

TP Chapitre 02 : Construction de l'ALU

Objectifs pratiques

- Implémenter le Half Adder et Full Adder
- Construire un additionneur multi-bits
- Assembler l'ALU complète
- Générer les drapeaux

Durée estimée : 2h30

Prérequis : TP Chapitre 01 terminé (portes logiques)

Préparation

Accès au Simulateur



Ouvrir le Simulateur HDL

Allez dans HDL Progression → Projet 3 : Arithmétique

Alternative locale :

```
cd web  
npm install  
npm run dev
```

Exercice 1 : Half Adder

Objectif : Additionner 2 bits sans retenue d'entrée

Spécification

a	b	sum	carry
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Formules

```
sum   = XOR(a, b)
carry = AND(a, b)
```



Ouvrir l'exercice HalfAdder

Code à compléter

```
entity HalfAdder is
  port(
    a      : in bit;
    b      : in bit;
    sum     : out bit;
    carry  : out bit
  );
end entity;

architecture rtl of HalfAdder is
  component Xor2 port(a, b : in bit; y : out bit); end component;
  component And2 port(a, b : in bit; y : out bit); end component;
begin
  -- TODO: Compléter
end architecture;
```

► Solution

Exercice 2 : Full Adder

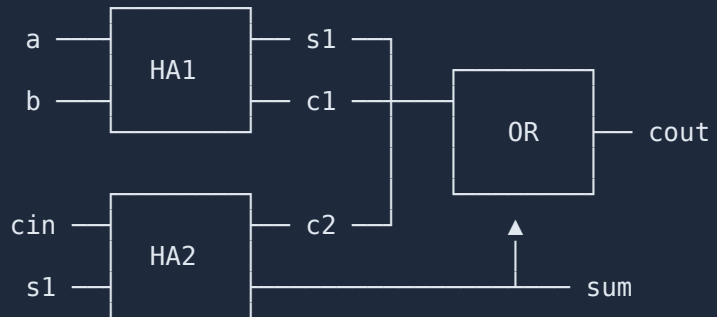
Objectif : Additionner 2 bits + retenue d'entrée

Spécification

3 entrées : a, b, cin

2 sorties : sum, cout

Construction



Ouvrir l'exercice FullAdder

Code à compléter

```
entity FullAdder is
  port(
    a    : in bit;
    b    : in bit;
    cin  : in bit;
    sum  : out bit;
    cout : out bit
  );
end entity;

architecture rtl of FullAdder is
  component HalfAdder
    port(a, b : in bit; sum, carry : out bit);
  end component;
  component Or2 port(a, b : in bit; y : out bit); end component;
  signal s1, c1, c2 : bit;
begin
  -- TODO: Compléter
end architecture;
```

► Solution

Exercice 3 : Additionneur 16 bits

Objectif : Chaîner des Full Adders

Spécification

- Entrées : a[15:0], b[15:0]
- Sorties : y[15:0], cout

Construction en cascade

```
FA0: cin = '0'      → y[0], c0  
FA1: cin = c0       → y[1], c1  
FA2: cin = c1       → y[2], c2  
...  
FA15: cin = c14     → y[15], cout
```



Ouvrir l'exercice Add16

Code avec generate

```
entity Add16 is
  port(
    a    : in bits(15 downto 0);
    b    : in bits(15 downto 0);
    y    : out bits(15 downto 0);
    cout : out bit
  );
end entity;

architecture rtl of Add16 is
  component FullAdder
    port(a, b, cin : in bit; sum, cout : out bit);
  end component;
  signal c : bits(16 downto 0);
begin
  c(0) <= '0'; -- Pas de retenue initiale

  gen: for i in 0 to 15 generate
    fa: FullAdder port map (
      a => a(i), b => b(i), cin => c(i),
      sum => y(i), cout => c(i+1)
    );
  end generate;

  cout <= c(16);
end architecture;
```


Exercice 4 : Incrémenteur (Inc16)

Objectif : Ajouter 1 à un nombre

Astuce

$\text{Inc}(a) = \text{Add}(a, 1)$ mais on peut simplifier !

$$a + 1 = a + 0\dots01$$

Le second opérande est toujours 0...01.



Ouvrir l'exercice Inc16

► Solution simplifiée

Exercice 5 : Soustracteur (Sub16)

Objectif : Utiliser le complément à 2

Rappel

$$A - B = A + \text{NOT}(B) + 1$$

Construction

1. Inverser tous les bits de B
2. Additionner avec cin = 1



Ouvrir l'exercice Sub16

Code à compléter

```
entity Sub16 is
  port(
    a : in bits(15 downto 0);
    b : in bits(15 downto 0);
    y : out bits(15 downto 0)
  );
end entity;

architecture rtl of Sub16 is
  component Inv port(a : in bit; y : out bit); end component;
  component FullAdder port(a,b,cin : in bit; sum,cout : out bit); end component;
  signal not_b : bits(15 downto 0);
  signal c : bits(16 downto 0);
begin
  -- Étape 1 : Inverser B
  gen_inv: for i in 0 to 15 generate
    inv: Inv port map (a => b(i), y => not_b(i));
  end generate;

  -- Étape 2 : Additionner avec cin = 1
  c(0) <= '1';
  gen_add: for i in 0 to 15 generate
    fa: FullAdder port map (
      a => a(i), b => not_b(i), cin => c(i),
      sum => y(i), cout => c(i+1)
    );
  end generate;
end architecture;
```

Exercice 6 : ALU Complète

Objectif : Assembler toutes les opérations

Interface

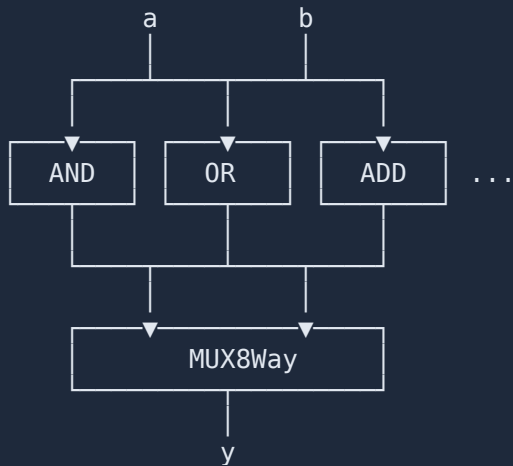
```
entity ALU is
  port(
    a : in bits(31 downto 0);
    b : in bits(31 downto 0);
    op : in bits(3 downto 0);
    y : out bits(31 downto 0);
    n : out bit; -- Negative
    z : out bit; -- Zero
    c : out bit; -- Carry
    v : out bit -- Overflow
  );
end entity;
```



Ouvrir l'exercice ALU

Architecture de l'ALU

Principe : Calculer tous les résultats, puis MUX pour sélectionner



Étapes d'implémentation

1. Opérations logiques : AND32, OR32, XOR32, NOT32

2. Addition/Soustraction :

- Inverser B si SUB
- cin = 1 si SUB

3. Sélection : Mux8Way selon **op**

4. Drapeaux :

- $N = y(31)$
- $Z = \text{NOR de tous les bits de } y$
- $C = \text{cout de l'additionneur}$
- $V = \text{calcul d'overflow}$

Calcul du flag V (Overflow signé)

L'overflow se produit quand :

- Deux positifs donnent un négatif
- Deux négatifs donnent un positif

```
-- Pour l'addition :  
-- V = (a[31] == b[31]) AND (a[31] != y[31])  
  
signal same_sign, sign_changed : bit;  
  
u_same: Xnor2 port map (a => a(31), b => b(31), y => same_sign);  
u_changed: Xor2 port map (a => a(31), b => y(31), y => sign_changed);  
u_v: And2 port map (a => same_sign, b => sign_changed, y => v);
```

Calcul du flag Z (Zero)

Tous les bits du résultat doivent être à 0 :

```
-- Option 1 : Or32Way puis NOT
signal any_one : bit;
u_or: Or32Way port map (a => y, y => any_one);
u_z: Inv port map (a => any_one, y => z);

-- Option 2 : Chaîne de NOR
```


Exercice 7 : Test de l'ALU

Objectif : Vérifier le fonctionnement

Tests à effectuer

a	b	op	Résultat attendu	Flags
5	3	ADD	8	N=0, Z=0
5	5	SUB	0	Z=1
-1	1	ADD	0	Z=1, C=1
0x7FFFFFFF	1	ADD	0x80000000	N=1, V=1



Tester dans le simulateur

Exercice Bonus : Multiplicateur 8 bits

Objectif : Comprendre la multiplication matérielle

Principe des produits partiels

```
      a[7:0]
    × b[7:0]
    -----
pp0 = a AND b[0]      (décalage 0)
pp1 = a AND b[1]      (décalage 1)
...
pp7 = a AND b[7]      (décalage 7)
-----
y[15:0] = somme des pp
```

Structure

1. 8 And8 pour générer les produits partiels
2. Addition en arbre (7 additions)
3. Résultat sur 16 bits



Ouvrir l'exercice Mul8

Récapitulatif

Composants implémentés

Composant	Complexité	Prérequis
HalfAdder	★	XOR, AND
FullAdder	★★	HalfAdder, OR
Add16	★★	FullAdder
Inc16	★	Add16
Sub16	★★	Add16, NOT
ALU	★★★★	Tout !
Mul8	★★★★	And8, Add16

Validation Finale

Checklist

- [] HalfAdder : tous les tests passent
- [] FullAdder : tous les tests passent
- [] Add16 : additionne correctement
- [] Sub16 : soustrait via complément à 2
- [] ALU : toutes les opérations fonctionnent
- [] Drapeaux N, Z, C, V calculés correctement

Prochaine étape

➡ **Chapitre 03 : Mémoire** — Construire des registres et de la RAM !

📖 **Référence** : Livre Seed, Chapitre 02 - Arithmétique