Projet PARM
Polytech ARM-based embedded processor

N. Bounouas, P.E. Novac, T. Niget, T. Prévost, C. Vouriot, B. Miramond
Polytech Nice Sophia

25 août 2025

https://bitbucket.org/edge-team-leat/parm_public

Table des matières

1 Présentation du projet

1.1 Le microprocesseur ARM Cortex-M0

La famille des ARM Cortex-M regroupe des processeurs 32 bits. Ils peuvent être utilisés comme microprocesseur ou microcontrôleur. On les retrouve dans diverses applications : Arduino Due, machine à laver, distributeur de boissons... Les Cortex-M visent en majorité le marché de l'embarqué.

Le but de ce projet est de simuler le comportement d'un Cortex-M0 au moyen d'un logiciel de simulation électronique : `Logisim`. L'idée est ici d'obtenir un système ayant un comportement similaire à un Cortex-M0 et non une copie conforme du fait de la complexité d'un processeur réel.

1.2 Le projet

Durant ce projet nous allons implémenter notre microprocesseur en le divisant en plusieurs blocs :

- Partie matérielle :
  - ALU 32 bits
  - Banc de 8 registres
  - Contrôleur
  - Chemin de données : entre contrôleur, banc de registre et ALU, ainsi que l'interfaçage avec les mémoires
  - Entrée/Sorties
- Partie logicielle :
  - Assembleur
  - Compilation

Spécificités de l'implémentation

- Pas de gestion des interruptions
- Pas de gestion des appels de fonctions
- Pas d'optimisation
- Pas de pipeline
- Pas de FPU [1]
- Pas de MMU [2]
- Toutes les instructions s'exécutent en 1 cycle (excepté les instructions `LDR`/`STR` en 2 cycles)
- Instructions sur 16 bits
- Données sur 32 bits
- Adressage RAM/ROM sur 9 bits
- Adressage RAM uniquement sur la pile (en utilisant le *Stack Pointer*)

1.3 Logisim

`Logisim` est un programme permettant la modélisation et la simulation de circuit logique. La modélisation du circuit ne se fait que par dessin et glisser-déposer des différents éléments électroniques.

[1] *Floating-Point Unit*, unité de calcul en virgule flottante

[2] *Memory Management Unit*, unité de gestion mémoire, gère la traduction des adresses virtuelles en adresses physiques au sein du processeur

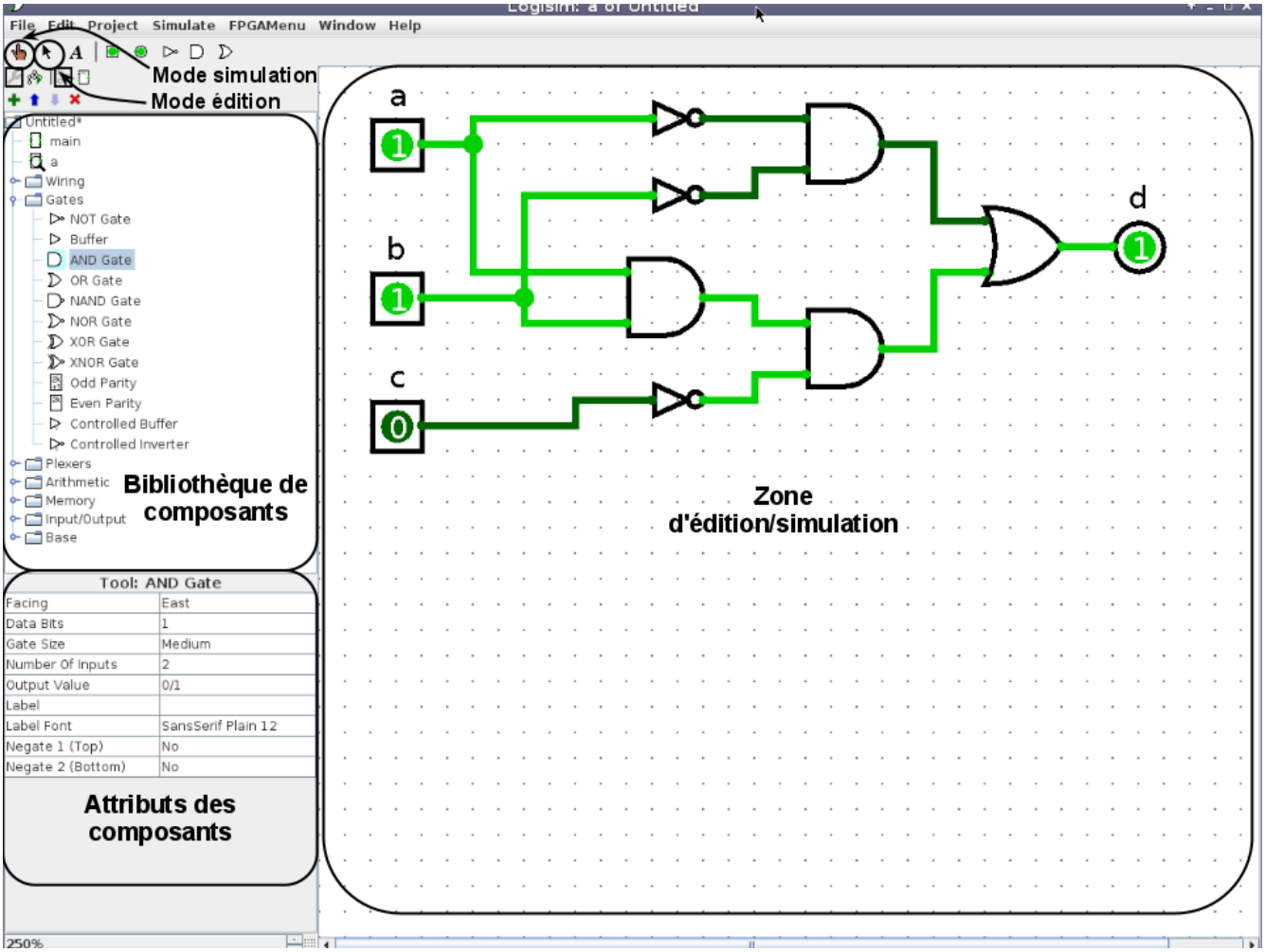


FIG. 1 : Interface de Logisim

Installation : la version de `Logisim` utilisé dans le cadre du projet est la 3.8.0, accessible à l'adresse https://github.com/logisim-evolution/logisim-evolution/releases/tag/v3.8.0. Sur Windows, utilisez le fichier `.msi` pour installer. Sur Mac, utilisez le fichier `.dmg`. Sur Ubuntu/Debian, passez par le fichier `.deb` avec la commande :

```
sudo apt install ./logisim-evolution_3.8.0-1_amd64.deb
```

Pour les autres systèmes, vous pouvez lancer directement le fichier .jar sans installer. La commande à utiliser est :

```
java -Dsun.java2d.opengl=true -jar logisim-evolution.jar
```

Cette section est un extrait du tutoriel officiel « Introduction à l'utilisation de Logisim ». Pour plus d'informations, se référer à la documentation officielle.

Vous pouvez voir l'interface de `Logisim` sur la Figure 1.

Une des particularités de `Logisim` est de pouvoir éditer et simuler un circuit en même temps. Nous expli-

querons plus tard dans ce document comment simuler un circuit, puis comment l'implémenter sur la carte du laboratoire.

1.3.1 Mode édition

1. Pour utiliser le mode édition, il faut simplement sélectionner la flèche comme indiqué en haut de la figure 1.
2. On peut alors choisir un composant dans la bibliothèque sur la gauche. Pour l'ajouter dans son schéma, il suffit de cliquer sur le composant désiré, puis de cliquer sur le schéma.
3. Chaque composant que vous utiliserez aura des attributs modifiables dans la zone inférieur gauche de `Logisim`. Par exemple si l'on pose une porte `AND`, on peut modifier le nombre de signaux qu'elle prend en entrée, ou encore mettre un inverseur sur une de ses entrées.
4. Il est aussi possible de faire des copier/coller d'un ou plusieurs composants. Dans ce cas, les composants conserverons aussi tous les attributs préalablement définis.
5. Une fois que l'on a posé tous les composants, il faut alors les connecter. Pour cela il suffit de placer le curseur avec la souris sur un des ports à connecter et, en gardant pressé le bouton gauche de la souris, le déplacer jusqu'au port de destination.

1.3.2 Création d'un premier circuit

Tous les circuits réalisés dans `Logisim` peuvent être réutilisés dans d'autres circuits. Afin de créer un nouveau circuit, il faut aller dans `Projet` → `Ajouter Circuit...` et nommer le circuit. Le circuit créé devient un composant disponible dans la bibliothèque.

1.3.3 Mode simulation

`Logisim` est capable de simuler le circuit en affichant les valeurs des signaux directement sur le schéma. L'utilisateur peut alors définir les valeurs des bits en entrée et observer la réaction du design.

1. Pour utiliser le mode simulation, il faut sélectionner la main en haut à gauche de `Logisim` (cf Figure 1)
2. Il est alors possible de contrôler l'état des différentes entrées en cliquant directement dessus.
3. En cliquant sur une entrée, la valeur doit alterner entre `0` ou `1`.
4. Voici un descriptif des couleurs utilisées pour les signaux en mode simulation.

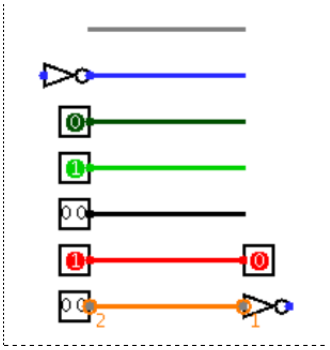


FIG. 2 : Couleurs des fils en simulation

- **Gris** : La taille du fil est inconnue. Le fil n'est relié à aucune entrée ou sortie.
- **Bleu** : Le fil comporte une valeur, cependant elle est inconnue.

- **Vert foncé** : Le fil comporte la valeur `0`.
- **Vert clair** : Le fil comporte la valeur `1`.
- **Noir** : Le fil comporte plusieurs bits (bus).
- **Rouge** : Le fil comporte une erreur.
- **Orange** : Les composants reliés au fil n'ont pas la bonne taille.

1.3.4 Design hiérarchique

La méthodologie de design que l'on vient d'utiliser est valable pour la conception de systèmes numériques plutôt simples, c'est-à-dire avec un nombre de portes logiques plutôt bas. Lorsque l'on vise des systèmes plus compliqués on risque de voir le nombre de portes et de connexions exploser. Dans ce cas, le risque d'introduire des erreurs devient très important.

La clé pour gérer correctement une complexité plus grande est d'utiliser le design hiérarchique. Grâce au design hiérarchique on peut travailler à différents niveaux d'abstraction. D'abord on décrit des blocs de base à l'aide des portes logiques, pour ensuite utiliser ces blocs de base comme parties d'un système plus large.

Pour créer un design hiérarchique il faudra suivre les pas suivants :

1. Créez un nouveau circuit comme déjà expliqué dans la section 1.3.2 et nommez le. Pour passer de l'édition d'un circuit à l'autre, il suffit de double-cliquer sur le nom de celui désiré dans le menu de gauche.
2. Il est alors possible d'ajouter un sous circuit de la même manière que l'utilisation d'un composant quelconque. On clique sur le sous circuit en question dans le menu indiqué sur la Figure 3, puis on le place en cliquant sur la zone d'édition.
3. Si le sous circuit avait été créé correctement, alors il devrait être représenté par un petit bloc, avec sur sa gauche des points bleus correspondant aux entrées, et sur sa droite des points verts correspondant aux sorties.
4. Si les sorties apparaissent en bleu et non en vert sur le schéma, vérifiez que vous avez bien affecté l'attribut `Sortie?` = `Oui` dans les `Pin`s de sortie.

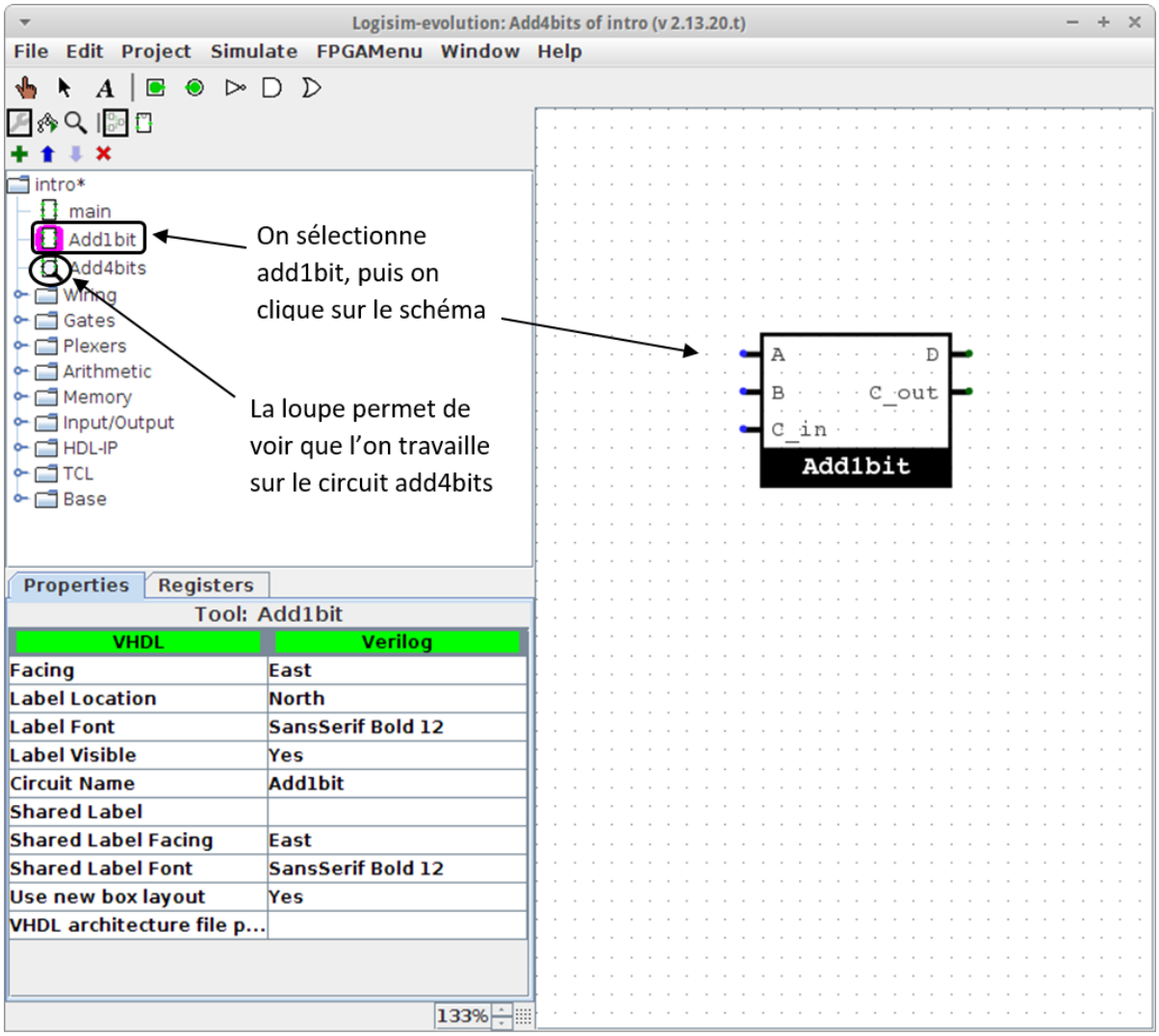


FIG. 3 : Sous circuit

1.3.5 Bus et séparateurs

Pour l'implémentation de composant travaillant avec des données sur plusieurs bits (un additionneur par exemple), il devient nécessaire de regrouper plusieurs signaux en créant un bus de données. Par exemple, pour définir l'entrée A comme un bus de 4 bits, il faut ajouter un élément `Pin` et définir sa taille via l'attribut `Data bits` = 4.

Lorsque l'on tire un fil de l'une de ces entrées, ce n'est plus un simple signal mais un bus de 4 bits. Pour pouvoir connecter les éléments de ce bus aux entrées de plusieurs composants travaillant sur chacun un bit, on va devoir séparer les différents fils du bus afin de pouvoir les traiter un par un. L'élément `Séparateur` de `Cablage` permet d'effectuer ces conversions dans les deux sens : d'un bus de 4 bits vers 4 fils, et de 4 fils vers un bus de 4 bits – voir Figure 4.

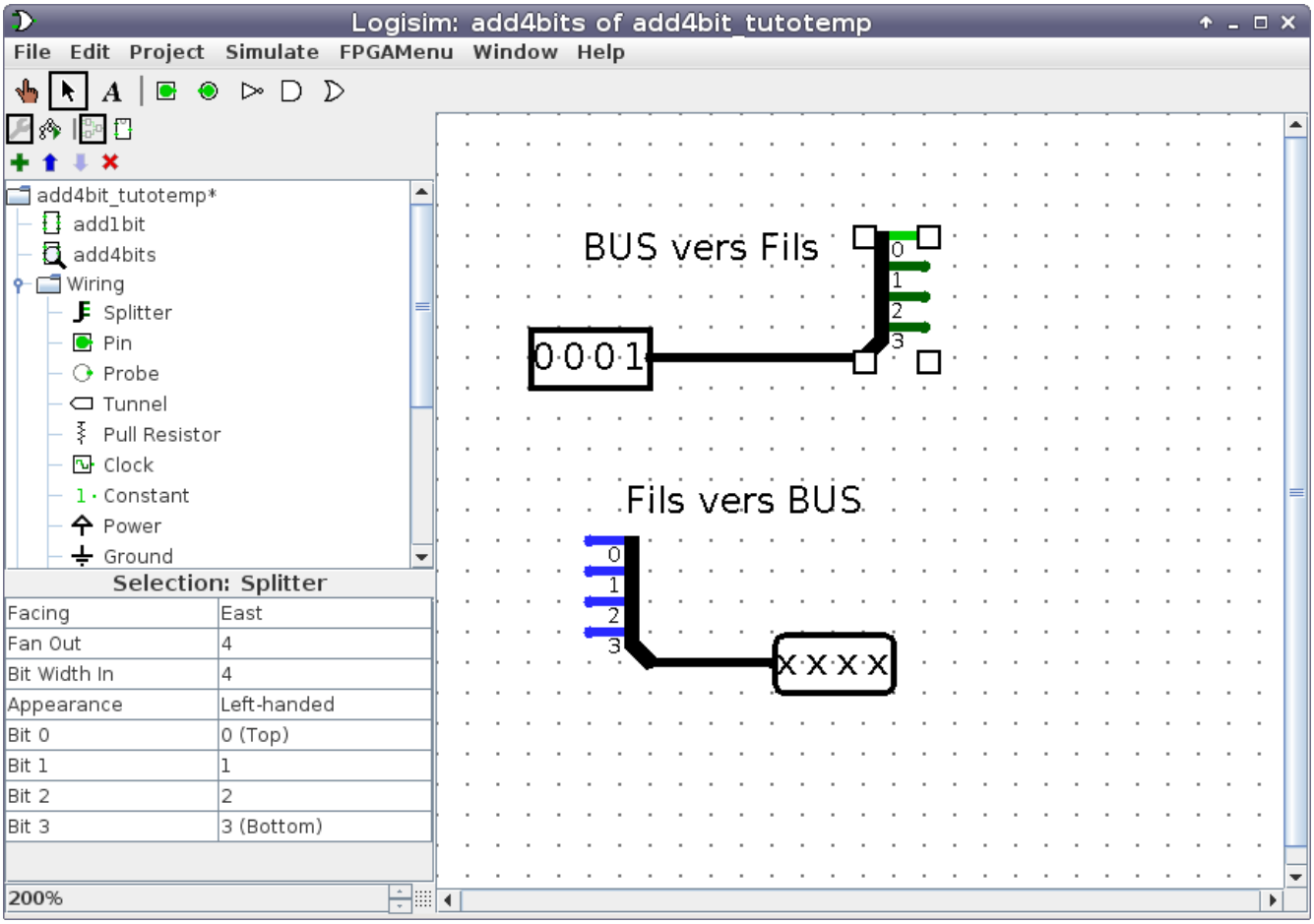


FIG. 4 : Exemples splitters

Il faut définir les tailles d'entrées et de sorties du `Séparateur` via les attributs `Ventilation en sortie` et `Largeur de bits en entrée`.

Note : le bit de poids faible est indexé à 0 en sortie du `splitter`.

Remarque : n'utiliser de préférence que des composants dont l'indicateur `VHDL` dans la zone `Properties` est vert. Les autres (`Buffer controllé` par exemple) ne pourront pas être déployés sur la carte FPGA.

2 Décodeur 7 segment

2.1 Introduction

Nous allons commencer par une prise en main de `Logisim` en réalisant un décodeur 7 segments. Ce type d'afficheur est un grand classique en ce qui concerne l'affichage de caractères hexadécimaux.

Le principe de cet afficheur est très simple, En allumant plusieurs segments en même temps nous allons pouvoir représenter les caractères suivants : 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F.

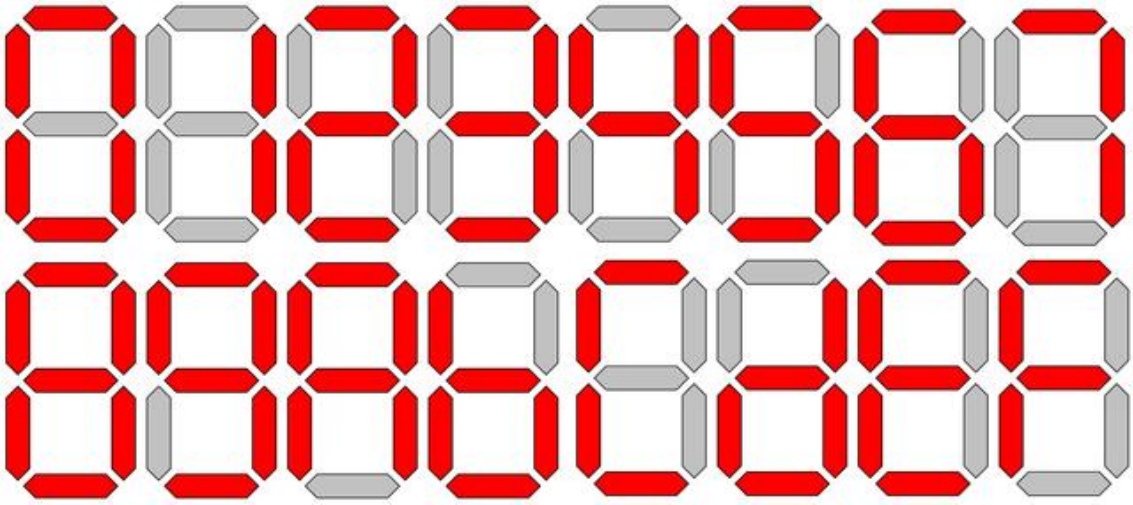


FIG. 5 : Un affichage hexadécimal par 7 segments. Merci à @Skywodd - https://www.carnetdumaker.net/

L'objectif est ici est de recevoir une information sur 4 bits (comprise entre `0b0000` et `0b1111`) et de la traduire sur 7 bits correspondant aux segments à allumer et à ceux à éteindre[3].

2.2 Table de correspondance

Nous allons ici associer à chaque valeur à sa décomposition en segment d'après le schéma suivant :

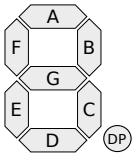


FIG. 6 : Détail et Annotation d'un 7 segment par H2g2bob - CC BY SA

2.3 Mise en place sur logisim

La table de vérité présentée dans la section précédente peut être utilisée pour obtenir une fonction simplifiée de chaque segment en utilisant les tables de Karnaugh[4]. `Logisim` embarque une fonctionnalité permettant d'effectuer cette analyse de manière simplifiée. Pour cela il est nécessaire de lancer `Logisim` avec l'option -analyze, soit dans notre cas :

```
java -Dsun.java2d.opengl=true -jar logisim-evolution.jar -analyze
```

[3] http://www.electronics-tutorials.ws/blog/7-segment-display-tutorial.html
[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Table_de_Karnaugh

En utilisant ce paramètre une option apparaît dans le menu ”Projet”->”Analyser le circuit”. Il est possible dans l’onglet ”table” de remplir la table de vérité du circuit. Une fois le tableau complété, cliquer sur ”Construire le circuit” générera le circuit correspondant. Ce dernier devrait ressembler à ceci :

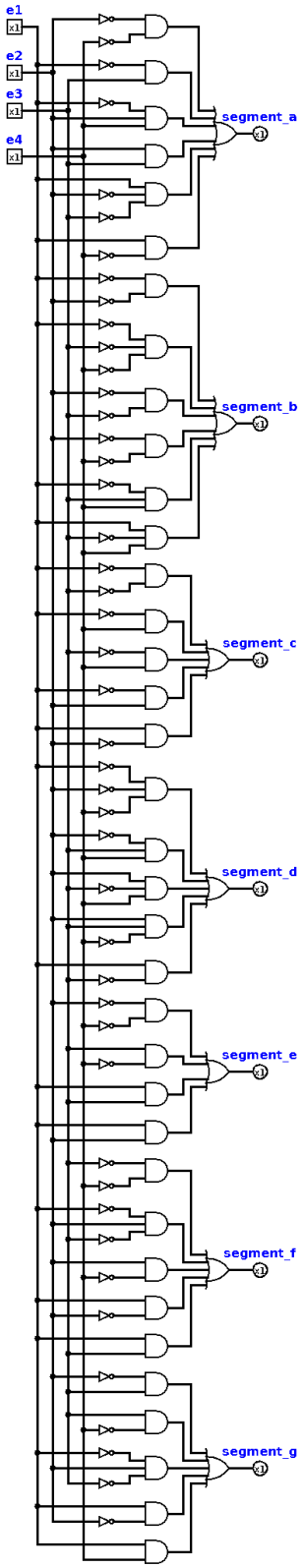


FIG. 7 : Contenu du composant ”Seven segment decoder”

3 Organisation du travail

Le projet est constitué des parties / tâches suivantes qui seront à répartir au sein du groupe. Cette répartition n'est pas "gravée dans la roche", assurez-vous simplement qu'à la fin du projet il n'y ait pas de trop grandes disparités de quantité de travail effectuée par les différents membres du groupe.

Chaque partie dans la liste est accompagnée de sa difficulté approximative.

- ★★ ALU (Matériel)
  - Réaliser les blocs d'opérateurs arithmétiques et logiques
  - Calculer les flags
- ★★ Banc de registres (Matériel)
- ★ Contrôleur - Décodeur d'instruction (Matériel)
- ★★★★ Contrôleur - Shift, add, sub, mov (Matériel)
- ★★★ Contrôleur - Data Processing (Matériel)
- ★★ Contrôleur - Flags APSR (Matériel)
- ★★★Contrôleur - Load/Store (Matériel)
- ★★ Contrôleur - SP Address (Matériel)
- ★★ Contrôleur - Conditional (Matériel)
- ★★ Chemin de données / circuit CPU (Matériel)
  - Relier le contrôleur, le banc de registres et l'ALU
- ★★★ Assembleur (Logiciel))
  - Parser un fichier assembleur
  - Générer le fichier binaire à charger dans la mémoire d'instruction de Logisim
- ★ Compilation de code C (Logiciel)
  - NB : cette partie ne consiste qu'à lancer sur votre processeur des programmes C. Ne vous penchez sur ça qu'une fois que vous pouvez lancer des programmes assembleur et que ceux-ci fonctionnent correctement !

4 ALU

4.1 Description

L'unité arithmétique et logique est l'élèment qui se charge des calculs au sein du processeur. Les ALU les plus basiques ne font que des opérations sur des entiers cependant on trouve des ALU spécialisées. Les calculs sur ces dernières vont des opérations à virgule flottante jusqu'à des calculs plus complexes tels que des racines carrées, des logarithmes, des sinus ou cosinus…Notre ALU n'effectuera que des calculs simples (addition, soustraction, multiplication, décalage) sur des entiers de 32 bits.

Une ALU comporte deux entrées amenant les données à traiter. Une troisième entrée permet de désigner le calcul à effectuer. En sortie on retrouvera le résultat de l'opération ainsi que des drapeaux. Ces drapeaux représentent une série d'état à la suite d'un calcul : un résultat négatif, un résultat nul, un débordement ou encore une retenue.

L'entrée `Shift` indique le nombre de décalage pour les opérations de décalage.

Remarque : les instructions `TST`, `CMP`, `CMN` n'enregistrent pas le résultat de l'opération. Seuls les drapeaux sont mis à jour. Pour ces opérations en particulier, il faudra recopier l'entrée `B` sur la sortie `S`. Le contrôleur définira le même registre pour le registre `Rn` d'opérande B que pour le registre `Rd` de destination de la sortie S.

Remarque 2 : pour l'instruction `SBC`, les retenues (emprunts) entrante et sortante doivent être inversées (voir *11.1.2.7 SBC (register) : Substract with Carry (p. 347)*).

4.2 Interface

4.2.1 Entrées

Port	Taille	Description
`A`	32	Première opérande
`B`	32	Seconde opérande
`Shift`	5	Nombre de décalage
`CarryIn`	1	Retenu entrante
`Codop`	4	Code opération ALU

4.2.2 Sorties

Port	Taille	Description
`S`	32	Registre résultat
`Flags`	4	Registre drapeaux, ordre : `NZCV`

4.3 Opérations

Ces opérations de l'ALU correspondent exactement aux instructions de la catégorie *Data Processing*. En cas de doute, se référer à *11 Jeu d'instructions (Instruction Set Architecture)*.

Codop	Opération	Instructions	Remarque
0000	`A and B`	AND	
0001	`A xor B`	EOR	
0010	`B << Shift`	LSL	Retenue sortante, voir jeu d'instructions
0011	`B >> Shift`	LSR	Retenue sortante, voir jeu d'instructions
0100	`B >> Shift (arith)`	ASR	Retenue sortante, voir jeu d'instructions
0101	`A + B + CarryIn`	ADC	
0110	`B - A + not CarryIn`	SBC	Retenues (emprunts) entrante et sortante inversées
0111	`B >> Shift (rot)`	ROR	Retenue sortante, voir jeu d'instructions
1000	`A and B`	TST	Résultat perdu, seuls les drapeaux sont mis à jour
1001	`-A`	RSB	Registre Rm utilisé plutôt que Rn
1010	`B - A`	CMP	Résultat perdu, seuls les drapeaux sont mis à jour
1011	`A + B`	CMN	Résultat perdu, seuls les drapeaux sont mis à jour
1100	`A or B`	ORR	
1101	`A * B`	MUL	
1110	`B and not A`	BIC	
1111	`not A`	MVN	Complément binaire

4.4 Drapeaux

Ces drapeaux de l'ALU correspondent exactement aux drapeaux de l'architecture ARM. En cas de doute, se référer à *11 Jeu d'instructions (Instruction Set Architecture)* et *11.3 Drapeaux (p. 31)* .

Symbole	Nom	Description
N	Negative	Résultat négatif
Z	Zero	Résultat nul
C	CarryOut	Retenue sortante (dépassement de capacité non-signé).
V	Overflow	Dépassement de capacité signé

5 Banc de registres

5.1 Description

Le processeur ne stocke pas le résultat d'un calcul directement en RAM, pour cela il travaille avec une mémoire rapide mais petite constituée de quelques registres (20 registres de 32 bits un dans Cortex-M0).

Parmi les 20 registres présents dans un Cortex-M0, seuls 13 d'entre eux sont dédiés à un usage général. Les 7 autres ont un usage bien particulier (voir tableau suivant)

Nom	Accès	Valeur de remise à zéro	Description	A implémenter
R0 - R12	LE	Inconnue	Registres à usage général	OUI (uniquement 8)
MSP	LE	?	Pointeur de pile	Oui (contrôleur)
PSP	LE	Inconnue	Pointeur de pile	Oui (contrôleur)
LR	LE	Inconnue	Registre de lien	Non
PC	LE	?	Compteur d'instruction	Oui (contrôleur)
PSR	LE	Inconnue	Statut du programme	Non
ASPSR	LE	Inconnue	Statut d'application du programme	Non
IPSR	L	0x00000000	Statut d'interruption du programme	Non
EPSR	L	Inconnue	Statut d'exécution du programme	Non
PRIMASK	LE	0x00000000	Masque de priorité	Non
CONTROL	LE	0x00000000	Registre de contrôle	Non

Dans notre cas, le banc de registre ne contient que 8 registres R0–R7 par soucis de simplicité. Les registres PC et SP sont implémentés dans le contrôleur.

5.2 Interface

5.2.1 Entrées

Port	Taille	Description
DataIn	32	Données entrantes, à enregistrer dans le registre sélectionné
RegDest	3	Sélection du registre de destination des données entrantes
Clk	1	Horloge
Reset	1	Remise à zéro
RegA	3	Sélection du registre A pour les données sortantes
RegB	3	Sélection du registre B pour les données sortantes

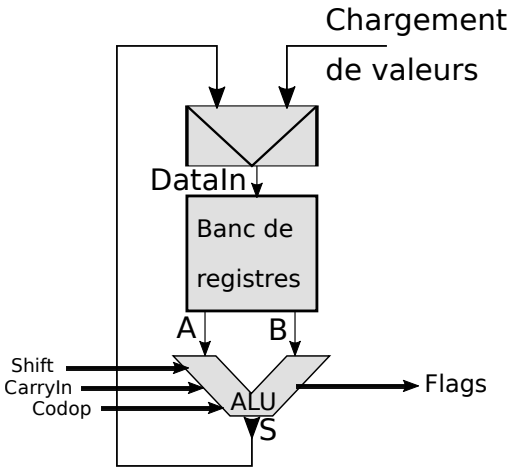
5.2.2 Sorties

Port	Taille	Description
AOut	32	Données sortantes du registre sélectionné A
BOut	32	Données sortantes du registre sélectionné B
R0	32	Registre interne 0
R1	32	Registre interne 1
R2	32	Registre interne 2
R3	32	Registre interne 3
R4	32	Registre interne 4
R5	32	Registre interne 5
R6	32	Registre interne 6
R7	32	Registre interne 7

Les sorties R0–R7 ne seront pas utilisées pour implémenter une quelconque fonctionalité. Elles sont présentes pour aider à visualiser le comportement du processeur.

5.3 Interaction avec l'ALU

Après avoir réalisé l'ALU et le banc de registres, l'interaction entre ces composants peut être mise en oeuvre de la manière suivante :



Il est ainsi possible de valider leur comportement en enregistrant des données dans le banc de registre (à l'aide des ports DataIn et RegDest) puis en effectuant diverses opération par l'ALU en spécifiant le Codop.

6 Contrôleur

6.1 Description

Le contrôleur ou unité de contrôle (Control unit en anglais) joue le rôle de chef d'orchestre au sein du processeur. Il est en charge du décodage des instructions. En fonction des informations récupérées au sein de l'instruction et des différents drapeaux, le contrôleur va agir sur le chemin de données.

Il est responsable du choix de la source fournissant les données. La sortie Load selon si elle est à 0 ou à 1

choisira respectivement un chargement depuis l'ALU ou directement depuis la RAM. Le même mécanisme est utilisé pour choisir la source du nombre de décalage, des immédiats 8 (voir tableau des sorties).

Le contrôleur abrite de plus le compteur ordinal et l'incrémente lorsqu'il traite une instruction.

6.2 Interface

6.2.1 Entrées

Port	Taille	Description
`Inst`	16	Instruction à traiter
`Flags`	4	Drapeaux en entrée, ordre `NZCV`
`Clk`	1	Horloge
`Reset`	1	Remise à Zero

6.2.2 Sorties

Port	Taille	Description
`Carry`	1	Retenue sortante (provenant des drapeaux) à destination de l'ALU
`DP_Shift`	1	Provenance du nombre de décalage : 0 pour registre A, 1 pour Imm5
`Imm32_Enable`	1	Provenance de la donnée A : 0 pour registre, 1 pour Imm32
`Imm5`	5	Nombre de décalage pour les instructions de décalage de la catégorie *Shift, add, sub, mov*
`Imm32`	8	Valeur pour les instructions `MOV`, `CMP`, `ADD` et `SUB`
`ALU_Opcode`	4	Code opération à destination de l'ALU
`Rm`	3	Séléction du registre pour lecture de l'opérande A
`Rn`	3	Sélection du registre pour lecture de l'opérande B
`Rd`	3	Sélection du registre pour enregistrement du résultat
`RAM_Addr`	32	Adresse mémoire des instructions *Load/Store*
`Load`	1	Provenance des données en entrée du banc de registre
`Store`	1	1 pour stocker la valeur du registre `Rm` à l'adresse `RAM_Address`
`PC`	16	Compteur ordinal : adresse de la prochaine instruction en ROM
`Flags`	4	Valeur des drapeaux issue de Flags APSR
`SP`	32	Valeur de SP

6.3 Sous composants

6.3.1 Décodeur d'instruction

6.3.1.1 Description

Le bloc *Opcode Decoder* active l'une de ses sorties en fonction de la catégorie d'instruction reconnue, afin d'activer les blocs correspondant du contrôleur.

L'entrée `Opcode` correspond au code opération pré-extrait de l'instruction, c'est à dire les 6 bits de poids fort de l'instruction.

Les sorties doivent être activées en fonction du code binaire correspondant à chacune d'elle. Voir *11 Jeu d'instructions (Instruction Set Architecture)*.

6.3.1.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
`Opcode`	6	Code opération à décoder

Sorties

Port	Taille	Description
`Shift`	1	Active le bloc *Shift, add, sub, mov*
`Data_Processing`	1	Active le bloc *Data Processing*
`Load_Store`	1	Active le bloc *Load/Store*
`SP_Address`	1	Active le bloc *SP Address*
`Branch`	1	Active le bloc *Conditional*

6.3.2 Shift, add, sub, mov

6.3.2.1 Description

Le bloc *Shift, add, sub, mov* traite les instructions de calcul de la catégorie `Shift, add, sub, mov` (voir *11.1.1 Shift, add, sub, mov*).

La sortie `ALU_Opcode` devra être définie pour chacune des instructions afin d'exécuter la bonne opération dans l'ALU (voir *4.3 Opérations*).

Certaines instructions ne mettent pas à jour tous les drapeaux. La sortie `Flags_Update_Mask` doit être définie en conséquence avec le masque dont les bits à 1 correspondent aux drapeaux à mettre à jour.

La sortie `Carry` force la valeur de la retenue entrante pour l'ALU. Les instructions `ADD` et `SUB` n'utilisent pas de retenue entrante. Elle doit être définie à 0 pour `ADD` et à 1 pour `SUB` étant donnée qu'elle est est inversée pour la soustraction dans l'ALU.

La sortie `Imm32` est utilisée pour communiquer les valeurs des immédiats de `MOV`, `CMP`, `ADD` et `SUB` à l'ALU. Dans ce cas, la sortie `Imm32_Enable` doit être définie à 1. Les immédiats devront être étendus de 3 ou 8 bits vers 32 bits en complétant par des zéros (ce sont des entiers non-signés).

La sortie `Imm5` est utilisée en tant que valeur du nombre de décalage pour les instructions de décalage `LSL`, `LSR` et `ASR`.

Si l'entrée `Enable` est à 0, les sorties sont forcées à 0.

Remarque : l'immédiat pour l'instruction `MOV` passe par l'ALU pour être enregistré dans le registre de destination. Pour que la valeur ne soit pas modifiée, on peut l'inverser ici et utiliser l'opération `RSB` dans l'ALU.

Remarque 2 : quand une instruction ne fait pas usage de certaines sorties, leur valeur n'est pas importante. Vous pouvez donc concevoir votre circuit en supposant ce qui vous arrange, tant que les sorties sont reliées à quelque chose.

6.3.2.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
Instruction	16	Instruction *Shift, add, sub, mov* à décoder
Enable	1	Active le composant. Si 0, les sortie sont forcées à 0

Sorties

Port	Taille	Description
ALU_Opcode	4	Code opération à destination de l'ALU
Rm	3	Sélection du registre opérande A
Rn	3	Sélection du registre opérande B
Rd	3	Sélection du registre résultat
Flags_Update_Mask	4	Masque de mise à jour des drapeaux à destination du bloc *Flags APSR*
Carry	1	Valeur à utiliser en tant que retenue entrante pour l'ALU
Imm32_Enable	1	Indique au processeur d'utiliser la sortie Imm32 à la place du registre Rm
Imm5	5	Nombre de décalage à destination de l'ALU
Imm32	32	Valeur à utiliser en tant qu'opérande A de l'ALU

6.3.3 Data Processing

6.3.3.1 Description

Le bloc *Data Processing* traite les instructions de calcul de la catégorie Data Processing (voir *11.1.2 Data processing*).

La sortie ALU_Opcode correspond aux bits 6 à 9, les code opérations de l'ALU ayant été implémenté en conséquence.

Certaines instructions ne mettent pas à jour tous les drapeaux. La sortie Flags_Update_Mask doit être définie en conséquence avec le masque dont les bits à 1 correspondent aux drapeaux à mettre à jour.

Si l'entrée Enable est à 0, les sorties sont forcées à 0.

Remarque : les instructions TST, CMP et CMN ne mettent à jour que les drapeaux et n'enregistrent pas le résultat de l'opération. Pour celles-ci, le registre Rd sera défini à Rn afin d'être cohérent avec les autres instructions, et que l'ALU puisse copier le contenu de l'opérande B dans le résultat.

Remarque 2 : pour les instructions RSB et MUL, les bits 3 à 5 définissent le registre Rn, contrairement aux autres instructions pour lesquelles ces bits définissent le registre Rm. Pour simplifier l'implémentation du contrôleur, on considèrera toujours que les bits 3 à 5 correspondent à Rm et que les bits 0 à 2 correspondent à Rdn. Pour RSB, l'ALU devra alors faire usage de l'opérande A (en provenance du registre Rm).

Remarque 3 : quand une instruction ne fait pas usage de certaines sorties, leur valeur n'est pas importante. Vous pouvez donc concevoir votre circuit en supposant ce qui vous arrange, tant que les sorties sont reliées à quelque chose.

6.3.3.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
Instruction	16	Instruction *Data Processing* à décoder
Enable	1	Active le composant. Si 0, les sortie sont forcées à 0

Sorties

Port	Taille	Description
ALU_Opcode	4	Code opération à destination de l'ALU
Rm	3	Sélection du registre opérande A
Rn	3	Sélection du registre opérande B
Rd	3	Sélection du registre résultat
Flags_Update_Mask	4	Masque de mise à jour des drapeaux à destination du bloc *Flags APSR*

6.3.4 Flags APSR

6.3.4.1 Description

Le bloc *Flags APSR* correspond au 4 bits de poids fort du registre Application Program Status Register de l'architecture ARM. Il conserve les drapeaux générés par la dernière instruction, afin qu'ils soient disponibles pour la prochaine instruction.

L'entrée Update_Mask permet de réinjecter l'ancien état d'un drapeau si le bit correspondant est à 0. Si le bit est à 1, le drapeau est mis à jour.

6.3.4.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
Flags_In	4	Nouveaux drapeaux générés par l'instruction courante, ordre NZCV
Update_Mask	4	Masque d'enregistrement des drapeaux, ordre NZCV
Clk	1	Horloge
Reset	1	Remise à zéro

Sorties

Port	Taille	Description
Flags_Out	4	Drapeaux générés par l'instruction précédente, ordre NZCV

6.3.5 Load/Store

6.3.5.1 Description

Le bloc *Load/Store* traite les instructions de lecture/écriture en mémoire (voir *11.1.3 Load/Store*).

La sortie RAM_Addr correspond à l'adresse mémoire à laquelle effectuer l'opération. Elle est calculée en fonction de la valeur actuelle du Stack_Pointer et de l'offset provenant de l'instruction.

La sortie Store indique à la mémoire de stocker la donnée du registre Rm à l'adresse RAM_Addr. La donnée sera écrite au cycle suivant.

La sortie Load indique au processeur de présenter la donnée à l'adresse RAM_Addr en entrée du banc de registre (DataIn). La donnée sera disponible au cycle suivant.

La sortie PC_Hold retarde l'incrémentation du *Program Counter* d'un coup d'horloge. La RAM étant syn-

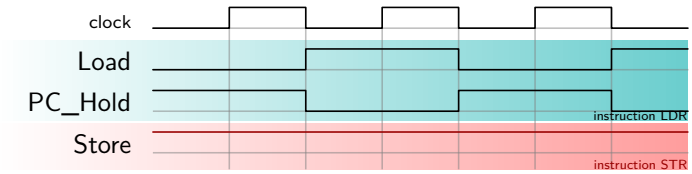
chrone, elle a besoin d'un cycle pour traiter l'opération de lecture. La donnée lue n'est donc pas disponible immédiatement, et le processeur ne peut pas commencer à exécuter l'instruction suivante. La sortie `Load` devra donc elle aussi être retardée d'un cycle.

Si l'entrée `Enable` est à 0, les sorties sont forcées à 0.

Astuce : utiliser une bascule D pour activer `PC_Hold` et retarder `Load`.

Remarque : comme indiqué en section 7.3.1, chaque adresse de notre RAM correspond à un mot, c'est à dire 32 bits de données. Le langage assembleur est plus flexible et adresse la RAM octet par octet (8 bits). En revanche, nous n'implémentons ici que des instructions (LDR et STR) permettant de dialoguer avec la RAM mot par mot. De ce fait l'immédiat contenu dans l'instruction correspond directement à un incrément d'adresse mot par mot. Le programme d'assemblage, lui, devra diviser l'offset de l'instruction assembleur pour coder l'immédiat dans la représentation binaire.

Pour vous aider, voici un chronogramme du comportement attendu :



6.3.5.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
`Instruction`	16	Instruction de lecture/écriture en mémoire à décoder
`Enable`	1	Active le composant. Si 0, les sortie sont forcées à 0
`Stack_Pointer`	32	Valeur courante du pointeur de pile
`Clk`	1	Horloge
`Reset`	1	Remise à zéro

Sorties

Port	Taille	Description
`Store`	1	Informe d'une opération d'écriture
`Load`	1	Informe d'une opération de lecture
`PC_Hold`	1	Retarde l'incrémentation du compteur ordinal d'un cycle
`Rmd`	3	Registre cible / source pour l'opération de lecture / écriture
`RAM_Addr`	32	Adresse mémoire à laquelle effectuer les opérations

6.3.6 SP Address

6.3.6.1 Description

Le bloc *SP Address* traite les instructions de mise à jour du pointeur de pile (voir *11.1.4 Miscellaneous 16-bit instructions*).

La sortie `New_Stack_Pointer` correspond à la nouvelle valeur du pointeur de pile qui sera enregistré dans

le *Stack Pointer*. Elle est calculée en fonction de la valeur actuelle du `Stack_Pointer` et de l'opération en provenance de l'instruction (addition ou soustraction d'un immédiat).

Si l'entrée `Enable` est à 0, la sortie `Write_Enable` est forcée à 0.

6.3.6.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
`Instruction`	16	Instruction de mise à jour du pointeur de pile à décoder
`Enable`	1	Active le composant. Si 0, les sortie sont forcées à 0
`Stack_Pointer`	32	Valeur courante du pointeur de pile

Sorties

Port	Taille	Description
`Write_Enable`	1	Le registre du pointeur de pile sera mis à jour avec la valeur `New_Stack_Pointer`
`New_Stack_Pointer`	32	Nouvelle valeur du pointeur de pile

6.3.7 Conditional

6.3.7.1 Description

Le bloc conditionnel traite les instructions de branchement (voir *11.1.5 Branch*).

Il vérifie éventuellement la condition à l'aide des drapeaux du registre *Flags APSR*, selon le tableau *11.2 Conditions (p. 178)*. Si la condition est vérifiée, la sortie `Verified` passe à 1.

La sortie `Offset` correspond à l'offset qui sera ajouté au *Program Counter*, en provenance de l'instruction.

Si l'entrée `Enable` est à 0, la sortie `Verified` est forcée à 0.

6.3.7.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
`Instruction`	16	Instruction du branchement conditionnel à décoder
`Enable`	1	Active le composant. Si 0, les sortie sont forcées à 0
`N`	1	Drapeau négatif
`Z`	1	Drapeau nul
`C`	1	Drapeau retenue
`V`	1	Drapeau dépassement de capacité

Sorties

Port	Taille	Description
`Verified`	1	La condition est vérifiée
`Offset`	11	Offset à appliquer au Program Counter si la condition est vérifiée

6.3.8 Program Counter

6.3.8.1 Description

Le compteur ordinal (*Program Counter*), aussi appelé pointeur d'instruction (*Instruction Pointer*), est un compteur 16 bits dont la valeur donne l'adresse de la prochaine instruction à exécuter. Il est déjà implémenté directement dans le contrôleur.

Il s'incrémente automatiquement à chaque front descendant d'horloge lorsque le signal `Count` est à l'état haut. Le signal `PC_Hold` sortant du sous-composant *Load/Store* retarde cette incrémentation d'un cycle afin de laisser le temps à la RAM de présenter la donnée sélectionnée sur sa sortie. En effet, étant synchrone, elle n'agit qu'au coup d'horloge suivant.

Lorsque le signal `Load` est à l'état haut, le compteur charge la valeur suivante à partir de son entrée au prochain coup d'horloge. Les instructions de branchement (voir *11.1.5 Branch*) du sous-composant *Conditional* exploitent cette possibilité afin d'altérer le flot d'exécution du programme en sautant à une certaine adresse.

Remarque : afin d'être cohérent avec le comportement d'un vrai `Cortex-M0` et donc rester compatible avec les programmes compilés par `GCC` ou `LLVM`, l'offset du branchement est incrémenté de 3.

6.3.8.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
`Data`	16	Valeur du compteur à définir si `Load` est à l'état haut
`Count`	1	Active l'incrémentation automatique du compteur
`UpDown`	1	0 : décrémente, 1 : incrémente. Forcé à 1.
`Load`	1	Charge la valeur à partir de l'entrée `Data`
`Clk`	1	Horloge
`Clear`	1	Remise à Zero

Sorties

Port	Taille	Description
`Output`	16	Valeur courante du compteur ordinal
`Carry`	1	1 si le compteur atteint sa valeur maximale. Non utilisé ici.

6.3.9 Stack Pointer

6.3.9.1 Description

Le pointeur de pile (*Stack Pointer*) est un simple registre 32 bits indiquant l'adresse en mémoire du début de la pile. Il est déjà implémenté directement dans le contrôleur.

Son contenu est modifié par les instructions `ADD` et `SUB` (voir *11.1.4 Miscellaneous 16-bit instructions*) du sous-composant *SP Address*.

Son contenu est utilisé par les instructions `LDR` et `STR` (voir *11.1.3 Load/Store*) du sous-composant *Load/Store*.

Remarque : en général dans un programme, on commence par décrémenter (avec `SUB`) le pointeur de pile de la quantité d'espace mémoire dont on aura besoin. Par la suite, pour les accès mémoire on utilisera `LDR`

et `STR` avec un offset pour sélectionner le bon emplacement dans la pile. À la fin, on incrémente (avec `ADD`) le pointeur de pile pour revenir à l'état initial.

On peut dire que la pile grandit vers le bas.

6.3.9.2 Interface

Entrées

Port	Taille	Description
`Data`	32	Nouvelle valeur du pointeur de pile
`Enable`	1	Active l'enregistrement de la valeur au prochain coup d'horloge
`Clk`	1	Horloge
`Reset`	1	Remise à Zero

Sorties

Port	Taille	Description
`Output`	32	Valeur courante du pointeur de pile

7 Chemin de données

7.1 Description

Il s'agit d'interfacer les différents composants CPU, RAM et ROM afin d'obtenir une machine fonctionelle qui puisse exécuter un programme automatiquement.

Un bouton `Reset` contrôle l'entrée `Reset` du processeur afin de remettre à zéro son état et recommencer l'exécution du programme depuis le début.

Un bouton `Clock` contrôle l'entrée `Clk` du processeur et de la RAM afin de contrôler manuellement l'exécution de chacun des instructions. Pour une exécution automatique et pour le déploiement sur FPGA, on utilisera le composant `Horloge` de Logisim.

7.2 CPU

7.2.1 Description

Le processeur regroupe le contrôleur, le banc de registres et l'ALU.

À chaque coup d'horloge, l'instruction est décodée par le contrôleur, le calcul est effectué par l'ALU tandis que le banc de registres lui fournit les données et enregistre le résultat.

Lors d'une instruction `LDR`, le signal `Load` du contrôleur est activé, et la donnée en entrée du banc de registres doit être lue à partir de l'entrée `RAM_In` plutôt qu'à partir du résultat de l'ALU.

Lors d'une instruction `STR`, le signal `Store` du contrôleur est activé et est passé à la RAM. Les données en sortie `RAM_Out` sont fournies par la sortie `AOut` du banc de registres.

Lors d'une instruction de la catégorie *Shift, add, sub, mov*, le signal `DP_Shift` du contrôleur est activé et l'immédiat `Imm5` en sortie du contrôleur est utilisé pour l'entrée `Shift` de l'ALU.

Lors d'une instruction de la catégorie *Data Processing*, le signal `DP_Shift` du contrôleur est désactivé et les 5 bits de poids faible de la sortie `AOut` sont utilisés pour l'entrée `Shift` de l'ALU.

Lors d'une instruction `MOV` ou `ADD` / `SUB` / `CMP` avec immédiat, le signal `Imm32_Enable` du contrôleur est activé et la donnée à l'entrée `A` de l'ALU doit être lue à partir de la sortie `Imm32` du contrôleur plutôt qu'à partir de la sortie `AOut` du banc de registres.

Les sorties `Rm`, `Rn` et `Rd` du contrôleur se connectent respectivement aux entrées `RegA`, `RegB` et `RegDest` du banc de registres pour sélectionner les registres correspondant.

Les sorties `PC` et `RAM_Addr` se connectent respectivement aux sorties `ROM_Addr` et `RAM_Addr` de ce composant CPU pour sélectionner les adresses de la ROM et de la RAM.

Les sorties `Flags` et `SP` se connectent aux broches du même nom pour communiquer ces valeurs aux afficheurs de la façade.

7.2.2 Interface

7.2.2.1 Entrées

Port	Taille	Description
`RAM_In`	32	Données chargées à partir de la RAM
`ROM_In`	16	Instruction chargée à partir de la ROM
`Clk`	1	Horloge
`Reset`	1	Remise à Zero

7.2.2.2 Sorties

Port	Taille	Description
`ROM_Addr`	16	Adresse de la prochaine instruction
`RAM_Addr`	32	Adresse de la donnée à lire/écrire en mémoire
`RAM_Out`	32	Donnée à écrire en mémoire
`Store`	1	Indique à la RAM de sauvegarder la donnée `RAM_Out` à l'adresse `RAM_Addr`
`R0-R7`	8×32	Sortie des registres utilisées à des fins de débogage et visualisation du comportement
`Flags`	4	Valeur des drapeaux, issue du contrôleur
`SP`	32	Valeur de SP, issue du contrôleur

7.3 RAM

7.3.1 Description

La RAM est la mémoire de données dans laquelle le programme vient stocker le contenu d'un registre ou lire une donnée pour remplir un registre. Synchrone, elle ne lit ou n'enregistre les données qu'au coup d'horloge suivant.

Elle est adressée sur 8 bits et contient des données de 32 bits.

Le signal `Load` est définit à 1 de manière à toujours obtenir la données à l'adresse `Address` sur la sortie `Data`.

Lorsque le signal `Store` est activé, les données présentent sur l'entrée `Input` sont enregistrées dans la RAM à l'adresse `Address`.

Sous Logisim, le paramètre `Databus implementation` doit être défini à `Separate databus for read and write` et le paramètre `Trigger` à `Rising Edge`.

Remarque : le jeu d'instructions ARMv7-M adresse la RAM octet par octet (1 adresse = 8 bits de données) tandis que sous Logisim, le composant RAM est adressé mot par mot (1 adresse = 32 bits de données). Cela permet de simplifier la gestion de la RAM puisqu'il est possible de charger des données directement dans les registres 32 bits du CPU.

7.3.2 Interface

7.3.2.1 Entrées

Port	Taille	Description
`Address`	8	Adresse à laquelle lire/écrire les données
`Load`	1	Lire les données au prochain coup d'horloge
`Store`	1	Enregistrer les données au prochain coup d'horloge
`Clock`	1	Horloge
`Input`	32	Données à écrire

7.3.2.2 Sorties

Port	Taille	Description
`Data`	32	Données lues

7.4 ROM

7.4.1 Description

La ROM est la mémoire d'instruction à partir de laquelle les instructions du programme sont lues. Elle est accessible en lecture uniquement et est asynchrone.

Elle est adressée sur 16 bits et contient des données de 16 bits (largeur d'une instruction Thumb).

Le programme, assemblé par l'assembleur, devra être chargé dans cette ROM

7.4.2 Interface

7.4.2.1 Entrées

Port	Taille	Description
`Address`	16	Adresse de l'instruction à charger

7.4.2.2 Sorties

Port	Taille	Description
`Data`	16	Instruction lue

8 Périphériques d'entrée/sortie mappés en mémoire

Actuellement, notre processeur ne peut interagir avec l'utilisateur que de façon très primitive :

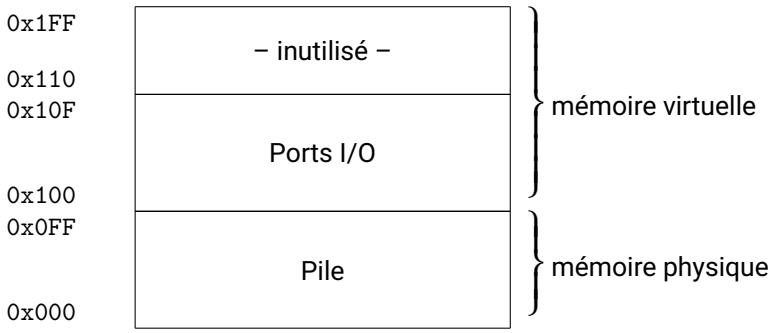
- En écrivant une valeur dans un registre
- En lisant ou écrivant une valeur dans la RAM

Dans les deux cas, cela limite à des valeurs numériques, et cela implique de prévoir à l'avance, par convention, dans quel registre ou case mémoire lire ou écrire.

Dans la réalité, vous lisez ce document sur un ordinateur avec lequel vous interagissez via des périphériques d'entrée/sortie : un clavier, une souris, un écran, etc.

L'espace mémoire de l'ordinateur contient des sections correspondant non pas à une vraie mémoire, mais à des registres partagés avec des périphériques. Les instructions de gestion de RAM sont utilisés pour lire ou écrire dans ces registres.

Le processeur PARM possède une RAM de 256 mots de 32 bits et un bus d'adresse sur 9 bits. Son espace mémoire est disposé de la manière suivante :



Les 256 premiers mots (adresses $[0; 256[$) correspondent à la mémoire RAM physique, tandis que les 256 suivants sont "virtuels", ils sont gérés par le contrôleur MMIO présent en bas du circuit, qui se charge de déléguer aux différents périphériques. Ici, 16 emplacements sont alloués, donc les adresses $[256; 271[$ correspondent à des périphériques et les adresses $[271; 512[$ ne sont "branchées" à rien.

La documentation des différents périphériques est disponible dans le fichier `include/parm.h`.

8.1 Exemple : DIP switch

Un composant d'entrée très courant est le DIP switch. Il s'agit d'un petit bloc comportant une série de n interrupteurs, encodant un nombre sur n bits. Voici à quoi il ressemble :

FIG. 8 : DIP switch

Notre processeur est relié à trois switches de ce genre, sur les entrées 3, 4 et 5 (adresses 259, 260 et 261). Du point de vue d'un programme, lire depuis les DIP switches revient à lire depuis une variable qui serait stockée à ces emplacements, c'est entièrement transparent.

8.2 Exemple : Terminal

La manière la plus simple d'afficher du texte est via un terminal. Nommé d'après les terminaux physiques qui équipaient les mini-ordinateurs des années 1970, son fonctionnement est simple : quand il reçoit un caractère, il l'affiche. Certains caractères ont un effet particulier :

- `\n` (newline) effectue un retour à la ligne
- `\b` (backspace) efface le dernier caractère saisi
- `\f` (form-feed) efface l'écran

Ainsi, cela évite d'avoir des entrées spécifiques pour toutes ces actions.

En pratique, le terminal de Logisim possède plusieurs entrées : l'horloge, le caractère, la mise à jour et la réinitialisation. Cette dernière n'est utilisée que quand on appuie sur le bouton "Reset" du processeur.

À chaque front montant d'horloge, si la broche "mise à jour" est haute, alors le caractère est affiché.

Une seule sortie est fournie aux programmes : caractère. Sa valeur est reliée à l'entrée "caractère" de l'écran, et dès qu'une écriture est faite dans cette sortie, l'entrée "mise à jour" est passée à 1.

9 Assembleur

9.1 Introduction

Le code binaire à exécuter est obtenu par l'assemblage d'instructions issues du jeu d'instructions ARMv7 (contre un jeu ARMv6 dans le Cortex-M0 réel).

Le rôle de l'assembleur est de traduire un programme écrit en langage assembleur dans une représentation que le processeur saura interpréter.

Ici, le langage assembleur sera l'UAL (*Unified Assembler Language*) de ARM, restreint aux instructions ARMv7 implémentées. La représentation des instructions en sortie correspond au codage Thumb des instructions, c'est à dire uniquement sur 16-bits (voir *11 Jeu d'instructions (Instruction Set Architecture)*).

Le format de sortie aura la particularité d'être un fichier texte lisible par Logisim. Les instructions Thumb devront donc être codées en hexadecimal dans un format décrit ci-après.

9.2 Syntaxe

Syntaxe UAL :
`S` : màj des drapeaux
`<c>` : condition
`Rm` : registre opérande 1
`Rn` : registre opérande B
`Rd` : registre destination

`#<immN>` : immédiat sur `N` bits
`SP` : registre de pointeur de pile en mémoire
`opcode` : code de l'instruction, peut occuper jusqu'à la taille indiquée
`{}` : argument optionnel
`[]` : adresse

NB : quand votre programme lit du code assembleur, plusieurs choses doivent être ignorées :

- les espaces et tabulations (il n'y a aucune différence entre `movs r1, #0` et `movs r1,#0`
- les commentaires (parties de lignes qui commencent `@`)
- les directives de compilation (instructions spéciales qui commencent par un `.`)
- les instructions `push ...` et `add r7, sp ...` qui sont parfois émises par les compilateurs C mais ne sont pas utilisées dans le cadre de ce projet

Des fichiers sources assembleur, ainsi que leur version binaire assemblée, vous sont fournis dans les dossiers `code_asm` et `code_c` du dépôt Git du projet. Dans le cadre du développement de votre assembleur, vous pouvez (et devriez) vous aider de ces fichiers pour le tester. Votre livrable d'assembleur doit, idéalement, pouvoir lire et assembler tous les fichiers .s fournis, sans erreur, et donner exactement la même sortie que les fichiers .bin correspondants.

Exemple :

Nous allons partir d'un exemple très simple : 3 variables sont déclarées sur la pile, *a* et *b* ont une valeur qui leur est propre et nous stockons dans *c* le résultat de l'addition *a + b*.
Code C :

```c
int main() {
    int a, b, c;
    a = 0;
    b = 1;
    c = a + b;
}
```

Code assembleur pour le Cortex-M0 avec un pseudo-code C équivalent, et l'encodage correspondant :

```
b083 | sub     sp, #12          | int* sp; int r0, r1, r2;
2000 | movs    r0, #0           | sp      = sp - 3;
9002 | str     r0, [sp, #8]     | r0      = 0;
2101 | movs    r1, #1           | sp[2]   = r0;
9101 | str     r1, [sp, #4]     | r1      = 1;
9902 | ldr     r1, [sp, #8]     | sp[1]   = r1;
9a01 | ldr     r2, [sp, #4]     | r1      = sp[2];
1889 | adds    r1, r1, r2       | r2      = sp[1];
9100 | str     r1, [sp]         | r1      = r1 + r2;
b003 | add     sp, #12          | sp[0]   = r1;
                                | sp      = sp + 3;
```

9.3 Syntaxe Logisim

Voici un exemple de fichier lisible par Logisim pour remplir le contenu de la ROM obtenu par assemblage du code assembleur ci-dessus :

```
v2.0 raw
b083 2000 9002 2101 9101 9902 9a01 1889 9100 b003
```

On observe dont un entête `v2.0 raw`, toujours présent sur la première ligne.

Sur les lignes suivantes, les instructions sont disposées par groupes de 4 caractères hexadecimaux séparés par des espaces, ce qui représente 16 bits. On a donc une instruction par groupe. Les retours à la ligne sont optionnels.

10 Compilation de code C

Avec le jeu d'instructions de ce processeur, il est possible d'exécuter du code C compilé par `Clang`. Il doit cependant rester relativement simple avec une structure bien précise.

En particulier, on évitera :

- Les appels de fonctions (`LR`, `PUSH`, `POP` non implémentés)
- Les variables globales et `static` (adressage uniquement sur la pile)
- Les adressages indirects (donc l'utilisation de tableaux ou de chaînes)

On s'assurera donc :

- D'écrire tout le code dans la fonction `void run()`
- De déclarer toutes les variables dans le corps de cette dernière

Voici le code de démarrage pour un programme C dans le cadre du projet :

```
#include <parm.h>

void run()
{
    BEGIN();
    // code ici
    END();
}
```

On utilise ici une fonction s'appelant `run` et non pas `main` car les compilateurs C émettent un warning lorsque la fonction `main()` ne se termine pas (par exemple, si elle contient une boucle infinie). Or, c'est ici un cas souhaité, et appeler la fonction autrement évite ce warning.

Les appels `BEGIN` et `END` sont des macros servant à allouer l'espace mémoire nécessaire pour gérer les périphériques d'entrée/sortie. Il faut systématiquement les écrire dans vos programmes en début et en fin de fonction, sans quoi vous ne pourrez pas utiliser la RAM et ne pourrez donc pas utiliser de variables.

La commande à utiliser est la suivante (écrivez la, si vous la copiez depuis le PDF les caractères ne seront pas bons) :

```
clang -S -target arm-none-eabi -mcpu=cortex-m0 -O0 -mthumb -nostdlib\
-I./include main.c
```

avec `main.c` le fichier source C. Veillez à être dans le dossier code_c en lançant cette commande.

Cela créera un fichier de sortie `main.s` contenant les instructions assembleur, entourées de directives spéciales qui ne nous intéressent pas ici.

Remarque : depuis la version 9 de `Clang`, l'addressage mémoire est réalisé différemment en utilisant des instructions `add <Rd>,SP,#<imm8>` et `ldr <Rt>,<Rn>,#<imm5>` qui ne sont pas prises en charge par l'implémentation. Il faut donc s'assurer d'utiliser une version 4 à 8 de `Clang` (paquet `clang-8` sous Ubuntu).

Le code assembleur devra être passé à l'assembleur écrit dans le cadre du projet pour générer le fichier lisible par Logisim et pouvoir l'importer dans la ROM.

11 Jeu d'instructions (Instruction Set Architecture)

Toutes les informations présentes dans cette section proviennent directement du manuel de référence de l'architecture ARMv7-M (*ARM v7-M Architecture Reference Manual*). Elles ont été traduites et réorganisées pour en faciliter la lecture. En cas de doute, ou pour en savoir plus, les pages du manuel sont indiquées entre parenthèses.

NB : les registres sont encodés par leur numéro. C'est-à-dire que le registre r0 sera encodé comme la valeur 0 ; r1 par 1, etc.

11.1 Instructions à implémenter

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
opcode															

Comprendre : toute instruction peut être identifiée à l'aide d'au maximum 7 bits de poids fort. Pour certains, moins de bits suffisent.

11.1.1 Shift, add, sub, mov

Toutes les instructions de cette section ont la forme suivante :

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	opcode													

Comprendre : les deux bits de poids fort sont à zéro, puis il y a au maximum (il peut y en avoir moins) 5 bits constants (”opcode”) servant à identifier l'instruction.

11.1.1.1 LSL (immediate) : Logical Shift Left (p. 282)

Description :

Décale le contenu du registre `Rn` vers la gauche d'un nombre de bits donné par l'immédiat `imm5`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Des zéros sont insérés à droite.

Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = Rn<0 - shift>` avec shift le nombre de décalage. Autrement dit, `C` est égal au dernier bit sortant.

Assembleur : T1

```
LSLS <Rd>,<Rn>,#<imm5>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	0	imm5					Rn			Rd		

11.1.1.2 LSR (immediate) : Logical Shift Right (p. 284)

Description :

Décale le contenu du registre `Rn` vers la droite d'un nombre de bits donné par l'immédiat `imm5`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Des zéros sont insérés à gauche.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = Rn<shift - 1>` avec shift le nombre de décalage. Autrement dit, `C` est égal au dernier bit sortant.

Assembleur : T1

```
LSRS <Rd>,<Rn>,#<imm5>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	1	imm5					Rn			Rd		

11.1.1.3 ASR (immediate) : Arithmetic Shift Right (p. 203)

Description :

Décale le contenu du registre `Rn` vers la droite d'un nombre de bits donné par l'immédiat `imm5`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Le bit de signe de `Rn` est ré-inséré à gauche.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = Rn<shift - 1>` avec shift le nombre de décalage. Autrement dit, `C` est égal au dernier bit sortant.

Assembleur : T1

```
ASRS <Rd>,<Rn>,#<imm5>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	1	0	imm5					Rn			Rd		

11.1.1.4 ADD (register) : Add register (p. 192)

Description :

Ajoute le contenu du registre `Rn` au contenu du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
ADDS <Rd>,<Rn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	1	1	0	0	Rm			Rn			Rd		

11.1.1.5 SUB (register) : Substract register (p. 404)

Description : Soustrait le contenu du registre `Rm` au contenu du registre `Rn`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
SUBS <Rd>,<Rn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	1	1	0	1	Rm			Rn			Rd		

11.1.1.6 ADD (immediate) : Add 3-bit immediate (p. 190)

Description :

Ajoute l'immédiat `Imm3` au contenu du registre `Rn`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
ADDS <Rd>,<Rn>,<#imm3>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	1	1	1	0	Imm3			Rn			Rd		

11.1.1.7 SUB (immediate) : Subtract 3-bit immediate (p. 402)

Description :

Soustrait l'immédiat `Imm3` au contenu du registre `Rn`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
SUBS <Rd>,<Rn>,#<imm3>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	1	1	1	1	Imm3			Rn			Rd		

11.1.1.8 MOV (immediate) : Move (p. 291)

Description :

Écrit l'immédiat `imm8` dans le registre `Rd`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.

Assembleur : T1

```
MOVS <Rd>,#<imm8>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	1	0	0	Rd			imm8							

11.1.1.9 CMP (immediate) : Compare (p. 223)

Description :

Soustrait l'immédiat `imm8` au contenu du registre `Rn`, le résultat n'est pas écrit.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
CMP <Rd>,#<imm8>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	1	0	1	Rd			imm8							

11.1.1.10 ADD (immediate) : Add 8-bit immediate (p. 190)

Description :

Ajoute l'immédiat `imm8` au contenu du registre `Rdn`, écrit le résultat dans celui-ci.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T2

```
ADDS <Rdn>, #<imm8>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	1	1	0	Rdn			imm8							

11.1.1.11 SUB (immediate) : Subtract 8-bit immediate (p. 402)

Description :

Soustrait l'immédiat `imm8` au contenu du registre `Rdn`, écrit le résultat dans celui-ci.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T2

```
SUBS <Rdn>, #<imm8>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	1	1	1	Rdn			imm8							

11.1.2 Data processing

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	opcode									

11.1.2.1 AND (register) : Bitwise AND (p. 201)

Description :

Effectue un ET binaire entre le contenu du registre `Rdn` et le contenu du registre `Rm`, écrit le résultat dans le

registre `Rdn`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0`

Assembleur : T1

```
ANDS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Rm			Rdn		

11.1.2.2 EOR (register) : Exclusive OR (p. 233)

Description :

Effectue un OU exclusif binaire entre le contenu du registre `Rdn` et le contenu du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0`

Assembleur : T1

```
EORS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	Rm			Rdn		

11.1.2.3 LSL (register) : Logical Shift Left (p. 283)

Description :

Décale le contenu du registre `Rdn` vers la gauche d'un nombre de bits donné par l'octet inférieur du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Des zéros sont insérés à droite.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = Rn<0 - shift>` avec shift le nombre de décalage. Autrement dit, `C` est égal au dernier bit sortant.

Assembleur : T1

```
LSLS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	Rm			Rdn		

11.1.2.4 LSR (register) : Logical Shift Right (p. 285)

Description :

Décale le contenu du registre `Rdn` vers la droite d'un nombre de bits donné par l'octet inférieur du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Des zéros sont insérés à gauche.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = Rn<shift - 1>` avec shift le nombre de décalage. Autrement dit, `C` est égal au dernier bit sortant.

Assembleur : T1

```
LSRS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	Rm			Rdn		

11.1.2.5 ASR (register) : Arithmetic Shift Right (p. 204)

Description :

Décale le contenu du registre `Rdn` vers la droite d'un nombre de bits donné par l'octet inférieur du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Le bit de signe de `Rdn` est ré-inséré à gauche.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = Rn<shift - 1>` avec shift le nombre de décalage. Autrement dit, `C` est égal au dernier bit sortant.

Assembleur : T1

```
ASRS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	Rm			Rdn		

11.1.2.6 ADC (register) : Add with Carry (p. 188)

Description :

Ajoute le contenu du registre `Rm` et le drapeau de retenu au contenu du registre `Rdn`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
ADCS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	Rm			Rdn		

11.1.2.7 SBC (register) : Substract with Carry (p. 347)

Description :

Soustrait le contenu du registre `Rm` et le complément du drapeau de retenu au contenu du registre `Rdn`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée, 1 sinon.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
SBCS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	Rm			Rdn		

11.1.2.8 ROR (register) : Rotate Right (p. 339)

Description :

Pivote le contenu du registre `Rdn` vers la droite d'un nombre de bits donné par l'octet inférieur du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Les bits de `Rdn` sortant à droite sont ré-insérés à gauche.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = résultat<31>`. Autrement dit, `C` est égal au dernier bit sortant.

Assembleur : T1

```
RORS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	Rm			Rdn		

11.1.2.9 TST (register) : Set flags on bitwise AND (p. 420)

Description :

Effectue un ET logique entre le contenu du registre `Rn` et le contenu du registre `Rm`, le résultat n'est pas écrit.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0`

Assembleur : T1

```
TST <Rn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	Rm			Rn		

11.1.2.10 RSB (immediate) : Reverse Substract from 0 (p. 341)

Description :

Soustrait le contenu du registre `Rn` à l'immédiat 0, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0`
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
RSBS <Rd>,<Rn>,#0
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	Rn			Rd		

11.1.2.11 CMP (register) : Compare Registers (p. 224)

Description :

Soustrait le contenu du registre `Rm` au contenu du registre `Rn`, le résultat n'est pas écrit.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
CMP <Rn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	Rm			Rn		

11.1.2.12 CMN (register) : Compare Negative (p. 222)

Description :

Ajoute le contenu du registre `Rm` au contenu du registre `Rn`, le résultat n'est pas écrit.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.

`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération non signée.
`V = 1` en cas de dépassement de capacité lors d'une opération signée.

Assembleur : T1

```
CMN <Rn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	Rm			Rn		

11.1.2.13 ORR (register) : Logical OR (p. 310)

Description :

Effectue un OU binaire entre le contenu du registre `Rdn` et le contenu du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0`.

Assembleur : T1

```
ORRS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	Rm			Rdn		

11.1.2.14 MUL : Multiply Two Registers (p. 302)

Description :

Multiplie le contenu du registre `Rn` avec le contenu du registre `Rdm`, écrit les 32 bits de poids faible du résultat dans le registre `Rdm`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.

Assembleur : T1

```
MULS <Rdm>,<Rn>,<Rdm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	Rn			Rdm		

11.1.2.15 BIC (register) : Bit Clear (p. 210)

Description :

Effectue un ET binaire entre le contenu du registre `Rdn` et le complément du contenu du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rdn`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0`.

Assembleur : T1

```
BICS <Rdn>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	Rm			Rdn		

11.1.2.16 MVN (register) : Bitwise NOT (p. 304)

Description :

Effectue un NON binaire sur le contenu du registre `Rm`, écrit le résultat dans le registre `Rd`.
Les drapeaux suivants sont mis à jour :
`N = 1` si `résultat < 0`, `N = 0` sinon.
`Z = 1` si `résultat = 0`, `Z = 0` sinon.
`C = 0`.

Assembleur : T1

```
MVNS <Rd>,<Rm>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	Rm			Rd		

11.1.3 Load/Store

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	0	1	opcode											

11.1.3.1 STR (immediate) : Store Register (p. 386)

Description :

Écrit un mot de 32 bits contenu dans le registre `Rt` à l'adresse mémoire spécifiée.
L'adresse mémoire est calculée à partir du contenu du registre `SP` plus l'immédiat `imm8`.
L'immédiat `imm8` correspond à l'`offset` divisé par 4 par l'assembleur.

Assembleur : T2

```
STR <Rt>,[SP,#<offset>]
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	0	1	0	Rt			imm8							

11.1.3.2 LDR (immediate) : Load Register (p. 246)

Description :

Charge un mot de 32 bits contenu à l'adresse mémoire spécifiée, écrit le résultat dans le registre `Rt`.
L'adresse mémoire est calculée à partir du contenu du registre `SP` plus l'immédiat `imm8`.
L'immédiat `imm8` correspond à l'`offset` divisé par 4 par l'assembleur.

Assembleur : T2

```
LDR <Rt>,[SP{,#<offset>}]
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	0	1	1	Rt			imm8							

11.1.4 Miscellaneous 16-bit instructions

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	1	1	opcode											

11.1.4.1 ADD (SP plus immediate) : Add Immediate to SP (p. 194)

Description :

Ajoute l'immédiat `imm7` à la valeur du registre `SP`, écrit le résultat dans le registre `SP`.
L'immédiat `imm7` correspond à l'`offset` divisé par 4 par l'assembleur.
Les drapeaux ne sont pas mis à jour.

Assembleur : T2

```
ADD SP,{SP},#<offset>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	1	1	0	0	0	0	0	imm7						

11.1.4.2 SUB (SP minus immediate) : Subtract Immediate from SP (p. 406)

Description :

Soustrait l'immédiat `imm7` à la valeur du registre `SP`, écrit le résultat dans le registre `SP`.
L'immédiat `imm7` correspond à l'`offset` divisé par 4 par l'assembleur.
Les drapeaux ne sont pas mis à jour.

Assembleur : T1

```
SUB SP,{SP},#<offset>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	1	1	0	0	0	0	1	imm7						

11.1.5 Branch

Dans le code assembleur, les instructions de branchement ont pour opérande des étiquettes, pointant vers d'autres endroits dans le code. Lors de l'encodage par le compilateur, la valeur de l'immédiat (imm8 ou imm11) est égale à $N_{cible} - N_{source} - 3$, où N représente le numéro de l'instruction dans le programme (indexée à 0). Cette valeur peut être négative (si on veut sauter à une instruction présente plus tôt dans le programme) et sera donc encodée comme valeur signée en complément à 2.

11.1.5.1 B : Conditional Branch (p. 205)

Description :

Continue l'exécution à partir de l'étiquette `label` si la condition <c> est vérifiée.

Assembleur : T1

```
B<c> <label>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	1	0	1	cond				imm8							

11.1.5.2 B : Unconditional Branch (p. 205)

Description :

Continue l'exécution à partir de l'étiquette `label`.

Assembleur : T2

```
B <label>
```

Binaire :

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	1	1	0	0	imm11										

11.2 Conditions (p. 178)

code	symbole	signification	drapeaux
0000	EQ	égalité	Z == 1
0001	NE	différence	Z == 0
0010	CS ou HS	retenue	C == 1
0011	CC ou LO	pas de retenue	C == 0
0100	MI	négatif	N == 1
0101	PL	positif ou nul	N == 0
0110	VS	dépassement de capacité	V == 1
0111	VC	pas de dépassement de capacité	V == 0
1000	HI	supérieur (non signé)	C == 1 et Z == 0
1001	LS	inférieur ou égal (non signé)	C == 0 ou Z == 1
1010	GE	supérieur ou égal (signé)	N == V
1011	LT	inférieur (signé)	N != V
1100	GT	supérieur (signé)	Z == 0 et N == V
1101	LE	inférieur ou égal (signé)	Z == 1 ou N != V
1110	AL	toujours vrai	

Remarque : Par complétude, vous pouvez considérer que la condition 1111 correspond à ”toujours faux”. En réalité, cette condition n’est jamais utilisée, mais lors de la réalisation de circuits il est déconseillé de laisser des entrées non reliées.

11.3 Drapeaux (p. 31)

- `N` : résultat négatif, égal au bit de poids fort du résultat
- `Z` : résultat nul, égal à 1 si le résultat est 0
- `C` : retenue
- `V` : dépassement de capacité