
Jeux d'instructions

Daniel Etiemble
de@lri.fr

PERFORMANCE

- L'équation

$$\text{CPU execution time} = \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Nombre} \\ \text{d'instructions}}}{NI} * \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Cycles}/ \\ \text{Instruction}}}{CPI} * \underset{\substack{\downarrow \\ \text{Temps cycle d'horloge}}}{TC}$$

- 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

Les objectifs

- Performance
 - Pipeline efficace
 - Instructions de longueur fixe
 - Décodage simple
 - Modes d'adressage simples
- Taille du code
 - Minimiser la taille des instructions
 - Instructions de longueur variable (ou fixe)
 - Accès aux données efficace
 - Modes d'adressage complexes et efficaces pour applications visées
- Compatibilité binaire avec les générations précédentes
 - Exemple IA-32 (x86)

Modèles d'exécution

- Modèles d'exécution (n,m)
 - n : nombre d'opérandes par instruction
 - m : nombre d'opérandes mémoire par instruction
- Les différents modes
 - RISC : (3,0)
 - Instructions de longueur fixe
 - Load et Store : seules instructions mémoire
 - IA-32 : (2,1)
 - Pile (0,0)
 - Tous les opérandes sont accédés via la pile

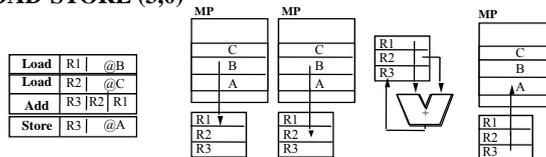
Modèle d'exécution RISC

(n,m)

n : nombre d'opérandes par instruction
m : nombre d'opérandes mémoire par instruction

Ex : $A = B + C$

LOAD-STORE (3,0)



Instructions de longueur fixe

Seules les instructions Load et Store accèdent à la mémoire

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

7

Registres: organisation RISC

- 32 registres généraux (entiers) R0 à R31
- 32 registres flottants
- Instructions UAL et mémoire
 - Registre – registre
 - $R_d \leftarrow R_{s1} \text{ op } R_{s2}$
 - Registre – immédiat
 - $R_d \leftarrow R_{s1} \text{ op } \text{immédiat}$
 - $R_d \leftrightarrow \text{Mémoire } (R_{s1} + \text{dépl.})$

R0	always zero	local var A	R16
R1		local var B	R17
R2		local var C	R18
R3		local var D	R19
R4		local var E	R20
R5			R21
R6			R22
R7			R23
R8	compiler temp 1		R24
R9	compiler temp 2		R25
R10	compiler temp 3		R26
R11	compiler temp 4		R27
R12			R28
R13		stack pointer	R29
R14			R30
R15			R31

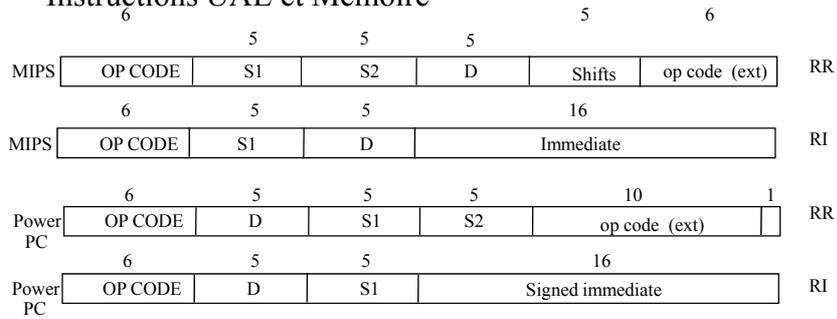
Typical RISC Processor

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

8

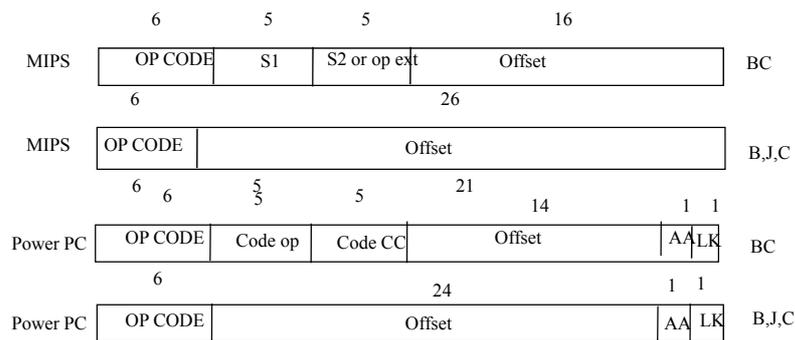
Formats d'instructions RISC

- Instructions UAL et Mémoire



Formats d'instructions RISC

- Sauts et branchements



Modèle (2,1)

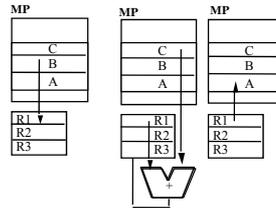
(n,m)

n : nombre d'opérandes par instruction
 m : nombre d'opérandes mémoire par instruction

Ex : A := B + C

REGISTRE-MEMOIRE (2,1)

Load	R1	@B
Add	R1	@C
Store	R1	@A



CISC compatible avec la technologie MOS des années 75-80

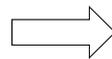
Caractéristiques IA-32

- Instructions de longueur variable

Op code	Reg. et M	Déplacement	Immédiat	
1 or 2	1 or 2	0, 1, 2 or 4	0, 1, 2 or 4	octets

– Inst dest, source

REG	REG
REG	MEM
REG	IMM
MEM	REG
MEM	IMM



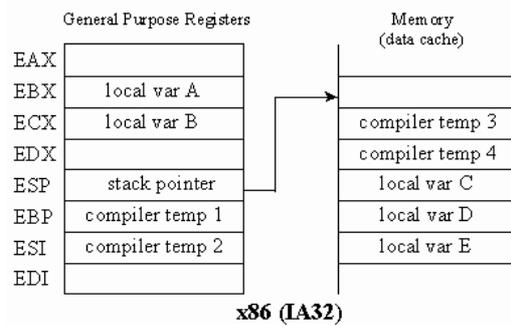
Lecture mémoire,
 Exécution,
 Ecriture mémoire

- Instructions complexes
 - Rep
- Modes d'adressage complexes

Adresse mémoire = Rb + RI x f + déplacement

Registres : organisation IA-32

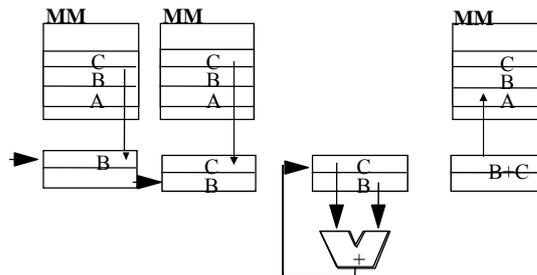
- Organisation non homogène
 - 8 registres «généraux» avec rôle spécifique
 - Registres flottants fonctionnant en pile (x87)
 - Registres «SIMD» MMX, SSE-SSE2-SSE3



Modèle pile (0,0)

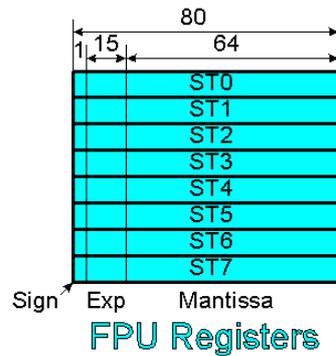
Pile (0,0)

Push	@B
Push	@C
Add	
Pop	@A



- Utilisé dans certains CPU (Transputer)
- Pile flottante x87

Pile flottante x87



- **Matériel pour calcul rapide sur nombres flottants**
 - Opérations flottantes en parallèle avec les opérations entières
 - Historiquement implanté comme un coprocesseur (8087-80387)
 - CPU et FPU échangent les données via la mémoire
- **8 registres spécifiques 80 bits (précision étendue)**

Instructions flottantes IA-32 (x87)

- **Exemples de codes opérations flottants 80x87 FPU**
 - FADD: Addition
 - FMUL: Multiplication
 - FDIV: Division
 - FDIVR: Division
 - FSIN: Sinus (radians)
 - FCOS: Cosinus (radians)
 - FSQRT: Racine carrée
 - FSUB: Soustraction
 - FABS: Valeur absolue
 - FYL2X: Calcule $Y * \log_2(X)$
 - FYL2XP1: Calcule $Y * \log_2(X)+1$

Programmer la pile

- ST=ST(0)=sommet de pile
Utilisation de ST(0) est implicite si non spécifié
- Restriction : un registre doit être ST(0)
- **FLD MemVar**: Charge ST(0) avec MemVar & Empile ST(i) dans ST(i+1) pour i=0..6
- **FSTP MemVar**: Sommet de pile en mémoire & Empile ST(i) dans ST(i-1) pour i=1..7
- **FST MemVar**: Sommet de pile en mémoire. Laisse résultat en ST(0)
- **FSTP**: Range résultat et dépile

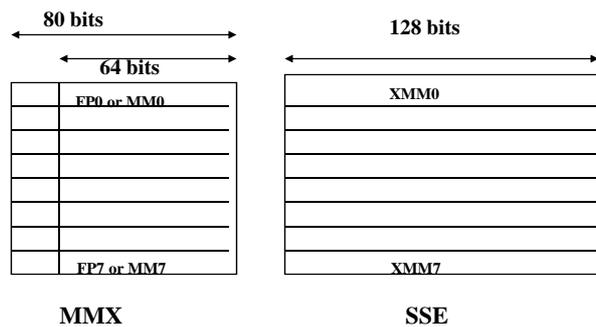
Programmer avec la pile

```
FLD VarX
FLD VarY
FLD VarZ
FMUL
FADD
FSTP MRslt
```

Programmer avec des registres

```
FLD VarX
FLD VarY
FMUL ST(1),ST(0)
FSIN ST(0)
```

Registres MMX, SSE et SSE2 du Pentium 4



- Les registres MMX sont partagés avec les registres flottants
- Les registres XMM sont séparés

Registres SIMD

- Intel AVX
 - 16 registres 256 bits Ymm0 à Ymm15
 - Formats
 - SSE = AVX 128 bits
 - 8 floats
 - 4 doubles
 - Implanté dans « Sandy Bridge » (32 nm)
- Version scalaire des instructions SIMD
- Cours sur les instructions SIMD

Le débat RISC-CISC pour les PC

- Définition
 - RISC : modèle (3,0)
 - CISC : tous les autres
- RISC et pipeline
 - Les jeux d'instructions RISC facilitent la réalisation de pipelines performants
- « Solution » Intel et AMD pour IA-32
 - Convertir les instructions CISC en instructions RISC lors du décodage des instructions (conversion dynamique)
 - On conserve la compatibilité binaire
 - On a l'efficacité des pipelines « RISC »

Traduction des instructions x86

Pentium Pro, PII, PIII, Pentium 4, iCore

Instructions x86	Opérations RISC
add EAX, [EBP +d8]	load temp, [EBP + d8] add EAX, temp
add [EBP +d8], EAX	load temp, [EBP + d8] add EAX, temp store EAX, [EBP+8]
cmp EAX, imm32	cmp EAX, imm32
push ECX	sub ESP, 4 store [ESP], ECX

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

21

Le jeu d'instructions ARM

JEU D 'INSTRUCTIONS RISC 32 BITS

	31	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	16	15	12	11	8	7	5	4	3	0								
Cond	0	0	1	Opcode				S	Rn				Rd				Operand 2						Data Processing PSR Transfer						
Cond	0	0	0	0	0	0	0	A	S	Rd				Rn				Rs	1		0	0	1	Rm	Multiply				
Cond	0	0	0	1	0	B	00		Rn				Rd				0	0	0	0	1	0	0	1	Rm	Single Data Swap			
Cond	0	1	I	P	U	B	W	L	Rn				Rd				offset						Single Data Transfer						
Cond	0	1	1	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX																		1	XXXX		Undefined				
Cond	1	0	0	P	U	S	W	L	Rn				Register List																Block Data Transfer
Cond	1	0	1	offset																		L		Branch					
Cond	1	1	0	P	U	N	W	L	Rn				CRd	CP#	offset						Coproc Data Transfer								
Cond	1	1	1	0	CP	Opc	CRn				CRd	CP#	CP	0	CRm				Coproc Data Operation										
Cond	1	1	1	0	CP	Opc	L	CRn				Rd	CP#	CP	1	CRm				Coproc Register Transfer									
Cond	1	1	1	1	ignored by processor																		Software Interrupt						

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

22

ARM ISA et densité du code

- Toutes les instructions sont conditionnelles
 - suppression de branchement
- Modes d'adressage complexes
 - registre + déplacement 8 bits (avec rotation)
 - registre + registre avec décalage
 - pré ou post indexation
- Transfert de blocs de registres
- Combinaison d'opérations UAL avec décalage/rotation sur le deuxième opérande
 - multiplication par constante

ARM : Modèle de programmation

- 31 registres 32 bits + 6 registres d'état
 - 16 registres R0 à R15 visible par le programmeur
 - R15 = CP
 - R14 = Registre de lien (retour de procédure)
 - R13 = Pointeur de pile
 - Autres registres utilisés pour interruptions, système, etc
- Format général des instructions
 - si condition $Rd \leftarrow Rn \text{ OP Shift/Rotate (Operand 2)}$

Suppression des branchements

- Exemple
 - $R3 = \text{Max}(R1, R2)$

Code MIPS32

```
ADD R3,R1,R0
SLT R4,R2,R1
BGTZ R4, Suite
ADD R3,R2,R0
```

Suite :

Code ARM

```
MOV R3,R1
CMP R1,R2
MOVLT R3,R2
```

Suite :

Branchement conditionnel

Pas de branchement

Réduction de la taille de code

- MIPS16
 - Version 16 bits du code MIPS32
- Thumb
 - Définition d'instructions 16 bits compatibles avec les instructions ARM 32 bits
 - suppression de la condition
 - 8 registres (R0 à R7) au lieu de 16
 - Immédiats sur 8 bits au lieu de 12 bits
 - Format à 2 opérandes au lieu de 3 opérandes
 - Compression au niveau procédures
 - Exécuter un code 16 bits sur un processeur 32 bits
 - Traduction au décodage Thumb vers ARM

ARM et THUMB

Simple C routine

Here is a simple C routine that demonstrates the differences between Thumb and ARM code. This routine returns the absolute value of the C integer passed to it as a parameter. The C code is:

```
if (X>=0)
    return x;
else
    return -x;
```

Codes	Instructions	Taille (Octets)
ARM	3	12
Thumb	4	8

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

The equivalent ARM assembly version is (excluding preamble):

```
iabs  CMP  r0,#0    ;Compare r0 to zero
      RSBLT r0,r0,#0 ;If r0<0 (less than-LT)
           then r0= 0-r0
      MOV  pc,lr   ;Move Link Register,to PC
           (Return)
```

The Thumb assembly version is:

```
CODE16 ;Directive specifying 16-bit
        (Thumb)
iabs  CMP  r0, #0    ; Compare r0 to zero
      BGE return;   ; Jump to Return if greater or
           equal to zero
      NEG  r0, r0 ;If not, negate r0
return MOV  pc,lr ; Move Link register to PC
           (Return)
```

27

Codes ARM et Thumb

CONVERSION BINAIRE HEXADECIMAL

ARM code:

```
MOV  r1,r0    ;r0 holds value to convert
           ;Load r1 with value
MOV  r2,#8    ;Load r2 with decimal 8
Loop: MOV  r1,r1,ROR #28 ;Rotate r1 right by 28 and
           ;put result in r1
      AND  r0,r1,#15   ;AND r1 with decimal 15
      CMP  r0,#10     ;Compare r0 with decimal 10 and
      ADDLT r0,r0,'#0' ;if it's less than 10 then
           ;ADD ASCII 0 to r0
      ADDGE r0,r0,'#A' ;otherwise (greater or equal)
           ;ADD ASCII A to r0
      SWI 0          ;routine to write char to screen
      SUBS r2,r2,#1  ;subtract 1 from r2
      BGT Loop      ;and loop back to 1 if r2 is
           ;still greater than zero
      MOV  pc,lr    ;Load PC with Link reg (Return)
```

Thumb code:

Thumb code:

```
MOV  r1,r0    ;Value to convert in r0
           ;Load r1 with value
MOV  r2,#8    ;Put 8 in r2
Loop1 LSR  r0,r1,#28 ;Do logical shift right on r1
           ;by 28 places and place in r0
      LSL  r1,r1,#4  ;Do logical shift left on r1
           ;by 4 places
      CMP  r0,#10   ;Compare r0 with 10 and
      BLT Loop2    ;if less than 10, branch to Loop2
      ADD  r0,'#A'-'0'-10;ADD ASCII A-0-10 (7) to r0
      ADD  r0,'#0'  ;ADD ASCII 0 (48) to r0
Loop2 ADD  r0,'#0'  ;ADD ASCII 0 (48) to r0
      SWI 0          ;routine to write char to screen
      SUB  r2,r2,#1 ;subtract 1 from r2
      BNE Loop1    ;if unfinished loop1
      MOV  pc,lr    ;else,load PC with Link register
           ;(Return)
```

11 instructions
44 octets

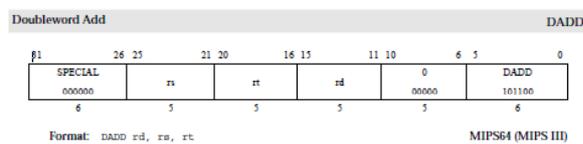
12 instructions
24 octets

M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

28

Jeux d'instructions 64 bits

- Extension des jeux d'instructions 32 bits.
- Exemple MIPS64
 - Même format d'instructions que MIPS32
 - Registres 64 bits



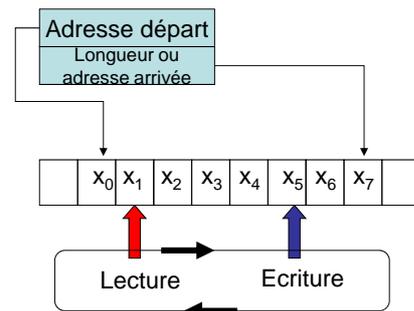
Instructions particulières liées aux applications

- Produit scalaire en calcul scientifique
 - S+= a[i]*b[i]
 - Power et PowerPC
 - Instructions Multiplication-Addition et Multiplication-soustraction (simple ou double précision)
- Produit scalaire en traitement du signal
 - Calcul des filtres FIR et IIR
 - DSP
 - Instruction Multiplication - Addition entière 16 bits vers 32 bits
 - Instruction DOTP (produit scalaire) dans le TMS 320C64x

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k x(n-k)$$

Modes d'adressage liés aux applications

- Adressage circulaire
 - But : ne conserver que les dernières valeurs des entrées ou d'un calcul précédent

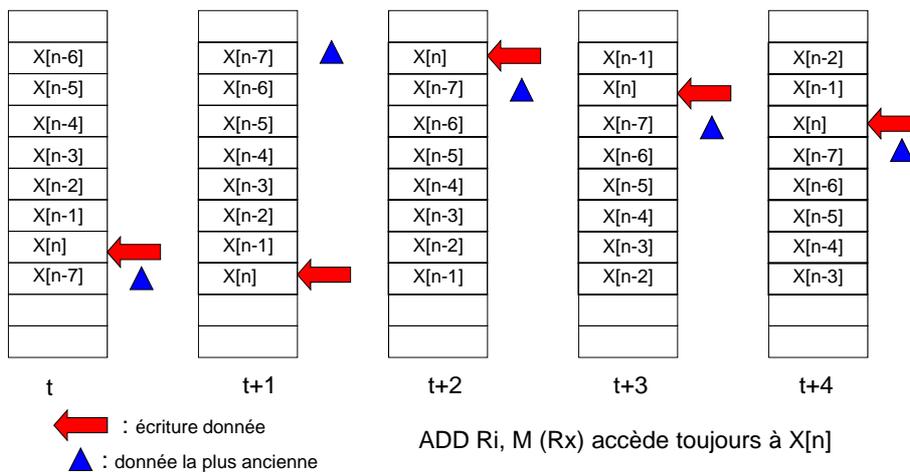


M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

31

Exemple d'adressage circulaire

Mémoire



M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

32

Algorithme de Cooley-Tukey (DFT)

- Algorithme DFT pour une puissance de 2 $N = 2^V$

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi nk/N}; W_N = e^{-j2\pi/N}$$

- Sommées séparées pour les valeurs paires et impaires de n :

$$X[k] = \sum_{n \text{ pair}} x[n]W_N^{nk} + \sum_{n \text{ impair}} x[n]W_N^{nk}$$

- Avec $n = 2r$ pour n pair et $n = 2r+1$ pour n impair

$$X[k] = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x[2r]W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x[2r+1]W_N^{(2r+1)k}$$

Algorithme de Cooley-Tukey (DFT)

mais $W_N^2 = e^{-j2\pi 2/N} = e^{-j2\pi/(N/2)} = W_{N/2}$ et $W_N^{2rk}W_N^k = W_N^k W_{N/2}^{rk}$

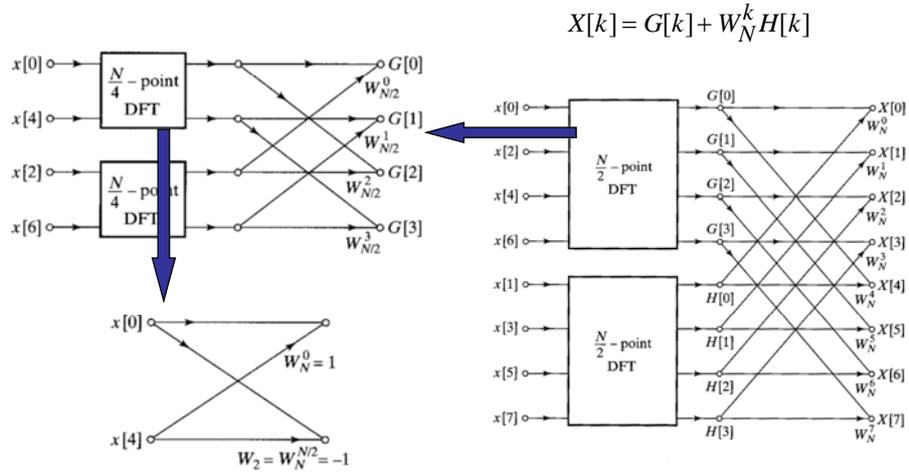
et ...

$$X[k] = \underbrace{\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r]W_{N/2}^{rk}}_{\text{DFT } N/2 \text{ points de } x[2r]} + W_N^k \underbrace{\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r+1]W_{N/2}^{rk}}_{\text{DFT } N/2 \text{ points de } x[2r+1]}$$

DFT $N/2$ points de $x[2r]$ DFT $N/2$ points de $x[2r+1]$

$$\begin{aligned} X[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{nk} \\ &= \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r]W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r+1]W_{N/2}^{rk} \end{aligned}$$

Représentation d'une DFT 8 points

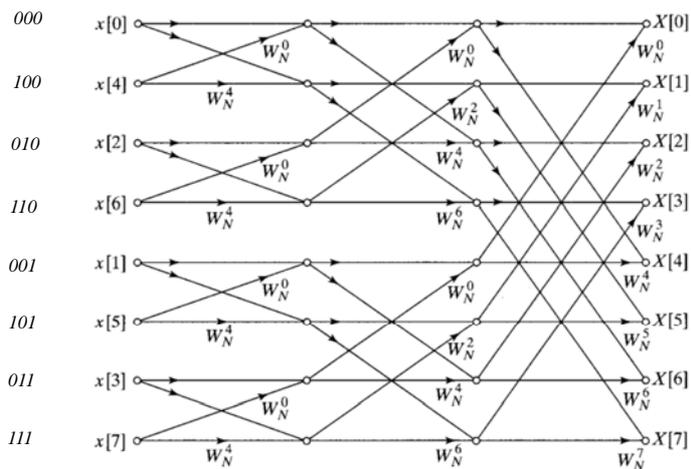


M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

35

La FFT complète 8 points

Ordre opposé des bits en entrée



M2R NSI- M2R SETI 2013-2014

36

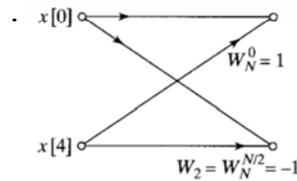
La DFT 2 points

- Expression :
$$X[k] = \sum_{n=0}^1 x[n]W_2^{nk} = \sum_{n=0}^1 x[n]e^{-j2\pi nk/2}$$

- Avec $k = 0, 1$ on obtient

$$X[0] = x[0] + x[1]$$

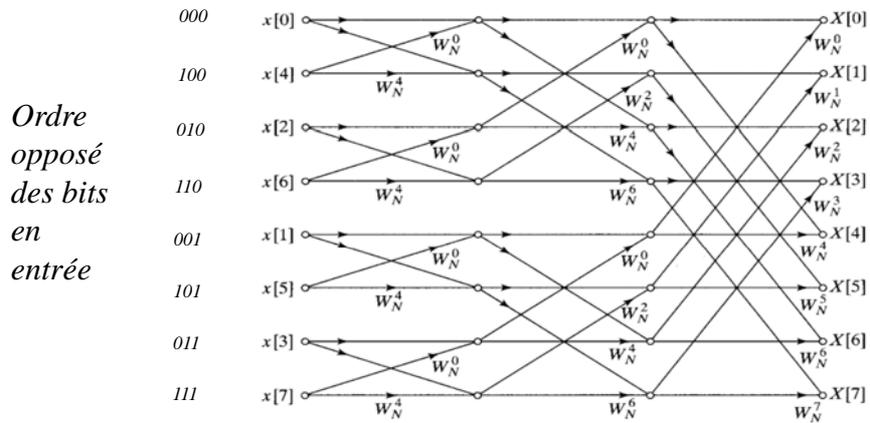
$$X[1] = x[0] + e^{-j2\pi/2}x[1] = x[0] - x[1]$$



Papillon FFT

Modes d'adressage liés aux applications

- Adressage avec inversion de l'ordre des bits (FFT)



Jeux d'instructions avec prédicats

- ARM
- VLIW DSP
 - TMS 360 C6x
- Itanium