			MVK		

PIPELINE C6x



C6x: Acquisition des paquets

32 bits



Le bit de poids faible de chaque instruction indique si l'instruction peut être exécutée en parallèle avec l'instruction qui suit.

Toujours 0

Programmation VLIW (C6x)

- Allocation des ressources
 - Instructions et unités fonctionnelles
- Graphes de dépendances
 - Latences (Chargement, Multiplication, Branchement)
- Déroulage de boucle
- Pipeline logiciel
 - Intervalle d'itérations
 - Cas des conditionnelles
 - Durée de vie des registres

Programmation C6x : produit scalaire (1)

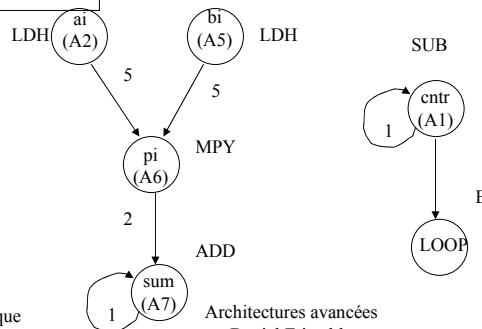
Code C

```
int dotp(short[a], short[b])
{
  int sum, i;
  sum=0;
  for (i=0; i<100;i++)
    sum+=a[i]*b[i];
  return (sum);
}
```

Code assembleur

```
LOOP: LDH .D1 *A4++,A2 ; load ai
      LDH .D1 *A3++,A5 ; load bi
      MPY .M1 A2, A5, A6 ; ai*bi
      ADD .L1 A6, A7,A7 ; sum+=(ai*bi)
      SUB .S1 A1,1,A1 ; decrement loop counter
[A1] B .S2 LOOP ; branch to loop
```

GRAPHE
DEPENDANCE



M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

43

Programmation C6x : produit scalaire (2)

CODE ASSEMBLEUR NON PARALLELE

```
      MVK .S1 100,A1 ; set up loop counter
      ZERO .L1 A7 ; zero out accumulator
LOOP
      LDH .D1 *A4++,A2 ; load ai
      LDH .D1 *A3++,A5 ; load ai
      NOP 4 ; delay slots for LDH
      MPY .M1 A2, A5, A6 ; ai*bi
      NOP 1 ; delay slot for MPY
      ADD .L1 A6, A7,A7 ; sum+=(ai*bi)
      SUB .S1 A1,1,A1 ; decrement loop counter
[A1] B .S2 LOOP ; branch to loop
      NOP 5 ; delay slots for branch
```

16 cycles/itération

M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

44

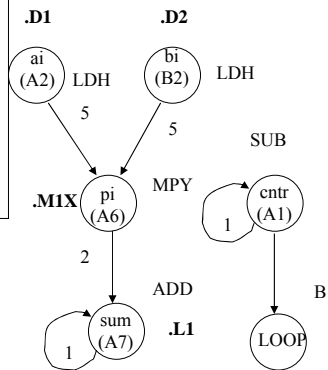
Programmation C6x : produit scalaire (3)

```

||      MVK      .S1      100,A1      ; set up loop counter
||      ZERO     .L1      A7          ; zero out accumulator
LOOP:
||      LDH      .D1      *A4++,A2    ; load ai
||      LDH      .D1      *B4++,B2    ; load bi
||      SUB      .S1      A1,1,A1     ; decrement loop counter
[A1]   B        .S2      LOOP        ; branch to loop
||      NOP      2          ; delay slots for LDH
||      MPY     .M1      A2, A5, A6    ; ai*bi
||      NOP      1          ; delay slot for MPY
||      ADD     .L1      A6, A7,A7     ; sum+=(ai*bi)
; branch occurs here

```

8 cycles/itération



M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

45

Programmation C6x : produit scalaire (4)

```

int dotp(short[a], short[b])
{
  int sum, sum0, sum1, i;
  sum0=0;
  sum1=0
  for (i=0; i<100;i+=2){
    sum0+=a[i]*b[i];
    sum1+=a[i+1]*b[i+1];
  }
  sum=sum0+sum1;
  return (sum);
}

```

```

LDW      .D1      *A4++,A2    ; load ai and ai+1
LDW      .D2      *B4++,B2    ; load bi and bi+1
MPY      .M1X     A2, B2, A6   ; ai*bi
MPYH     .M2X     A2, B2, B6   ; ai+1*bi+1
ADD      .L1      A6, A7,A7    ; sum0+=(ai*bi)
ADD      .L2      B6, B7,B7    ; sum1+=(ai+1*bi+1)
SUB      .S1      A1,1,A1     ; decrement loop counter
[A1]    B        .S2      LOOP ; branch to loop

```

M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

46

Programmation C6x : produit scalaire (5)

	MVK	.S1	100,A1	; set up loop counter
	ZERO	.L1	A7	; zero out sum0
	ZERO	.L2	B7	; zero out sum1
LOOP:	LDW	.D1	*A4++,A2	; load ai and ai+1
	LDW	.D2	*B4++,B2	; load bi and bi+1
	SUB	.S1	A1,1,A1	; decrement loop counter
[A1]	B	.S2	LOOP	; branch to loop
	NOP	2		; delay slots for LDH
	MPY	.M1X	A2, B2, A6	; ai*bi
	MPYH	.M2X	A2, B2, B6	; ai+1*bi+1
	NOP	1		; delay slot for MPY
	ADD	.L1	A6, A7,A7	; sum0+=(ai*bi)
	ADD	.L2	B6,B7,B7	; sum1+=(ai+1*bi+1)
; branch occurs here				
	ADD	.L1X	A7,B7,A4	; sum=sum0+sum1

8 cycles/2 itérations

Programmation C6x : produit scalaire (6)

Table des intervalles entre itérations

Unit/cy	0	1	2	3	4	5	6	7
.D1	LDW							
.D2	LDW							
.M1						MPY		
.M2						MPYH		
.L1								ADD
.L2								ADD
.S1		SUB						
.S2			B					

Unit/cy	0	1	2	3	4	5	6	7
.D1	LDW	LDW1	LDW2	LDW3	LDW4	LDW5	LDW6	LDW7
.D2	LDW	LDW1	LDW2	LDW3	LDW4	LDW5	LDW6	LDW7
.M1						MPY	MPY1	MPY2
.M2						MPYH	MPYH1	MPYH2
.L1								ADD
.L2								ADD
.S1		SUB	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6
.S2			B	B1	B2	B3	B4	B5

Programmation C6x : produit scalaire (7)

Pipeline logiciel

```

LOOP:
    LDW    .D1    *A4++,A2 ; load ai and ai+1 (+7)
    ||
    LDW    .D2    *B4++,B2 ; load bi and bi+1 (+7)
    |[A1]  SUB    .S1    A1,1,A1 ; decrement loop counter (+6)
    |[A1]  B      .S2    LOOP ; branch to loop (+5)
    ||
    MPY    .M1X   A2, B2, A6 ; ai*bi (+2)
    ||
    MPYH   .M2X   A2, B2, B6 ; ai+1*bi+1 (+2)
    ||
    ADD    .L1    A6, A7,A7 ; sum0+=(ai*bi)
    ||
    ADD    .L2    B6,B7,B7 ; sum1+=(ai+1*bi+1)

; branch occurs here
    ADD    .L1X   A7,B7,A4 ; sum=sum0+sum1
    
```

1 cycle /itération

PROLOGUE
EPILOGUE

Programmation C6x: si-alors-sinon

Code C

```

int if_then(short[a], short theta,
int codeword, int mask)
{
    int sum, i, cond;
    sum=0;
    for (i=0; i<32;i++)
        cond= codeword&mask
        if (theta==!(cond))
            sum+=a[i];
    else
        sum-=a[i];
    mask=mask<<1;
}
return (sum);
}
    
```

Code assembleur

```

                                MVK    32, cntr
                                ZERO   sum
LOOP:
                                AND    .SX2   cword, mask, cond
[cond]                          MVK    .S2    1,cond
                                CMPEQ  .L2    theta, cond, if
                                LDH    .D1    *a++,ai
[if]                             ADD    .L1    sum, ai, sum
[!if]                            SUB    .D1    sum, ai, sum
                                SHL    .S1    mask,1,mask
[cntr]                          ADD    .L2    -1,cntr,cntr
[cntr]                          B      .S1    LOOP
    
```

Si-alors-sinon : Table des intervalles entre itérations

Unit/cy	0	2	4	6	8	10	12	14
.D1				SUB ai	SUB ai	SUB ai	SUB ai	SUB ai
.D2								
.M1								
.M2								
.L1			ZERO	ADD ai	ADD ai	ADD ai	ADD ai	ADD ai
.L2	ADD cntr		CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ
.S1		SHL	SHL	SHL	SHL	SHL	SHL	SHL
.S2		AND	AND	AND	AND	AND	AND	AND
Unit/cy	1	3	5	7	9	11	13	15
.D1	LDH	LDH	LDH	LDH	LDH	LDH	LDH	LDH
.D2								
.M1								
.M2								
.L1								
.L2	ADD cntr	ADD cntr	ADD cntr	ADD cntr	ADD cntr	ADD cntr	ADD cntr	ADD cntr
.S1	B Loop	B Loop	B Loop	B Loop	B Loop	B Loop	B Loop	B Loop

**Intervalle
entre
itérations
=2**

Programmation C6x: Si-alors-sinon (pipeline logiciel)

```

LOOP:
[B0]   ADD   .L2   -1,B0,B0
|| [B2] MVK   .S2   1,B2
|| [B0] B     .S1   LOOP
||     LDH   .D1   *A4++,A7

[B1]   ADD   .L1   A7, A5, A7
|| [!B1] SUB  .D1   A7, A5, A7
||     CMPEQ .L2   B6, B2, B1
||     SHL   .S1   A6,1,A6
||     AND   .SX2  B4, A6, B2
    
```

2 cycles/itération

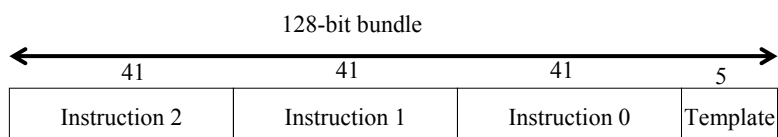
EPIC (IA64)

- **Parallélisme explicite**
 - Parallélisme d'instructions explicite dans le code machine (approche VLIW)
 - Le compilateur fait l'ordonnancement à grande échelle
 - Compatibilité binaire (x86, HP-PA)
- **Les caractéristiques qui augmente le parallélisme d'instructions**
 - Prédication
 - Spéculation
 - Autres...
- **Ressources pour l'exécution parallèle**
 - Beaucoup de registres (128 entiers, 128 flottants)
 - Beaucoup d'unités fonctionnelles...

Jeu d'instructions IA64

- VLIW de 128 bits, contenant 3 instructions
- 128 registres entiers et 128 registres flottants
- 64 registres 1 bit pour les prédicats
- Exécution conditionnelle de toute instruction, en fonction d'un registre prédicat
- Chargements spéculatifs
- Support pour pipeline logiciel

Format d'instructions IA64



Type instruction	Description	Type unité exécution
A	UAL entiers	Unité I ou M
I	Entiers non-UAL	Unité I
M	Mémoire	Unité M
F	Flottant	Unité F
B	Branchements	Unité B
L+X	Etendu	Unité I

Templates

Arrêts architecturaux

Mappage des emplacements d'instructions sur les unités d'exécution

MII
MLX
MMI
MFI
MMF
MIB
MBB
BBB
MMB
MFB

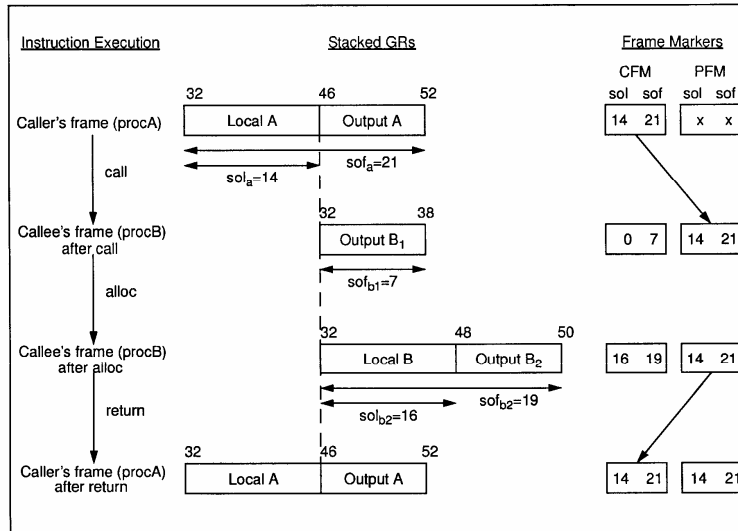
Organisation des registres

- Registres généraux : 128 x 65 bits; GR0-GR127
 - 64 bits données + 1 bit (*NaT: Not a Thing*)
 - Registres statiques : GR0-GR31
 - GR0 = 0
 - Variables globales
 - Registres en pile
 - GR32-GR127
 - Allocation d'un nombre programmable de registres locaux et de sortie

Organisation des registres (2)

- Registres flottants : 128 x 82 bits
 - Registres statiques FR0-FR31
 - FR0 = +0.0
 - FR1 = +1.0
 - Registres tournants FR32-FR127
- Registres prédicat : 64 x 1bit
 - Registres statiques : PR0-PR15
 - PR0=1
 - Registres tournants PR16-63
- Registres de branchements: 8 x 64 bits

Passage de paramètres

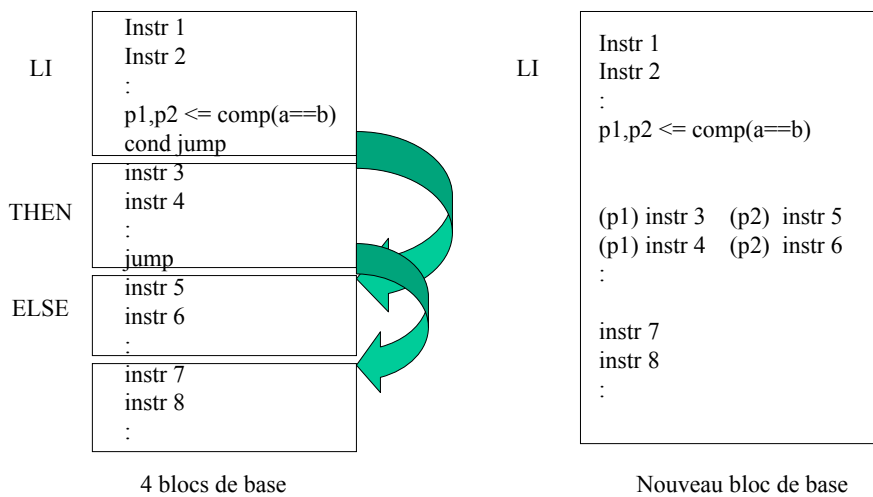


M1
2005-2006

Daniel Etienne

19

L'utilisation des prédicats



4 blocs de base

Nouveau bloc de base

M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etienne

60

Les prédicats dans l'IA64

p1, p2 ← if (qp) Compare (S1,S2) (comp) = Comparaison (S1,S2)
 (qp) = prédicat courant

		p1		p2	
Normal	-	(qp)	(comp)	(qp)	(¬ comp)
UNC		(qp) (¬qp)	(comp) 0	(qp) (¬ qp)	(¬ comp) 0
AND	and andcm	(qp& ¬ comp) (qp&comp)	0 0	(qp& ¬ comp) (qp&comp)	0 0
OR	or orcmm	(qp&comp) (qp& ¬ comp)	1 1	(qp&comp) (qp& ¬ comp)	1 1
De Morgan	orandcm and.orcmm	(qp&comp) (qp& ¬ comp)	1 0	(qp&comp) (qp& ¬ comp)	0 1

M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

61

Exemple

```

if (r1)
    r1=r3+r4;
else
    r7=r6-r5;
    
```

	comp.eq p1,p2=r1,r0	//0
(p1)	br.cond else;	//0
	add r1=r3,r4	//1
	br end_if	//1
else	sub r7=r6,r5	//1
end_if		

	comp.eq p1,p2=r1,r0	//0
(p1)	add r2=r3,r4	//1
(p2)	sub r7=r6,r5	//1

30% de mauvaises prédictions
 10 cycles par mauvaise prédiction
 5 cycles

M1 Informatique
2005-2006

Architectures avancées
Daniel Etiemble

62

Equilibrage des chemins

<pre>if(r4) //2 r3=r2+r1; else //18 r3=r2*r1;</pre>	<pre>setf : 8 cycles xma : 6 getf : 2</pre>	<p>Coût mauvaise prédiction = 10 cycles</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>% if pris</th> <th>mauvaise prédiction</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50%</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cas 1 : $2*0.5 + 18*0.5 = 10$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cas 2 : $5*0.5 + 18*0.5 = 11.5$</td> </tr> <tr> <td>70%</td> <td>10%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cas 1 : $2*0.7 + 18*0.3 + 10*0.1 = 7.8$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cas 2 : $5*0.7 + 18*0.3 = 8.9$</td> </tr> <tr> <td>30%</td> <td>30%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cas 1 : $2*0.3 + 18*0.7 + 10*0.3 = 16.2$</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Cas 2 : $5*0.3 + 18*0.7 = 14.1$</td> </tr> </tbody> </table>	% if pris	mauvaise prédiction	50%	0%	Cas 1 : $2*0.5 + 18*0.5 = 10$		Cas 2 : $5*0.5 + 18*0.5 = 11.5$		70%	10%	Cas 1 : $2*0.7 + 18*0.3 + 10*0.1 = 7.8$		Cas 2 : $5*0.7 + 18*0.3 = 8.9$		30%	30%	Cas 1 : $2*0.3 + 18*0.7 + 10*0.3 = 16.2$		Cas 2 : $5*0.3 + 18*0.7 = 14.1$	
% if pris	mauvaise prédiction																					
50%	0%																					
Cas 1 : $2*0.5 + 18*0.5 = 10$																						
Cas 2 : $5*0.5 + 18*0.5 = 11.5$																						
70%	10%																					
Cas 1 : $2*0.7 + 18*0.3 + 10*0.1 = 7.8$																						
Cas 2 : $5*0.7 + 18*0.3 = 8.9$																						
30%	30%																					
Cas 1 : $2*0.3 + 18*0.7 + 10*0.3 = 16.2$																						
Cas 2 : $5*0.3 + 18*0.7 = 14.1$																						
<table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">T</td> <td style="text-align: center;">F</td> </tr> </table>				T	F																	
	T	F																				
<pre>cmp.ne p1, p2=r3, r0 ; // 0 0 (p1) add r3=r2,r1 //1 1 (p2) setf f1=r1 //1 1 (p2) setf f2=r2 ;; //1 1 (p2) xma.1 f3=f1,f2,f0 ;;//9 2 (p2) getf r3=f3 ;; //15 3 (p2) use of r3 //17 4 18 5</pre>																						

Comparaisons en parallèle

<pre>if(rA rB rC rD) { /* if-block instructions */ }</pre>	<pre>if((rA<0)&&(rB==-15)&&(rC>0)) /* if-block instructions */</pre>
<pre>cmp.ne p1,p0=r0, r0 ;; // p1=0 cmp.ne.or p1,p0=rA,r0 cmp.ne.or p1,p0=rB,r0 cmp.ne.or p1,p0=rC,r0 cmp.ne.or p1,p0=rD,r0 (p1) br.cond if-block</pre>	<pre>cmp.eq p1,p0=r0, r0 ;; // p1=1 cmp.ge.and p1,p0=rA,r0 cmp.ne.and p1,p0=rB,-15 cmp.le.and p1,p0=rC,r0 (p1) br.cond if-block</pre>
<pre>if((rA==0) (rB==10)) r1=r3+r4; else r7=r6-r5;</pre>	<pre>cmp.ne p1,p2=r0, r0 ;; // p1=0 cmp.eq.or.andcm p1,p2=rA,r0 cmp.eq.or.andcm p1,p2=rB,10 (p1) add r1=r3,r4 (p2) sub r7=r6,r5</pre>

Déplacement de code

Vers le bas

Vers le haut

```
(p1) br.cond some_label //0
st4 [r34]=r23 //1
ld4 r5 = [r56] //1
ld4 r6 = [r57] //2
```

p2 = -p1

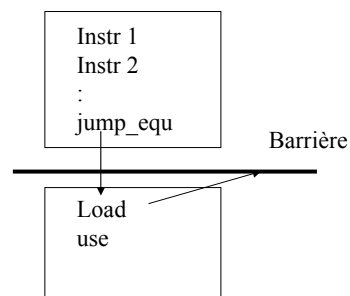
```
(p2) st4 [r34]=r23 //0
(p2) ld4 r5 = [r56] //0
(p1) br.cond some_label //0
ld4 r6 = [r57] //1
```

```
ld8 r56 = [r45] //0
st4 [r23]=r56 //2
Etiqu_A: //3
add...
add...
add... ;;
```

```
// point qui domine Label_A
cmp.ne p1,p0= r0, r0 ;; p1=0
// autres instructions
cmp.eq p1,p0= r0, r0 ;; p1=1
ld8 r56 = [r45] //0
Etiqu_A: //1
add...
add...
add...
(p1) st4 [r23]=r56 //2
```

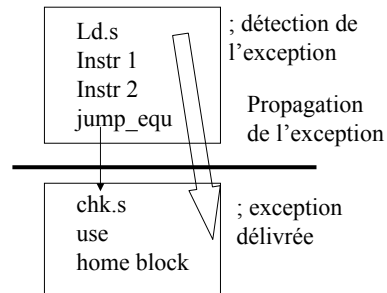
La latence mémoire

- Les chargements influent sur la performance
 - Souvent la première instruction d'une chaîne d'instructions dépendantes
 - Peuvent provoquer des latences importantes (échecs cache)
- Les chargements peuvent provoquer des exceptions



Les chargements spéculatifs

- Distinguer le comportement du chargement de celui de l'exception
 - L'instruction de chargement spéculatif (ld.s) débute une opération de chargement et détecte les exceptions
 - Propage un "jeton" d'exception (inclus dans le registre destination) de ld.s à chk.s
 - L'instruction de test d'exception spéculative (chk.s) provoque les exceptions détectées par ld.s



Spéculations sur les données et instructions

Récupération sur données spéculées à l'aide de ld.c

```
// autres instructions
std8 [r4]=r12
ld8 r6, [r8];;
add r5=r6, r7;;
st8 [r18]=r5
```

```
ld8.a r6, [r8];; // chargement avancé
// autres instructions
std8 [r4]=r12
ld8.c.clr r6, [r8];; //test du chargement
add r5=r6, r7;;
st8 [r18]=r5
```

ALAT: *Advanced Load Address Table*

Entrée allouée par ld.a

Entrée testée par ld.c

Spéculations sur les données et instructions (2)

Récupération sur données spéculées à l'aide de chk.a

```
// autres instructions
std8 [r4]=r12
ld8 r6, [r8];;
add r5=r6, r7;;
st8 [r18]=r5
```

```
ld8.a r6, [r8];;
// autres instructions
add r5=r6, r7;;
// autres instructions
std8 [r4]=r12
chk.a.clr r6, recover
Back : st8 [r18], r5
```

```
//ailleurs
Recover :
ld8 r6, [r8];;
add r5=r6, r7
br back
```

Optimisation des boucles

```
L1: ld4 r4=[r5],4 ;; // 0
    add r7=r4,r9;; // 2
    st4 [r6]=r7,4;; //3
    br.cloop L1;; //3
```

```
Stage 1 : ld4 r4=[r5],4
Stage 2 : -----
Stage 3 : add r7=r4,r9
Stage 4 : st4 [r6]=r7,4
```

PIPELINE LOGICIEL

1	2	3	4	5	Cycle	
ld4					X	PROLOGUE
	ld4				X+1	
add		ld4			X+2	NOYAU
st4	add		ld4		X+3	
	st4	add		ld4	X+4	
		st4	add		X+5	EPILOGUE
			st4	add	X+6	
				st4	X+7	

Renommage de registres explicite

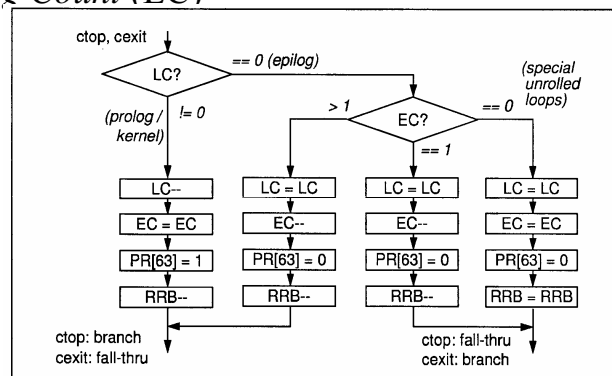
- Renommage de registres
 - N° registre = N° registre + rrb (*Rotating Register Base*)
 - rrb est décrémenté par des instructions de branchement spéciales
- p16-p63, f32-f127, et une zone programmable de registres entiers peuvent “tourner” (rotation de registres)
 - rrb.gr, rrb.fr, rrb.pr
 - Décrémentés simultanément par les branchements de boucle pour pipeline logiciel

```
L1: ld4 r35=[r4], 4
    st4 [r5]=r37, 4
    swp_branch L1;;
```

Latence de 2 cycles

Branchements de boucle

- *Loop Count (LC)*
- *Epilog Count (EC)*



Exemple de boucle avec compteur

Stage 1 : (p16) ld4 r4=[r5],4
 Stage 2 : (p17)-----
 Stage 3 : (p18) add r7=r4,r9
 Stage 4 : (p19) st4 [r6]=r7,4

```

mv lc=199      // LC = loop count ) 1
mv ec=4        // EC= epilog stages +1
mov pr.rot =1<<16;; //PR16=1, rest=0
    
```

```

L1:
(p16) ld4 r32=[r5],4 //0
(p18) add r35=r34,r9 //0
(p19) st4 [r6]=r36,4 //0
      br.ctop L1;;
    
```

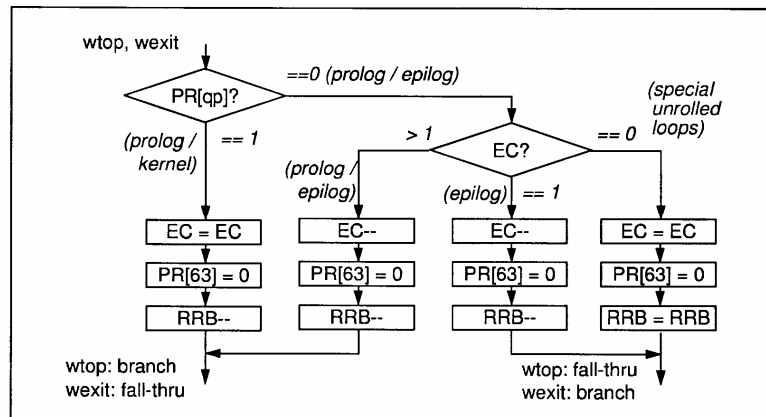
AVEC REGISTRES TOURNANTS

Exemple de boucle avec compteur (2)

Cycle	Port/Instructions				State before br.ctop					
	M	I	M	B	p16	p17	p18	p19	LC	EC
0	ld4			br.ctop	1	0	0	0	199	4
1	ld4			br.ctop	1	1	0	0	198	4
2	ld4	add		br.ctop	1	1	1	0	197	4
3	ld4	add	st4	br.ctop	1	1	1	1	196	4
...
100	ld4	add	st4	br.ctop	1	1	1	1	99	4
...
199	ld4	add	st4	br.ctop	1	1	1	1	0	4
200		add	st4	br.ctop	0	1	1	1	0	3
201		add	st4	br.ctop	0	0	1	1	0	2
202			st4	br.ctop	0	0	0	1	0	1
...					0	0	0	0	0	0

Boucles While

- *Epilog Count (EC)*



Exemple de boucle While

```
L1:  ld4 r4=[r5],4 ;; // 0
     st4 [r6]=r4,4 //2
     cmp.ne p1,p0=r4,r0 //2
     (p1)br L1;; //2
```

```
Stage 1 : ld4 r4=[r5],4
Stage 2 : -----
Stage 3 : st4 [r6]=r4,4
          cmp.ne p1,p0=r4,r0
          (p1)br L1
```

PIPELINE LOGICIEL

1	2	3	4	5	Cycle
ld4					X
	ld4.s				X+1
scb		ld4.s			X+2
	scb		ld4.s		X+3
		scb		ld4.s	X+4
			scb		X+5
				scb	X+6

Exemple de boucle *While* (2)

```
mv ec=2          // EC= epilog stages +1
mov pr.rot =1<<16;; //PR16=1, rest=0
```

```
L1:
    ld4.s r32=[r5], 4          //0
(p18)  chk.s r34, recovery    //0
(p18)  cmp.ne p17, p0=r34,r0 //0
(p18)  st4 [r6]=r34,4
(p17)  br.wtop.sptk L1;;      //0
```

1	2	3	4	Cycle
	ld4			X
		ld4.s		X+1
scb		ld4.s		X+2
	scb		ld4.s	X+3
		scb		X+4
			scb	X+5

Exemple de boucle *While* (3)

Cycle	Port/instructions					State before br.wtop			
	M	I	I	M	B	p16	p17	p18	EC
0	ld4.s				br.wtop	1	0	0	2
1	ld4.s				br.wtop	0	1	0	1
2	ld4.s	cmp	chk	st4	br.wtop	0	1	1	1
3	ld4.s	cmp	chk	st4	br.wtop	0	1	1	1
...
100	ld4.s	cmp	chk	st4	br.wtop	0	1	1	1
...
199	ld4.s	cmp	chk	st4	br.wtop	0	1	1	1
200	ld4.s	cmp	chk	st4	br.wtop	0	1	1	1
201	ld4.s	cmp	chk	st4	br.wtop	0	0	1	1
						0	0	0	0

Exemples

```
for (i=0; i<N;i++)
  A[i]=B[i]+C[i];
```

```
L1: ldf f5=[r5], 8
     ldf f6=[r6], 8
     fadd f7=f5,f6
     stf [r7]=f7,8
     br.cloop L1
```

p16	p17	p18	p19	p20	p21	p22	p23	p24
	1	3	5	7	9	11	13	15
					fadd	fadd	fadd	fadd
								stf
0	2	4	6	8	10	12	14	16
ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf
ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf	ldf

Latences

ldf : 9 cycles
fadd : 5 cycles

2 cycles/itération $\Pi=2$

```
L1 : (p24) stf [r7]=f60,8
      (p21) fadd f57=f37,f47 ;
      (p16) ldf f32=[r5],8
      (p16) ldf f42=[r6],8
      br.ctop L1;;
```

Exemple (2)

```
for (i=0; i<N;i+=2){
  A[i]=B[i]+C[i];
  A[i+1]=B[i+1]+C[i+1];}
```

Déroulage d'ordre 2

```
L1 : (p16) ld fp f32,f33=[r5],16
      (p16) ld fp f34,f35=[r6], 16;
      (p20) fadd f40=f36,f38
      (p20) fadd f41= f37,39;;
      (p22) stf [r7] = f42, 8
      (p22) stf [r7] = f43,8
      br.ctop L1;;
```

p16	p17	p18	p19	p20	p21	p22		
	1	4	7	10	13	16	19	
						stf	stf	
						stf	stf	
	2	5	8	11	14	17	20	
				fadd	fadd	fadd	fadd	
				fadd	fadd	fadd	fadd	
0	3	6	9	12	15	18	21	
ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	
ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	ldfp	

$\Pi=3$

3 cycles/2 itérations