

---

## 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 mémoire	Calcul de l'adresse de branchement
Exécution	Accès mémoire	Exécution
Ecriture du résultat	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

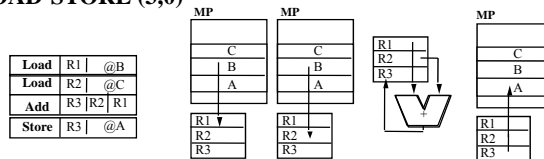
## Modèle d'exécution RISC

(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

## 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
    - $R_d \leftarrow R_{s1} \text{ op } \text{immédiat}$
    - $R_d \leftrightarrow \text{Mémoire } (R_{s1} + \text{dépl.})$

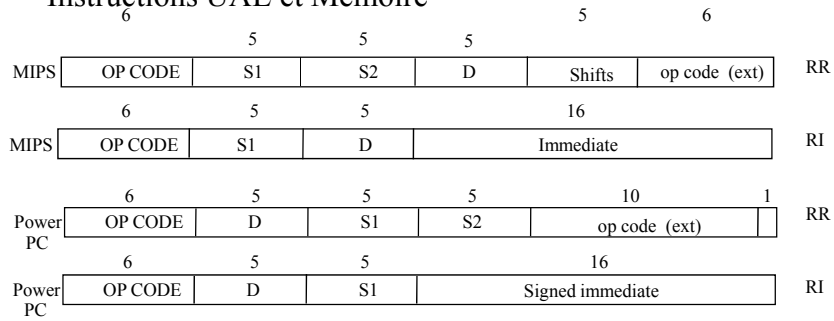
R0	always zero	local var A	R16
R1		local var B	R17
R2		local var C	R18
R3		local var D	R19
R4		local var E	R20
R5			R21
R6			R22
R7			R23
R8	compiler temp 1		R24
R9	compiler temp 2		R25
R10	compiler temp 3		R26
R11	compiler temp 4		R27
R12			R28
R13		stack pointer	R29
R14			R30
R15			R31

Typical RISC Processor

## Formats d'instructions RISC

---

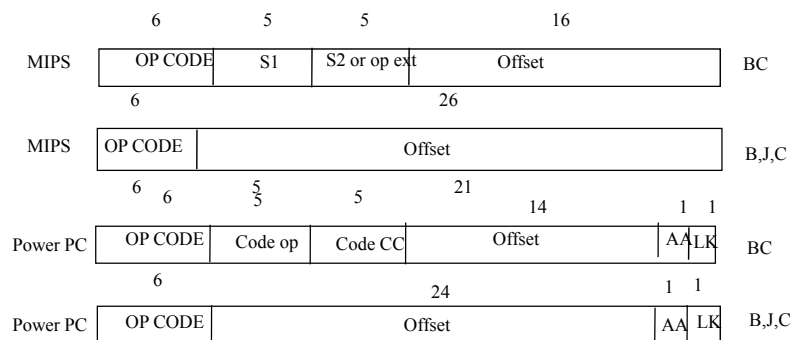
- Instructions UAL et Mémoire



## Formats d'instructions RISC

---

- Sauts et branchements



## Modèle (2,1)

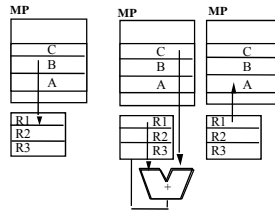
(n,m)

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

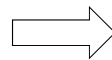
## Caractéristiques IA-32

- 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



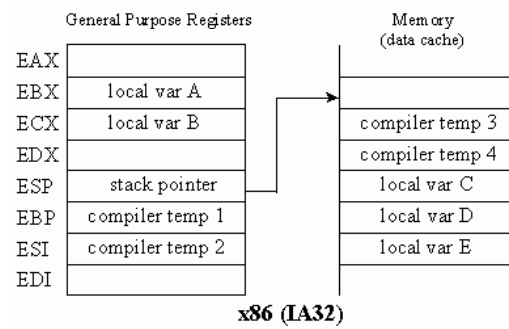
Lecture mémoire,  
Exécution,  
Ecriture mémoire

- Instructions complexes
  - Rep
- Modes d'adressage complexes

Adresse mémoire =  $R_b + R_I \times f + \text{déplacement}$

## Registres : organisation IA-32

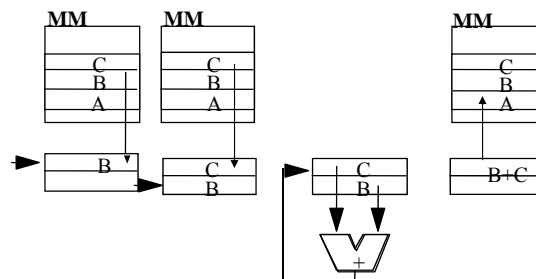
- Organisation non homogène
  - 8 registres «généraux» avec rôle spécifique
  - Registres flottants fonctionnant en pile (x87)
  - Registres «SIMD» MMX, SSE-SSE2-SSE3



## Modèle pile (0,0)

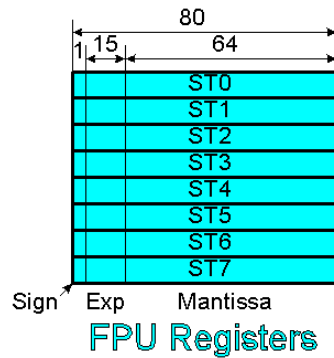
**Pile (0,0)**

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

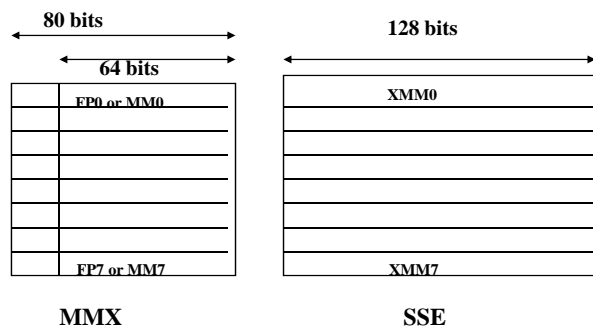
```
FLD VarX
FLD VarY
FLD VarZ
FMUL
FADD
FSTP MRslt
```

### 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)

## 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, P4

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 2012-2013

Tronc commun architectures  
D. Etiemble

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	0	0	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	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX															1	XXXX				Undefined		
Cond	1	0	0	P	U	S	W	L	Rn				Register List											Block Data Transfer		
Cond	1	0	1	L	offset																	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 2012-2013

Tronc commun architectures  
D. Etiemble

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  $Rd \leftarrow Rn \text{ OP Shift/Rotate (Operand 2)}$

## 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

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)
```

## Codes ARM et Thumb

---

### CONVERSION BINAIRE HEXADECIMAL

ARM code:	Thumb code:
<pre> MOV r1,r0 ;r0 holds value to convert MOV r2,#8 ;Load r1 with value Loop: MOV r1,r1,ROR #28 ;Load r2 with decimal 8 ;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) </pre>	<pre> MOV r1,r0 ;Value to convert in r0 MOV r2,#8 ;Load r1 with value ;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 Loop2 ADD r0,'#0' ;ADD ASCII 0 (48) to r0 SWI 0 ;routine to write char to screen SUB r2,#1 ;subtract 1 from r2 BNE Loop1 ;if unfinished loop1 MOV pc,lr ;else,Load PC with Link register ;(Return) </pre>
<p>11 instructions 44 octets</p>	<p>12 instructions 24 octets</p>

## Instructions particulières liées aux applications

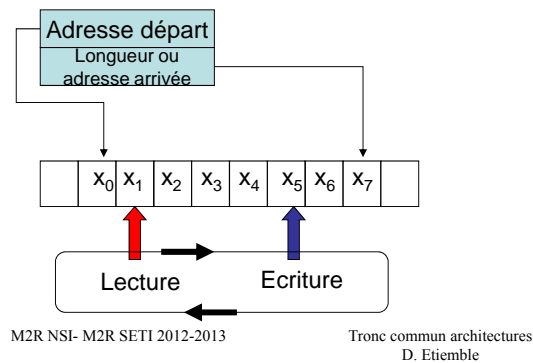
---

- **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

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

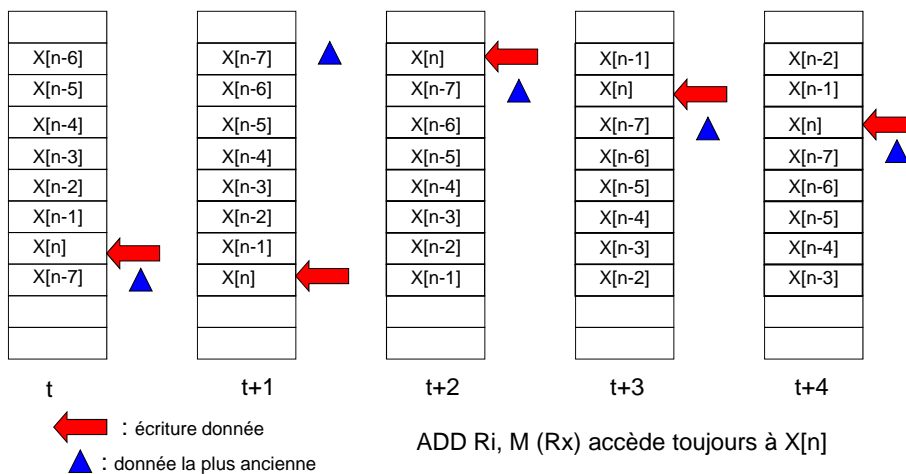
## Modes d'adressage liés aux applications

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



## Exemple d'adressage circulaire

Mémoire



## 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 ...

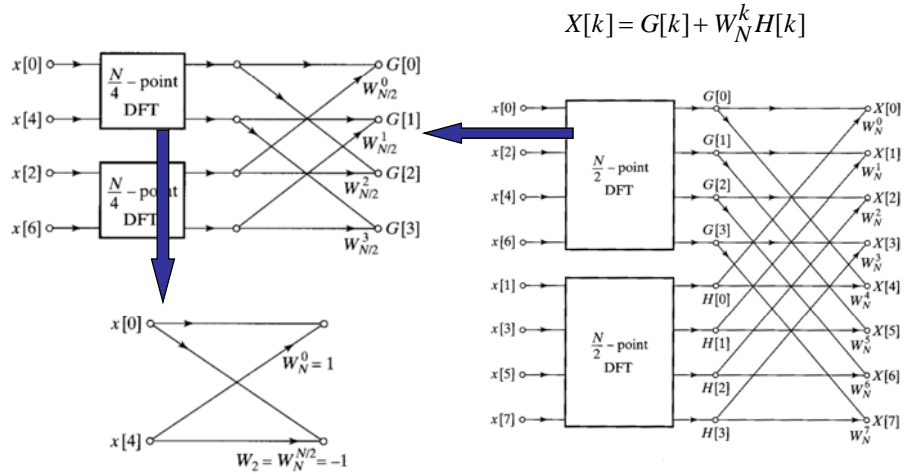
$$X[k] = \underbrace{\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r]W_{N/2}^{rk}}_{\text{DFT } N/2 \text{ points de } x[2r]} + W_N^k \underbrace{\sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r+1]W_{N/2}^{rk}}_{\text{DFT } N/2 \text{ points de } x[2r+1]}$$

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

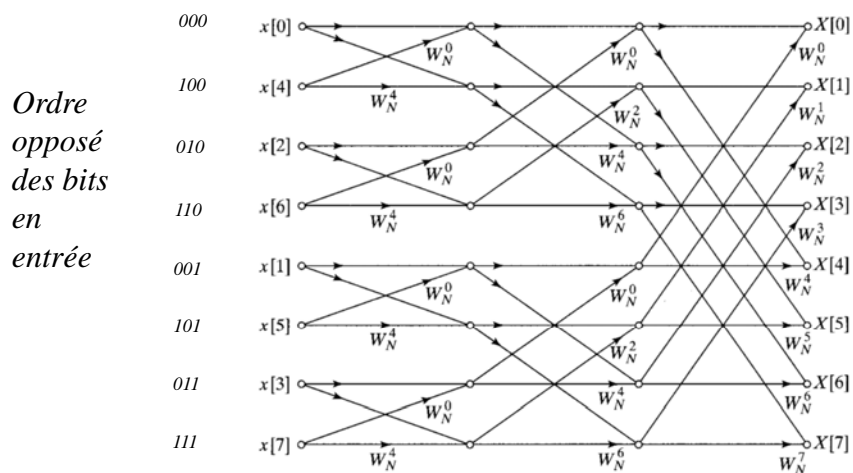
$$\begin{aligned} X[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{nk} \\ &= \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r]W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{n=0}^{(N/2)-1} x[2r+1]W_{N/2}^{rk} \end{aligned}$$



## Représentation d'une DFT 8 points



## La FFT complète 8 points



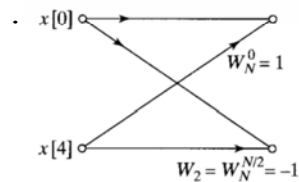
## La DFT 2 points

- 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

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

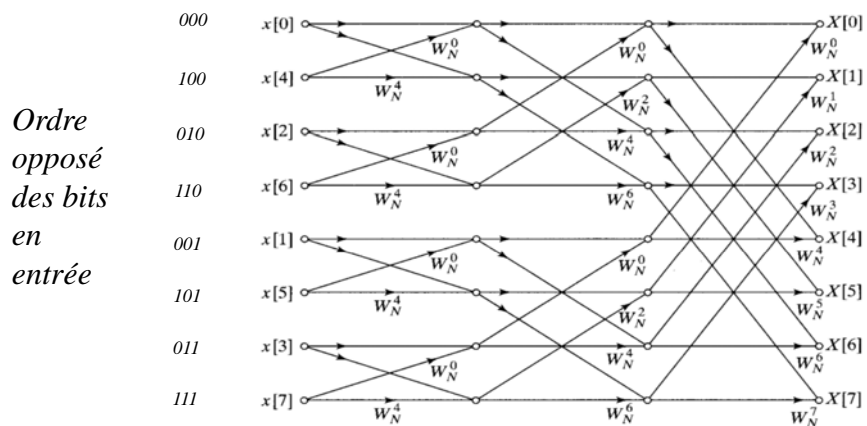
$$X[1] = x[0] + e^{-j2\pi/2}x[1] = x[0] - x[1]$$



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