

---

# Parallélisme d'instructions : Superscalaires versus VLIW

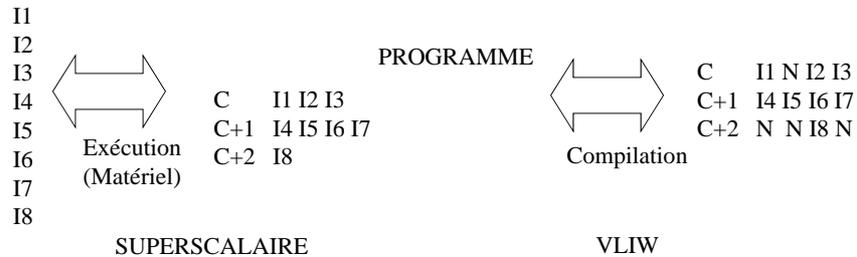
Daniel Etiemble  
de@lri.fr

## Résumé

---

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

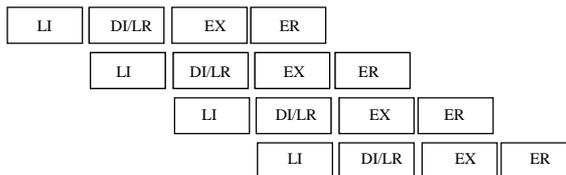
## Processeurs : superscalaire/VLIW



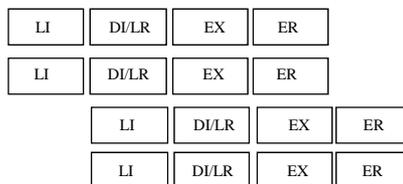
- **Superscalaire**
  - Le matériel est responsable à l'exécution du lancement parallèle des instructions
    - Contrôle des dépendances de données et de contrôle par matériel
- **VLIW**
  - Le compilateur est responsable de présenter au matériel des instructions exécutables en parallèle
    - Contrôle 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
    - ROB/RAT (processeurs à flots de données réduit)
- Existe à la fois pour les processeurs scalaires (à cause des instructions multi-cycles) et les processeurs superscalaires (problèmes accentués)

## 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

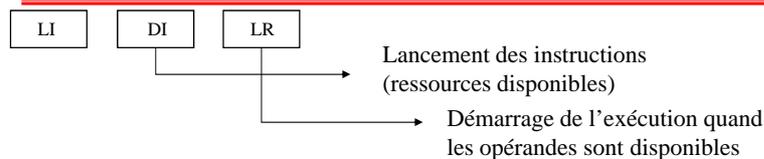
## Problèmes superscalaires (2)

---

- **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

## 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 (21164)

---

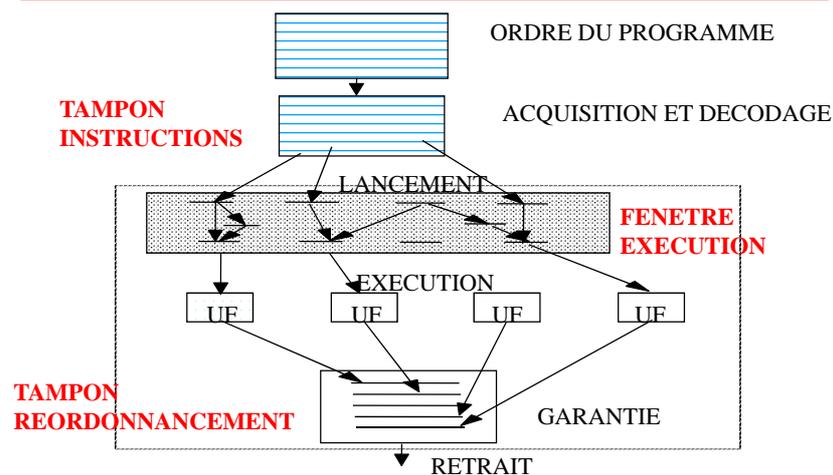
- 4 instructions acquises par cycle
- 4 pipelines indépendants
  - 2 entiers
  - 2 flottants
- 1 groupe de 4 instructions considéré à chaque cycle
  - si les 4 instructions se répartissent dans E0, E1, FA et FM, elles démarrent leur exécution. Sinon, certaines utilisent les cycles suivants jusqu'à ce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

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

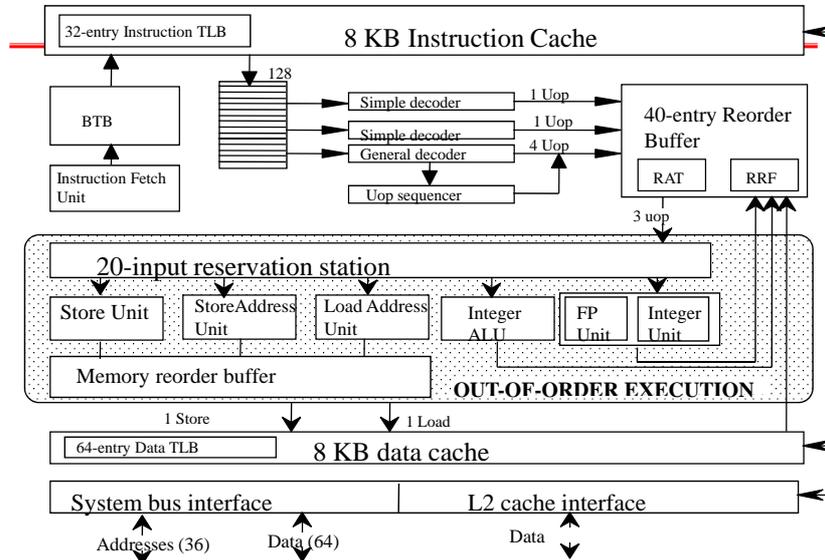
## Exécution dans l'ordre (Power 6)

- Lecture des instructions depuis le cache L2
- Pré-décodage
  - Groupes de 5 instructions (max) par thread en fonction des ressources et de règles de regroupement
    - 2 FXU (entiers)
    - 2 FP ou VMX (flottants et SIMD)
    - 2 LSU (Accès mémoire)
    - 1 BU (Branchement)
  - Groupe rangé dans le cache L1-I
- Lancement des instructions
  - Toutes les instructions d'un groupe d'un thread sont lancées ensemble.
  - Jusqu'à 7 instructions de 2 threads peuvent être lancées simultanément si ressources disponibles

## Exécution non ordonnée



## Schéma fonctionnel du Pentium Pro



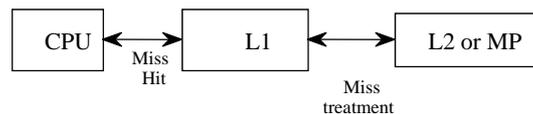
M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

Architectures avancées  
Daniel Etiemble

13

## 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.



M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

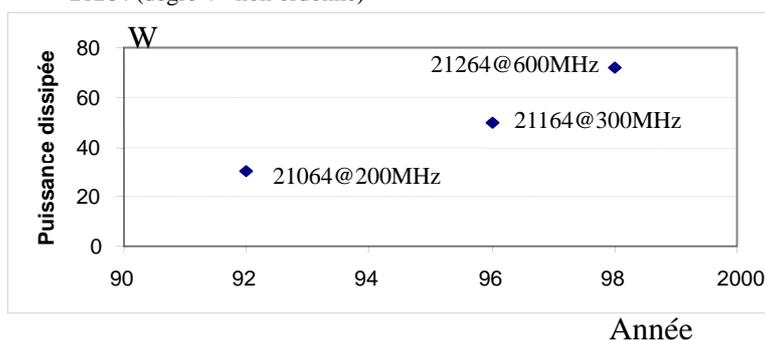
Tronc commun Architectures  
Daniel Etiemble

14

## 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)



M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

Tronc commun Architectures  
Daniel Etiemble

15

## 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	
Etages 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 <sup>2</sup>	84 mm <sup>2</sup>	
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%

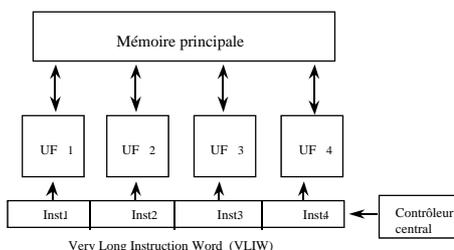
M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

Tronc commun Architectures  
Daniel Etiemble

16

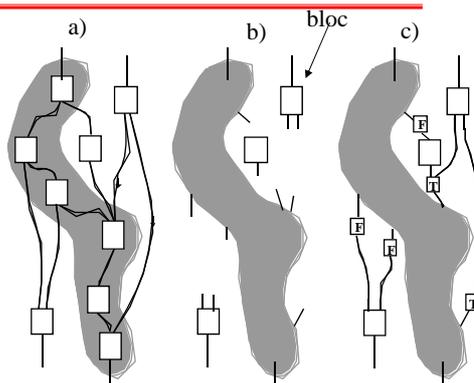
# ARCHITECTURE VLIW

- 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 : Ordonnancement de traces
- Pour:
  - Matériel simplifié (contrôle)
- Contre:
  - La compatibilité binaire entre générations successives est difficile ou impossible



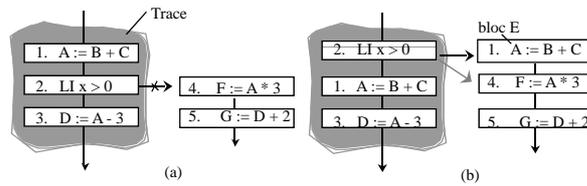
## VLIW: “Ordonnancement de traces”

- 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

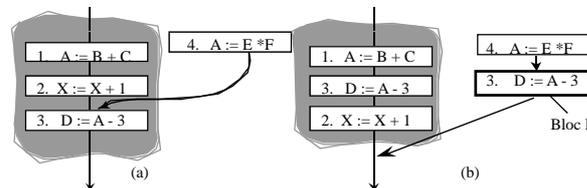


# VLIW: "Ordonnancement de traces"

## Blocs sortant de la trace

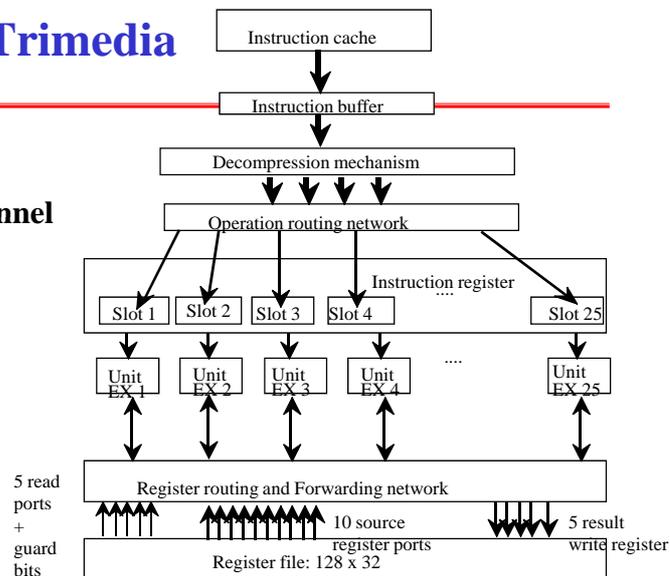


## Blocs entrant dans la trace



## VLIW - Trimedia (Philips)

### Schéma fonctionnel



## Jeu d'instructions Trimédia

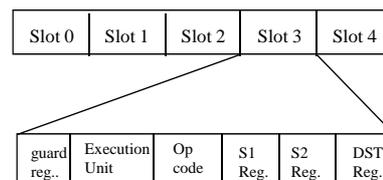
---

- 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)

---

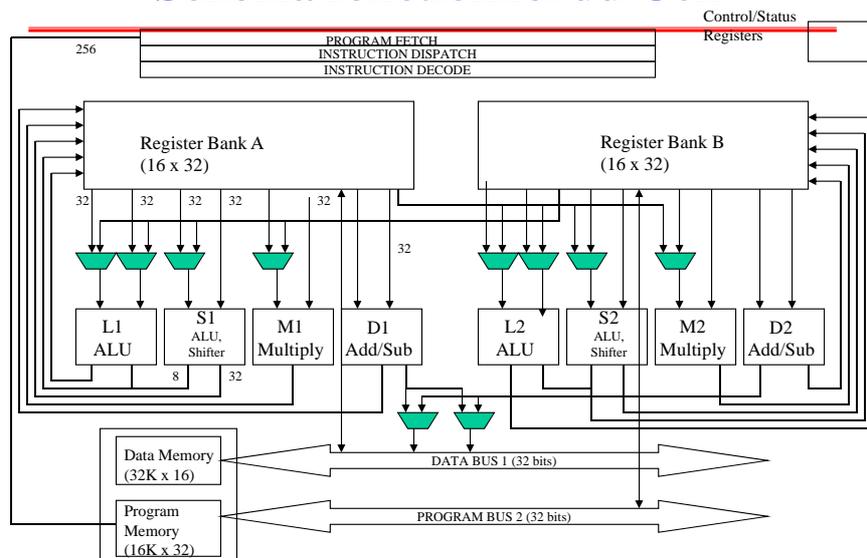
- Format d'instructions
  - Registres de garde : indiquent si l'opération est exécutée (opérations conditionnelles)
  - Techniques de compression
    - Supprimer les NOP des opérations non utilisées
  - Branchements retardés
    - 3 cycles
- Objectifs
  - VLIW + DSP
  - Multimédia



## 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



## Modes d'adressage

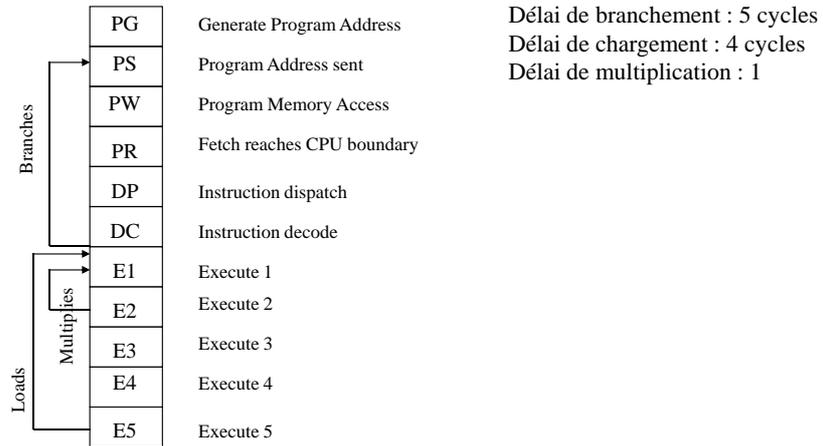
Type d'adressage	No modification	Préincrément ou Décrément du registre adresse	Postincrément ou Décrément du registre adresse
Registre Indirect	*R	*++R *--R	*R++ *R--
Registre + déplacement	*+R[ucst5] *-R[ucst5]	*++R[ucst5] *--R[ucst5]	*R++[ucst5] *R--[ucst5]
Base + Index	*+R[offsetR] *-R[offsetR]	*++R[offsetR]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

## 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		

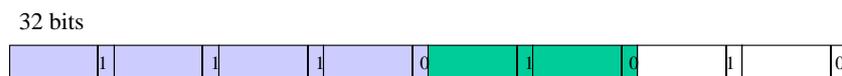
## PIPELINE C6x

---



## C6x: Acquisition des paquets

---



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)

---

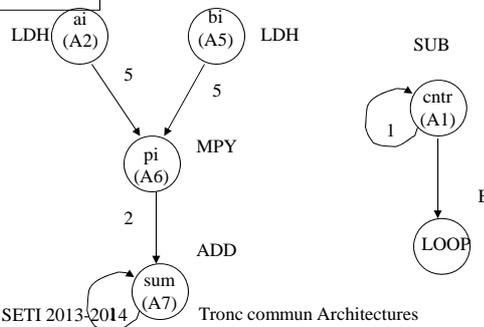
**Code C**

```
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**



## 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

M2R NSI- M2R SET1 2013-2014

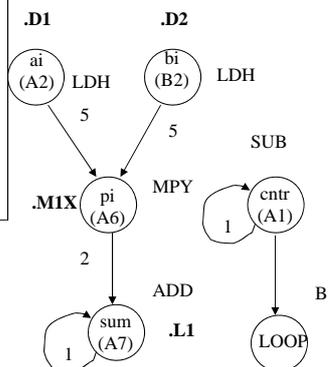
Tronc commun Architectures  
Daniel Etiemble

31

## 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	.D2	*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



M2R NSI- M2R SET1 2013-2014

Tronc commun Architectures  
Daniel Etiemble

32

## 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

## 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

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

Tronc commun Architectures  
Daniel Etienne

35

## 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

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

Tronc commun Architectures  
Daniel Etienne

36

## 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				
.D2								
.M1								
.M2								
.L1			ZERO	ADD ai				
.L2	ADD cntr		CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ	CMPEQ
.S1		SHL						
.S2		AND						
Unit/cy	1	3	5	7	9	11	13	15
.D1	LDH							
.D2								
.M1								
.M2								
.L1								
.L2	ADD cntr							
.S1	B Loop							
.S2		MVK						

**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

## IA-64 (EPIC)

---

- Voir « superscalaires versus VLIW » dans le cours  
M1 Architectures avancées

<http://www.lri.fr/~de/ArchiM1-1011.htm>