

# VHDL et Circuits Numériques Programmables

Support de cours

**Daniela Dragomirescu**  
**INSA - DGEI**



D.D

## Bibliographie

- ❖ VHDL - Du langage à la modélisation - R.Airiau et al. - Presses Polytechniques et Universitaires Romandes
- ❖ Digital Design and Modeling with VHDL and Synthesis - K.C. Chang - IEEE Press
- ❖ Advanced ASIC Chip Synthesis - H. Bhatnagar - Kluwer Academic Publisher
- ❖ Principles of CMOS VLSI Design: A system Perspective - N. Weste, K.Eshraghian - Addison Wesley



D.D

## Table de matières

- ❖ 1. Introduction
  - ✱ Cycle de conception d'un système numérique
- ❖ 2. Conception des circuits numériques
  - ✱ Le langage VHDL et la synthèse logique
- ❖ 3. Études de cas :
  - ✱ Contrôleur Ethernet ( couche Media Access Control –MAC) -TP



D.D

3

## Table de matières détaillé

- ❖ 1. Introduction
- ❖ 2. Le langage VHDL
  - ✱ 2.1 Introduction
    - ★ 2.1.1 Historique
    - ★ 2.1.2 Qu'est-ce qu'un langage de description de matériel ?
    - ★ 2.1.3 Avantages et inconvénients de VHDL
    - ★ 2.1.4 Standardisation
  - ✱ 2.2 Bibliothèques
  - ✱ 2.3 Unités de conception
    - ★ 2.3.1 Entité
    - ★ 2.3.2 Architecture
    - ★ 2.3.3 Configuration
    - ★ 2.3.4 Le packaging
  - ✱ 2.4 Domaine concurrent et domaine séquentielle
  - ✱ 2.5 Test
  - ✱ 2.6 Opérateurs et littéraux
  - ✱ 2.7 Objets



D.D

4

## Table de matières

- \* 2.8 Types
  - \* 2.8.1 Types scalaires
    - ◆ Type physique, type STD\_LOGIC
  - \* 2.8.2 Types composites
    - ◆ Tableaux, Articles, Agrégats
  - \* 2.8.3 Sous-types
- \* 2.9 Notions de signal et d'affectation du signal
  - \* 2.9.1 Affectation inconditionnelle de signal
  - \* 2.9.2 Exécution d'une affectation de signal
  - \* 2.9.3 Affectation conditionnelle de signal
  - \* 2.9.4 Affectation sélective de signal
  - \* 2.9.5 Attributs
  - \* 2.9.6 Règles de distinction entre variable et signal
- \* 2.10 Instruction concurrentes
  - \* Processus



D.D

5

## Table de matières

- \* 2.11 Instructions séquentielles
    - \* wait
    - \* assert
  - \* 2.12 Généricité
  - \* 2.13 Compilation, élaboration, exécution, exploitation
  - \* 2.14 Synthèse et Performances
- ❖ 3. Etudes de cas

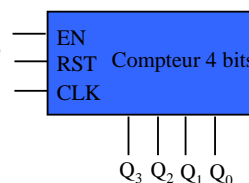


D.D

6

## Introduction

- ❖ Rappels :
- ❖ Circuits logiques combinatoires
  - \* leur sortie est déterminé par la valeur courante de l'entrée
  - \* portes logiques, multiplexeurs, demultiplexeurs, décodeurs, circuits arithmétiques
- ❖ Circuits logiques séquentielles
  - \* Leur sortie est partiellement déterminé par l'évolution de l'entrée. La réponse du circuit dépend de l'histoire plus ou moins récente du fonctionnement du circuit. Fonction **MEMOIRE** interne.
  - \* Bascule D, registres, mémoires RAM, compteurs
- ❖ Exercice : réalisez un compteur 4bits en utilisant des bascules D en logique séquentielle synchrone



D.D

7

## Introduction

### Evolution de la méthodologie de conception

Intel Processeur	Date de production	Fréquence de fonctionnement	Nr. de transistors par puce
<b>8086</b>	<b>1978</b>	<b>8 MHz</b>	<b>29 K</b>
80286	1982	125 MHz	134 K
80386 DX	1985	20MHz	275 K
<b>80486 DX</b>	<b>1989</b>	<b>25 MHz</b>	<b>1.2 M</b>
Pentium	1993	60MHz	3.1 M
Pentium Pro	1995	200 MHz	5.5 M
Pentium II	1997	266 MHz	7 M
Pentium III	1999	500 MHz	8.2 M
Pentium III Xeon	1999	700 MHz	28 M
<b>Pentium 4</b>	<b>2001</b>	<b>1.7 GHz</b>	<b>42 M</b>



D.D

8

## Introduction

- ❖ Evolution de la méthodologie de conception
  - ❖ Apparition des langages HDL - **H**ardware **D**escription **L**anguage
    - \* Verilog
    - \* VHDL
- } Même principe, syntaxe différente
- ❖ Travail avec des cellules standard - briques de base appartenant à une bibliothèque spécifique à chaque fondeur de circuits intégrés



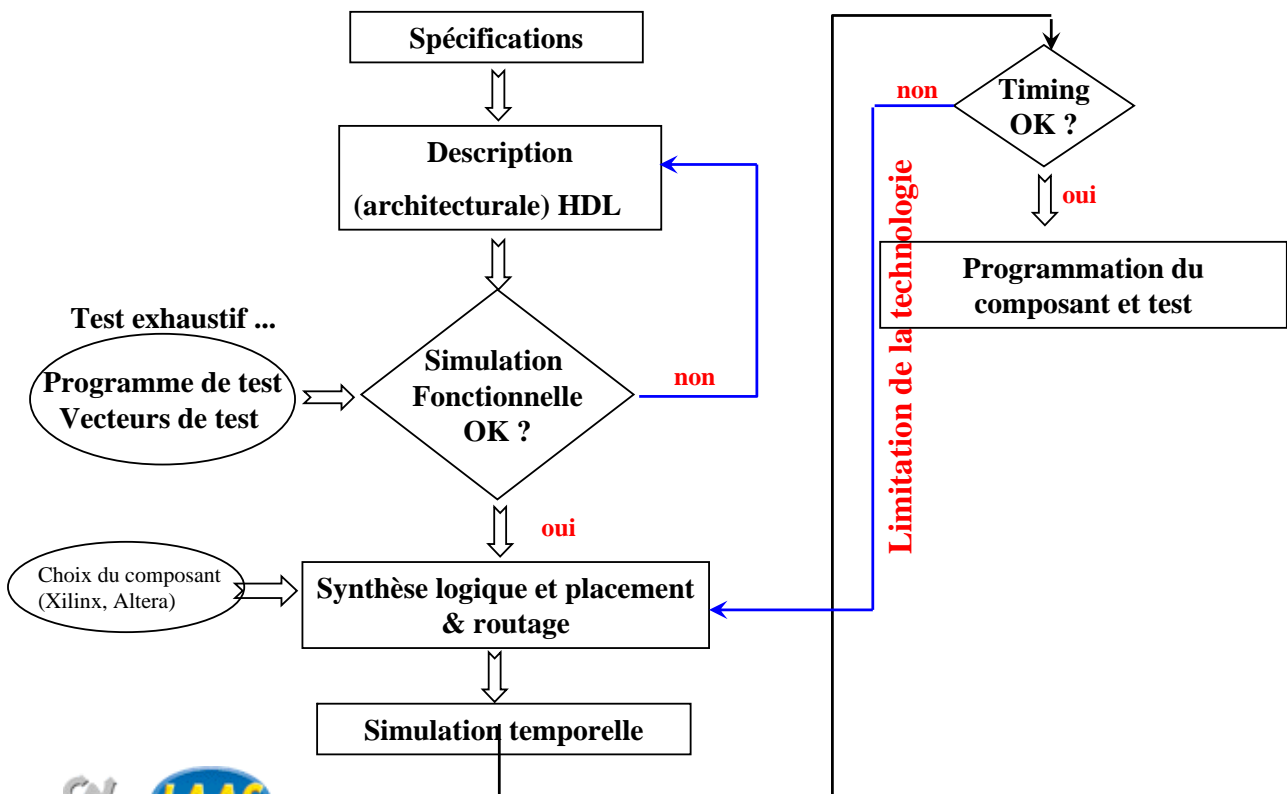
Standard cells - design kit



D.D

9

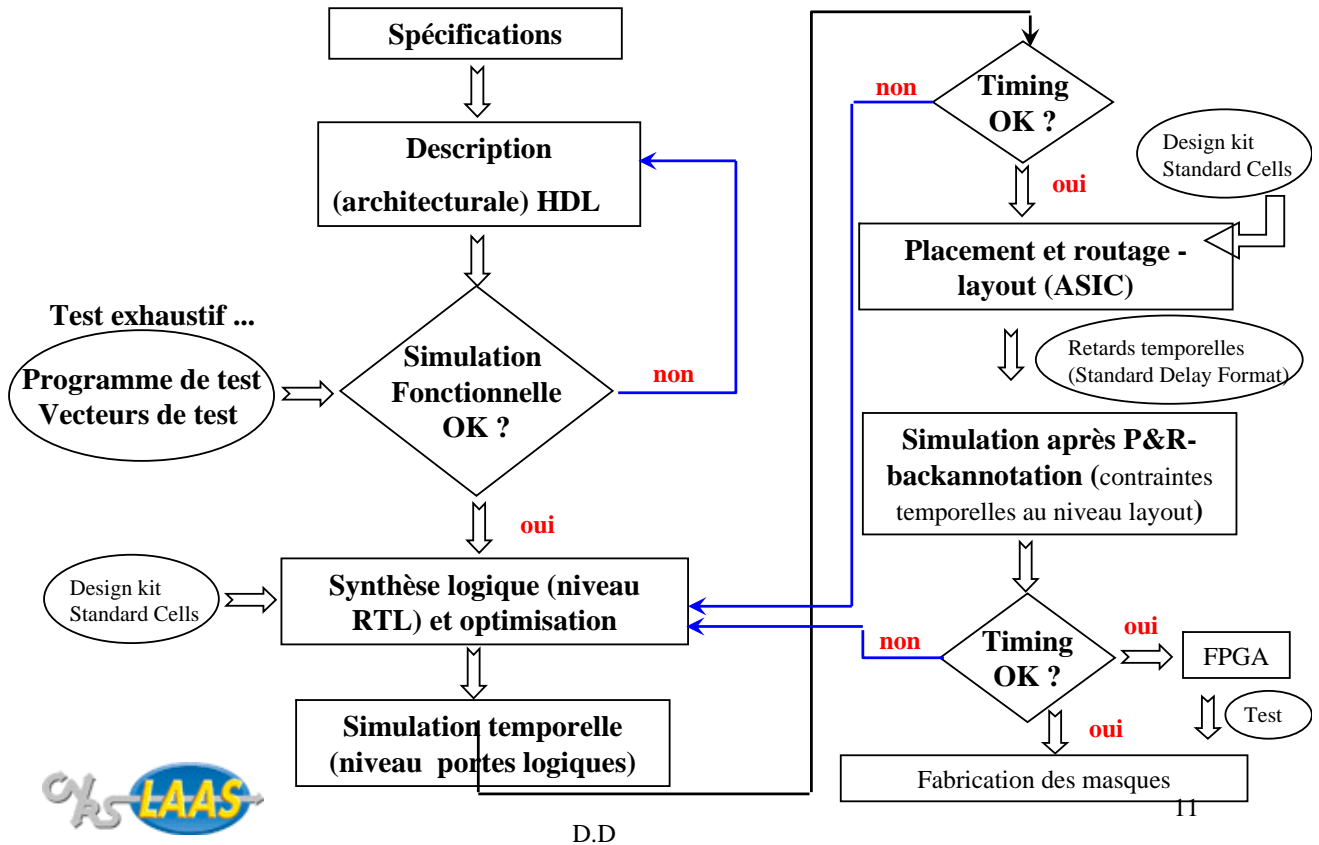
## Cycle de conception des systèmes numériques intégrés - FPGA



D.D

10


## Cycle de conception des systèmes numériques intégrés - ASIC



D.D

## 2. Conception des circuits numériques Le langage VHDL

## 2.1.1 Historique

- ❖ VHDL - VHSIC Hardware Description Language  
VHSIC - Very High Speed Integrated Circuits
- ❖ 1980 - demande du département de la défense des Etats-Unis
- ❖ ADA pour le logiciel et VHDL pour le matériel
- ❖ VHDL - dédié seulement à la microélectronique ?  NON !
- ❖ VHDL sert à décrire des systèmes matériels à un haut niveau d'abstraction
  - \* circuits intégrés
  - \* cartes de composants
  - \* systèmes entiers ( logiciel + matériel) - réseaux d 'ordinateurs



D.D

13

## 2.1.2 Qu'est-ce qu'un langage de description de matériel ?

- ❖ Un langage de description matériel ne vise pas une « exécution »
- ❖ Un langage de description matériel tel VHDL peut être utilisé pour différents buts :
  - \* Spécification
  - \* Simulation
  - \* Synthèse
  - \* Preuve formelle



D.D

14

### 2.1.3 Avantages et inconvénients de VHDL

#### ❖ Avantages :

- \* VHDL est standardisé - standard IEEE
- \* pérennité assurée par la norme
- \* **conception modulaire et hiérarchique**
- \* VHDL est un langage moderne, puissant et général
  - \* **haute modularité**
  - \* **notion de temps bien définie**
  - \* unités de compilation séparées
  - \* typage fort
  - \* **généricité**
  - \* sécurité d'emploi
  - \* fiabilité
- \* en utilisant VHDL on minimise le risque d'erreur sur le circuit intégré en silicium - on diminue le coût de production

#### ❖ Inconvénients:

- \* langage de simulation  **tout n'est pas synthétisable !**

### 2.1.4 Standardisation

- ❖ IEEE Standard 1076 - 1987
- ❖ IEEE Standard 1076 - 1993
- ❖ IEEE Standard 1076 - 2003



## 2.2 Bibliothèques

- ❖ Langage modulaire - unités petites et hiérarchisées
- ❖ Unités de conception - peuvent être compilées séparément
- ❖ Description VHDL correcte - bibliothèque de travail - **WORK**
  - \* portabilité
- ❖ Utilitaires ou modèles généraux - bibliothèques de ressources
  - \* facilite le travail en équipe
- ❖ Bibliothèques : IEEE , STD
  - \* **package** IEEE.std\_logic\_1164 et **package** IEEE.std\_logic\_arith
  - \* **package** STD.textio et **package** STD.STANDARD



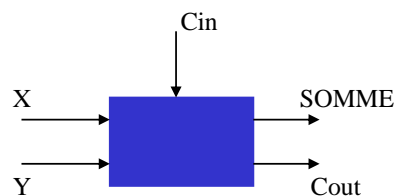
D.D

17

## 2.3 Unités de conception

### 2.3.1 Entité

- ❖ **Entité** - model VHDL
  - \* Vue externe



```
entity adder is
    port (
        X, Y, Cin:    in bit;
        Somme, Cout:  out bit);
end adder;
```



D.D

18

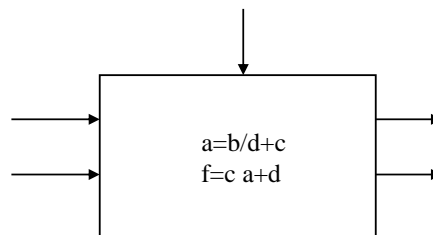
## Les ports

PORT FORMEL  OBJET : CONNECTE	MODE IN	MODE OUT	MODE INOUT	MODE BUFFER	MODE LINKAGE
Port de mode <b>in</b>	oui	non	non	non	oui
Port de mode <b>out</b>	non	oui	non	non	oui
Port de mode <b>inout</b>	oui	oui	oui	non	oui
Port de mode <b>buffer</b>	oui	non	non	oui	oui
Port de mode <b>linkage</b>	non	non	non	non	oui
Signal local	oui	oui	oui	oui	oui
Mot clé <b>open</b> (non-connecté)	non	oui	oui	oui	oui

## 2.3 Unités de conception

### 2.3.2 Architecture

#### ❖ Vue interne d'une entité - ARCHITECTURE



#### ❖ Style de description de l'architecture :

- \* Description **structurelle** : interconnexion de composants
- \* Description **flot de données** : comportement sous forme d'équations
- \* Description **comportementale** : comportement sous forme algorithmique

#### ❖ On peut combiner les différents styles des descriptions dans une même architecture

## 2.3.2 Architecture

### ❖ Architecture **structurelle** de l'additionneur

architecture **vue\_structurale** of adder is

```
component demi_additionneur
    port( I1,I2:    in bit;
          Carry:   out bit;
          Sum:     out bit);
```

end component;

```
component porte_OU
```

```
    port( I1, I2:    in bit;
          O:         out bit);
```

end component;

```
signal a,b,c : bit;
```

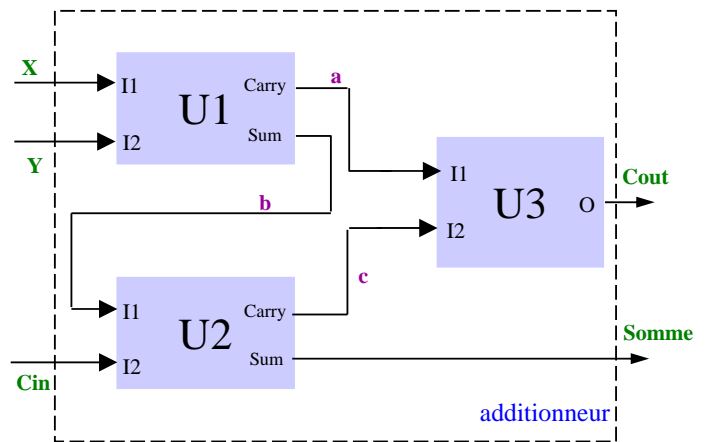
begin

```
    U1: demi_additionneur    port map(X,Y,a,b);
```

```
    U3: porte_OU             port map(a,c,Cout);
```

```
    U2: demi_additionneur    port map(b,Cin,c,Somme);
```

```
end vue_structurale;
```



D.D

21

## 2.3.2 Architecture

### ❖ Architecture **flot de données** de l'additionneur

$$S = X \oplus Y$$

$$\text{Somme} = S \oplus \text{Cin}$$

$$\text{Cout} = XY + S\text{Cin}$$

Equations booléennes de  
l'additionneur

architecture **data\_flow** of adder is

```
signal S: bit;
```

begin

```
Somme <= S xor Cin ;    --after 10 ns;
```

```
S <= X xor Y ;    -- after 10 ns;
```

```
Cout <= (X and Y) or (S and Cin);    -- after 20 ns;
```

```
end data_flow;
```



D.D

22

## 2.3.2 Architecture

- ❖ Architecture **comportementale** de l'additionneur

✱ représentée par une table de vérité

architecture vue\_comportementale of adder is

begin

**process** -- instruction concurrente

variable N: integer;

constant sum\_vector: bit\_vector(0 to 3):= "0101";

constant carry\_vector: bit\_vector(0 to 3):= "0011";

begin

N:=0;

if X= '1' then N:=N+1; end if;

if Y= '1' then N:=N+1; end if;

if Cin='1' then N:=N+1; end if;

Somme <= sum\_vector(N) after 20 ns;

Cout <= carry\_vector(N) after 30 ns;

wait on X, Y, Cin;

**end process;**

end vue\_comportementale;

X	Y	C <sub>in</sub>	Sum	C <sub>out</sub>
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1



D.D

23

## 2.3.3 Configuration

- ❖ Donne la correspondance entre le composant et le modèle dont il est instancié
- ❖ Permet faire la liaison entre des composants utilisés dans une architecture et leur réalisation effective

Ex: Soit une entité « trois\_registres » avec une architecture « beh » ayant 3 registre R1, R2 et R3

1. use work.trois\_registres;

configuration alpha of trois\_registres is

for beh

for R1,R2 : registre\_8bit use entity work.registre\_8bit(arch);

for R3 : registre\_8bit use entity work.registre\_8bit(decalage);

end for;

end alpha;

2. **FOR ALL** : registre\_8bit use entity work.registre\_8bit(arch);



D.D

24

## Exemple : l'additionneur

```

entity adder is
    port (X, Y, Cin : in bit;
          Sum, Cout : out bit);
end adder;
architecture vue_structurale of adder is
    component demi_additionneur
        port ( I1,I2:      in bit;
              Carry:      out bit;
              Sum:        out bit);
    end component;
    component porte_OU
        port ( I1, I2:      in bit;
              O:          out bit);
    end component;
    for all : demi_additionneur use entity work.half_adder(beh);
    for all : porte_ou use entity work.porte_ou(struct);

    signal a,b,c : bit;
    begin
        U1:  demi_additionneur port map(X,Y,a,b);
        U2:  demi_additionneur port map(b,Cin,c,Sum);
        U3:  porte_OU          port map(a,c,Cout);
    end vue_structurale;
end adder;

```

```

library ma_lib;

```

```

for all : demi_additionneur use entity
    ma_lib.half_adder(beh);

```



D.D

25

## 2.3.4 Le paquetage

- ❖ Ensemble des algorithmes, sous-programmes, nouveau types et sous-types, des objets: signaux et constantes ( pas de variables)
- ❖ Un ou plusieurs paquetage dans la même bibliothèque
- ❖ 2 unités de conception :
  - \* **Spécification d'un paquetage** - vue externe
    - ★ présente tous ce qu'exporte le paquetage (algorithmes, objets, types)
  - \* **Corps du paquetage** - vue interne - *optionnel*
    - ★ contient la description des algorithmes, déclarations locales des types, objets
- ❖ Pour avoir accès à un paquetage il faut le référencé par une clause **use**
  - \* **library** IEEE;
  - use** IEEE.std\_logic\_1164.all ;
  - \* **library** ma\_lib;
  - use** ma\_lib.mon\_paquetage.all;



D.D

26

## 2.3.4 Le paquetage

### ❖ Spécification du paquetage :

**package** SIMPLE **is**

**constant** TAILLE\_MAX: **integer** :=1024;

**subtype** mon\_integer **is** **INTEGER** **range** 0 **to** TAILLE\_MAX;

**signal** addition\_10bits : mon\_integer ;

**function** MIN(A,B:INTEGER) **return** INTEGER;

**function** MAX(A,B:INTEGER) **return** INTEGER;

**end** SIMPLE;

\* Les déclarations faite dans la spécification du paquetage sont connus dans le corps du paquetage



D.D

27

## 2.3.4 Le paquetage

### ❖ Corps du paquetage

**package body** SIMPLE **is**

**function** MIN(A,B:INTEGER) **return** INTEGER **is**

**begin**

**if** A<B **then return** A;

**else return** B;

**end if**;

**end** MIN;

**function** MAX(A,B:INTEGER) **return** INTEGER **is**

**begin**

**if** B<A **then return** A;

**else return** B;

**end if**;

**end** MAX;

**end** SIMPLE;



D.D

28

## 2.4 Domaine concurrent et domaine séquentiel

- ❖ La description d'un système matériel est naturellement concurrente
- ❖ Le fond d'une description VHDL est **concurrent**
  
- ❖ Les 2 domaines cohabitent en VHDL
  
- ❖ Domaine **concurrent**
  - \* La zone de déclarations des **entités**
  - \* La zone de déclarations des **architectures**
  
- ❖ Domaine **séquentiel**
  - \* La zone de déclarations de **processus**
  - \* Le **corps du paquetage**



D.D

29

## 2.5 TEST

- ❖ Pour **vérifier (simuler)** le comportement du composant décrit en VHDL il faut le **tester**
  
- ❖ Le programme de test - un programme VHDL, avec la même structure (entity, architecture)
  - \* Applique les stimuli en entrée et regarde les sorties du composant sous test
  
- ❖ Si possible - test exhaustif
  - \* Difficile à mettre en œuvre pour des systèmes complexes
  - \* Preuve formelle



D.D

30

## 2.5 TEST

### ❖ Exemple: test de l'additionneur

```
entity test_adder is
end test_adder;
architecture bench of test_adder is
  COMPONENT adder is
    port (X, Y, Cin : in std_logic;
          Sum, Cout : out std_logic);
  END COMPONENT;

  For all : adder use entity work.adder(vue_structurale);

  SIGNAL data1, data2, data3 :std_logic;
  SIGNAL dataout, carry_out : std_logic;

  BEGIN
    additionneur: adder PORT MAP (data1,data2, data3,dataout, carry_out);
    data1 <= '0', '1' after 30 ns;
    data2 <= '1', '0' after 50 ns, '1' after 60 ns;
    data3 <= '0', '1' after 12 ns;

  END bench;
```

Test non-exhaustif



D.D

31

## 2.6 Opérateurs et littéraux

### ❖ Classes d'opérateurs par ordre de priorité croissante

1. Logiques :      and                  or                  nand      nor                  xor;
  - défini sur les types booléen et BIT
2. Relationnels:    =                  /=                  <                  <=                  >                  >=
  - défini sur tous les types sauf le type file
3. Arithmétiques et concaténation: +                  -                  &
4. Signe:    +                  -
  - les opérateurs de signe sont moins prioritaires que les opérateurs de multiplication !!!!!
5. Multiplication:   \*                  /                  mod      rem
6. Exposant, valeur absolue, complément:                  \*\*                  abs                  not
  - \*\* élévation à la puissance : opérande de droite (la puissance) doit être entière

### ❖ Il est possible de **surcharger** les opérateurs ; ceci ne change pas leur priorité



D.D

32



## 2.6 Opérateurs et littéraux

### ❖ Classifications:

- \* numérique - notation décimale - entier (1345 ou 1\_345) ou réel ( 13.0)
  - notation basée - base 16 : X"A2"
- \* caractères ou chaîne de caractères ('a' , "Bonjour", "1234" )
- \* énumérés
- \* chaînes de bits ( "1010" )
- \* null

❖ OBS:                      1 - nombre entier                      '1' - bit

❖ **Expressions** - portent un type, et au moment de l'exécution une valeur

❖ **Identificateurs** - commencent avec une lettre; pas de différence entre majuscules et minuscules



D.D

33

## 2.7 Les objets

- ❖ Les objets contiennent des valeurs. Il y a 4 classes d'objets en VHDL : constantes, variables, fichiers et signaux.
- ❖ Les constantes ont une valeur unique fixe
- ❖ Les variables ont une valeur unique modifiable
- ❖ Les fichiers contiennent des séquences de valeurs qui peuvent être lues ou écrites
- ❖ Les **signaux** conservent l'histoire des valeurs passées, de la valeur présente et des valeurs prévues dans le futur : seules les valeurs futures peuvent être modifiées par affectation de signal
- ❖ Tous les objets ont un type



D.D

34

## 2.8 Types

- ❖ VHDL est un langage typé
- ❖ Un type est un ensemble de valeurs ordonnées
- ❖ Le type est **statique** : il ne peut pas être modifié
- ❖ Il est possible de définir de nouveaux types en utilisant les types prédéfinis et des constructeurs de types
- ❖ Classification :
  - \* Types scalaires
  - \* Types composites
  - \* Types **access** (pointeur) - seules **les variables** peuvent être de type acces
  - \* Types fichiers - mot clé **file**



D.D

35

### 2.8.1 Types scalaires

- ❖ Les entiers
  - \* **subtype** mon\_integer **is** INTEGER **range** -65\_536 **to** 65\_535 ;
- ❖ Les flottants
  - \* **subtype** mon\_flottant **is** REAL **range** 5.36 **downto** 2.15;
- ❖ Les types énumérés
  - \* **type** COULEUR **is** (BLEU, VERT, ROUGE);
  - \* **type** BOOLEAN **is** (FALSE, TRUE);
  - \* **type** LOGIC4 **is** ('X', '0', '1', 'Z');
- ❖ Les types physiques
  - \* **TIME** - définit dans le paquetage STANDARD
  - \* TIME -la notion de temps que connaît le simulateur
  - \* Sont caractérisés par l'unité de base, l'intervalle de ses valeurs autorisées, collection des sous-unités et leur correspondance.



D.D

36

## 2.8.1 Type physiques

### ❖ TIME

type TIME is range -9\_223\_372\_036\_854\_775\_808 to  
9\_223\_372\_036\_854\_775\_807

-- codage sur 64 bits ;

units fs ;

ps = 1000 fs;

ms = 1000 us;

ns = 1000 ps;

sec = 1000 ms;

us = 1000 ns;

min = 60 sec ;

hr = 60 min;

end units;

### ❖ DISTANCE

type DISTANCE is range 0 to 1E16

units A ;

nm = 10 A;

um = 1000 nm;

mm = 1000 um;

cm = 10 mm;

m = 1000 mm;

km = 1000 m;

end units;



D.D

37

## 2.8.1 Type STD\_LOGIC

- ❖ Se trouve dans le paquetage IEEE.std\_logic\_1164
- ❖ Paquetage IEEE.std\_logic\_unsigned
- ❖ Paquetage IEEE.std\_logic\_arith

- ❖ Remplace le type bit ; c'est le type bit résolu

- ❖ Il a 5 valeurs:

- \* '1' - 1 logique
- \* '0' - 0 logique
- \* 'Z' - haute impédance
- \* 'U' - non-initialisé
- \* 'X' - indéterminé

- ❖ STD\_LOGIC\_VECTOR

- \* signal A : std\_logic\_vector(0 to 7);



D.D

38

## 2.8.2 Types composites

### ❖ Classification :

- \* Tableaux : collection d 'objets de même type - **array**
- \* Articles : collection d 'objets de types différents - **record**

### ❖ Tableaux

- \* Ses éléments sont désignés par un indice
- \* Contraints
  - \* **type** MOT **is array** (0 to 31) **of** STD\_LOGIC;
- \* Non-contraints
  - \* **type** STD\_LOGIC\_VECTOR **is array** ( NATURAL **range <>**) **of** STD\_LOGIC;
  - \* Définition d'un intervalle d'indiaage lors de l'exécution
    - ◆ **signal** bus : STD\_LOGIC\_VECTOR ( 63 **downto** 0);
- \* Attributs de tableaux :  
LEFT, RIGHT, HIGH, LOW, RANGE, REVERSE\_RANGE, LENGTH



D.D

39

## 2.8.2. Tableaux - Attributs

### ❖ Exemple :

- ```
type INDEX 1 is INTEGER range 1 to 20;
type INDEX2 is INTEGER range 19 downto 2;
type VECTEUR1 is array (INDEX1) of STD_LOGIC;
type VECTEUR2 is array (INDEX2) of STD_LOGIC;
```
- \* VECTEUR1'**LEFT** rendra 1 et VECTEUR2'**RIGHT** rendra 2
  - \* VECTEUR1'**HIGH** rendra 20 et VECTEUR2'**HIGH** rendra 19
  - \* VECTEUR1'**LOW** rendra 1 et VECTEUR2'**LOW** rendra 2
  - \* VECTEUR1'**RANGE** rendra 1 to 20 - utilisation pour des boucles
  - \* VECTEUR1'**REVERSE\_RANGE** rendra 20 downto 1
  - \* VECTEUR1'**LENGTH** rend le nombre d'éléments du tableau - donc 20



D.D

40

## 2.8.2 Types composites - ARTICLES

### ❖ Articles - mot clé **record** - **end record**

- \* Contient des éléments de types différentes
- \* Ses éléments sont désignés par un **nom**
- \* Exemple :

\* **type** BIT\_COMPLET **is**  
**record**

valeur : std\_logic;

sortance\_min, sortance\_typ, sortance\_max: integer;

**end record**;

signal A : BIT\_COMPLET;

variable B : BIT\_COMPLET;

**➡ alors A.valeur est de type std\_logic, A.sortance\_typ est de type entier**

\* **Affectation**

A <= B ;

ou

A.valeur <= B.valeur **after** 50 ns;



D.D

41

## 2.8.2 Agrégats

- ❖ Un agrégat est une façon d'indiquer la valeur d'un type composite
- ❖ Un agrégat se note entre parenthèse, les éléments étant séparés par des virgules
- ❖ Vérification de type faite par le compilateur
- ❖ Exemple : soit
  - \* **type** TAB **is array** (1 to 3) **of** INTEGER ;
  - \* **type** ART **is record**
    - Champ1 : NATURAL;
    - Champ2 : STD\_LOGIC;
    - Champ3 : NATURAL;
  - end record**;
  - \* signal A : TAB; signal B : ART;
- ❖ 3 notations distinctes de l'agrégat :
  - \* **notation positionnelle**

A <= (12, 13, 14);

B <= (5, '0', 15);
  - \* **notation par dénomination**

A <= (1=>12, 2=>13, 3=>14);      B <=(Champ3 =>15, Champ1 => 5, Champ2 =>'0' );
  - \* **notation mixte (positionnelle -dénomination)**

A <=(5, **others** =>0);      B <=(Champ2 =>'0', **others** =>0);



D.D

42

### 2.8.3 Sous-types

- ❖ Déclaration de sous-type quand on souhaite restreindre les valeurs d'un certain type
- ❖ Un sous-type est toujours compatible avec son type de base
- ❖ Exemples:
  - \* subtype integer\_8bits is INTEGER range 0 to 255 ;
  - \* subtype NATURAL is INTEGER range 0 to INTEGER'HIGH;
- ❖ Sous-types dynamiques:
  - \* Font intervenir des expressions calculables à la simulations

Subtype MOT is STD\_LOGIC\_VECTOR (1 to MAX);  
où MAX est un paramètre d'un sous-programme ou paramètre générique d'une entité



### 2.9 Notions de signal et affectation du signal

- ❖ Un signal correspond à la représentation matérielle du support de l'information en VHDL.
- ❖ Un signal a une évolution en temps ( une variable - non)
- ❖ Toute déclaration de signal se fait dans le domaine concurrent - la zone de déclaration des architectures, des entités et la spécification du paquetage
- ❖ Tout signal peut conserver l'historique de ses valeurs passées si celles-ci sont utilisées par ailleurs, la valeur présente et les valeurs prévues dans le futur - le «pilote » du signal
- ❖ Affectation du signal :
  - \* connexion à un port de sortie d'un composant
  - \* affectation du signal dans le domaine concurrent
  - \* affectation du signal dans le domaine séquentiel



## 2.9.1 Affectation inconditionnelle de signal

$S \leq '0', '1' \text{ after } 20 \text{ ns};$

- ❖ La valeur doit avoir un type compatible avec celui du signal affecté
- ❖ Chaque élément de l'expression a une partie valeur et une partie délai de type physique TIME (**délai nul par défaut sans la clause after**)

$S \leq A \text{ after } 10 \text{ ns};$

- ❖ Tous les signaux utilisés dans l'expression sont soit locaux, soit **des ports définis en entrée**



D.D

45

## 2.9.2 Exécution d'une affectation de signal

- ❖ **L'affectation du signal** ne change pas la valeur présente du signal, mais **modifie les valeurs futures** que ce signal sera susceptible de prendre

$A \leq B;$       ou       $A \leq B \text{ after } 0 \text{ ns};$

- ❖ Le signal A prend la valeur présente du signal B après un **delta délai**
- ❖ **Delta délai** - est un délai qui est nul pour la simulation et ne représente que la causalité



D.D

46

## 2.9.2 Exécution d'une affectation de signal

$S \leq A+B$  **after** 20 ns;

- ❖ L'expression affectée à un signal est évaluée à chaque changement de valeur sur l'un de ses signaux d'entrée (réponse événementielle)
- ❖ Chaque valeur calculée par l'expression est mémorisée dans le signal destination avec son délai d'apparition
- ❖ Si l'affectation est de nouveau évaluée, les anciennes valeurs prévues pour le futur peuvent être remplacées par les nouvelles valeurs - voir exemple affectation conditionnelle



D.D

47

## 2.9.3 Affectation conditionnelle de signal

- ❖ Condition simple:
  - \*  $S \leq A$  **when** condition **else** **Instruction conditionnelle concurrente**  
B;
  - \*  $S \leq A$  **after** 20 ns **when** condition **else**  
B **after** 10 ns;
- ❖ Condition multiple avec ordre de précedence
  - \*  $S \leq$  5 **when** A='1' **and** B='1' **else**  
4 **when** A='1' **else** **Instruction conditionnelle concurrente**  
0;
- ❖ Quand n'importe quel signal d'entrée change de valeur, l'ensemble des conditions est évalué dans l'ordre (de gauche à droite)
- ❖ La première valeur produite par la première expression dont la condition est vraie est affectée au signal



D.D

48



## 2.9.4 Affectation sélective de signal

- ❖ Une condition unique détermine quelle expression sera affectée au signal

**type** op\_bit **is** (et, ou, non) ;

**signal** opcode: op\_bit;

**signal** result, A, B, : std\_logic;

.....

**with** opcod **select**            -- instruction de choix **concurrente**

result <= A and B **when** et,

A or B **when** ou,

not A **when** non,

'0' **when** **others**;

- ❖ L'affectation sélective modélise les composants de type multiplexeurs et décodeurs



D.D

49

## 2.9.5 Attributs

- ❖ L'attribut est une caractéristique associée à un type ou à un objet
- ❖ L'utilisateur peut définir des nouveaux attributs
- ❖ Prédéfini :
  - ❖ S'**quiet**(T) - TRUE si le signal S est "tranquille" pendant au moins T
  - ❖ S'**stable**(T) - TRUE si aucun événement sur le signal S depuis T
  - ❖ S'**delayed**(T) - signal S différé de T après **NOW**
  - ❖ S'**event** - TRUE si un événement vient d'arriver sur S
  - ❖ S'**last\_value** - dernière valeur de S avant le dernier événement
  - ❖ S'**last\_event** - valeur du temps écoulé depuis le dernier événement de S



D.D

50

## 2.9.6 Règles de distinction entre variable et signal

- ❖ Les variables se déclarent dans le **domaine séquentiel des processus ou des sous-programmes**
- ❖ Les variables s'utilisent et s'affectent dans le domaine séquentiel uniquement `a:='1'`
- ❖ Les signaux se déclarent dans le **domaine concurrent** des entités, architectures, spécification du packaging, des blocs
- ❖ Les signaux s'utilisent dans les 2 domaines séquentiel et concurrent `a <='1'`
- ❖ Une affectation de variable est immédiate, alors qu'une affectation de signal est différée jusqu'à la fin de l'évaluation de toutes les affectations



## 2.10 Instructions concurrentes

- ❖ On ne simule pas en temps « réel » - on simule en temps virtuel (temps de simulation)
- ❖ Ces fonctionnements seront décrits par des instructions concurrentes s'exécutant de manière asynchrone
  - \* Assignations de signaux (conditionnelle ou sélective ou inconditionnelle)
  - \* Instanciations de composants
  - \* **Instruction processus**
  - \* Appels concurrents de procédures
  - \* Instructions d'assertion
  - \* Instructions de bloc
  - \* Instruction **generate**



## 2.10 Instructions concurrentes

### ❖ Processus

- \* est l'objet fondamental manipulé par le simulateur
- \* toute instruction concurrente peut toujours être traduite par un processus
- \* un processus est sensible aux signaux
- \* il contient que des instructions séquentielles
- \* la durée de vie d'un processus est celle de la simulation; un processus est cyclique



D.D

53

## 2.10 Instructions concurrentes - Processus

```
{label: } process { liste_des_signaux_surveillés}
Déclarations
begin
Instructions séquentielles
end process {label};
```

liste de sensibilité

- \* Les déclarations sont élaborés une seule fois, à l'initialisation
- \* un processus s'exécute au moins une fois à l'initialisation jusqu'à l'instruction **WAIT** (si elle existe)
- ❖ à chaque événement intervenant sur un des signaux surveillés, le processus va s'exécuter
- ❖ Restrictions:
  - \* l'instruction **wait** bloque le processus - voir détail sur l'instruction **wait** au chapitre 2.10 Instructions séquentielles
  - \* l'instruction **wait** ne peut s'utiliser à l'intérieur d'un processus que si celui-ci ne possède pas de liste de signaux surveillés



D.D

54

## 2.10 Instructions concurrentes - Processus

Processus avec liste de sensibilité :

```
{label: } process
  {liste_des_signaux_surveillés}
  Déclarations
begin
  Instructions séquentielles
end process {label};
```

\* S'exécute à l'initialisation une fois

Processus sans liste de sensibilité:

```
{label: } process
  Déclarations
begin
  wait on {signaux_surveillés }
  Instructions séquentielles
end process {label};
```

\* Ne s'exécute pas lors de l'initialisation



D.D

55

## 2.10 Instructions concurrentes

### ❖ Block

- \* réuni des instructions **concurrentes**
- \* est la base de hiérarchie en VHDL
- \* toute hiérarchie VHDL se ramène à un ou plusieurs blocs imbriqués
- \* permet de garder des affectations de signaux - circuits synchrones

```
label : block
  { généricité_et_port}
  ... Déclarations ...
begin
  ....Instruction concurrentes
end block;
```

### ❖ Appel concurrent de procédure

- \* a la même syntaxe que l'appel séquentiel de procédure
- \* **domaine concurrent** - **paramètres de la procédure ne peuvent être que de signaux ou de constantes**

### ❖ Instruction concurrente d'assertion



D.D

56

## 2.11 Instructions séquentielles

- ❖ Domaine d'utilisation des instructions séquentielles : dans le corps d'un processus ou sous-programme

- \* Instruction WAIT
- \* Instruction ASSERT
- \* Instructions d'affectation de variables et de signaux
- \* Appel de procédures
- \* Instructions conditionnelles
- \* Instructions de contrôle
- \* Instruction nulle - null



D.D

57

## 2.11 Instructions séquentielles

- ❖ Instruction WAIT
  - \* L'exécution de processus ou de programme peut être suspendue, en fonction d'une condition donnée et pour un temps indiqué par l'instruction wait
  - \* wait { on liste \_signaux } { until condition\_booléenne } { for temps };
  - \* Tout événement arrivant sur un signal de la liste donnée provoque l'évaluation de la condition booléenne.

- ❖ Exemple:

```
process
begin
    wait on CLK;
    if clk'event and CLK='1' then
        q <=d after 10 ns;
    end if;
end process;
```

```
process
begin
    wait until CLK'event and CLK ='1';
    q <=d after 10 ns;
end process;
```



D.D

58

## 2.11 Instructions séquentielles

### ❖ Instruction **ASSERT**

- \* Surveille une condition et émet un message dans le cas où celle-ci est **fausse**.
- \* L'exécution du programme reprend alors immédiatement derrière l'instruction d'assertion.
- \* **assert** condition {**report** mesg} {**severity** niveau}
- \* **assert** NOW<1 min report "Fin simu" severity ERROR;
- \* Type Severity\_Level is (note, warning, error, faillure);



D.D

59

## 2.11 Instructions séquentielles

### ❖ Instructions d'affectation de variables et de signaux

- \* Variable1 **:=** 2;
- \* Signal1 **<=** 2 **after** 20 ns;

### ❖ Appel de procédure

- \* **procedure** alfa (nr:**integer**, msg:**string**) --définition de la procédure
- \* Alfa(4, "GO"); --appel positionnel
- \* Alfa(nr =>4, msg =>"GO");

### ❖ Instruction **return**

- \* Réservée aux sous-programmes

### ❖ Instruction nulle

- \* **null**
- \* l'exécution passe à la ligne suivante
- \* L'instruction nulle n'est pas nécessaire à la compilation de processus ou de corps de procédures vides



D.D

60

## 2.11 Instructions séquentielles

### ❖ Instructions conditionnelles

\* **if** condition1 **then** traitement1  
  **elsif** condition2 **then** traitement2  
  **else** traitement3  
  **end if**;

\* Instructions de choix:  
  **case** expression **is**  
    **when** val1 **=>** instructions1  
    **when** val2 **=>** instructions2  
    **when** others **=>** instr3  
  **end case**;



## 2.11 Instructions séquentielles

### ❖ Instructions de boucle

\* **loop**  
  \* Instructions séquentielles  
  **end loop**;

\* **for** indice **in** intervalle **loop**  
  \* Instructions séquentielles  
  **end loop**;

\* **while** condition **loop**  
  \* Instructions séquentielles  
  **end loop**;

\* **next** label\_de\_boucle **when** condition   --arête l'itération en cours

\* **exit** label\_de\_boucle **when** condition



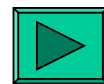
## Bascule D

```
entity basculeD is
port(
  D, CLK: in std_logic;
  Q: inout std_logic;
  Qb: out std_logic);
end basculeD;
architecture beh1 of basculeD is
begin
  process
  begin
    wait until clk'event and clk='1';
    Q <= d;
    Qb <= not Q;
  end process;
end beh1 ;
```



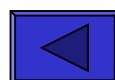
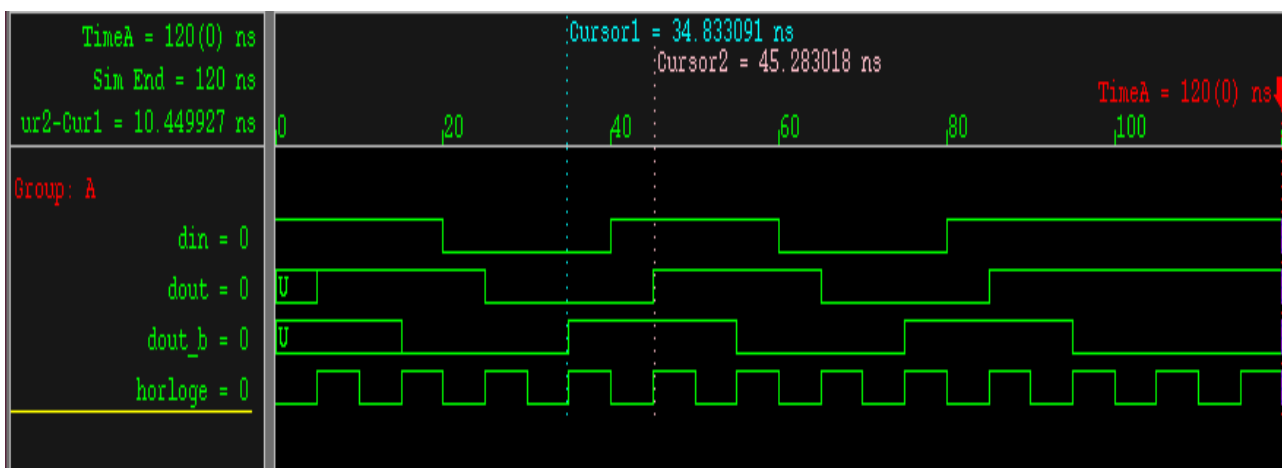
D.D

```
entity basculeD is
port(
  D, CLK: in std_logic;
  Q: inout std_logic;
  Qb: out std_logic);
end basculeD;
architecture beh2 of basculeD is
Begin
  Qb <= not Q;
  process
  begin
    wait until clk'event and clk='1';
    Q <= d;
  end process;
end beh2 ;
```



63

## Bascule D - architecture beh1

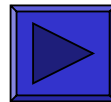
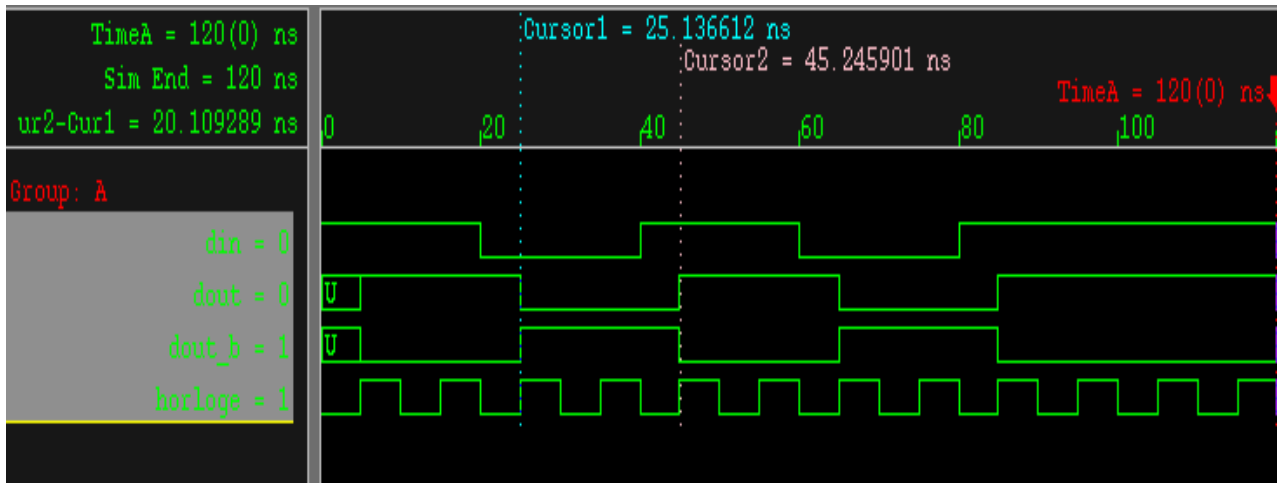


D.D

64



## Bascule D - architecture beh2



D.D

65

## Bascule D

```
entity basculeD is
  port(
    D, CLK: in std_logic;
    Q: out std_logic;
    Qb: out std_logic);
end basculeD;

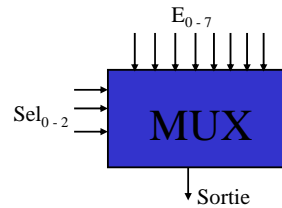
architecture beh3 of basculeD is
begin
  process
  begin
    wait until clk'event and clk='1';
    Q <= d ;
    Qb <= not D;
  end process;
end beh3 ;
```



D.D

66

## Multiplexeur 8 bits (3 entrées de sélection)



```

entity mux is
  port (
    sel : in integer range 0 to 7 ;
    entree : in std_logic_vector(0 to 7);
    Sortie : out std_logic);
end mux;

Architecture beh of mux is
begin
  with sel select
    sortie <= entree(0) when 0,
              entree(1) when 1,
              entree(2) when 2,
              entree(3) when 3,
              entree(4) when 4,
              entree(5) when 5,
              entree(6) when 6,
              entree(7) when 7;
end beh;
  
```

-- instruction de choix concurrente

## 2.12 Généricité

- ❖ une entité est générique, jamais une architecture
- ❖ permet de définir une famille de composants par rapport à une caractéristique donnée
- ❖ valeur fixée lors de l'instance de l'entité

```

* entity Porte_et is
  generic (nombre_entrees: Natural:=2);
  port ( A: in STD_LOGIC_VECTOR (1 to nombre_entrees);
         B: out STD_LOGIC);
end Porte_et;
  
```

\* Instanciation du composant :

```

* Porte_et_4entrees : Porte_et generic map (nombre_entrees => 4)
  port map (A=> alfa, B=>beta);
  
```

c'était défini au par avant :

- ★ Signal alfa : std\_logic\_vector (1 to 4);
- ★ Signal beta : std\_logic;

## 2.12 Généricité

### Instruction concurrente **generate**

- ❖ Permet l'élaboration itérative ou conditionnelle de lignes de code
- ❖ 2 formes : conditionnelle et itérative
- ❖ Forme conditionnelle
  - \* label : **if** condition\_booléenne **generate**  
     suite d'instructions concurrentes  
   **end generate** {label};
- ❖ Forme itérative
  - \* **for** nom\_du\_paramètre\_de\_la\_génération **in** intervalle discret **generate**  
     suite d'instructions concurrentes  
   **end generate** {label};



D.D

69

## 2.12 Généricité

- ❖ Exemple: registre à décalage **générique (N)**
  - \* entrées Data et Clock - std\_logic;
  - \* sortie S est un std\_logic\_vector (N-1 downto 0)
  - \* architecture structurelle en utilisant un composant de type bascule D

```
entity reg_decalage is
  GENERIC( N: natural :=8);
  port (
    Data, clock : in std_logic;
    S : out std_logic_vector(N-1 downto 0));
end reg_decalage;
```



D.D

70

## 2.12 Généricité

**ARCHITECTURE** structurelle **OF** reg\_decalage **IS**

```

COMPONENT basculeD PORT (
    D, clk : in STD_logic;
    Q : OUT STD_LOGIC ;
    Qb : out std_logic );

END COMPONENT;

for all : basculeD use entity work.basculeD(beh3);

begin

gauche : basculeD port map (data, clock, S(N-1), open);

boucle : for i IN 1 to N-1 generate
    circ : basculeD PORT MAP (S(N-i), clock, S(N-i-1), open);
END GENERATE boucle;

END structurelle ;

```



D.D

71

## 2.12 Généricité

**ARCHITECTURE** structurelle **OF** reg\_decalage **IS**

```

COMPONENT basculeD PORT (
    D, clk : in STD_logic;
    Q : OUT STD_LOGIC ;
    Qb : out std_logic );

END COMPONENT;

signal aux : std_logic_vector (N-1 downto 0);

for all : basculeD use entity work.basculeD(beh3);

begin

gauche : basculeD port map (data, clock, aux(N-1), open);

boucle : for i IN 1 to N-1 generate
    circ : basculeD PORT MAP (aux(N-i), clock, aux(N-i-1), open);
END GENERATE boucle;

S <= aux ;

END structurelle ;

```



D.D

72

## 2.12 Généricité

**ARCHITECTURE** beh **OF** reg\_decalage **IS**

**begin**

comport : **process**

**begin**

**wait until** clock'event and clock ='1';

s(n-1) <= Data ;

copie : **For** i **IN** n-1 **downto** 1 **LOOP**

s(n-i-1) <= s(n-i);

**end loop** copie;

**end process** comport ;

**END** beh;



D.D

73

## 2.12 Généricité

**ARCHITECTURE** beh **OF** reg\_decalage **IS**

signal aux : std\_logic\_vector (N-1 downto 0);

**begin**

s <= aux ;

comport : **process**

**begin**

**wait until** clock'event and clock ='1';

aux(n-1) <= Data ;

copie : **For** i **IN** n-1 **to** 1 **LOOP**

aux(n-i-1) <= aux(n-i);

**end loop** copie;

**end process** comport ;

**END** beh;



D.D

74

## 2.13. Compilation, élaboration, exécution, exploitation

### ❖ Utilisation du VHDL :

- \* compilation et éditions de liens - aspects statiques de la description;
- \* élaboration - aspects paramétrables de la description;
  - effectue l'instanciation de la description VHDL;
  - si la structure est hiérarchique il faut commencer par le plus haut niveau
- \* exécution - pour un simulateur  $\Leftrightarrow$  simulation
  - pour un synthétiseur  $\Leftrightarrow$  la synthèse
- \* exploitation des résultats plus spécifique de la simulation



D.D

75

## 2.14. Synthèse

### ❖ C'est un processus de traduction :

- \* entrée : description comportementale
- \* sortie : description structurelle à partir d'éléments de base prédéfinis - **standard cells**

### ❖ Respect de la fonctionnalité originale

### ❖ Respect des contraintes en temps et en topologie

### ❖ Représentation physique :

- \* ASIC
- \* FPGA



D.D

76

## 2.14. VHDL et la synthèse

### ❖ Points forts :

- \* généralité. Le domaine est en évolution rapide. La généralité du langage et sa capacité d'abstraction le rend apte à supporter cette évolution.
- \* lien avec la simulation

### ❖ Points faibles :

- \* il n'y a pas pour l'instant de sous-ensembles pour la synthèse standardisés
- \* la sémantique de VHDL pour la simulation est définie et standardisée, mais pas la sémantique VHDL pour la synthèse !



D.D

77

## Synthèse à partir de VHDL

### ❖ Deux voies :

- \* synthèse logique - industrie
  - \* spécification comportementale de niveau **RTL ( Register Transfer Level)**
  - \* bibliothèque d'éléments matériels - design kit - standard cells
- \* synthèse architecturale - encore du domaine de l'investigation
  - \* spécification comportementale abstraite
  - \* compilation, allocation et partage de ressources, séquençement



D.D

78

## 2.14. Synthèse logique : principes

- ❖ Sous-ensemble de VHDL pour la synthèse:
  - \* descriptions **synchrones** (horloges explicites)
  - \* expressions de délais ignorées (clauses **after**)
  - \* restrictions sur l'écriture d'un process
  - \* seulement certains types sont permis
- ❖ Le détail des restrictions varie d'un fournisseur à l'autre
- ❖ On va présenter les restrictions minimales
- ❖ La configuration n'est pas supporté pour la synthèse. Il faut que le nom du "component" = nom du model VHDL



D.D

79

## 2.14. Types pour la synthèse logique

- ❖ énumérés
- ❖ type BIT et opérations associées
- ❖ types du package STD\_LOGIC
- ❖ entiers :
  - \* la plage de variation détermine le nombre de bits nécessaires
  - \* les bits ne sont pas individuellement accessibles
- ❖ Types non synthétisables
  - \* REAL, ACCES, FILE
  - \* Types physiques: TIME ou définis par l'utilisateur



D.D

80



## 2.14. Synthèse - remarques

- ❖ usage des types énumérés fortement recommandé : on reste synthétique et on laisse à l'outil de synthèse le choix de la bonne stratégie de codage
- ❖ il n'y a pas de consensus quant au codage des types énumérés
- ❖ seuls les tableaux à une dimension sont synthétisables à cause de la difficulté du calcul d'adresse. Les agrégats sont mis à plat.
- ❖ les types prédéfinis du package IEEE\_1164 sont fortement recommandés



D.D

81

## 2.14. Objets et synthèse logique

- ❖ Constantes
  - \* Acceptées pour tous les types synthétisables. Leur déclaration ne produit aucun matériel. Leur usage produit du matériel dans les cas suivants :
    - \* partie droite d'affectation de signal
    - \* dans une instruction **if** ou **case**
    - \* dans une instruction concurrente conditionnelle
- ❖ Signaux
  - \* assimilables à des fils ou bus
- ❖ Variables (affectation de variable)
  - \* pas de règle générale pour déduire le matériel produit
  - \* c'est le contexte d'utilisation qui est déterminant



D.D

82

## 2.14. Valeurs initiales

- ❖ En VHDL 3 types:
  - \* Valeurs par défaut héritée de la définition du type ou du sous-type
  - \* Initialisation explicite à la déclaration de l'objet
  - \* Valeur affectée par instruction au début d'un process
  
- ❖ Synthèse - les 2 premiers cas sont ignorés par les outils de synthèse



D.D

83

## Paramètres génériques

- ❖ Permet de définir une famille de composants par rapport à une caractéristique donnée
  
- ❖ Valeur est fixé lors de l'instanciation de l'entité
  
- ❖ Synthèse :
  - \* Le type de paramètres génériques synthétisable est restreint en fonction de l'outil
  - \* Pour SYNOPSYS : seulement les paramètres génériques de type **INTEGER** ou **énumérés** sont synthétisable.



D.D

84

## 2.14. Instructions séquentielles et synthèse logique

- ❖ Instruction de synchronisation :
  - \* sur signal de la liste de sensibilité (process ( A,B,C) ou wait A,B,C )
    - ★ matériel combinatoire
  - \* sur signal reconnu comme horloge (clk '**event**' ou clk='1'). Seules les transitions de '0' à '1' ' sont reconnues ou l'inverse
- ❖ Instructions d'itération
  - \* **for** : synthétisable dans la mesure où les bornes de variation de l'index sont statiques
  - \* **while** : non-synthétisable au niveau RTL
- ❖ Appel de sous-programmes
  - \* certains fonctions sont connues de la synthèse - pas de matériel additionnel
  - \* fonctions passage de paramètres par valeurs - combinatoire
  - \* fonctions passage de paramètres par référence - pas du domaine de la synthèse logique



## 2.14. Processus pour la synthèse logique

- ❖ Problème principal : combinatoire ou séquentiel ?
- ❖ Processus combinatoire si :
  - \* liste de sensibilité ou un seul point de synchronisation (wait)
  - \* pas de déclaration de variable ou bien variables locales systématiquement affectées avant d'être lues
  - \* les signaux lus se trouvent tous dans la liste de sensibilité
  - \* Les signaux écrits sont tous affectés quelques soient les branchements parcourus
- ❖ Si création de mémoire - processus séquentiel
  - \* style synchrone - bascule D



## 2.14. Instructions concurrentes et synthèse logique

- ❖ Affectation de signal simple - matériel combinatoire
- ❖ Affectation conditionnelle ou sélectionnée
  - \*  $S \leq A$  when  $X = '1'$  else  $B$  when  $Y = '1'$  else  $C$  - **combinatoire**
  - \*  $S \leq A$  when  $X = '1'$  else  $B$  when  $Y = '1'$  else  $S$  - **séquentiel**
- ❖ Instanciation (de composants , generate )
  - \* Les notions d'entité et de composant permettent de hiérarchiser la description d'un système
  - \* Configuration - ne sont pas supportés
  - \* durant le processus de synthèse, différentes interprétations possibles
    - ★ instances « aplaties »
    - ★ composant synthétisé une fois. Seule la frontière est resynthétisée pour chaque instance
    - ★ composant synthétisé une fois et dupliqué pour chaque instance



## 2.14. Synthèse architecturale

- ❖ Elle travaille sur des spécifications VHDL abstraites pour aboutir à un niveau où la synthèse logique puisse être appliquée
- ❖ Étapes :
  - \* transformations comportementales sur la spécification: élimination du code superflu ou redondant, mise à plat des boucles, propagation des constantes
  - \* partitionnement
  - \* ordonnancement
    - ★ construction de la partie **contrôle**
  - \* allocation de ressources
    - ★ construction de la partie **chemin de données**
  - \* production de la description RTL obtenue
- ❖ La synthèse logique est la continuation de la synthèse architecturale. En distinguant les deux, on distingue ce qu'on sait bien faire de ce qu'on ne maîtrise pas encore.



## 2.14. Remarque finale sur la synthèse

- ❖ La sémantique de VHDL pour la synthèse n'est actuellement définie que pour un sous-ensemble du langage pour les raisons suivantes:
  - \* Les outils industriels n'abordent pour l'instant que la synthèse logique (niveau RTL)
  - \* Certaines constructions VHDL ne sont pas synthétisables



D.D

89

## 2.14. Performances

- ❖ Timing
  - \* Estimation des retards induits par les éléments combinatoires, en particulier détection des "chemins critiques"
  - \* Estimation des retards induits par les éléments des mémoires
  - \* Estimation du temps de cycle de l'horloge
- ❖ Surface
  - \* Estimation en fonction des composants utilisées:
    - ★ Standard cells
    - ★ FPGA
- ❖ Consommation
- ❖ Testabilité, fiabilité, "manufacturabilité"



D.D

90

## 2.14. Contraintes temporelles

- ❖ 4 catégories de contraintes temporelles peuvent être introduites pour optimiser un circuit. --> temps minimums ou maximums entre différents points du circuits:
  - \* Entrées -registres
  - \* Registres - sorties
  - \* Entrées - sorties
  - \* Registres-registres
- ❖ Définition de la période de l'horloge globale  $T_{\text{periode}}$  + le temps additionnel sur les entrées  $T_{\text{in}}$  et le temps additionnel sur les sorties  $T_{\text{out}}$
- ❖  $T_{\text{out}}$  - information sur la charge équivalente sur chaque sortie = fan-out
- ❖  $T_{\text{in}}$  - information sur la puissance de sortie du composant connecté en entrée
- ❖  $T_{\text{periode}}$ 
  - \* information de "skew" = déphasage maximal entre les arrivées de l'horloge sur les bascules
  - \* Information sur la latence = temps maximal entre la commutation de l'horloge et la dernière bascule recevant l'horloge; La latence intervient sur le "skew" entre les composants externes.



D.D

91

## 2.14. Optimisation temporelle

- ❖ Permet d'améliorer les caractéristiques de temps de traversée et de fréquence d'horloge
- ❖ Les outils de CAO ne modifient pas le nombre de bascules du circuits lors de l'optimisation
- ❖ Les outils CAO optimise la logique combinatoire interne
- ❖ Il faut isoler le chemin le plus long de traversée de la logique combinatoire = chemin critique --> **OPTIMISATION DU CHEMIN CRITIQUE :**
  - \* Toute logique combinatoire partagée entre le chemin critique et d'autres chemins de logique est dupliquée pour permettre une optimisation poussée sur le chemin critique.
  - \* Augmentation de la taille des circuits après une optimisation temporelle



D.D

92

# Les FPGAs

## Xilinx

Spartan

et

Virtex



D.D

## Structure des FPGAs

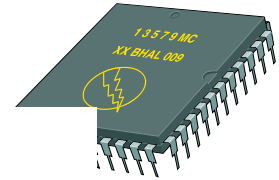
- ❖ CI Standards (portes, bascules, décodeurs, MPX...)
- ❖ CI ASIC 'sur mesure'
- ❖ CI Configurable (FPGA ...)

### Les différents choix :

Coût  
Vitesse de conception  
Vitesse d'exécution  
Consommation/poids  
Fiabilité ...



D.D



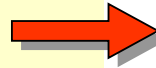
- ❖ Circuits Semi-Custom configurables

Circuits programmables une fois ou plusieurs fois  
Technologies Fusible ou SRAM

- ❖ PLD : PLA / PLS  
Programmable Logic Devices

- ❖ EPLD/CPLD Electrically PLD /  
Complex PLD

- ❖ FPGA  
Field Programmable Gate Array



ALTERA  
AMD  
LATTICE  
XILINX  
...

ACTEL  
ALTERA  
XILINX  
...



D.D

95

- ❖ Techniques de programmation

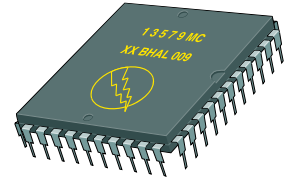
|        |                                                                       |
|--------|-----------------------------------------------------------------------|
| OTP    | <b>One Time Programmable</b><br>Fuse ou Antifuse                      |
| EPROM  | <b>Electriquement programmable, effaçable au rayons UV</b>            |
| EEPROM | <b>EEPROM effaçable électriquement</b>                                |
| FLASH  | <b>EEPROM à effacement collectif</b>                                  |
| SRAM   | <b>Static RAM : mémoire CMOS volatile<br/>+ ROM ou EEPROM externe</b> |



D.D

96

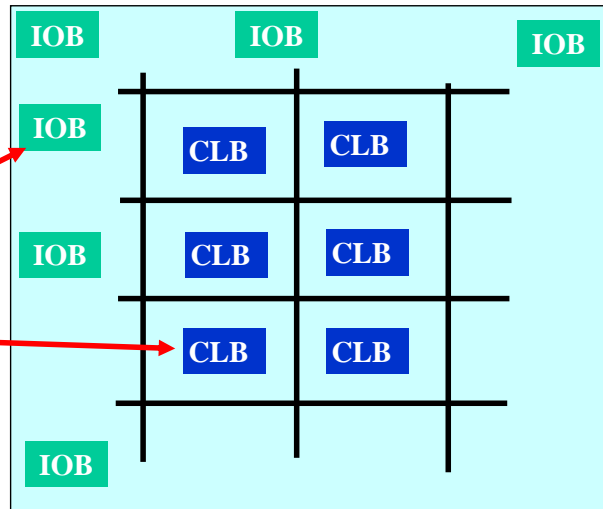




## ❖ Structure

IOB : Input/Output  
Block

CLB : Configurable  
Logic Block

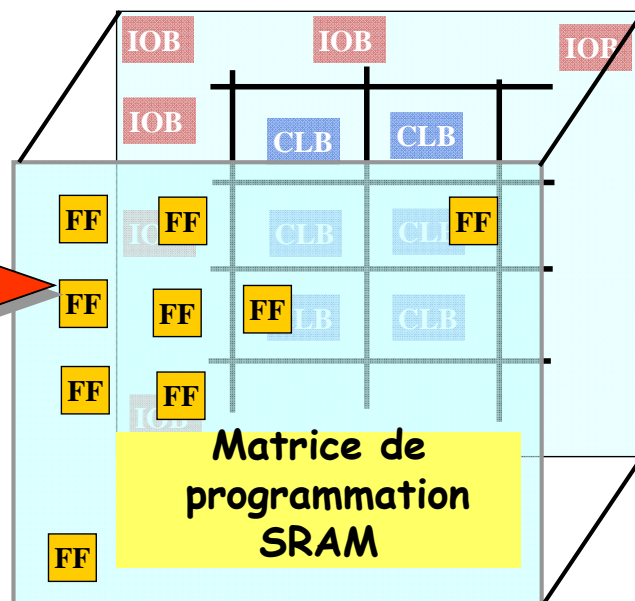


D.D

97

## ❖ Programmation

- Anti-Fusible
- Mémoire SRAM  
(FPGA Spartan)



D.D

98

# SPARTAN II

D.D

## Structure des FPGAs (SPARTAN)

### ❖ Structure IO

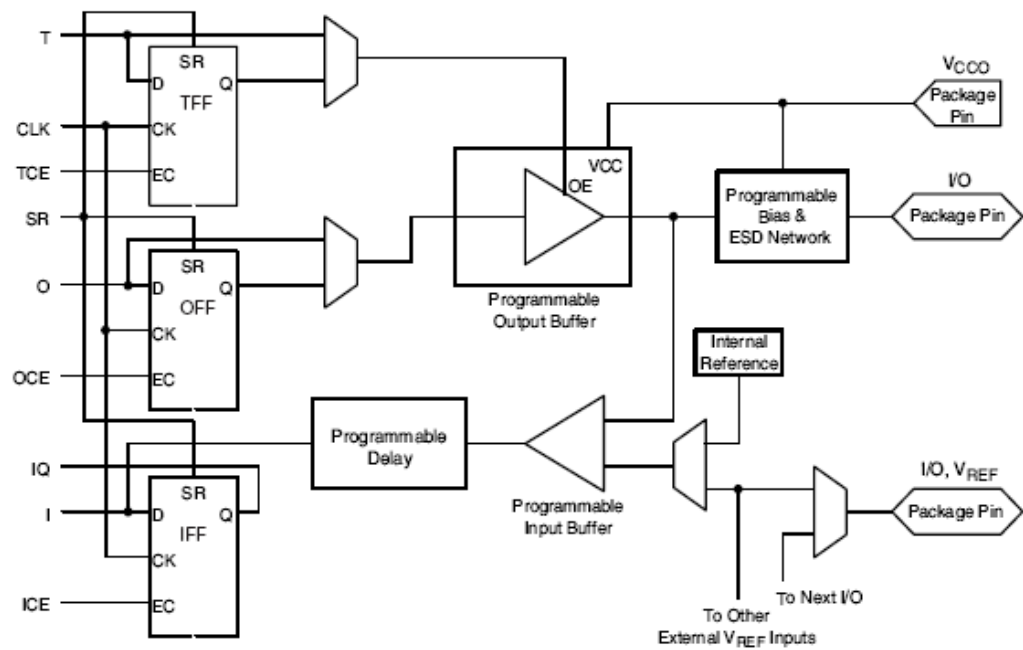
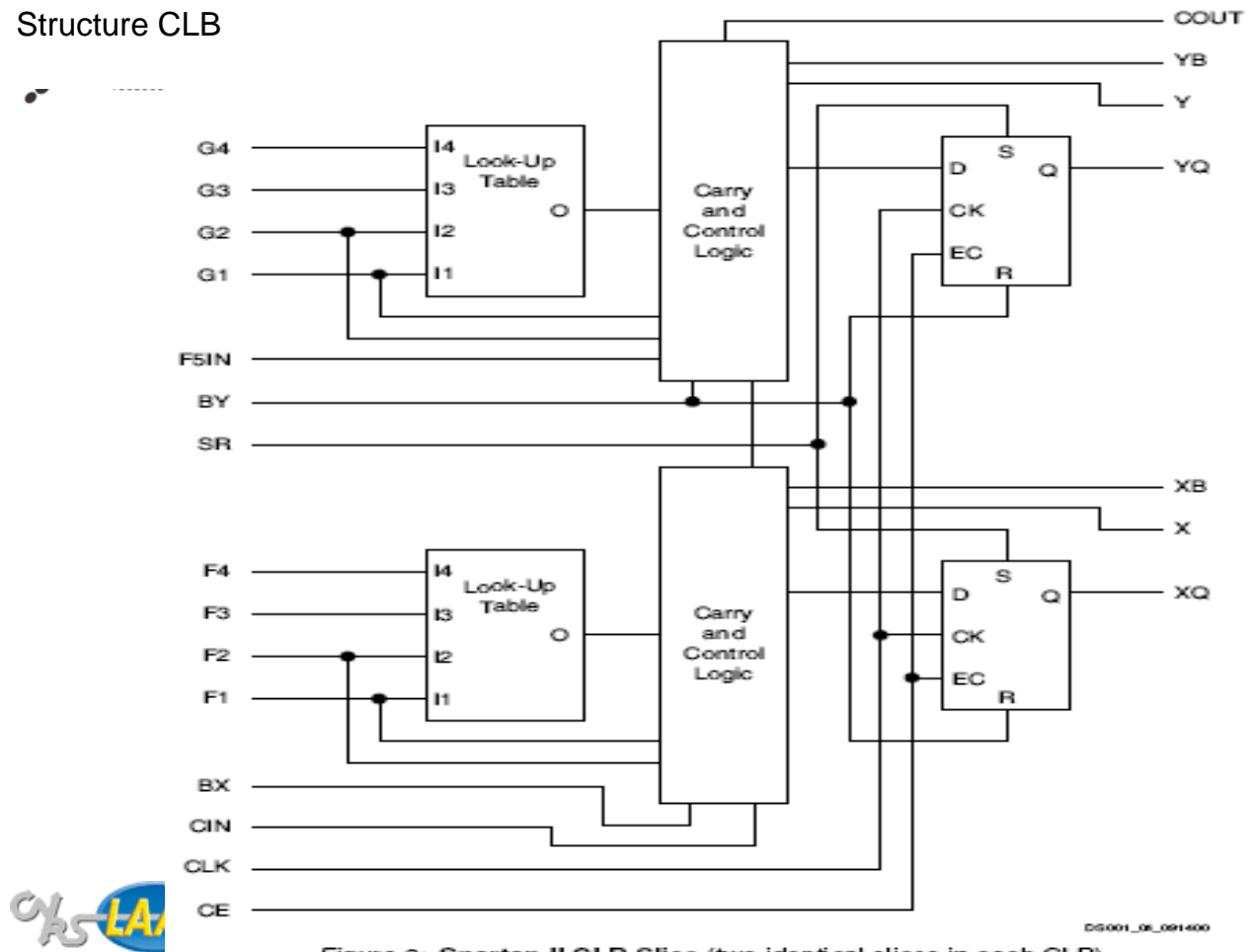


Figure 1: Spartan-II Input/Output Block (IOB)

00001\_02\_000000

## ❖ Structure CLB

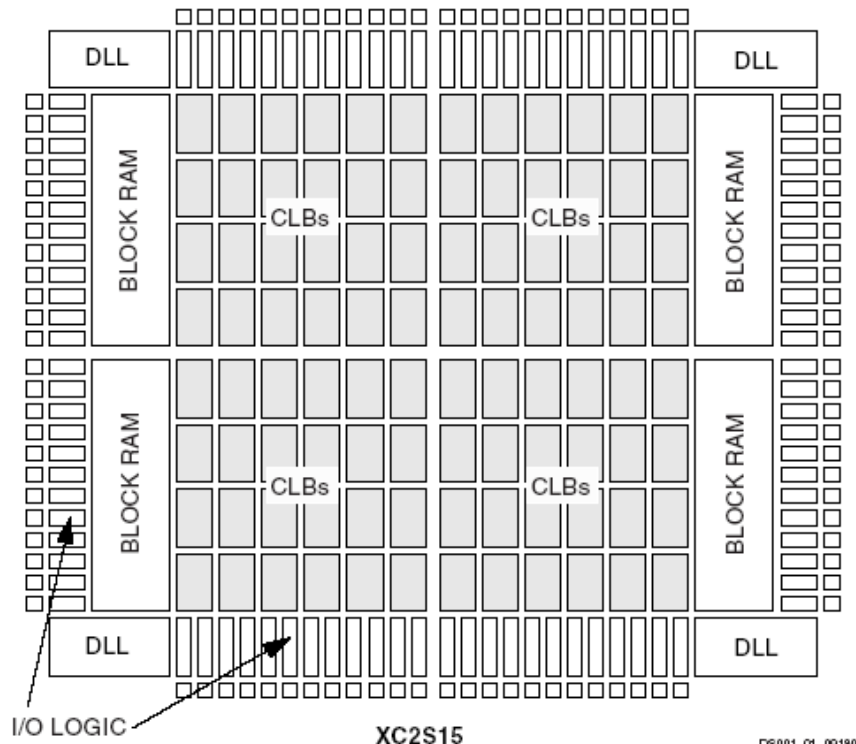


## FPGA Spartan II

| Device  | Logic Cells | System Gates (Logic and RAM) | CLB Array (R x C) | Total CLBs | Maximum Available User I/O <sup>(1)</sup> | Total Distributed RAM Bits | Total Block RAM Bits |
|---------|-------------|------------------------------|-------------------|------------|-------------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| XC2S15  | 432         | 15,000                       | 8 x 12            | 96         | 86                                        | 6,144                      | 16K                  |
| XC2S30  | 972         | 30,000                       | 12 x 18           | 216        | 132                                       | 13,824                     | 24K                  |
| XC2S50  | 1,728       | 50,000                       | 16 x 24           | 384        | 176                                       | 24,576                     | 32K                  |
| XC2S100 | 2,700       | 100,000                      | 20 x 30           | 600        | 196                                       | 38,400                     | 40K                  |
| XC2S150 | 3,888       | 150,000                      | 24 x 36           | 864        | 260                                       | 55,296                     | 48K                  |
| XC2S200 | 5,292       | 200,000                      | 28 x 42           | 1,176      | 284                                       | 75,264                     | 56K                  |



# FPGA Spartan II



D.D

103

## DLL (Delay Lock Loop)

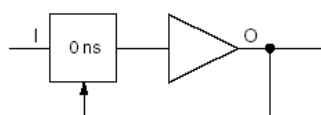
- ❖ Delay-Locked Loop (DLL) circuits which provide zero propagation delay and low clock skew between output clock signals distributed throughout the device.
- ❖ Each DLL can drive up to two global clock routing networks within the device. The global clock distribution network minimizes clock skews due to loading differences. By monitoring a sample of the DLL output clock, the DLL can compensate for the delay on the routing network, effectively eliminating the delay from the external input port to the individual clock loads within the device.
- ❖ The DLL can provide multiple phases of the source clock.
- ❖ The DLL can also act as a clock doubler or it can divide the user source clock by up to 16.



D.D

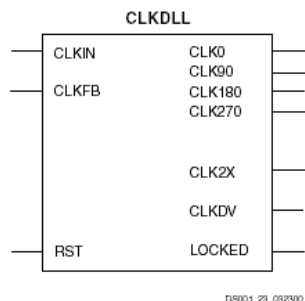
104

## Library DLL Symbols



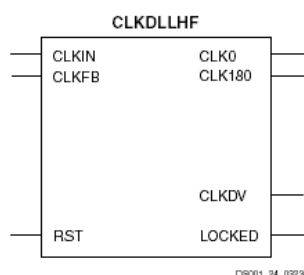
### Simplified DLL Macro Symbol BUFGDLL

This macro delivers a quick and efficient way to provide a system clock with zero propagation delay throughout the device.



### Standard DLL Symbol CLKDLL

access to the complete set of DLL features



### High-Frequency DLL Symbol CLKDLLHF

access to the complete set of DLL features



D.D

105

## Block RAM Features

- ❖ The Spartan-II FPGA family provides dedicated blocks of on-chip, true dual-read/write port synchronous RAM, with 4096 memory cells.
- ❖ Each port of the block RAM memory can be independently configured as a read/write port, a read port, a write port, and can be configured to a specific data width.
- ❖ **Operating Modes**
  - \* Block RAM memory supports two operating modes.
    - \* Read Through
    - \* Write Back



D.D

106

## Block RAM Features

### Block RAM Characteristics:

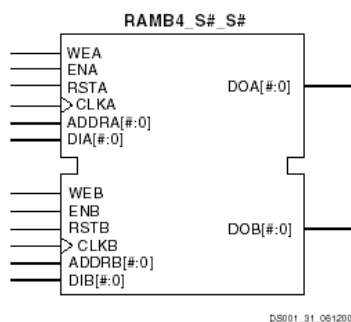
- ❖ 1. All inputs are registered with the port clock and have a setup to clock timing specification.
- ❖ 2. All outputs have a read through or write back function depending on the state of the port WE pin. The outputs relative to the port clock are available after the clock-to-out timing specification.
- ❖ 3. The block RAM are true SRAM memories and do not have a combinatorial path from the address to the output. The LUT cells in the CLBs are still available with this function.
- ❖ 4. The ports are completely independent from each other (*i.e.*, clocking, control, address, read/write function, and data width) without arbitration.
- ❖ 5. A write operation requires only one clock edge.
- ❖ 6. A read operation requires only one clock edge.
- ❖ 7. The output ports are latched with a self timed circuit to guarantee a glitch free read. The state of the output port will not change until the port executes another read or write operation.



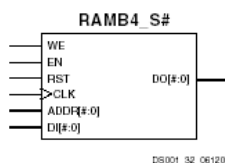
D.D

107

## RAM Library Primitives



### Dual-Port Block RAM Memory



### Single-Port Block RAM Memory



D.D

108

## RAM Library Primitives

Table 10: Available Library Primitives

| Primitive     | Port A Width | Port B Width |
|---------------|--------------|--------------|
| RAMB4_S1      | 1            | N/A          |
| RAMB4_S1_S1   |              | 1            |
| RAMB4_S1_S2   |              | 2            |
| RAMB4_S1_S4   |              | 4            |
| RAMB4_S1_S8   |              | 8            |
| RAMB4_S1_S16  |              | 16           |
| RAMB4_S2      | 2            | N/A          |
| RAMB4_S2_S2   |              | 2            |
| RAMB4_S2_S4   |              | 4            |
| RAMB4_S2_S8   |              | 8            |
| RAMB4_S2_S16  |              | 16           |
| RAMB4_S4      | 4            | N/A          |
| RAMB4_S4_S4   |              | 4            |
| RAMB4_S4_S8   |              | 8            |
| RAMB4_S4_S16  |              | 16           |
| RAMB4_S8      | 8            | N/A          |
| RAMB4_S8_S8   |              | 8            |
| RAMB4_S8_S16  |              | 16           |
| RAMB4_S16     | 16           | N/A          |
| RAMB4_S16_S16 |              | 16           |

Table 11: Block RAM Port Aspect Ratios

| Width | Depth | ADDR Bus   | Data Bus   |
|-------|-------|------------|------------|
| 1     | 4096  | ADDR<11:0> | DATA<0>    |
| 2     | 2048  | ADDR<10:0> | DATA<1:0>  |
| 4     | 1024  | ADDR<9:0>  | DATA<3:0>  |
| 8     | 512   | ADDR<8:0>  | DATA<7:0>  |
| 16    | 256   | ADDR<7:0>  | DATA<15:0> |



D.D

109

## RAM Library Primitives

- ❖ Block RAM instances can have LOC properties attached to them to constrain the placement. The block RAM placement locations are separate from the CLB location naming convention, allowing the LOC properties to transfer easily from array to array.

- ❖ The LOC properties use the following form:

$$\text{LOC} = \text{RAMB4\_R\#C\#}$$

RAMB4\_R0C0 is the upper left RAMB4 location on the device.



D.D

110

# VIRTEX II



D.D

## Virtex II

- ❖ Virtex2 successeur du Virtex-E
- ❖ Produit en Décembre 2000
- ❖ Gravé en 0.12µm
- ❖ Architecture totalement repensée
  - \* Grande rapidité entre les modules
- ❖ Multiplieurs câblées (18 bits x 18 bits)
  - \* Plus rapide que les portes logiques
  - \* Associé à un bloc mémoire
- ❖ Matrices de switches bufférisées
  - \* Réduit effet RC
- ❖ DCI –digitally controlled impedances



D.D



## Virtex II

- ❖ Interconnections directes entre CLB
- ❖ Bloc mémoire double port
  - \* Entrées, sorties et Horloges séparées
  - \* Configurable de 16K \* 1bit à 512 \* 36 bits
  - \* 3 Modes d'écriture
    - ★ Write First
    - ★ Read First
    - ★ No Change
  - \* Éviter l'écriture simultanée sur la même case mémoire



D.D

113

## Virtex II

- ❖ Horloge d'origine partagée en 4 directions
  - \* FPGA mieux irrigué
- ❖ DCM
  - \* Avance de phase
  - \* Multiplication par 2, d'un quotient
- ❖ Horloge interne jusqu'à 420 MHz
- ❖ Horloge non utilisé, non alimenté
  - \* Gain en énergie



D.D

114

## Distribution de l'horloge

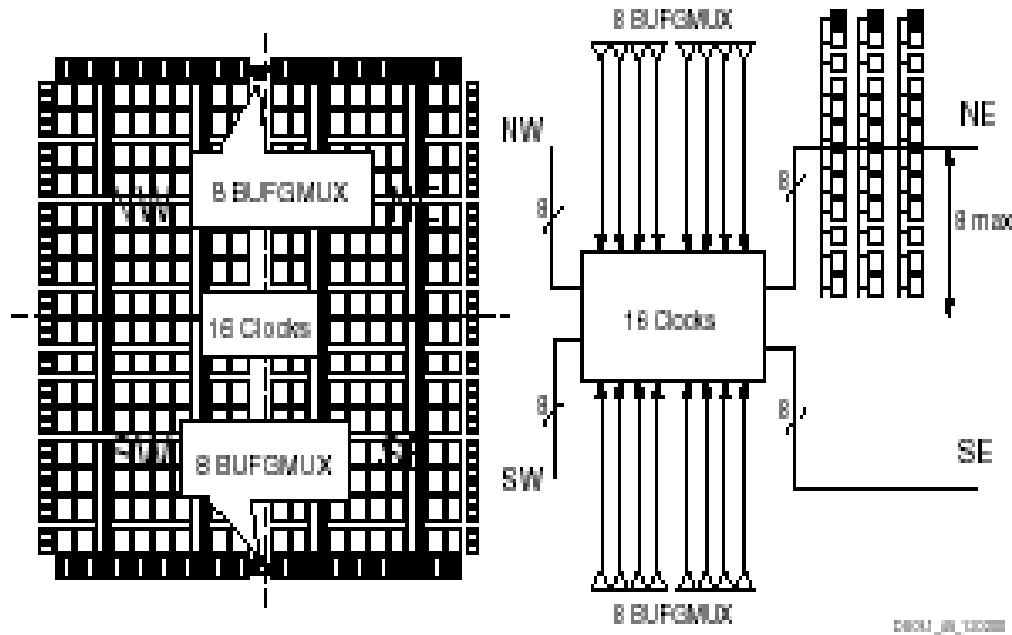


Figure 40: Virtex-II Clock Distribution

## La famille Virtex II

Table 1: Virtex-II Field-Programmable Gate Array Family Members

| Device   | System Gates | CLB<br>(1 CLB = 4 slices = Max 128 bits) |        |                               | Multiplier Blocks | SelectRAM Blocks |                 | DCMs | Max I/O Pads <sup>(1)</sup> |
|----------|--------------|------------------------------------------|--------|-------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|------|-----------------------------|
|          |              | Array Row x Col.                         | Slices | Maximum Distributed RAM Kbits |                   | 18 Kbit Blocks   | Max RAM (Kbits) |      |                             |
| XC2V40   | 40K          | 8 x 8                                    | 256    | 8                             | 4                 | 4                | 72              | 4    | 88                          |
| XC2V80   | 80K          | 16 x 8                                   | 512    | 16                            | 8                 | 8                | 144             | 4    | 120                         |
| XC2V250  | 250K         | 24 x 16                                  | 1,536  | 48                            | 24                | 24               | 432             | 8    | 200                         |
| XC2V500  | 500K         | 32 x 24                                  | 3,072  | 96                            | 32                | 32               | 576             | 8    | 264                         |
| XC2V1000 | 1M           | 40 x 32                                  | 5,120  | 160                           | 40                | 40               | 720             | 8    | 432                         |
| XC2V1500 | 1.5M         | 48 x 40                                  | 7,680  | 240                           | 48                | 48               | 864             | 8    | 528                         |
| XC2V2000 | 2M           | 56 x 48                                  | 10,752 | 336                           | 56                | 56               | 1,008           | 8    | 624                         |
| XC2V3000 | 3M           | 64 x 56                                  | 14,336 | 448                           | 96                | 96               | 1,728           | 12   | 720                         |
| XC2V4000 | 4M           | 80 x 72                                  | 23,040 | 720                           | 120               | 120              | 2,160           | 12   | 912                         |
| XC2V6000 | 6M           | 96 x 88                                  | 33,792 | 1,056                         | 144               | 144              | 2,592           | 12   | 1,104                       |
| XC2V8000 | 8M           | 112 x 104                                | 46,592 | 1,456                         | 168               | 168              | 3,024           | 12   | 1,108                       |

## Architecture Virtex II

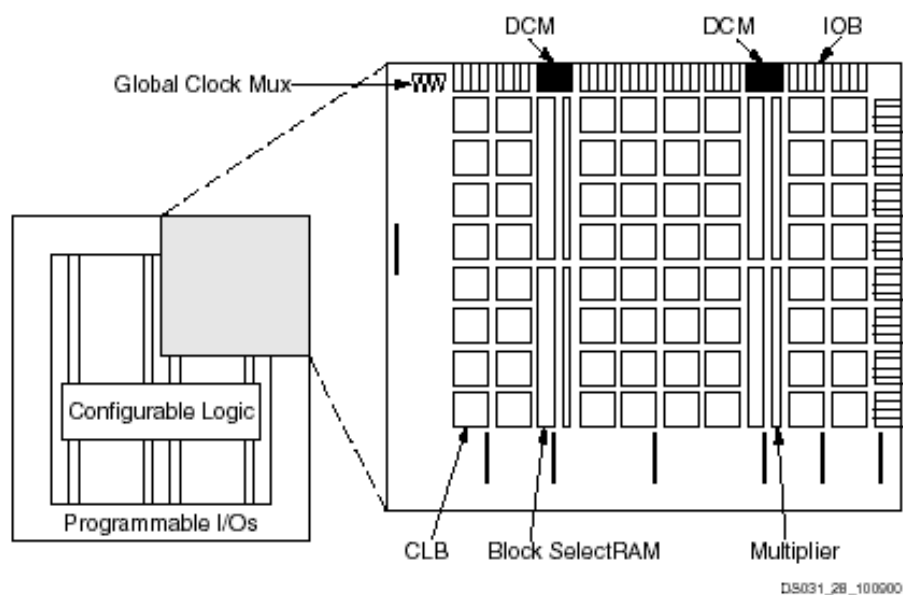


Figure 1: Virtex-II Architecture Overview

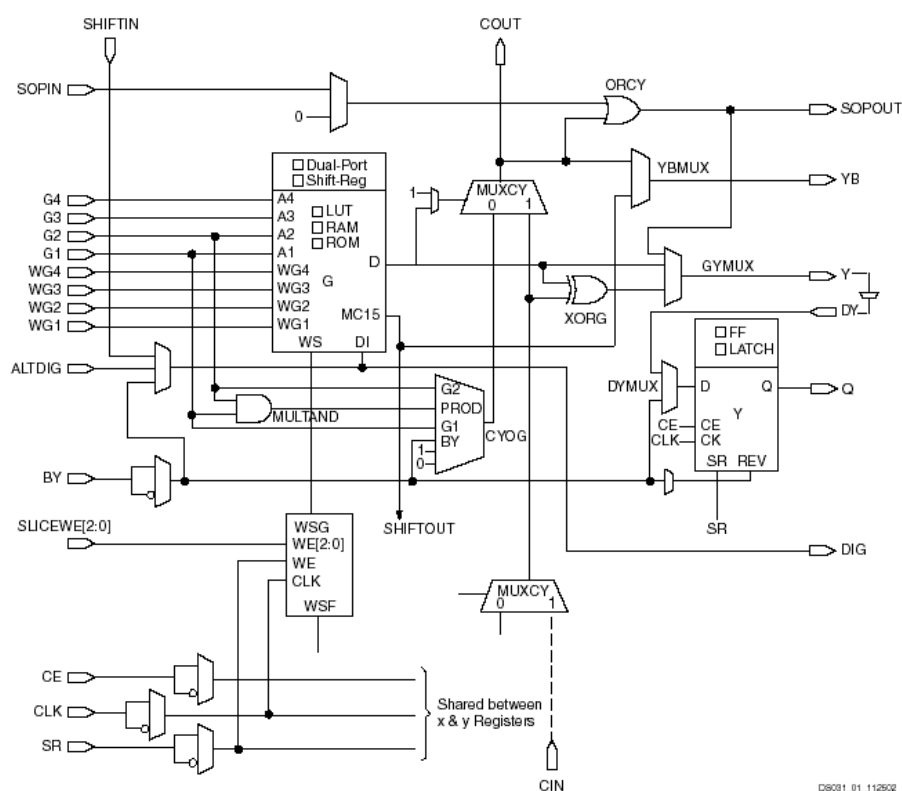


Figure 16: Virtex-II Slice (Top Half)

## Blocks RAM

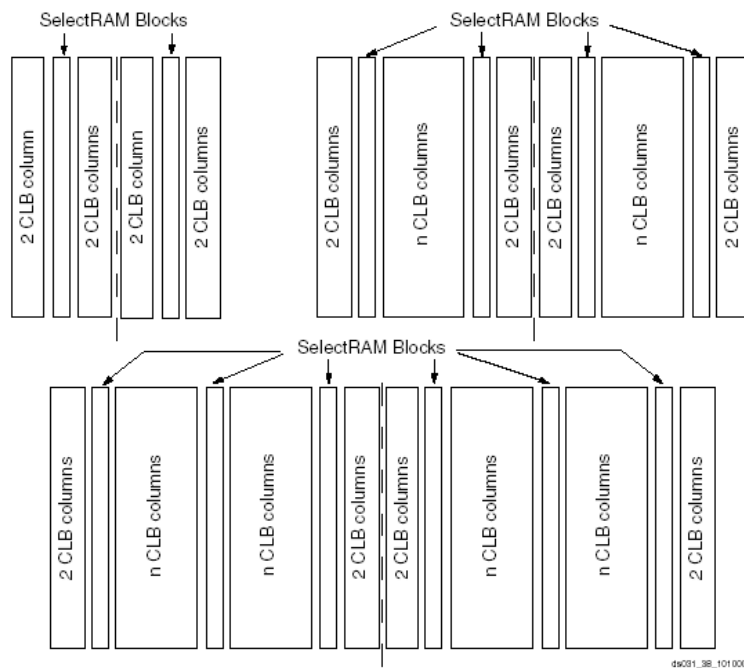
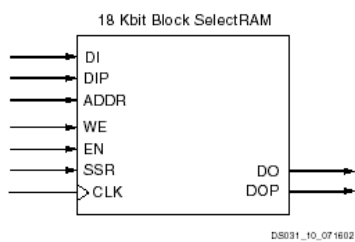
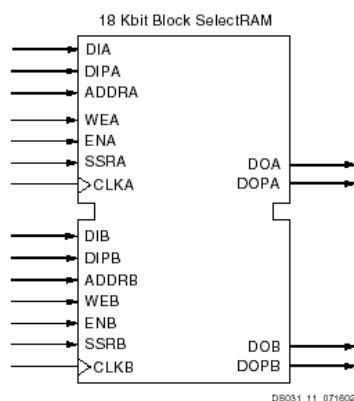


Figure 34: Block SelectRAM (2-column, 4-column, and 6-column)

## Blocks RAM



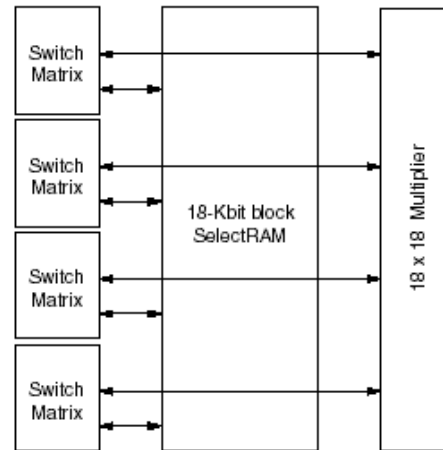
18 Kbit Block SelectRAM Memory in Single-Port Mode



18 Kbit Block SelectRAM in Dual-Port Mode

## 18-Bit x 18-Bit Multipliers

Virtex-II devices incorporate many embedded multiplier blocks. These multipliers can be associated with an 18 Kbit block SelectRAM resource or can be used independently. They are optimized for high-speed operations and have a lower power consumption compared to an 18-bit x 18-bit multiplier in slices.



DS081\_33\_101000

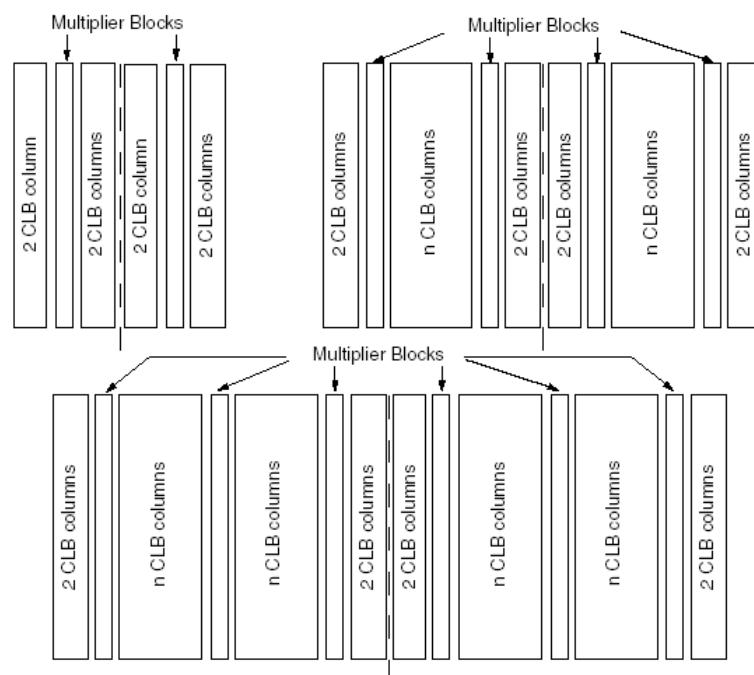


Figure 35: SelectRAM and Multiplier Blocks

D.D

121

## 18-Bit x 18-Bit Multipliers



DS081\_30\_101000



Figure 37: Multipliers (2-column, 4-column, and 6-column)

D.D

122

# SPARTAN III



D.D

## Spartan III

- ❖ Avant-Dernier FPGA de Xilinx
- ❖ Produit depuis 2003
- ❖ Bonnes idées du Spartan2 et Virtex2
- ❖ Architecture du Virtex2
- ❖ Gravé en 90 nm
- ❖ DCM, Multiplieurs câblées
- ❖ Forte densité des CLBs
- ❖ Fréquence max. de 326Mhz
- ❖ Prix de vente faible



D.D

## Spartan III

| Famille      | Virtex2     | Spartan3  | Virtex2     | Spartan3  |
|--------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| Nom          | XC2V250     | XC3S200   | XC2V1500    | XC3S1500  |
| Logic Cells  | 3456        | 4320      | 17280       | 29952     |
| Multiplieurs | 24          | 12        | 48          | 32        |
| Max ram      | 432 Kbits   | 216 Kbits | 864 Kbits   | 576 Kbits |
| DCM          | 8           | 4         | 8           | 4         |
| CLB          | 384         | 480       | 1920        | 3328      |
| Prix         | 158 dollars | ?         | 600 dollars | ?         |



D.D

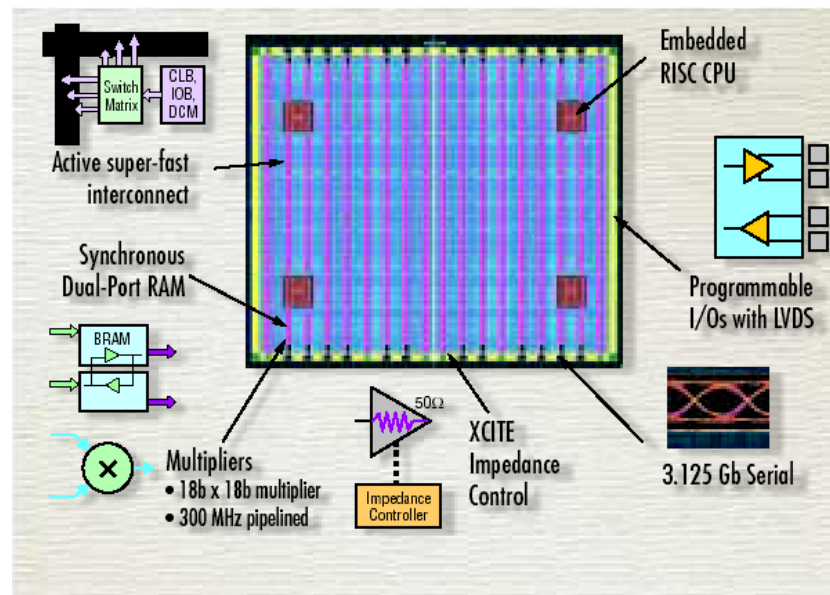
125

## Virtex II Pro



D.D

## Xilinx Virtex II Pro

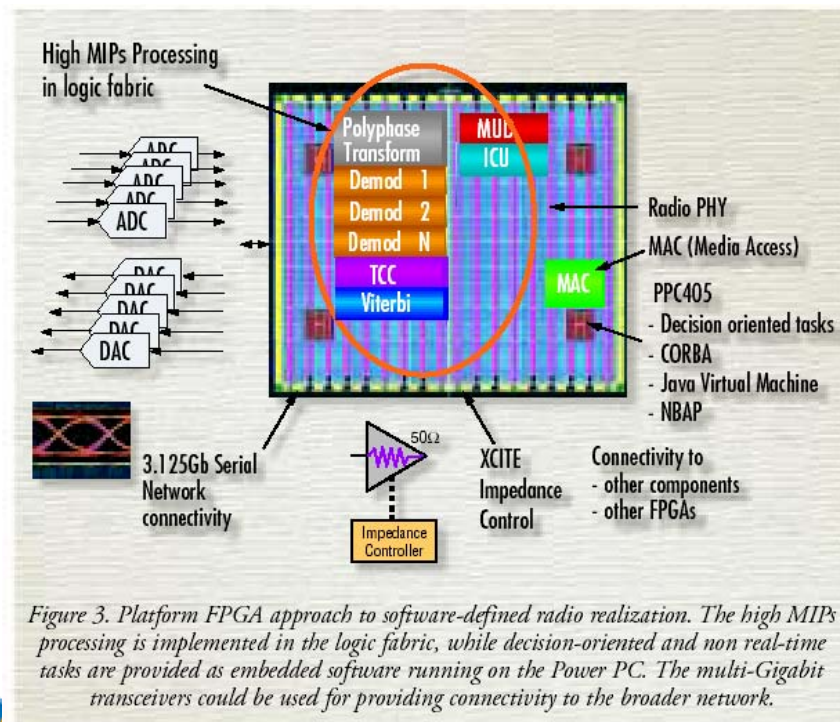


## Xilinx Virtex II Pro

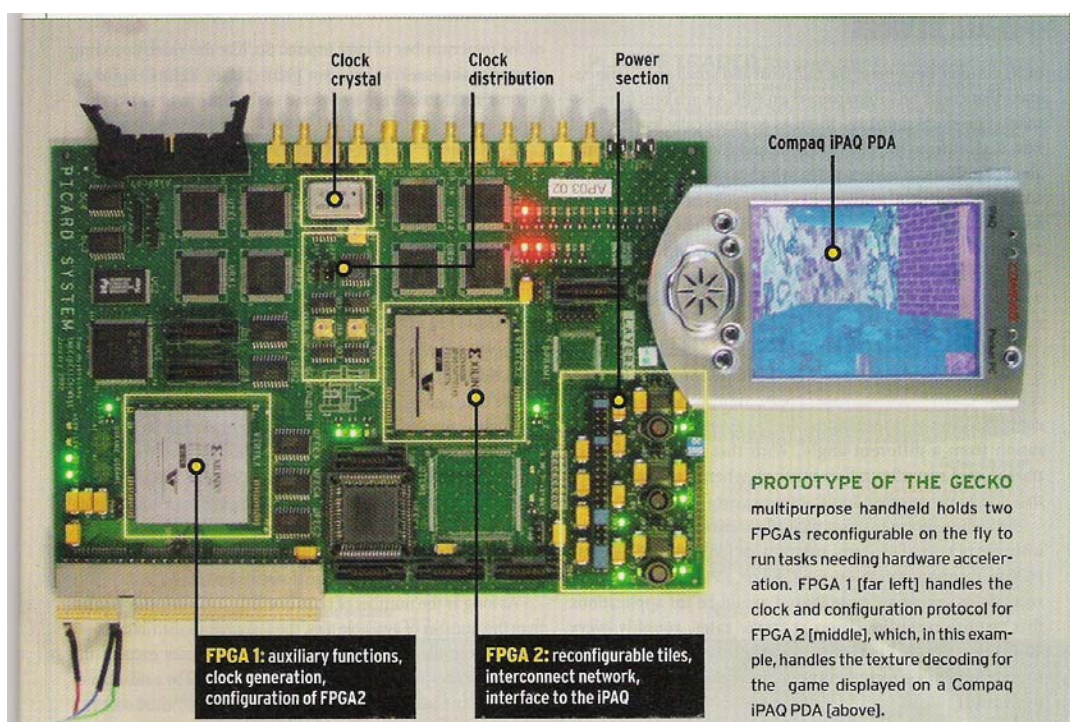
- ❖ Matrice de multiplieurs câblés hardware pour le support du traitement de signal parallèle
- ❖ Liaison série multi-giga bit pour communications inter-chip ou inter-système
- ❖ Microprocesseurs RISC pour réaliser des tâches de décision et pour tourner des systèmes d'exploitation temps réel.
- ❖ Impédances configurables dynamiquement pour les entrées/sorties  
→ simplification du système et du circuit imprimé contenant le FPGA

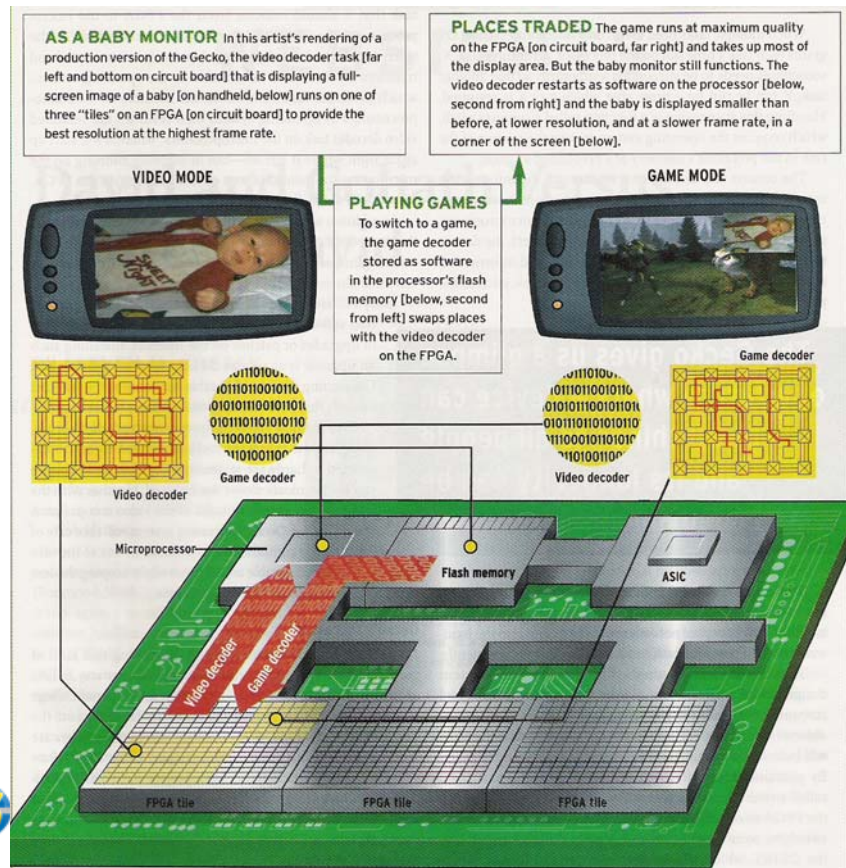


## Plateforme pour Radio Logiciel

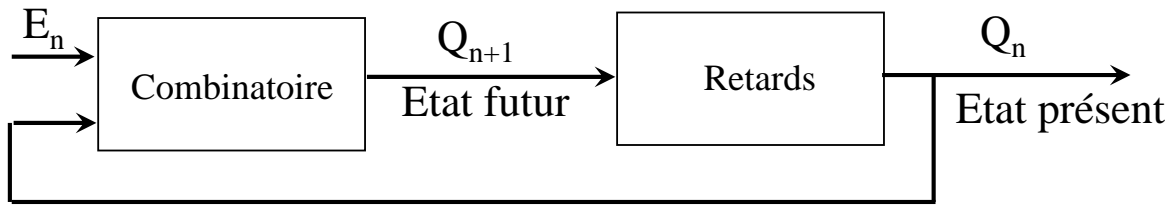


## DO-IT-All Devices

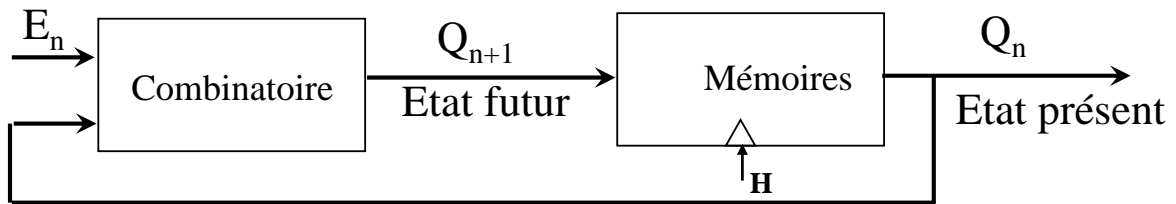




- ❖ Système asynchrone Plus rapide mais de conception complexe



- ❖ Système synchrone Conception moins complexe



D.D

133

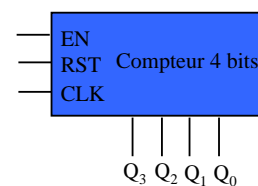
## Exercice : Synthèse d'un compteur 4 bits modulo 10

- ❖ Logique séquentielle  
**synchrone**

EN = '1' - comptage autorisé  
EN = '0' - comptage bloqué

- ❖ Utilisez de bascules D

RST = '1' - RAZ  
RST = '0' - comptage



| Q <sub>3</sub> | Q <sub>2</sub> | Q <sub>1</sub> | Q <sub>0</sub> | En | D <sub>3</sub> | D <sub>2</sub> | D <sub>1</sub> | D <sub>0</sub> | En | D <sub>3</sub> | D <sub>2</sub> | D <sub>1</sub> | D <sub>0</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 0              | 0              | 0              | 0              | 1  | 0              | 0              | 0              | 1              | 0  | 0              | 0              | 0              | 0              |
| 0              | 0              | 0              | 1              | 1  | 0              | 0              | 1              | 0              | 0  | 0              | 0              | 0              | 1              |
| 0              | 0              | 1              | 0              | 1  | 0              | 0              | 1              | 1              | 0  | 0              | 0              | 1              | 0              |
| 0              | 0              | 1              | 1              | 1  | 0              | 1              | 0              | 0              | 0  | 0              | 0              | 1              | 1              |
| 0              | 1              | 0              | 0              | 1  | 0              | 1              | 0              | 1              | 0  | 0              | 1              | 0              | 0              |
| 0              | 1              | 0              | 1              | 1  | 0              | 1              | 1              | 0              | 0  | 0              | 1              | 0              | 1              |
| 0              | 1              | 1              | 0              | 1  | 0              | 1              | 1              | 1              | 0  | 0              | 1              | 1              | 0              |
| 0              | 1              | 1              | 1              | 1  | 1              | 0              | 0              | 0              | 0  | 0              | 1              | 1              | 1              |
| 1              | 0              | 0              | 0              | 1  | 1              | 0              | 0              | 1              | 0  | 1              | 0              | 0              | 0              |
| 1              | 0              | 0              | 1              | 1  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0  | 1              | 0              | 0              | 1              |

Sorties des bascules D

état futur des entrées des  
bascules D pour EN='1'

état futur des entrées des  
bascules D pour EN='0'



D.D

134

## Exercice : Synthèse d'un compteur 4 bits modulo 10

**D<sub>0</sub>** Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> En=0

| Q <sub>3</sub> \ Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|---------------------------------|----|----|----|----|
| 00                              | 0  | 1  | 1  | 0  |
| 01                              | 0  | 1  | 1  | 0  |
| 11                              | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                              | 0  | 1  | φ  | φ  |

Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> En=1

| Q <sub>3</sub> \ Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|---------------------------------|----|----|----|----|
| 00                              | 1  | 0  | 0  | 1  |
| 01                              | 1  | 0  | 0  | 1  |
| 11                              | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                              | 1  | 0  | φ  | φ  |

$$D_0 = Q_0 \oplus E_n$$

## Exercice : Synthèse d'un compteur 4 bits modulo 10

**D<sub>1</sub>** Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> En=0

| Q <sub>3</sub> \ Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|---------------------------------|----|----|----|----|
| 00                              | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 01                              | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 11                              | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                              | 0  | 0  | φ  | φ  |

Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> En=1

| Q <sub>3</sub> \ Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|---------------------------------|----|----|----|----|
| 00                              | 0  | 1  | 0  | 1  |
| 01                              | 0  | 1  | 0  | 1  |
| 11                              | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                              | 0  | 0  | φ  | φ  |

$$D_1 = \bar{E}_n Q_1 + Q_1 \bar{Q}_0 + E_n \bar{Q}_3 \bar{Q}_1 Q_0$$



## Exercice : Synthèse d'un compteur 4 bits modulo 10

**D<sub>2</sub>** Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> En=0

| Q <sub>3</sub> Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|-------------------------------|----|----|----|----|
| 00                            | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 01                            | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 11                            | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                            | 0  | 0  | φ  | φ  |

Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> En=1

| Q <sub>3</sub> Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|-------------------------------|----|----|----|----|
| 00                            | 0  | 0  | 1  | 0  |
| 01                            | 1  | 1  | 0  | 1  |
| 11                            | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                            | 0  | 0  | φ  | φ  |

$$D_2 = \overline{E_n} Q_2 + Q_2 \overline{Q_1} + Q_2 \overline{Q_0} + E_n \overline{Q_2} Q_1 Q_0$$

## Exercice : Synthèse d'un compteur 4 bits modulo 10

**D<sub>3</sub>** Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> Enable=0

| Q <sub>3</sub> Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|-------------------------------|----|----|----|----|
| 00                            | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 01                            | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11                            | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                            | 1  | 1  | φ  | φ  |

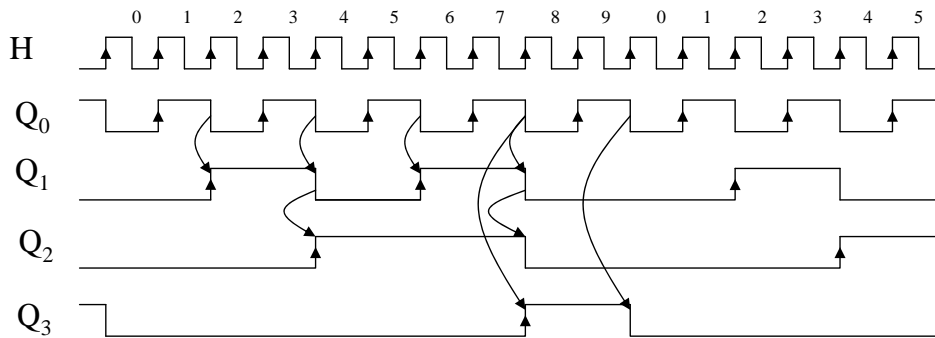
Q<sub>1</sub> Q<sub>0</sub> Enable=1

| Q <sub>3</sub> Q <sub>2</sub> | 00 | 01 | 11 | 10 |
|-------------------------------|----|----|----|----|
| 00                            | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 01                            | 0  | 0  | 1  | 0  |
| 11                            | φ  | φ  | φ  | φ  |
| 10                            | 1  | 0  | φ  | φ  |

$$D_3 = \overline{E_n} Q_3 + Q_3 \overline{Q_0} + E_n Q_2 Q_1 Q_0$$

## Exercice : Synthèse d'un compteur 4 bits modulo 10 asynchrone

- ❖ Les bascules ne sont plus reliées à la même horloge
- ❖ Choisir le signal de commande le plus adapté



H commande  $Q_0$ .

$\overline{Q_0}$  commande les bascule 1 et 3.

$\overline{Q_1}$  commande la bascule 2

$$D_0 = \overline{Q_0}$$

$$D_1 = \overline{Q_3} \overline{Q_1}$$

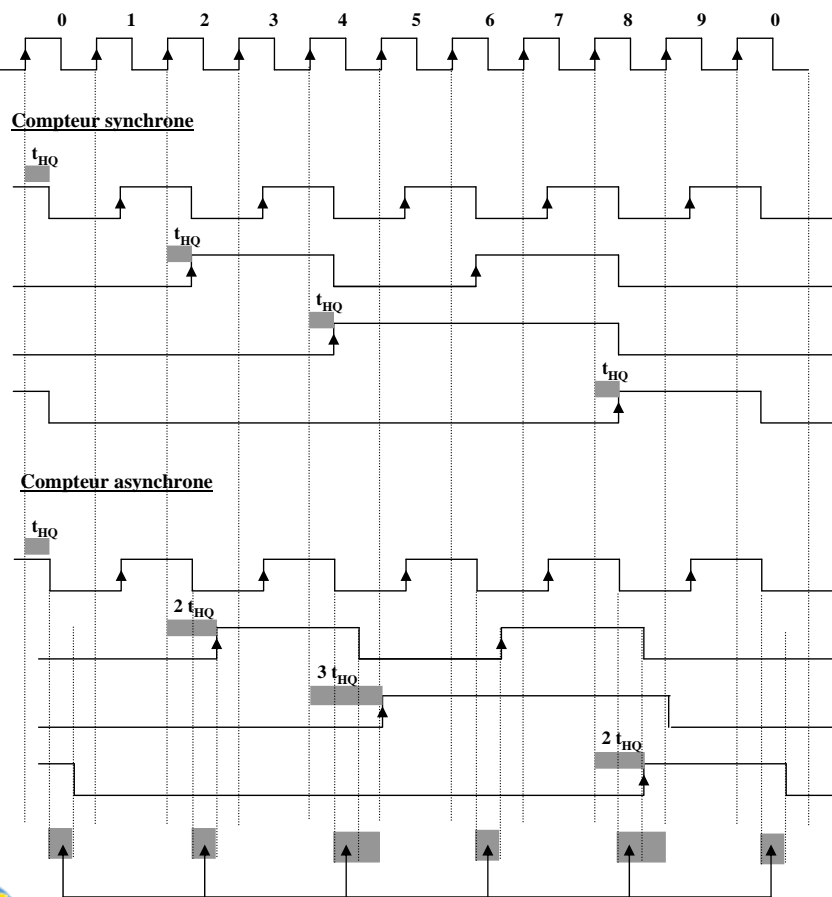
$$D_2 = \overline{Q_2}$$

$$D_3 = Q_2 Q_1$$



D.D

139



Etats aléatoires  
D.D



140

## Réglstre à decalage

```

❖ Library IEEE;
❖ Use IEEE.std_logic_1164.all;

❖ entity reg_decalage is
❖     GENERIC( n: natural :=2);
❖     port (
❖         Data, clock : in std_logic;
❖         S : inout std_logic_vector(n-1
❖             downto 0));
❖ end reg_decalage;

❖ Architecture structurelle OF reg_decalage IS

❖ COMPONENT mem PORT ( D, clk : in STD_logic;
❖                     Q : INOUT STD_LOGIC ;
❖                     Qb : out std_logic );
❖ end COMPONENT;

❖ begin

❖ gauche : mem Port map (data, clock, S(n-1));
❖ boucle : For i IN 1 to n-1 generate
❖     circ: mem PORT MAP (S(n-i), clock, S(n-
❖         i-1));
❖     END GENERATE boucle;
❖ END structurelle ;

❖ configuration reg_config of reg_decalage is
❖ for structurelle
❖     for all: mem use entity work.basculeD(beh);
❖     end for;
❖ end for;
❖ end reg_config;

```



D.D

141

## Réglstre à decalage

```

❖ Architecture beh OF reg_decalage IS
❖ begin
❖
❖ comport : process
❖     begin
❖         wait until clock ='1';
❖         s(n-1) <= Data after 5 ns;
❖         copie : For i IN n-1 to 1 LOOP
❖             s(n-i-1) <= s(n-i) after 5 ns;
❖         end loop copie;
❖     end process comport ;
❖
❖ end beh;

```



D.D

142