

Université Grenoble Alpes (UGA)

UFR en Informatique, Mathématique et Mathématiques Appliquées (IM2AG)
Département Licence Sciences et Technologies (DLST)

Architectures des ordinateurs (une introduction)

Unité d'Enseignement INF401 pour les Parcours INF, MIN et MIN-int
Année 1, l'exécution des programmes en langage machine.

Documentation Technique
Sujets des Travaux Dirigés
Sujets des Travaux Pratiques

Année Universitaire 2018 / 2019

Table des matières

I	Documentation Technique	4
1	Environnement informatique pour les travaux pratiques	5
2	Langage machine et langage d'assemblage ARM	9
II	Travaux Dirigés	24
1	TD séance 1 : Codage	25
2	TD séance 2 : Représentation des nombres	27
3	TD séance 3 : Langage machine, codage des données	37
4	TD séance 4 : Codage des données (suite)	41
5	TD séances 5 et 6 : Codage des structures de contrôle	45
6	TD séance 7 : Fonctions : paramètres et résultat	49
7	TD séance 8 : Appels/retours de procédures, action sur la pile	55
8	TD séance 9 : Correction partiel	58
9	TD séance 10 : Paramètres dans la pile, paramètres passés par l'adresse	59
10	TD séance 11 : Etude du code produit par le compilateur arm-eabi-gcc, optimisations	61
11	TD séance 12 : Organisation d'un processeur : une machine à pile	71
III	Travaux Pratiques	77
1	TP séance 1 : Représentation des informations (ex. : images, programmes, entiers)	78
2	TP séance 2 : Codage et calculs en base 2	84
3	TP séances 3 et 4 : Codage des données	88
4	TP séance 5 : Codage de structures de contrôle et le metteur au point gdb	94
5	TP séances 6 et 7 : Parcours de tableaux	98

6	TP séances 8, 9 et 10 : Procédures, fonctions et paramètres	103
7	TP séance 11 : Etude du code produit par le compilateur <code>arm-eabi-gcc</code> , optimisations	106
8	TP séances 12 : Procédures et paramètres	109
IV Annexes		118
1	Annexe I : Codage ASCII des caractères	119
2	Annexe II : Entiers en base 2, types C	120
3	Annexe III : fonction de multiplication	121
4	Annexe IV : Spécification des fonctions d'entrée/sortie définies dans <code>es.s</code>	122

Première partie

Documentation Technique

Chapitre 1

Environnement informatique pour les travaux pratiques

1.1 Connexion au serveur

Un serveur Linux : `turing` est disponible pour les TPs de INF401.

Depuis un poste du DLST : utiliser un logiciel de connexion à distance (typiquement `putty`, `xming` ou `cygwin/X`) disponible sur le pc windows pour obtenir une bannière de connexion sur `turing`.

Depuis une machine de type POSIX (unix, linux, macOS) : lancer la commande `ssh -X -C turing.e.ujf-grenoble.fr` dans un terminal (Xterm, Konsole, etc) pour vous connecter.

1.2 Emplacement des fichiers

Les fichiers nécessaires pour effectuer chaque TP sont situés dans le répertoire : `/Public/401_INF_Public/TP< i >`, ou `< i >` désigne le numéro du TP.

Par exemple, les fichiers nécessaires pour la première séance sont situés dans le répertoire `/Public/401_INF_Public/TP1`. Lorsque le TP dure plus d'une séance le nom du répertoire porte les numéros des deux séances, comme par exemple `/Public/401_INF_Public/TP3et4`.

1.3 Configuration de la session de travail

Les opérations suivantes doivent être effectuées pour configurer *une fois pour toutes* votre environnement de travail :

1. Se connecter à `turing`
2. Exécuter les commandes de configuration contenues dans le fichier `config.sh` au moyen de la commande : `source /Public/401_INF_Public/config.sh`

Vérifier que le répertoire `/opt/gnu/arm/bin` est bien en tête du chemin d'accès aux exécutable, au moyen de la commande : `echo $PATH`

Cette opération installe une fois pour toutes l'environnement requis pour les TPs. Elle n'est à exécuter qu'une seule fois. *Elle n'aura pas à être ré-exécutée lors des autres séances.*

Votre binôme doit ensuite répéter la même opération, afin que vous puissiez tous deux travailler avec un environnement correct dans la suite du semestre :

- Il doit se connecter à son tour à `turing` (depuis un autre poste ou sur le même après que vous soyez vous-même déconnecté).

- Il doit ensuite exécuter sous son identité la commande :
`source /Public/401_INF_Public/config.sh`

1.4 Démarrage d'une session de travail

Les opérations suivantes sont à effectuer **au début de chaque séance** :

1. Se connecter à `turing`.
2. Ouvrir une deuxième fenêtre au moyen de la commande : `xterm &` (Ctrl+clic central ou droit pour options de configuration).
3. Copier le répertoire `/Public/401_INF_Public/TP< i >` dans votre répertoire de travail. Par exemple, pour le 1^{er} TP utilisez la commande :
`cp -r /Public/401_INF_Public/TP1 .`
(*ne pas oublier le point à la fin de la commande précédente !...*)
Puis pour pouvoir modifier vos fichiers : `chmod -R u+w TP1`
4. Effectuer les exercices décrits dans l'énoncé du TP.

1.5 TP1 : ressources disponibles

1.5.1 Fichiers

- Exo 1.1.1 : `image.bm`
- Exo 1.2.1 : `lignes.xpm`
- Exo 2.x : `prog.c`
- Exo 3 : `prog1.s`, `prog1.var1.s`, `prog1.var2.s`, `prog1.var2.s`

1.5.2 Outils

- `nedit` : création et modification de fichiers au format texte (`gedit` également disponible)..
- `cat` et `less` : visualisation de fichiers texte.
- `bitmap` : affichage d'une image monochrome au format *bitmap*.
- `xli` : visualisation de fichiers contenant une image.
- `hexdump` : visualisation en hexadécimal d'un fichier binaire ou texte.
- `arm-eabi-gcc` : compilateur C et assembleur pour processeur Arm.
- `arm-eabi-objdump` : utilitaire permettant d'observer le contenu d'un fichier binaire ayant été produit par `arm-eabi-gcc`.

1.6 Quelques commandes utiles (rappels)

- Créer une copie d'un fichier existant (sans utiliser `nedit` :
`cp <nom fichier original> <nom nouveau fichier>`
Exemple : `cp fich1.c fich2.c`
ou bien :
`cp <nom fichier original> <nom répertoire destination>`
Exemple : `cp fich1.c repA`
- Renommer un fichier :
`mv <nom original du fichier> <nouveau nom du fichier>`

Exemple : `mv fich1.c fich2.c`

- Déplacer un fichier :
`mv <nom du fichier> <nom du répertoire destination>`
Exemple : `mv fich1.c ../repB`
- Afficher (sans le modifier) le contenu d'un *gros* fichier (inutile d'utiliser `nedit`) :
`less <nom du fichier>` Exemple : `less fich1.c`
- Afficher (sans le modifier) le contenu d'un *petit* fichier (inutile d'utiliser `nedit`) :
`cat <nom du fichier>` Exemple : `cat fich2.s`

1.7 Commandes raccourcies

- `armas <nom du fichier source .s>`
Assemblage d'un fichier source. Le résultat est un fichier binaire translatable dont le nom est suffixé par `.o` (`prog.o` dans l'exemple).
Exemple : `armas prog.s`
- `armcc <nom du fichier source .c>`
Compilation d'un fichier en langage C. Le résultat est un fichier binaire translatable dont le nom est suffixé par `.o` (`prog.o` dans l'exemple).
Exemple : `armcc prog.c`
- `armbuild <nom du fichier exécutable> <nom du fichier source> [<liste de fichiers .o à ajouter éventuellement>]`
Assemblage (ou compilation, pour un fichier en langage C) *et* production d'un exécutable.
Exemple 1 : `armbuild prog1 prog1.s lib.o`
Exemple 2 : `armbuild prog2 prog2.c`
- `armrun <nom du fichier exécutable>`
Exécution/simulation d'un fichier binaire exécutable.
Exemple : `armrun prog`
- `armgdb <nom du fichier exécutable>`
Mise au point d'un fichier binaire exécutable.
Exemple : `armgdb prog`
- `armddd <nom du fichier exécutable>`
Mise au point d'un fichier binaire exécutable (mode graphique).
Exemple : `armddd prog`
- `armdata <nom du fichier "objet" .o>`
Observation de la section `.data` d'un fichier binaire translatable. Le résultat est affiché à l'écran.
Exemple : `armdata prog.o`
- `armdisas <nom du fichier "objet" .o>`
Observation/désassemblage de la section `.text` d'un fichier binaire translatable. Le résultat est

affiché à l'écran.

Exemple : `armdisas prog.o`

Chapitre 2

Langage machine et langage d'assemblage ARM

2.1 Résumé de documentation technique ARMv4 pour ARM7TDMI

2.1.1 Organisation des registres

Dans le mode dit “utilisateur” le processeur ARM a 16 registres visibles de taille 32 bits nommés `r0`, `r1`, ..., `r15` :

- `r13` (synonyme `sp`, comme “stack pointer”) est utilisé comme registre pointeur de pile.
- `r14` (synonyme `lr` comme “link register”) est utilisé par l’instruction “branch and link” (`bl`) pour sauvegarder l’adresse de retour lors d’un appel de procédure.
- `r15` (synonyme `pc`, comme “program counter”) est le registre compteur de programme.

Les conventions de programmation des procédures (ATPCS=“ARM-Thumb Procedure Call Standard, Cf. Developer Guide, chapitre 2) précisent :

- les registres `r0`, `r1`, `r2` et `r3` sont utilisés pour le passage des paramètres (données ou résultats)
- le registre `r12` (synonyme `ip`) est un “intra-procedure call scratch register” ; autrement dit il peut être modifié par une procédure appelée.
- le compilateur `arm-eabi-gcc` utilise le registre `r11` (synonyme `fp` comme “frame pointer”) comme base de l’environnement de définition d’une procédure.

Le processeur a de plus un registre d’état, `cpsr` pour “Current Program Status Register”, qui comporte entre autres les codes de conditions arithmétiques. Le registre d’état est décrit dans la figure 2.1.

31	28			7	6		4	0
N	Z	C	V		I	F		mode

FIGURE 2.1 – Registre d’état du processeur ARM

Les bits `N`, `Z`, `C` et `V` sont les codes de conditions arithmétiques, `I` et `F` permettent le masquage des interruptions et `mode` définit le mode d’exécution du processeur (`User`, `Abort`, `Supervisor`, `IRQ`, etc).

2.1.2 Les instructions

Nous utilisons trois types d'instructions : les instructions arithmétiques et logiques (paragraphe 2.1.5), les instructions de rupture de séquence (paragraphe 2.1.6) et les instructions de transfert d'information entre les registres et la mémoire (paragraphe 2.1.7).

Les instructions sont codées sur 32 bits.

Certaines instructions peuvent modifier les codes de conditions arithmétiques **N**, **Z**, **C**, **V** en ajoutant un **S** au nom de l'instruction.

Toutes les instructions peuvent utiliser les codes de conditions arithmétiques en ajoutant un mnémonique (Cf. figure 2.2) au nom de l'instruction. Au niveau de l'exécution, l'instruction est exécutée si la condition est vraie.

2.1.3 Les codes de conditions arithmétiques

La figure 2.2 décrit l'ensemble des conditions arithmétiques.

code	mnémonique	signification	condition testée
0000	EQ	égal	Z
0001	NE	non égal	\overline{Z}
0010	CS/HS	\geq dans N	C
0011	CC/LO	$<$ dans N	\overline{C}
0100	MI	moins	N
0101	PL	plus	\overline{N}
0110	VS	débordement	V
0111	VC	pas de débordement	\overline{V}
1000	HI	$>$ dans N	$C \wedge \overline{Z}$
1001	LS	\leq dans N	$\overline{C} \vee Z$
1010	GE	\geq dans Z	$(N \wedge V) \vee (\overline{N} \wedge \overline{V})$
1011	LT	$<$ dans Z	$(N \wedge \overline{V}) \vee (\overline{N} \wedge V)$
1100	GT	$>$ dans Z	$\overline{Z} \wedge ((N \wedge V) \vee (\overline{N} \wedge \overline{V}))$
1101	LE	\leq dans Z	$Z \vee (N \wedge \overline{V}) \vee (\overline{N} \wedge V)$
1110	AL	toujours	

FIGURE 2.2 – Codes des conditions arithmétiques

Toute instruction peut être exécutée sous une des conditions décrites dans la figure 2.2. Le code de la condition figure dans les bits 28 à 31 du code de l'instruction. Par défaut, la condition est **AL**, elle peut être omise : en l'absence de toute autre condition, c'est elle qui sera utilisée, i.e. elle est implicite.

2.1.4 Description de l'instruction de chargement d'un registre

Nous choisissons dans ce paragraphe de décrire en détail le codage d'une instruction.

L'instruction **MOV** permet de charger un registre avec une valeur immédiate ou de transférer la valeur d'un registre dans un autre avec modification par translation ou rotation de cette valeur.

La syntaxe de l'instruction de transfert est : **MOV** [**<COND>**] [**S**] **<rd>**, **<opérande>** où **rd** désigne le registre destination et **opérande** est décrit par la table ci-dessous :

opérande	commentaire
#immédiate-8	entier sur 32 bits (Cf. remarque ci-dessous)
rm	registre
rm, shift #shift-imm-5	registre dont la valeur est décalée d'un nombre de positions représenté sur 5 bits
rm, shift rs	registre dont la valeur est décalée du nombre de positions contenu dans le registre rs

Dans la table précédente le champ **shift** de l'opérande peut être LSL, LSR, ASR, ROR qui signifient respectivement "logical shift left", "logical shift right", "arithmetic shift right", "rotate right".

Une valeur immédiate est notée selon les mêmes conventions que dans le langage C ; ainsi elle peut être décrite en décimal (15), en hexadécimal (0xF) ou en octal (017).

Le codage de l'instruction MOV est décrit dans les figures 2.3 et 2.4. <COND> désigne un mnémonique de condition ; s'il est omis la condition est AL. Le bit S est mis à 1 si l'on souhaite une mise à jour des codes de conditions arithmétiques. Le bit I vaut 1 dans le cas de chargement d'une valeur immédiate. Les codes des opérations LSL, LSR, ASR, ROR sont respectivement : 00, 01, 10, 11.

Remarque concernant les valeurs immédiates : Une valeur immédiate sur 32 bits (opérande #immediate) sera codée dans l'instruction au moyen, d'une part d'une constante exprimée sur 8 bits (bits 7 à 0 de l'instruction, figure 2.4, 1^{er} cas), et d'autre part d'une rotation exprimée sur 4 bits (bits 11 à 8) qui sera appliquée à la dite constante lors de l'exécution de l'instruction.

La valeur de rotation, comprise entre 0 et 15, est multipliée par 2 lors de l'exécution et permet donc d'appliquer à la constante une rotation à **droite** d'un nombre pair de positions compris entre 0 et 30. La rotation s'applique aux 8 bits placés initialement à droite dans un mot de 32 bits (qui n'est pas celui qui contient l'instruction).

Il en résulte que ne peuvent être codées dans l'instruction toutes les valeurs immédiates sur 32 bits, seulement celles de la forme immediate-8 Rotate.Right (rotate-imm*2).

Une rotation nulle permettra de coder toutes les valeurs immédiates sur 8 bits.

31	28	27	26	25	24	21	20	19	16	15	12	11	0
cond		0 0		I	1 1 0 1		S	0 0 0 0			rd		opérande

FIGURE 2.3 – Codage de l'instruction mov

11	8	7	0
rotate-imm		immediate-8	

11	7	6	5	3	0
shift-imm-5		shift	0	rm	

11	8	6	5	3	0
rs	0	shift	1	rm	

FIGURE 2.4 – Codage de la partie opérande d'une instruction

Exemples d'utilisations de l'instruction mov

MOV r1, #42 @ r1 <-- 42

```

MOV r3, r5          @ r3 <-- r5
MOV r2, r7, LSL #28 @ r2 <-- r7 décalé à gauche de 28 positions
MOV r1, r0, LSR r2  @ r1 <-- r0 décalé à droite de n pos., r2=n
MOVS r2, #-5        @ r2 <-- -5 + positionnement N, Z, C et V
MOVEQ r1, #42       @ si cond(EQ) alors r1 <-- 42
MOVLTS r3, r5       @ si cond(LT) alors r3 <-- r5 + positionnement N, Z, C et V

```

2.1.5 Description des instructions arithmétiques et logiques

Les instructions arithmétiques et logiques ont pour syntaxe :

code-op[<cond>][s] <rd>, <rn>, <opérande>, où code-op est le nom de l'opération, rn et opérande sont les deux opérandes et rd le registre destination.

Le codage d'une telle instruction est donné dans la figure 2.5. opérande est décrit dans le paragraphe 2.1.4, figure 2.4.

31	28	27	26	25	24	21	20	19	16	15	12	11	0
cond	0	0	I	code-op	S	rn	rd	opérande					

FIGURE 2.5 – Codage d'une instruction arithmétique ou logique

La table ci-dessous donne la liste des intructions arithmétiques et logiques ainsi que les instructions de chargement d'un registre. Les instructions TST, TEQ, CMP, CMN n'ont pas de registre destination, elles ont ainsi seulement deux opérandes ; elles provoquent systématiquement la mise à jour des codes de conditions arithmétiques (dans le codage de l'instruction les bits 12 à 15 sont mis à zéro). Les instructions MOV et MVN ont un registre destination et un opérande (dans le codage de l'instruction les bits 16 à 19 sont mis à zéro).

code-op	Nom	Explication du nom	Opération	remarque
0000	AND	AND	et bit à bit	
0001	EOR	Exclusive OR	ou exclusif bit à bit	
0010	SUB	SUBstract	soustraction	
0011	RSB	Reverse SuBstract	soustraction inversée	
0100	ADD	ADDition	addition	
0101	ADC	Addition with Carry	addition avec retenue	
0110	SBC	SuBstract with Carry	soustraction avec emprunt	
0111	RSC	Reverse Substract with Carry	soustraction inversée avec emprunt	
1000	TST	TeST	et bit à bit	pas rd
1001	TEQ	Test EQuivalence	ou exclusif bit à bit	pas rd
1010	CMP	CoMPare	soustraction	pas rd
1011	CMN	CoMpare Not	addition	pas rd
1100	ORR	OR	ou bit à bit	
1101	MOV	MOVe	copie	pas rn
1110	BIC	BIt Clear	et not bit à bit	
1111	MVN	MoVe Not	not (complément à 1)	pas rn

Exemples d'utilisations

```

ADD r1, r2, r5      @ r1 <-- r2 + r5
ADDS r0, r2, #4     @ r0 <-- r2 + 4 + positionnement NZCV
SUB r3, r7, r0      @ r3 <-- r7 - r0
SUBS r3, r7, r0     @ r3 <-- r7 - r0 + positionnement NZCV

```

```

SUBGES r3, r7, r0      @ si cond(GE) r3 <-- r7 - r0 et positionnement NZCV
CMP r1, r2             @ calcul de r1-r2 et positionnement NZCV
TST r3, #1             @ calcul de r3 ET 1 et positionnement NZCV
ANDS r1, r2, #0x0000ff00 @ r1 <-- r2 ET 0x0000ff00 et positionnement NZCV

```

2.1.6 Description des instructions de rupture de séquence

Nous utilisons trois instructions de rupture de séquence : B[<cond>] <déplacement>, BL[<cond>] <déplacement>, BLX[<cond>] <registre>.

a) Instruction B[<cond>] <déplacement> L’instruction BCond provoque la modification du compteur de programme si la condition est vraie ; le texte suivant est extrait de la documentation ARM :

```

if ConditionPassed(cond) then
    PC <-- PC + (SignExtend(déplacement) << 2)

```

L’expression (SignExtend(déplacement) << 2) signifie que le **déplacement** est tout d’abord étendu de façon signée à 32 bits puis multiplié par 4. Le **déplacement** est en fait un entier relatif (codé sur 24 bits comme indiqué ci-dessous) et qui représente le nombre d’instructions (en avant ou en arrière) entre l’instruction de rupture de séquence et la cible de cette instruction.

Dans le calcul du déplacement, il faut prendre en compte le fait que lors de l’exécution d’une instruction, le compteur de programme ne repère pas l’instruction courante mais deux instructions en avant.

31	28	27	25	24	23	0
cond	1	0	1	0	déplacement	

FIGURE 2.6 – Codage de l’instruction de rupture de séquence b{cond}

Exemples d’utilisations

```

BEQ +5      @ si cond(EQ) alors pc <-- pc + 4*5
B -8        @ pc <-- pc - 4*8

```

Dans la pratique, on utilise une étiquette (Cf. paragraphe 2.2.4) pour désigner l’instruction cible d’un branchement. C’est le traducteur (i.e. l’assembleur) qui effectue le calcul du déplacement.

La figure 2.7 résume l’utilisation des instructions de branchements conditionnels après une comparaison.

b) Instruction BL[<cond>] <déplacement> L’instruction BL provoque la modification du compteur de programme avec sauvegarde de l’adresse de l’instruction suivante (appelée **adresse de retour**) dans le registre **lr** ; le texte suivant est extrait de la documentation ARM :

```

lr <-- address of the instruction after the branch instruction
PC <-- PC + (SignExtend(déplacement) << 2)

```

Exemples d’utilisations

```

BL 42      @ lr <-- pc+4 ; pc <-- pc +4*42

```

Conditions des instructions de branchement conditionnel				
Type	Entiers relatifs (Z)		Naturels (N) et adresses	
Instruction C	Bxx	Condition	Bxx	Condition
goto	B ou BAL	1110	B ou BAL	1110
if (x== y) goto	BEQ	0000	BEQ	0000
if (x != y) goto	BNE	0001	BNE	0001
if (x < y) goto	BLT	1011	BLO, BCC	0011
if (x <= y) goto	BLE	1101	BLS	1001
if (x > y) goto	BGT	1100	BHI	1000
if (x >= y) goto	BGE	1010	BHS,BCS	0010

FIGURE 2.7 – Utilisation des branchements conditionnels après une comparaison

31	28	27	25	24	23	0
cond	1	0	1	1	déplacement	

FIGURE 2.8 – Codage de l’instruction de branchement à un sous-programme `bl`

c) Instruction BLX[<cond>] <registre> L’instruction `BLX Rm` provoque la modification du compteur de programme avec sauvegarde de l’adresse de l’instruction suivante (appelée **adresse de retour**) dans le registre `lr`; le texte suivant est extrait de la documentation ARM :

```
lr <-- address of the instruction after the branch instruction
PC <-- Rm
```

Attention : Dans le cadre des TP, l’adresse passée en paramètre à `BLX` doit être paire. En effet, l’exécution de `BLX` avec une adresse impaire active un mode spécial du processeur (THUMB) avec un autre jeu d’instructions (codées sur 16 bits). Ce type d’erreur peut avoir des effets assez variés en fonction du programme concerné : on peut obtenir un message d’erreur relatif au mode THUMB ou un comportement arbitraire du simulateur.

Exemples d’utilisations

```
BLX R5      @ lr <-- pc+4 ; pc <-- R5
```

Pour désigner une procédure on utilisera une étiquette ; des exemples sont donnés dans le paragraphe 2.2.4.

2.1.7 Description des instructions de transfert d’information entre les registres et la mémoire

Transfert entre un registre et la mémoire

L’instruction `LDR` dont la syntaxe est : `LDR <rd>, <mode-adressage>` permet le transfert du mot mémoire dont l’adresse est spécifiée par `mode-adressage` vers le registre `rd`. Nous ne donnons pas le codage de l’instruction `LDR` parce qu’il comporte un grand nombre de cas ; nous regardons ici uniquement les utilisations les plus fréquentes de cette instruction.

Le champ `mode-adressage` comporte, entre crochets, un registre et éventuellement une valeur immédiate ou un autre registre, ceux-ci pouvant être précédés du signe `+` ou `-`. Le tableau ci-dessous indique pour chaque cas le mot mémoire qui est chargé dans le registre destination. L’instruction `ldr` permet beaucoup d’autres types de calcul d’adresse qui ne sont pas décrits ici.

mode-adressage	opération effectuée
[rn]	rd ← mem [rn]
[rn, #offset12]	rd ← mem [rn + offset12]
[rn, #-offset12]	rd ← mem [rn - offset12]
[rn, rm]	rd ← mem [rn + rm]
[rn, -rm]	rd ← mem [rn - rm]

Il existe des variantes de l'instruction LDR permettant d'accéder à un octet : LDRB ou à un mot de 16 bits : LDRH. Et si l'on veut accéder à un octet signé : LDRSB ou à un mot de 16 bits signé : LDRSH. Ces variantes imposent cependant des limitations d'adressage par rapport aux versions 32 bits (exemple : valeur immédiate codée sur 5 bits au lieu de 12).

Pour réaliser le transfert inverse, registre vers mémoire, on trouve l'instruction STR et ses variantes STRB et STRH. La syntaxe est la même que celle de l'instruction LDR. Par exemple, l'instruction STR rd, [rn] provoque l'exécution : MEM [rn] ← rd.

Exemples d'utilisations

```

LDR r1, [r0]           @ r1 ← 32bits-- Mem [r0]
LDR r3, [r2, #4]       @ r3 ← 32bits-- Mem [r2 + 4]
LDR r3, [r2, #-8]      @ r3 ← 32bits-- Mem [r2 - 8]
LDR r3, [pc, #48]      @ r3 ← 32bits-- Mem [pc + 48]
LDRB r5, [r3]          @ 8bits_poids_faibles (r5) ← Mem [r3],
                        @ extension aux 32 bits avec des 0
STRH r2, [r1, r3]      @ Mem [r1 + r3] ← 16bits-- 16bits_poids_faibles (r2)

```

L'instruction LDR est utilisée entre autres pour accéder à un mot de la zone text en réalisant un adressage relatif au compteur de programme. Ainsi, l'instruction LDR r2, [pc, #depl] permet de charger dans le registre r2 avec le mot mémoire situé à une distance depl du compteur de programme, c'est-à-dire de l'instruction en cours d'exécution. Ce mode d'adressage nous permet de récupérer l'adresse d'un mot de données (Cf. paragraphe 2.2.4).

Pré décrémentation et post incrémentation

Les instructions LDR et STR offrent des adressages post-incrémentés et pré-décrémentés qui permettent d'accéder à un mot de la mémoire et de mettre à jour une adresse, en une seule instruction. Cela revient à combiner un accès mémoire et l'incrémentement du pointeur sur celle-ci en une seule instruction.

instruction ARM	équivalent ARM	équivalent C
LDR r1, [r2, #-4]!	SUB r2, r2, #4 LDR r1, [r2]	r1 = *--r2
LDR r1, [r2], #4	LDR r1, [r2] ADD r2, r2, #4	r1 = *r2++
STR r1, [r2, #-4]!	SUB r2, r2, #4 STR r1, [r2]	
STR r1, [r2], #4	STR r1, [r2] ADD r2, r2, #4	

La valeur à incrémenter ou décrémenter (4 dans les exemples ci-dessus) peut aussi être donnée dans un registre.

Transfert multiples

Le processeur ARM possède des instructions de transfert entre un ensemble de registres et un bloc de mémoire repéré par un registre appelé registre de base : LDM et STM. Par exemple, **STMFD r7!, {r0,r1,r5}** range le contenu des registres **r0**, **r1** et **r5** dans la mémoire et met à jour le registre **r7** suite le transfert (i.e. $r7 = r7 - 12$) ; après l'exécution de l'instruction **MEM[r7 à jour]** contient **r0** et **MEM[r7 à jour + 8]** contient **r5**.

Il existe 8 variantes de chacune des instructions LDM et STM selon que :

- les adresses de la zone mémoire dans laquelle sont copiés les registres croissent (Increment) ou décroissent (Decrement).
- l'adresse contenue dans le registre de base est incrémentée ou décrétementée avant (Before) ou après (After) le transfert de chaque registre. Notons que l'adresse est décrétementée avant le transfert quand le registre de base repère le mot qui a l'adresse immédiatement supérieure à celle où l'on veut ranger une valeur (Full) ; l'adresse est incrémentée après le transfert quand le registre de base repère le mot où l'on veut ranger une valeur (Empty).
- le registre de base est modifié à la fin de l'exécution quand il est suivi d'un **!** ou laissé inchangé sinon.

Ces instructions servent aussi à gérer une pile. Il existe différentes façons d'implémenter une pile selon que :

- le pointeur de pile repère le dernier mot empilé (Full) ou la première place vide (Empty).
- le pointeur de pile progresse vers les adresses basses quand on empile une information (Descending) ou vers les adresses hautes (Ascending).

Par exemple, dans le cas où le pointeur de pile repère l'information en sommet de pile (case pleine) et que la pile évolue vers les adresses basses (lorsque l'on empile l'adresse décroît), on parle de pile **Full Descending** et on utilise l'instruction **STMFD** pour empiler et **LDMFD** pour dépiler.

Les modes de gestion de la pile peuvent être caractérisés par la façon de modifier le pointeur de pile lors de l'empilement d'une valeur ou de la récupération de la valeur au sommet de la pile. Par exemple, dans le cas où le pointeur de pile repère l'information en sommet de pile et que la pile évolue vers les adresses basses, pour empiler une valeur il faut décrétement le pointeur de pile avant le stockage en mémoire ; on utilisera l'instruction **STMDB (Decrement Before)**. Dans le même type d'organisation pour dépiler on accède à l'information au sommet de pile puis on incrémente le pointeur de pile : on utilise alors l'instruction **LDMIA (Increment After)**.

Selon que l'on prend le point de vue gestion d'un bloc de mémoire repéré par un registre ou gestion d'une pile repérée par le registre pointeur de pile, on considère une instruction ou une autre ... Ainsi, les instructions **STMFD** et **STMDB** sont équivalentes ; de même pour les instructions **LDMFD** et **LDMIA**.

Les tables suivantes donnent les noms des différentes variantes des instructions LDM et STM, chaque variante ayant deux noms synonymes l'un de l'autre.

nom de l'instruction	synonyme
LMDA (decrement after)	LDMFA (full ascending)
LDMA (increment after)	LDMFD (full descending)
LDMDB (decrement before)	LDMEA (empty ascending)
LDMB (increment before)	LDMED (empty descending)

nom de l'instruction	synonyme
STMDA (decrement after)	STMED (empty descending)
STMIA (increment after)	STMEA (empty ascending)
STMDB (decrement before)	STMFD (full descending)
STMIB (increment before)	STMFA (full ascending)

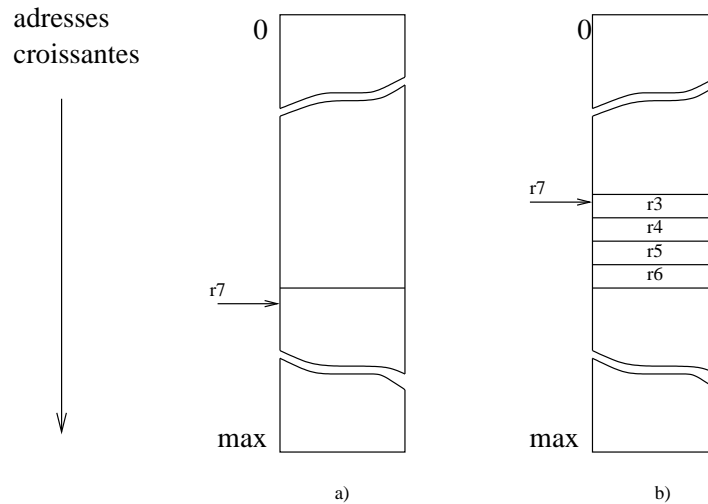


FIGURE 2.9 – Transfert multiples mémoire/registres : `STMFD r7!, {r3,r4,r5,r6}` ou `(STMDB ...)` permet de passer de l'état a) de la mémoire à l'état b). `LDMFD r7!, {r3,r4,r5,r6}` (ou `LDMIA ...`) réalise l'inverse.

La figure 2.9 donne un exemple d'utilisation.

2.2 Langage d'assemblage

2.2.1 Structure d'un programme en langage d'assemblage

Un programme est composé de trois types de sections :

- données initialisées ou non (`.data`)
- données non initialisées (`.bss`)
- instructions (`.text`)

Les sections de données sont optionnelles, celle des instructions est obligatoire. On peut écrire des commentaires entre le symbole `@` et la fin de la ligne courante. Ainsi un programme standard a la structure :

```
.data
@ déclaration de données
@ ...

.text
@ des instructions
@ ...
```

2.2.2 Déclaration de données

Le langage permet de déclarer des valeurs entières en décimal (éventuellement précédées de leur signe) ou en hexadécimal; on précise la taille souhaitée.

Exemple :

```
.data
.word 4536 @ déclaration de la valeur 4536 sur 32 bits (1 mot)
```

```
.hword -24    @ déclaration de la valeur -24 sur 16 bits (1 demi mot)
.byte 5       @ déclaration de la valeur 5 sur 8 bits (1 octet)
.word 0xffff2a35f @ déclaration d'une valeur en hexadécimal sur 32 bits
.byte 0xa5    @ idem sur 8 bits
```

On peut aussi déclarer des chaînes de caractères suivies ou non du caractère de code ASCII 00. Un caractère est codé par son code ASCII (Cf. paragraphe 1).

Exemple :

```
.data
.ascii "un texte" @ déclaration de 8 caractères...
.asciz "un texte" @ déclaration de 9 caractères, les mêmes que ci-dessus
                @ plus le code 0 à la fin
```

La définition de données doit respecter les règles suivantes, qui proviennent de l'organisation physique de la mémoire :

- un mot de 32 bits doit être rangé à une adresse multiple de 4
- un mot de 16 bits doit être rangé à une adresse multiple de 2
- il n'y a pas de contrainte pour ranger un octet (mot de 8 bits)

Pour recadrer une adresse en zone `data` le langage d'assemblage met à notre disposition la directive `.balign`.

Exemple :

```
.data
@ on note AD l'adresse de chargement de la zone data
@ que l'on suppose multiple de 4 (c'est le cas avec les outils utilisés)
.hword 43    @ après cette déclaration la prochaine adresse est AD+2
.balign 4    @ recadrage sur une adresse multiple de 4
.word 0xffff1234 @ rangé à l'adresse AD+4
.byte 3      @ après cette déclaration la prochaine adresse est AD+9
.balign 2    @ recadrage sur une adresse multiple de 2
.hword 42    @ rangé à l'adresse AD+10
```

On peut aussi réserver de la place en zone `.data` ou en zone `.bss` avec la directive `.skip`. `.skip 256` réserve 256 octets qui ne sont pas initialisés lors de la réservation. On pourra par programme écrire dans cette zone de mémoire.

2.2.3 La zone text

Le programmeur y écrit des instructions qui seront codées par l'assembleur (le traducteur) selon les conventions décrites dans le paragraphe 2.1.

La liaison avec le système (chargement et lancement du programme) est réalisée par la définition d'une étiquette (Cf. paragraphe suivant) réservée : `main`.

Ainsi la zone `text` est :

```
.text
.global main
main:

@ des instructions ARM
@ ...
```

2.2.4 Utilisation d'étiquettes

Une donnée déclarée en zone **data** ou **bss** ou une instruction de la zone **text** peut être précédée d'une étiquette. Une étiquette représente une adresse et permet de désigner la donnée ou l'instruction concernée.

Les étiquettes représentent une facilité d'écriture des programmes en langage d'assemblage.

Expression d'une rupture de séquence

On utilise une étiquette pour désigner l'instruction cible d'un branchement. C'est le traducteur (i.e. l'assembleur) qui effectue le calcul du déplacement. Par exemple :

```
etiq: MOV r0, #22
      ADD r1, r2, r0
      CMP r1, #13
      BNE etiq
```

Pour une conditionnelle "si r0=0 alors r0=1 sinon r0=2 finsi" une traduction possible sera donc :

```
si:    CMP r0, #0
        BEQ alors
sinon:  MOV R0, #1
        B finsi
alors:  MOV R0, #2
finssi:
```

Pour une boucle "répéter r1=r1+1 ; r0=r0-r1 tant que r0<0" une traduction possible sera donc :

```
corpsboucle: ADD r1, r1, #1
              SUB r0, r0, r1
test:        CMP r0, #0
              BGT corpsboucle
finboucle:
```

Accès à une donnée depuis la zone text

```
.data

X: .word 5

.text

@ acces au mot d'adresse X
LDR r1, LD_X @ r1 <-- l'adresse X
LDR r2, [r1]  @ r2 <-- Mem[X] c'est-à-dire 5

MOV r3, #245 @ r3 <-- 245
STR r3, [r1]  @ Mem[X] <-- r3
              @ la mémoire d'adresse X a été modifiée

@ plus loin
LD_X: .word X @ déclaration de l'adresse X en zone text
```

L'instruction `LDR r1, LD_X` est codée avec un adressage relatif au compteur de programme : `LDR r1, [pc, #depl]` (Cf. paragraphe 2.1.7).

Appel d'une procédure

On utilise l'instruction BL lorsque la procédure appelée est désignée directement par une étiquette. Version simple :

```
...
ma_proc: @ corps de la procedure
        bx lr
...
main:
...
    @ appel de la procedure ma_proc
    BL ma_proc
...
```

Pour une version plus complète :

appelée ma_proc :

- empiler l'adresse de retour (**lr**)
- empiler la valeur **fp** de l'appelant
- placer **fp** pour repérer les variables de l'appelée
- allouer la place pour les variables locales
- empiler les variables temporaires (registres) utilisées
- **corps de la procédure ou fonction**
- si fonction, le résultat est rangé en **fp+8**
- dépiler les variables temporaires (registres) utilisées
- libérer la place allouée aux variables locales
- dépiler **fp**
- dépiler l'adresse de retour (**lr**)
- retour à l'appelant : **bx lr**

appelant main :

- préparer et empiler les paramètres (valeurs et/ou adresses)
- si fonction, réserver une place dans la pile pour le résultat
- appeler ma_proc : **BL ma_proc**
- si fonction, récupérer le résultat
- libérer la place allouée aux paramètres
- si fonction, libérer la place allouée au résultat

Remarque : On peut utiliser l'instruction BLX lorsque l'adresse de la procédure est rangée dans un registre, par exemple lorsqu'une procédure est passée en paramètre :

```
LDR    r1, L_proc    @ r1 <-- adresse ma_proc
BLX    r1
...
L_proc: .word ma_proc
```

2.3 Organisation de la mémoire : petits bouts, gros bouts

La mémoire du processeur ARM peut être vue comme un tableau d'octets repérés par des numéros appelés **adresse** qui sont des entiers naturels sur 32 bits. On peut ranger dans la mémoire des mots de 32 bits, de 16 bits ou des octets (mots de 8 bits). Le paragraphe 2.2.2 indique comment déclarer de tels mots.

Dans la mémoire les mots de 32 bits sont rangés à des adresses multiples de 4. Il y a deux conventions de rangement de mots en mémoire selon l'ordre des octets de ce mot.

Considérons par exemple le mot 0x12345678.

- convention dite "Big endian" (Gros bouts) :
les 4 octets 12, 34, 56, 78 du mot 0x12345678 sont rangés aux adresses respectives $4x$, $4x+1$, $4x+2$, $4x+3$.
- convention dite "Little endian" (Petits Bouts) :
les 4 octets 12, 34, 56, 78 du mot 0x12345678 sont rangés aux adresses respectives $4x+3$, $4x+2$, $4x+1$, $4x$.

Le processeur ARM suit la convention "Little endian". La conséquence est que lorsqu'on lit le mot de 32 bits rangé à l'adresse $4x$ on voit : 78563412, c'est-à-dire qu'il faut lire "à l'envers". Selon les outils utilisés le mot de 32 bits est présenté sous cette forme ou sous sa forme externe, plus agréable...

En général les outils de traduction et de simulation permettent de travailler avec une des deux conventions moyennant l'utilisation d'options particulières lors de l'appel des outils (option `-mbig-endian`).

2.4 Commandes de traduction, exécution, observation

2.4.1 Traduction d'un programme

Pour traduire un programme écrit en C contenu dans un fichier `prog.c` :
`arm-eabi-gcc -g -o prog prog.c`. L'option `-o` permet de préciser le nom du programme exécutable ; `o` signifie "output". L'option `-g` permet d'avoir les informations nécessaires à la mise au point sous débogueur (Cf. paragraphe 2.4.2).

Pour traduire un programme écrit en langage d'assemblage ARM contenu dans un fichier `prog.s` :
`arm-eabi-gcc -Wa,--gdwarf2 -o prog prog.s`.

Lorsque l'on veut traduire un programme qui est contenu dans plusieurs fichiers que l'on devra rassembler (on dit "lier"), il faut d'abord produire des versions partielles qui ont pour suffixe `.o`, le `o` voulant dire ici "objet". Par exemple, on a deux fichiers : `principal.s` et `biblio.s`, le premier contenant l'étiquette `main`. On effectuera la suite de commandes :

```
arm-eabi-gcc -c -Wa,--gdwarf2 biblio.s
arm-eabi-gcc -c -Wa,--gdwarf2 principal.s
arm-eabi-gcc -g -o prog principal.o biblio.o
```

La première produit le fichier `biblio.o`, la seconde produit le fichier `principal.o`, la troisième les relie et produit le fichier exécutable `prog`.

Noter que les deux commandes suivantes ont le même effet :

```
arm-eabi-gcc -c prog.s et
arm-eabi-as -o prog.o prog.s. Elles produisent toutes deux un fichier objet prog.o sans les informations nécessaires à l'exécution sous débogueur.
```

2.4.2 Exécution d'un programme

Exécution directe

On peut exécuter un programme directement avec :

`arm-eabi-run prog`. S'il n'y a pas d'entrées-sorties, on ne voit évidemment rien...

Exécution avec un débogueur

Nous pouvons utiliser deux versions du même débogueur : `gdb` et `ddd`. On parle aussi de mettre au point. C'est un outil qui permet d'exécuter un programme instruction par instruction en regardant les "tripes" du processeur au cours de l'exécution : valeur contenues dans les registres, dans le mot d'état, contenu de la mémoire, etc.

`gdb` est la version de base (textuelle), `ddd` est la même mais graphique (avec des fenêtres, des icônes, etc.), elle est plus conviviale mais plus sujette à des problèmes techniques liés à l'installation du logiciel...

Soit le programme objet exécutable : `prog`. Pour lancer `gdb` : `arm-eabi-gdb prog`. Puis taper successivement les commandes : `target sim` et enfin `load`. Maintenant on peut commencer la simulation.

Pour éviter de taper à chaque fois les deux commandes précédentes, vous pouvez créer un fichier de nom `.gdbinit` dont le contenu est :

```
# un diese débute un commentaire
# commandes de démarrage pour arm-eabi-gdb
target sim
load
```

Au lancement de `arm-eabi-gdb prog`, le contenu de ce fichier sera automatiquement exécuté.

Voilà un ensemble de commandes utiles :

- placer un point d'arrêt sur une instruction précédée d'une étiquette, par exemple : `break main`.
On peut aussi demander `break no` avec `no` un numéro de ligne dans le code source. Un raccourci pour la commande est `b`.
- enlever un point d'arrêt : `delete break numéro_du_point_d'arrêt`
- voir le code source : `list`
- lancer l'exécution : `run`
- poursuivre l'exécution après un arrêt : `cont`, raccourci : `c`
- exécuter l'instruction à la ligne suivante, en entrant dans les procédures : `step`, raccourci `s`
- exécuter l'instruction suivante (sans entrer dans les procédures) : `next`, raccourci `n`
- voir la valeur contenue dans les registres : `info reg`
- voir la valeur contenue dans le registre `r1` : `info reg $r1`
- voir le contenu de la mémoire à l'adresse `etiquette` : `x &etiquette`
- voir le contenu de la mémoire à l'adresse `0x3ff5008` : `x 0x3ff5008`
- voir le contenu de la mémoire en précisant le nombre de mots et leur taille.
`x /nw adr` permet d'afficher `n` mots de 32 bits à partir de l'adresse `adr`.
`x /ph adr` permet d'afficher `p` mots de 16 bits à partir de l'adresse `adr`.
- modifier le contenu du registre `r3` avec la valeur `0x44` exprimée en hexadécimal : `set $r3=0x44`
- modifier le contenu de la mémoire d'adresse `etiquette` : `set *etiquette = 0x44`
- sortir : `quit`
- La touche `Enter` répète la dernière commande.

Et ne pas oublier : `man gdb` sous Unix (ou Linux) et quand on est sous `gdb` : `help nom_de_commande...`

Pour lancer `ddd` : `ddd --debugger arm-eabi-gdb`. On obtient une grande fenêtre avec une partie dite "source" (en haut) et une partie dite "console" (en bas). Dans la fenêtre "console" taper successivement les commandes : `file prog`, `target sim` et enfin `load`.

On voit apparaître le source du programme en langage d'assemblage dans la fenêtre "source" et une petite fenêtre de "commandes". Maintenant on peut commencer la simulation.

Toutes les commandes de `gdb` sont utilisables soit en les tapant dans la fenêtre "console", soit en les sélectionnant dans le menu adéquat. On donne ci-dessous la description de quelques menus. Pour

le reste, il suffit d'essayer.

- placer un point d'arrêt : sélectionner la ligne en question avec la souris et cliquer sur l'icône break (dans le panneau supérieur).
- démarrer l'exécution : cliquer sur le bouton Run de la fenêtre "commandes". Vous voyez apparaître une flèche verte qui vous indique la position du compteur de programme i.e. où en est le processeur de l'exécution de votre programme.
- le bouton Step permet l'exécution d'une ligne de code, le bouton Next aussi mais en entrant dans les procédures et le bouton Cont permet de poursuivre l'exécution.
- enlever un point d'arrêt : se positionner sur la ligne désirée et cliquer à nouveau sur l'icône break.
- voir le contenu des registres : sélectionner dans le menu Status : Registers ; une fenêtre apparaît. La valeur contenue dans chaque registre est donnée en hexadécimal (0x...) et en décimal.
- observer le contenu de la mémoire étiquetée `etiquette` : après avoir sélectionné memory dans le menu Data, on peut soit donner l'adresse en hexadécimal 0x... si on la connaît, soit donner directement le nom `etiquette` dans la case `from` en le précédant du caractère `&`, c'est-à-dire `&etiquette`.

2.4.3 Observation du code produit

Considérons un programme objet : `prog.o` obtenu par traduction d'un programme écrit en langage C ou en langage d'assemblage. L'objet de ce paragraphe est de décrire l'utilisation d'un ensemble d'outils permettant d'observer le contenu du fichier `prog.o`. Ce fichier contient les informations du programme source codées et organisées selon un format appelé `format ELF`.

On utilise trois outils : `hexdump`, `arm-eabi-readelf`, `arm-eabi-objdump`.

`hexdump` donne le contenu du fichier dans une forme brute.

`hexdump prog.o` donne ce contenu en hexadécimal complété par le caractère correspondant quand une valeur correspond à un code ascii ; de plus l'outil indique les adresses des informations contenues dans le fichier en hexadécimal aussi.

`arm-eabi-objdump` permet d'avoir le contenu des zones `data` et `text` avec les commandes respectives :

`arm-eabi-objdump -j .data -s prog.o` et

`arm-eabi-objdump -j .text -s prog.o`. Ce contenu est donné en hexadécimal. On peut obtenir la zone `text` avec le désassemblage de chaque instruction :

`arm-eabi-objdump -j .text -d prog.o`.

`arm-eabi-readelf` permet d'avoir le contenu du reste du fichier.

`arm-eabi-readelf -a prog.o` donne l'ensemble des sections contenues dans le fichier sauf les zones `data` et `text`.

`arm-eabi-readelf -s prog.o` donne le contenu de la table des symboles.

Deuxième partie

Travaux Dirigés

Chapitre 1

TD séance 1 : Codage

1.1 Codage binaire, hexadécimal de nombres entiers naturels

Ecrire les 16 premiers entiers en décimal, binaire et hexadécimal.

1.2 Codage ASCII

Regarder la table de codes ascii qui est en annexe.

Sur combien de bits est codé un caractère ?

Soit la fonction : `code_ascii` : un caractère --> un entier $\in [0, 127]$.

Comment passe-t-on du code d'une lettre majuscule au code d'une lettre minuscule ou l'inverse.
Quelle opération faut-il faire ?

1.3 Codage par champs : codage d'une date

On veut coder une information du style : `lundi 12 janvier`.

Codage du jour de la semaine : lun :0,...,dim :6, il faut 3 bits

Codage du quantième du jour dans le mois : 1..31, 5 bits

Codage du mois : 1..12, 4 bits

Quel est le code de la date : `lundi 12 janvier` ?

Quelle est la date associée au code 001 00011 0001 ?

Quel est la date associée au code 111 11111 1111 ?

1.4 Code d'une instruction ARM

C'est un autre type de codage par champs.

En utilisant la doc technique, coder en binaire les instructions ARM : `MOV r5, r7`,
`MOV r5, #7`.

Exercice à faire à la maison : codage d'une instruction `add`.

1.5 Codage d'un nombre entre 16 et 255

Combien faut-il de bits ? Coder les valeurs 17, 67, 188 en binaire et en hexadécimal. En déduire une méthode rapide de passage binaire vers hexadécimal ainsi que l'inverse.

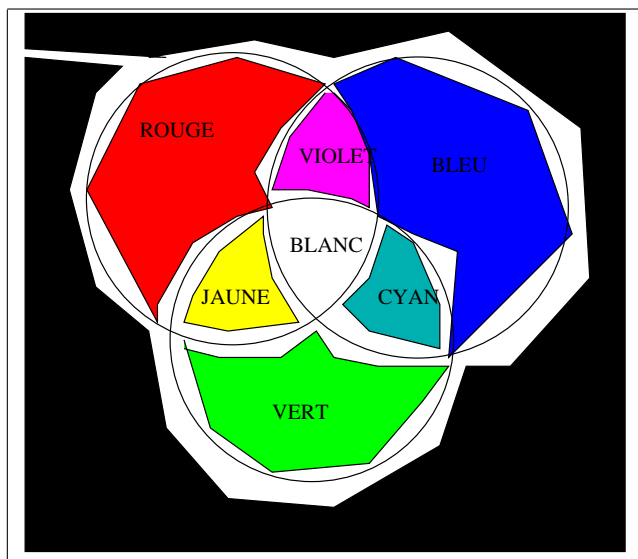


FIGURE 1.1 – Codage de couleurs

1.6 Codage de nombres à virgule

On représente des nombres à virgule de l'intervalle $[0, 16[$ par un octet selon le code suivant : les 4 bits de poids forts codent la partie entière, Les 4 bits de poids faibles codent la partie après la virgule ¹.

Par exemple 01101010 représente 6,625. En effet $x_3x_2x_1x_0x_{-1}x_{-2}x_{-3}x_{-4} = 01101010$ donne $X = 4 + 2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{8} = 6,625$. (Rappelons que les anglo-saxons le notent 6.625)

rang du bit	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4
bit	0	1	1	0	1	0	1	0
valeur arithmétique correspondante	8	4	2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$

Dans le cas général on a : $X = \sum_{i=-4}^3 2^i \times x_i$

Que représente le vecteur 00010100 ?

Donner l'écriture binaire de 5,125.

Quel est le plus grand nombre représentable selon ce code ?

Peut-on représenter $\frac{7}{3}$ ou $\frac{8}{5}$?

1.7 Codage de couleurs

Codage des 16 couleurs sur les premiers PC couleurs : Ici, il y a un bit de rouge, un bit de vert, un bit de bleu et un bit de clair. Ainsi on voit que cobalt est cyan pâle, rose est rouge pâle, mauve est violet pâle, jaune est brun pâle et blanc est gris pâle. La figure 1.1 montre les "mélanges".

B	$b_3b_2b_1b_0$		B	$b_3b_2b_1b_0$		B	$b_3b_2b_1b_0$	
0	0 0 0 0	noir	5	0 1 0 1	violet	10	1 0 1 0	vertpâle
1	0 0 0 1	bleu	6	0 1 1 0	brun	11	1 0 1 1	cobalt
2	0 0 1 0	vert	7	0 1 1 1	gris	12	1 1 0 0	rose
3	0 0 1 1	cyan	8	1 0 0 0	noir pâle	13	1 1 0 1	mauve
4	0 1 0 0	rouge	9	1 0 0 1	bleu pâle	14	1 1 1 0	jaune
						15	1 1 1 1	blanc

1. on ne dit pas décimale car ce mot est impropre ici mais c'est quand même le mot habituel

Chapitre 2

TD séance 2 : Représentation des nombres

2.1 Introduction

Un entier E peut être représenté par une suite de n chiffres (ou digits) e_i , tous inférieurs à la base utilisée ($0 \leq e_i \leq B - 1$) et tels que $E = \sum_{i=0}^{n-1} e_i * B^i$. Chaque chiffre e_i représente le reste de la division entière de E/B^i par B . La base B est éventuellement précisée en indice à droite du dernier chiffre ou entre parenthèses. Par défaut, il s'agit de la base 10.

L'entier composé des k chiffres de poids faibles de E est $E \bmod 2^k$ et celui composé des $n-k$ chiffres de poids forts de E est $E / 2^k$. Exemple pour $n=5$ et $k=2$:

$$23_{10} = 5 * 4 + 3 = 10111_2. (\underline{10111}) : 23/4 = 5 = 101_2. 23 \bmod 4 = 3 = 11_2$$

Les organes d'un ordinateur sont dimensionnés à un nombre fixe n de bits. Par exemple, les registres, les unités de calcul, le bus d'accès à la mémoire d'un ARM7 sont tous dimensionnés à 32 bits : le résultat d'une opération est stocké avec le même nombre de bits que ses opérandes. Tous les calculs sont donc réalisés modulo 2^n (environ quatre milliards pour $n = 32$ bits).

La table en annexe 2 donne les principales puissances de 2, ainsi que la valeur binaire et décimale de chaque chiffre hexadécimal.

$$\begin{array}{llll} 101_2 & = & 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 & = 4 + 1 = 5_{10} \\ 101_{10} & = & 1 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 1 \times 10^0 & = 100 + 1 = 101_{10} \\ 101_{16} & = & 1 \times 16^2 + 0 \times 16^1 + 1 \times 16^0 & = 256 + 1 = 257_{10} \\ A4_{16} & = & 10 \times 16^1 + 4 \times 16^0 & = 10 * 16 + 4 = 164_{10} \end{array}$$

Conversions entre bases 2, 10 et 16 :

1. 2 vers 16 : ajouter éventuellement des 0 à gauche pour avoir 4k bits, convertir les k quartets en k chiffres hexadécimaux.
2. 16 vers 2 : convertir chaque chiffre hexadécimal en quartet de bits
3. 10 vers $B=2$ ou $B=16$: diviser par B , le reste donne un chiffre (poids faible), recommencer avec le quotient, etc : le dernier reste non nul donne le chiffre de poids fort.

Exemples :

$$178_{10} = B2_{16} : 178/16 \text{ quotient } 11, \text{reste } \boxed{2} (\text{poids faible}), 11/16 : \text{quotient } 0 \text{ reste } 11 (\boxed{B} (\text{poids fort}))$$

1. modulo = reste de la division entière

$11_{10} = 1011_2 = 5 * 2 + \boxed{1}$ (*poids faible*), $5 = 2 * 2 + \boxed{1}$, $2 = 1 * 2 + \boxed{0}$, $1 = 0 * 2 + \boxed{1}$ (*poids fort*)
 $1001101101_2 \rightarrow \mathbf{00}10\ 0110\ 1101 \rightarrow 26B_{16}$

2.1.1 Propriété remarquable

$$\sum_{i=0}^{n-1} a^i = \frac{a^n - 1}{a - 1} \text{ et } \sum_{i=0}^{n-1} 2^i = 2^n - 1$$

En effet $(a^{n-1} + a^{n-2} + \dots + a^1 + 1)(a - 1) = (a^n - a^{n-1} + a^{n-1} - a^{n-2} \dots + a - 1) = (a^n - 1)$

L'entier dont la représentation est constituée de n bits à 1 est $2^n - 1$: $11111111_2 = 2^8 - 1 = 255_{10}$

2.1.2 Compléments à 1 et à 2

Soit $E = \sum_{i=0}^{n-1} e_i * 2^i$ un entier naturel représenté sur n chiffres en base 2. On appelle *complément à 1* de E (on dit habituellement *complément à 1 de E*) l'entier $\bar{E} = \sum_{i=0}^n \bar{e}_i$ obtenu en remplaçant les 1 par des 0 et les 0 par des 1 ($\bar{e}_i = 1 - e_i$) dans la représentation en binaire de E. Il s'écrit $\sim E$ en langage C. On a $E + \bar{E} = \sum_{i=0}^n e_i 2^i + \sum_{i=0}^n (1 - e_i) 2^i = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i = 2^n - 1$, d'où $\bar{E} = 2^n - 1 - E$.

On appelle *complément à 2* de E (on dit habituellement *complément à deux*) l'entier naturel $2^n - E$, noté \bar{E}^2 . Par définition, $\bar{E}^2 = \bar{E} + 1$. Soit u la position du premier un² dans la représentation en binaire de E . La représentation de \bar{E}^2 est obtenue à partir de celle de E en inversant les $n - u$ bits de poids forts et en conservant les u bits de poids faibles.

2.2 Addition

On rappelle le principe de calcul dans l'addition : colonne par colonne, de droite à gauche. Les retenues, habituellement placées au dessus de l'opérande gauche, sont placées ici en dessous de l'opérande droit. Dans chaque colonne, on fait la somme des chiffres du premier (a_i) et du deuxième (b_i) opérande, ainsi que la retenue entrante (c_i).

Le chiffre (r_i) du résultat est égal à :

- cette somme, la retenue sortante (c_{i+1}) étant 0, si *somme* < *base*,
- cette somme moins la base, la retenue sortante (c_{i+1}) étant 1, si *somme* ≥ *base*.

	a_3	a_2	a_1	a_0	opérande gauche		a_i
$+_{base}$	b_3	b_2	b_1	b_0	opérande droit		b_i
$C = c_4$	c_3	c_2	c_1	c_0	retenues	sortante	c_{i+1}
	r_3	r_2	r_1	r_0	résultat apparent		r_i
							entrante

$+_{10}$	3	6	4	3		3		4	3
$C = 0$	5	7	8	5		5		8	5
	1	1	0	0	$C = 0$	1	$\leftarrow 1$	0	0
	9	4	2	8	$9 < 10$	9	$14 \geq 10$	2	8
$+_2$	0	1	1	1		0		1	1
$C = 0$	0	1	1	0		0		1	0
	1	1	0	0	$C = 0$	1	$\leftarrow 1$	0	0
	1	1	0	1	$1 < 2$	1	$3 \geq 2$	0	1

2. $\forall i, e_i = 1 \Rightarrow i \geq u$, ($u=0$ si $E=0$)

$$\begin{array}{ccccc}
\begin{array}{c} +_2 \\ C=1 \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \\ C=1 \\ 2 \geq 2 \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \\ \leftarrow 0 \\ 1 < 2 \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \leftarrow 0 \\ 1 < 2 \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \leftarrow 1 \\ 3 \geq 2 \end{array} \\
\begin{array}{c} +_2 \\ C=0 \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \\ C=0 \\ 1 < 2 \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \\ \leftarrow 0 \\ 1 < 2 \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} \\ \leftarrow 0 \\ 1 < 2 \end{array} & \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \\ \leftarrow 0 \\ 1 < 2 \end{array}
\end{array}$$

Soit $e = \sum_{i=0}^{i=n-2} e_i 2^i$. Sur n bits, on peut coder 2^n valeurs différentes. Mais l'interprétation de ce codage n'est pas unique. En pratique, l'entier écrit $e_{n-1} e_{n-2} e_{n-3} \dots e_1 e_0$ en base deux représente la valeur $E = \alpha e_{n-1} 2^{n-1} + e$.

2.3.1 Pour entiers naturels (N) : $\alpha = 1$ et $E = \sum_{i=0}^{i=n-1} e_i 2^i$.

Pour stocker une valeur entière toujours positive ou nulle³, le programmeur peut décider d'utiliser une variable entière en interprétant son contenu comme un entier naturel (attribut *unsigned* de type entier en langage C) afin de maximiser l'intervalle de valeurs représentables : $[0 \dots 2^n - 1]$.

Dans le langage C, le type entier naturel est spécifié avec l'attribut **unsigned**, ou les types entier naturel de taille précise **uint xx _t** ($x \in \{8, 16, 32, 64\}$) définis dans stdint.h (révisions récentes du langage).

Chaque entier correspond à un angle de rotation depuis l'origine dans le sens trigonométrique⁴. L'addition de 2 entiers peut être interprétée comme la sommation des angles de rotation des opérandes. A partir d'un tour complet, il y a débordement (résultat apparent obtenu modulo 2^4 et C=1 qui indique qu'il faudrait un bit de plus (à 1) pour représenter le vrai résultat).

4. ou anti-horaire

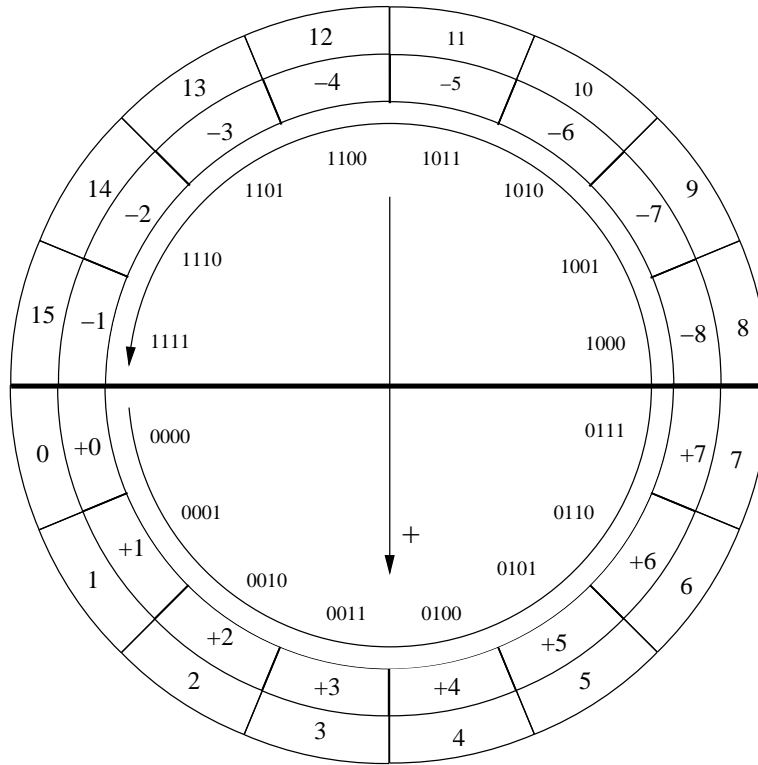


FIGURE 2.1 – Représentation d'entiers naturels et signés sur 4 bits

2.3.2 Une convention à oublier : signe et valeur absolue

La convention la plus intuitive pour l'ensemble \mathbb{Z} est de coder le signe dans le bit de poids fort ($0 : \geq 0, 1 : \leq 0$) et la valeur absolue sur les $n-1$ bits de poids faibles.

Elle présente deux inconvénients majeurs pour le codage des entiers⁵ :

- La valeur 0 a deux codages (sur 4 bits : 0000 et 1000)
- l'addition des relatifs est traitée différemment de celle des naturels

C'est pourquoi les entiers relatifs sont codés selon la méthode du complément à 2.

2.3.3 Pour entiers relatifs (\mathbb{Z}) par la méthode du complément à 2 : $\alpha = -1$ et

$$E = -e_{n-1}2^{n-1} + \sum_{i=0}^{i=n-2} e_i 2^i.$$

Le bit de poids fort représente maintenant le signe de l'entier et le principe consiste à retrancher 2^n à la valeur associée aux entiers dont le bit de poids fort est à 1. Cette convention représente les entiers négatifs selon la technique du *complément à deux*⁶ : l'entier relatif $-x$ est représenté comme l'entier naturel $2^n - x$. Dans les langages, cette convention d'interprétation est généralement utilisée par défaut (type entier sans attribut `unsigned` ou type `intxx_t` en langage C).

Un entier relatif E dont le bit de signe est 0 (≥ 0) appartient à l'intervalle $[0 \dots 2^{n-1} - 1]$ et sa valeur associée est la même que dans la convention pour entier naturels.

5. elle est utilisée dans certains formats de représentation des nombres à virgule flottante

6. La convention alternative "signe et valeur absolue" (resp. codé dans le bit de poids fort et codée sur les $n-1$ bits de poids faibles) a l'inconvénient de définir deux zéros : $+0$ et -0 . Rarement utilisée pour les entiers, elle peut s'appliquer à la représentation des nombres à virgule flottante.

Un entier E dont le bit de signe est 1 (< 0) appartient à l'intervalle $[-2^{n-1}, +2^{n-1} - 1]$ et sa valeur associée est $-\bar{e}^2 = -(2^n - e)$.

- Pour calculer l'opposé d'un entier, il faut prendre le complément à deux de cet entier (et non inverser simplement le bit de signe).
- Sur n bits, l'entier -2^{n-1} est son propre complément à deux et l'entier relatif $+2^{n-1}$ n'est pas représentable.
- L'ajout d'un bit à 0 en poids fort d'un entier relatif négatif inverse son signe et change sa valeur.

La couronne intérieure de la figure 2.1 illustre le codage des entiers relatifs sur 4 bits. A chaque entier peut être associé un angle de rotation dans le sens trigonométrique pour les entiers positifs ou nuls et dans le sens horaire pour les entiers négatifs.

Le code 1001 peut représenter selon la convention d'interprétation soit l'entier naturel 9 soit l'entier relatif -7. De même, 0101 est le code commun aux entiers naturels 5 et relatif +5.

L'addition de deux entiers relatifs de même signe donne une erreur lorsque la somme des angles correspondant aux entiers va au-delà d'une rotation d'un demi-tour, avec un résultat apparent de signe opposé à celui des opérandes. Cette erreur vient du fait que le résultat attendu n'appartient pas à l'intervalle des valeurs représentables sur le nombre de bits de codage utilisé.

2.3.4 Intervalles représentables

n	Convention naturels		Convention relatifs	
n	0	à $2^n - 1$	-2^{n-1}	à $+2^{n-1} - 1$
8	0	à 255	-128	à +127
16	0	à 65535 ($64K_b-1$)	-32768 ($-32K_b$)	à +32767 ($32K_b-1$)
32	0	à 4294967295 ($4G_b-1$)	-2147483648 ($-2G_b$)	à +2147483647 ($2G_b-1$)
64	0	à $1,8 \times 10^{19} (16E_b - 1)$	$-9 \times 10^{18} (-4E_b)$	à $+9 \times 10^{18} (+4E_b - 1)$

Pour les bornes de l'intervalle sur 64 bits, le tableau mentionne l'ordre de grandeur (préfixé par) : la valeur exacte représente une vingtaine de chiffres. Les préfixes K_b (kilo) et M_b (méga) représentent $2^{10} = 1024_{10}$ et $2^{20} = 1048576_{10}$, dont la valeur est proche de 1000 (1K) et 1000000 (1M). Même principe pour G_b (giga : 2^{30}) et E_b (eta : 2^{60}).

2.4 Changement de format, manipulation booléenne des bits, décalages

2.4.1 Extension et réduction de format

Des conversions de taille sont nécessaires lors de la copie d'un entier entre 2 contenants de tailles différentes, par exemple un registre de 32 bits et un emplacement mémoire de 8 ou 16 bits.

La réduction de format élimine les bits de poids forts excédentaires (opération modulo). La valeur entière n'est pas modifiée si elle est représentable sur le contenant de plus petite taille.

En sens inverse, la représentation de l'entier doit être étendue en ajoutant des bits de poids forts selon la nature de l'entier :

- ajout de bits à 0 pour un entier naturel
- duplication de l'ancien bit de poids fort (bit de signe) pour un entier relatif

Il existe ainsi 3 instructions ARM de transfert d'un entier entre un registre 32 bits **regx** et un emplacement de 16 bits en mémoire **mem[y]**. L'instruction **ldrh** est destinée aux entiers naturels codés sur 16 bits, et **ldrsh** aux entiers relatifs.

- **strh** : $\text{regx modulo } 2^{16} \rightarrow \text{mem}[y]$
- **ldrh** : $\text{regx} \xleftarrow{\text{extension en ajoutant 16 fois un bit 0}} \text{mem}[y]$
- **ldrsh** : $\text{regx} \xleftarrow{\text{extension en ajoutant 16 fois le bit de poids fort de mem}[y]} \text{mem}[y]$

2.4.2 Décalage et rotation

Le décalage logique à gauche de k bits (Logic Shift Left **#k** en langage d'assemblage ARM, $\ll k$ en C) d'un entier e ajoute d bits à 0 à droite, ce qui revient à multiplier e par 2^d . Le format de représentation restant inchangé, le décalage supprime les k bits de poids forts de e . Si l'un de ces bits éjectés n'est pas 0, le résultat de la multiplication n'est pas représentable sur le nombre de bits utilisé.

Remarque : l'entier 2^k est l'entier 1 décalé de k bits à gauche ($((\text{uint32_t})1 \ll k)$ en C).

Une opération de rotation est un décalage dans lequel les bits ajoutés à une extrémité sont ceux qui sont éjectés de l'autre extrémité de l'entier. Une rotation à gauche de k bits et une rotation à droite de $n - k$ bits ont le même effet.

Le décalage de k bits à droite correspond à la division par 2^k : les k bits de poids faibles sont éjectés.

Le décalage logique de k bits à droite (Logic Shift Right **#k** en langage d'assemblage ARM, $\gg k$ sur une variable unsigned en C) est destiné aux entiers naturels : k bits à 0 sont ajoutés en poids forts et l'entier est divisé par 2^k .

Le décalage arithmétique à droite (Arithmetic Shift Right en langage d'assemblage ARM) est destiné aux entiers relatifs : le bit de poids fort (signe) d'origine est recopié dans les bits ajoutés à gauche. L'entier est divisé par 2^k s'il en était un multiple au départ.

2.4.3 Opérations booléennes bit à bit

Un chiffre de la base 2 (bit d'un entier) et un booléen ont la même écriture : 0 ou 1.

Les opérateurs bit à bit traitent un entier sur n bits comme une collection de n booléens : chaque bit de rang j du résultat correspond à une opération booléenne sur les bits de rang j des opérandes.

La négation (un seul opérande) bit à bit (\sim en C) inverse tous les bits de l'entier : elle réalise le complément à 1 de celui-ci.

Les autres opérations booléennes classiques à 2 deux opérandes existent aussi en version bit à bit :

- Et bit à bit (**&** en C)
- Ou bit à bit (**|** en C)
- Ou exclusif bit à bit (**^** en C, remarquer que ce n'est pas l'opérateur d'élévation à la puissance)

Noter la différence avec les opérateurs booléens classiques du C :

- $11 \ \&\& \ 13$ donne 1 ($11 \neq 0$) : vrai, $13 \neq 0$: vrai, vrai et vrai : vrai $\rightarrow 1$
- $11 \ \& \ 13$ donne 9 : seuls les bits 0 et 3 sont à 1 dans les deux entiers.

2.4.4 Exemples d'application

Tous les entiers des exemples suivant sont supposés déclarés de type unsigned.

Tester si le bit b de e est à 1 (3 méthodes différentes) :

- décaler une copie de e de b bits à droite, puis ET bit à bit avec $2^0 = 1$: si $\neq 0$, le bit à tester est 1 ou
- décaler une copie de e pour amener le bit b en poids fort : le résultat interprété comme un entier relatif est < 0 si le bit b de e est à 1 ou
- ET bit à bit entre e et 1 décalé à gauche de b bits : bit testé à 1 si résultat non nul

Création de masque : entier dont les bits x à y ($y \geq x$) inclus sont à 0, les autres à 1 (utilisé dans un ET bit à bit, permet de forcer à 0 les bits x à y d'un entier) :

1. Complément à 1 de 0 (~ 0) : entier composé uniquement de bits à 1
2. décalage à gauche pour supprimer les bits à 1 au-delà du rang y
3. décalage à droite pour supprimer les bits à 1 en deçà du rang x
4. décalage à gauche pour ramener le premier bit à 1 au rang x
5. complément à 1 : inversion de tous les bits

2.5 Soustraction

Dans chaque colonne, on fait la somme du chiffre du deuxième (b_i) opérande et de l'emprunt entrant (e_i) et l'emprunt entrant initial e_0 est nul. Le chiffre (r_i) du résultat est égal :

- au chiffre du premier opérande (a_i) moins cette somme, l'emprunt sortant (e_{i+1}) étant 0, si $somme \leq a_i$,
- au chiffre du premier opérande (a_i) plus la base moins cette somme, l'emprunt sortant (e_{i+1}) étant 1, si $somme > a_i$,

	a_3	a_2	a_1	a_0	opérande gauche				
$+_{base}$	b_3	b_2	b_1	b_0	opérande droit				
$E = e_4$	e_3	e_2	e_1	e_0	emprunts	sortant	e_{i+1}	e_i	entrant
	r_3	r_2	r_1	r_0	résultat apparent			r_i	
$-_{10}$	8	6	4	8					
$E = 0$	5	7	9	5					
	1	1	0	0	$E = 0$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 0$
	2	8	5	3	$6 \leq 8$	$8 > 6$	$9 > 4$	$5 \leq 8$	
$-_2$	1	1	0	1					
$E = 0$	0	1	1	0					
	1	1	0	0	$E = 0$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 0$
	0	1	1	1	$0 \leq 1$	$2 > 1$	$1 > 0$	$0 \leq 1$	
$-_2$	0	1	0	0					
$E = 1$	0	1	0	1					
	1	1	1	0	$E = 1$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 1$	$\leftarrow 1$
	1	1	1	1	$1 > 0$	$2 > 1$	$1 > 0$	$1 > 0$	

2.6 Soustraction par addition du complément à deux

En pratique, toutes les soustractions sont réalisées par addition du complément à 2. On exploite la propriété suivante (calculs sur n bits) : $x + \bar{y}^2 = x + 2^n - y$.

Les résultats étant obtenus modulo 2^n , on peut calculer l'expression $x - y$ en effectuant une addition comme suit :

- Premier opérande : x
- Deuxième opérande : \bar{y}
- Retenue initiale : 1 (pour faire $x + \bar{y} + 1$)
- On observe que la ligne des retenues dans cette addition de \bar{y} est le complément de la ligne des emprunts dans la soustraction normale.

Le calcul de $13 - 6$ (réalisable) et $4 - 5$ (impossible pour des entiers naturels) est illustré par les deux derniers exemples des paragraphes 2.5 (soustraction normale) et 2.2 (soustraction par addition du complément à deux).

2.7 Indicateurs et débordements

Lors d'une opération (addition ou soustraction) sur les entiers, l'unité de calcul d'un processeur synthétise quatre indicateurs booléens à partir desquels il est possible de prendre des décisions.

2.7.1 Nullité et indicateur : Z

L'indicateur Z (**Z**éro) est vrai si et seulement tous les bits du résultat apparent sont à 0, ce qui signifie que ce dernier est nul.

2.7.2 Signe du résultat apparent : N

L'indicateur N est égal au bit de poids fort du résultat apparent. Si ce dernier est interprété comme un entier relatif, $N=1$ signifie que le résultat apparent est négatif.

2.7.3 Débordement en convention d'entiers naturels : C

L'indicateur C (**C**arry) est la dernière retenue sortante de l'addition. Il n'a de sens que dans une interprétation de l'opération sur des entiers naturels.

Après une addition, $C = 1$ indique un débordement : le résultat de l'opération est trop grand pour être représentable sur n bits. Le résultat apparent est alors faux : il correspond au vrai résultat à 2^n près.

E est le dernier emprunt sortant d'une soustraction. $E = 1$ indique que la soustraction est impossible parce que le deuxième opérande est supérieur au premier. Les soustractions sont en pratique réalisées par addition du complément à deux. C correspond alors à \bar{E} . Après une soustraction par addition du complément à deux, $C = 0$ indique que la soustraction est impossible, $C = 1$ que l'opération est correcte⁷.

7. Attention : les instructions de soustraction ou de comparaison de certains processeurs (dont le SPARC) stockent dans C le **complément** de la retenue finale. Pour ces processeurs, $C = 1$ indique toujours une erreur, que ce soit après une addition ou une soustraction.

2.7.4 Débordement en convention d'entiers relatifs : V

Pour les entiers, la soustraction est toujours réalisée par addition de l'opposé du deuxième opérande.

La valeur absolue de la somme de deux entiers relatifs de signes opposés est inférieure ou égale à la plus grande des valeurs absolues des opérandes et le résultat est toujours représentable sur n bits. La somme de deux entiers relatifs de même signe peut ne pas être représentable sur n bits, auquel cas le résultat apparent sera faux :

- Sa valeur n'est égale à celle du vrai résultat de l'opération qu'à 2^n près.
- Son bit de signe (bit de poids fort) est également faux : la somme de deux entiers positifs donnera un résultat apparent négatif et la somme de deux entiers négatifs donnera un résultat apparent positif ou nul.

L'indicateur V (oVerflow⁸) est l'indicateur de débordement destiné à la convention d'interprétation pour entiers relatifs. $V = 1$ indique un débordement, auquel cas les deux dernières retenues sont de valeurs différentes.

	0	0	1	1	+3			0	1	1	0	+6
+2	1	0	1	1	-5			+2	0	1	0	+4
V=0	0 = 0	1	1	0			V=1	0 ≠ 1	0	0	0	
	1	1	1	0	-2			1	0	1	0	-6
	1	0	1	0	-6							
+2	1	1	0	0	-4							
V=1	1 ≠ 0	0	0	0								
	0	1	1	0	+6							

Le signe du vrai résultat (sans erreur) de l'opération s'écrit : $V \oplus N = \overline{V}.N + V.\overline{N}$. Ainsi, le signe du résultat de l'opération sans erreur est N signe du résultat apparent s'il n'y a pas de débordement (\overline{V}), ou le signe opposé \overline{N} de celui du résultat apparent en cas de débordement (V).

2.7.5 Expressions des conditions avec les indicateurs ZNCV

Après synthèse des indicateurs lors du calcul de $x - y$, il est possible de tester diverses conditions.

Par exemple, l'expression de la condition "strictement inférieur" ($x < y$) est :

- \overline{C} si x et y sont considérés comme des entiers naturels (la soustraction est impossible)
- $V \oplus N$ si x et y sont considérés comme des entiers relatifs (le vrai résultat est négatif).

2.8 Exercices

2.8.1 Addition d'entiers naturels

Quels entiers naturels peut-on représenter sur 4 bits ?

Choisir deux entiers naturels représentables sur 4 bits, faire la somme en faisant apparaître les retenues propagées. Quand la somme n'est-elle pas représentable sur 4 bits ?

On pourra reprendre l'exercice pour des nombres représentés sur 8, 16 ou 32 bits...

2.8.2 Représentation des entiers relatifs en *complément à deux*

Quels entiers relatifs peut-on représenter sur 4 bits ? Donner pour chacun leur codage en complément à 2.

8. L'initiale O n'a pas été retenue pour éviter une confusion avec zéro

Quels entiers relatifs peut-on représenter sur 8 bits ? Comment s'y prendre pour coder un entier relatif en complément à 2 sur 8 bits ? Comment passer d'un relatif négatif à son opposé ?

Choisir un entier relatif positif représentable sur 4 bits. Donnez sa représentation sur 8 bits.

Choisir un entier relatif négatif représentable sur 4 bits. Donnez sa représentation sur 8 bits.

2.8.3 Addition d'entiers relatifs

Choisir deux entiers relatifs un positif et un négatif représentables sur 4 bits, faire la somme. Quand la somme n'est-elle pas représentable sur 4 bits ?

Choisir deux entiers relatifs positifs représentables sur 4 bits, faire la somme. Identifier les cas où la somme n'est pas représentable sur 4 bits ?

Même question pour deux entiers relatifs négatifs.

On pourra reprendre les exercices pour des nombres représentés sur 8, 16 ou 32 bits...

2.8.4 Soustraction de naturels

Choisir deux entiers naturels représentables sur 4 bits, faire la différence. Quand la différence n'est-elle pas représentable sur 4 bits ?

Pour comparer deux nombres a et b on peut calculer la différence $a - b$; $a > b$ ssi $a - b > 0$.

Dans le tableau de la figure 2.2 de votre documentation retrouvez les lignes correspondant à des comparaisons ($>$, $<$, \leq , \geq) de nombres dans \mathbb{N} . Faire le lien avec la réponse que vous avez donnée précédemment.

2.8.5 Comparaisons d'entiers relatifs

Choisir deux entiers relatifs représentables sur 4 bits, faire la différence. Exprimer quand la différence n'est pas représentable est un peu plus complexe : on trouve les expressions logiques nécessaire dans le tableau de la figure 2.2 de votre documentation. Prendre un exemple par exemple le cas \leq et chercher des entiers relatifs correspondant à chacun des cas de l'expression $Z \vee ((N \wedge \overline{V}) \vee (\overline{N} \wedge V))$.

2.8.6 Multiplier et diviser par une puissance de deux

Choisir un entier naturel n représentable sur 8 bits. Quelle est la représentation de $2 * n$, de $4 * n$, de $8 * n$? Quelle est la représentation de $n/2$, de $n/4$, de $n/8$?

Choisir un entier relatif (essayer avec un positif puis avec un négatif) x représentable sur 8 bits. Quelle est la représentation de $2 * x$, de $4 * x$, de $8 * x$? Quelle est la représentation de $x/2$, de $x/4$, de $x/8$?

Chapitre 3

TD séance 3 : Langage machine, codage des données

3.1 Sujet du TD

On considère l'instruction : $x := (a + b + c) - (x - a - 214)$.

x , a , b et c sont des variables représentées sur 32 bits et rangées en mémoire aux adresses (fixées arbitrairement) : 0x50f0, 0x2fa0, 0x3804, 0x4050.

Il existe un espace mémoire libre à partir de l'adresse 0x6400.

On veut écrire un programme en langage machine qui exécute l'instruction considérée. Le programme ne doit pas changer les valeurs des variables a , b et c (i.e. ne doit pas changer le contenu des cases mémoire correspondantes).

Exercice : Dans chacun des langages machines décrits dans la suite, écrire systématiquement le programme qui exécute l'instruction ci-dessus.

3.2 Un premier style de langage machine : machine dite à accumulateur

La figure 3.1 donne la structure de la machine. Cette machine possède un registre spécial appelé accumulateur (on notera **ACC**) utilisé dans les opérations à la fois comme un des deux opérandes et pour stocker le résultat.

Dans une telle machine une instruction de calcul est formée du code de l'opération à réaliser (addition ou soustraction) et de la désignation d'un opérande. Il y a deux façons de désigner une information : on donne son adresse en mémoire ou on donne une valeur.

instruction	opération réalisée
add adr	ACC \leftarrow ACC + MEM[adr]
add# vi	ACC \leftarrow ACC + vi
sub adr	ACC \leftarrow ACC - MEM[adr]
sub# vi	ACC \leftarrow ACC - vi

Par ailleurs, on peut aussi charger une information dans l'accumulateur depuis la mémoire ou avec une valeur appelée **valeur immédiate**.

instruction	opération réalisée
load adr	ACC \leftarrow MEM[adr]
load# vi	ACC \leftarrow vi

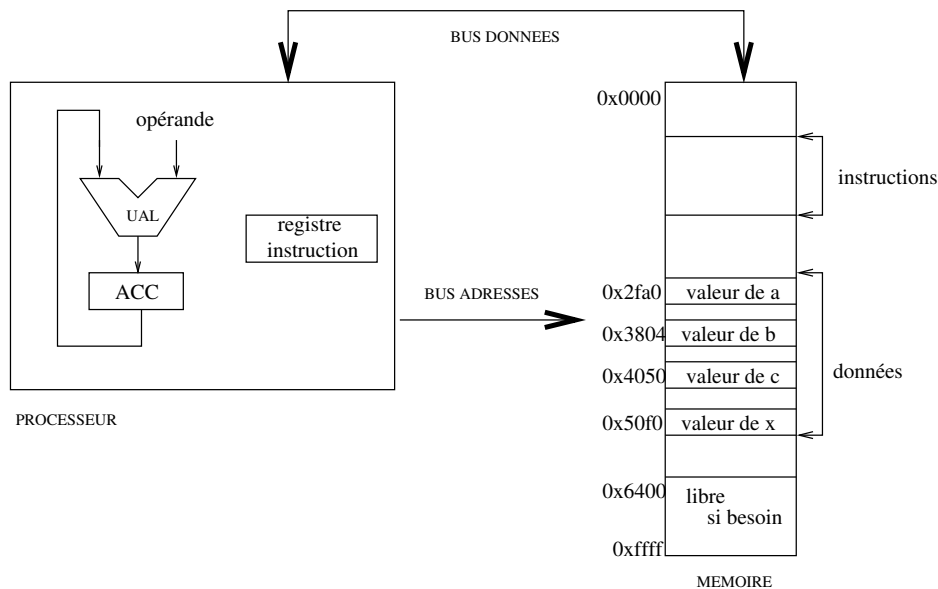


FIGURE 3.1 – Structure d’une machine à accumulateur

Et enfin, on peut ranger la valeur contenue dans l’accumulateur en mémoire :

instruction	opération réalisée
store adr	$\text{MEM}[\text{adr}] \leftarrow \text{ACC}$

1. Calculer la taille du programme si on suppose que les adresses sont représentées sur 16 bits (2 octets), les valeurs immédiates sont aussi représentées sur 2 octets et le code instruction est lui codé sur 1 octet.
2. Quelle est la différence entre `sub 0x2fa0` et `sub# 214` ?
3. Une instruction `store# 6` a-t-elle une signification ?
4. Ecrire un programme qui réalise le même calcul en commençant par évaluer la soustraction.

Les microprocesseurs des années 70/80 ressemblent à ce type de machine : type 6800, 6501 (APPLE 2), Z80. Il en existe encore dans les petits automatismes, les cartes à puce, ... Les adresses sont souvent sur 16 bits, les instructions sur 1,2,3,4 octets, le code opération sur 1 octet.

3.3 Machine avec instructions à plusieurs opérandes

On va s’intéresser maintenant à une machine dans laquelle on indique dans l’instruction : le code de l’opération à réaliser, un opérande dit destination et deux opérandes source.

On pourrait imaginer une instruction de la forme : `add adr1, adr2, adr3` dont la signification serait : $\text{mem}[\text{adr1}] \leftarrow \text{mem}[\text{adr2}] + \text{mem}[\text{adr3}]$.

Cela coûterait cher en taille de codage d’une instruction (6 octets pour les adresses si une adresse est sur 2 octets + le reste) mais surtout en temps d’exécution d’une instruction (3 accès mémoire).

Dans ce type de machine, il y a en fait des registres, proches du processeur et du coup d’accès plus rapide. On peut y stocker les informations avec lesquelles sont faits les calculs (Cf. figure 3.2). Il y a de plus des opérations de transfert d’information de la mémoire vers les registres (et inversement).

Les registres sont repérés par des numéros. On note `reg5` le registre de numéro 5 par exemple. On notera aussi `reg5` la valeur contenue dans le registre.

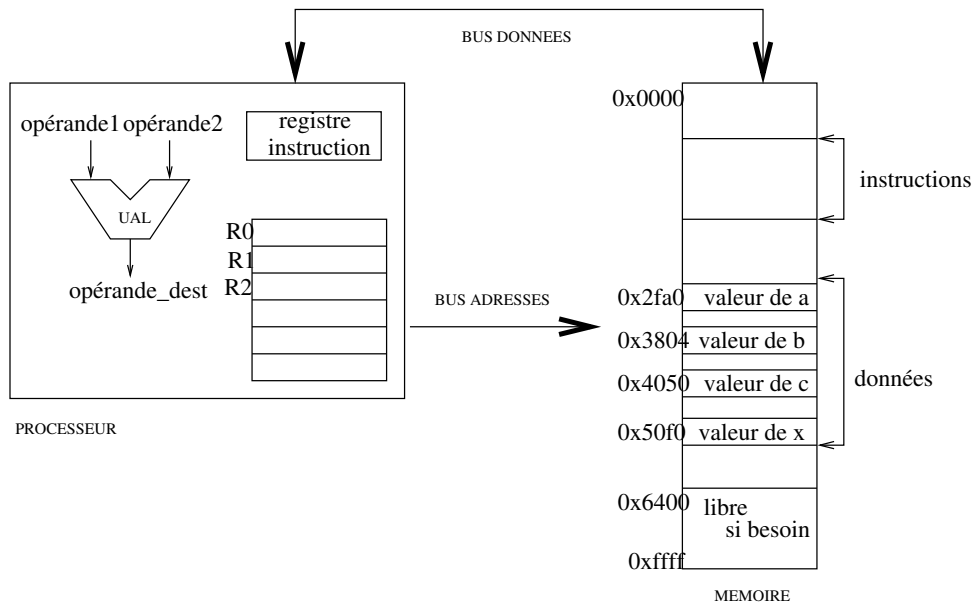


FIGURE 3.2 – Structure d’une machine générale à registres

Une instruction de calcul est formée du code de l’opération à réaliser, et de la désignation des registres intervenant dans le calcul. On trouve deux formes de telles instructions :

- deux opérandes sources dans des registres (on écrira regs1 et regs2) et un registre pour le résultat du calcul (on écrira regd pour registre destination).
- un opérande source dans un registre et l’autre donné dans l’instruction (valeur immédiate) et toujours un registre destination.

instruction	opération réalisée
add regd regs1 regs2	regd \leftarrow regs1 + regs2
sub regd regs1 regs2	regd \leftarrow regs1 - regs2
add# regd regs1 vi	regd \leftarrow regs1 + vi
sub# regd regs1 vi	regd \leftarrow regs1 - vi

Au niveau du codage, il faut coder : le code de l’opération à réaliser et les numéros des registres. Par exemple sur ARM il y a 16 registres, d’où 4 bits pour coder leur numéro.

Nous avons besoin aussi d’effectuer des transferts entre mémoire et registres. En général, dans ce genre de machine les adresses (et les données) sont représentées sur 32 bits (question d’époque...). Le problème est que pour représenter l’instruction *amener le mot mémoire d’adresse 0x2fa0 dans le registre 2*, il faut : 1 codeop + 1 numéro de registre sur x bits + 1 adresse (0x2fa0) sur 32 bits pour former l’instruction... codée elle aussi sur 32 bits.

Les opérations de transfert sont réalisées en deux étapes : mettre l’adresse du mot mémoire concerné dans un registre (ci-dessous reg1) puis charger un registre avec le contenu du mot mémoire à cette adresse (load) ou ranger le contenu du mot mémoire à cette adresse dans un registre (store).

instruction	opération réalisée
METTRE reg1, adr	reg1 \leftarrow adr
load reg2, [reg1]	reg2 \leftarrow Mem[reg1]
ou	
METTRE reg1, adr	reg1 \leftarrow adr
store [reg1], reg2	Mem[reg1] \leftarrow reg2

1. Si on suppose qu'une instruction est codée sur 4 octets, quelle est la taille du programme ?
2. Discuter de la taille de codage des numéros de registres.
3. Discuter de la taille de codage des valeurs immédiates.
4. Pourquoi en général n'y a-t-il qu'une valeur immédiate ?

Les microprocesseurs des années 90 sont de ce type : machines RISC, type Sparc, ARM. Les adresses sont en général sur 32 bits, toutes les instructions sont codées sur 32 bits, et il y a beaucoup de registres.

Remarque : Attention, pour le processeur ARM, dans la syntaxe de l'instruction `store` les opérandes sont inversés par rapport au choix fait ci-dessus ; on écrit `str reg2, [reg1]`. Ainsi l'ordre d'écriture des opérandes est le même pour l'instruction store (`str`) et l'instruction load (`ldr`).

Dans les années 70/80 il y a eu des processeurs (pas micro du tout) de type VAX (inspirés de, avec beaucoup de variantes). Une instruction peut être codée sur 4 mots de 32 bits et donc contenir 3 adresses.

Il a été construit dans les années 80/90 des microprocesseurs avec deux opérandes pour une instruction : un opérande source servant aussi de destination (type 68000, 8086). Les adresses sont sur 16, 24 ou 32 bits, les instructions sur 1,2,3 ou 4 mots de 16 bits. Le code opération est généralement sur 1 mot de 16 bits. Il y a 8 ou 16 registres.

3.4 Codage de METTRE ?

Il reste à comprendre comment coder : **METTRE une adresse de 32 bits dans un registre ?**

Même si on n'a plus que le code de METTRE, un seul numéro de registre, l'adresse reste sur 32 bits et ça ne tient toujours pas...

Par exemple, on veut coder : charger reg2 avec le mot mémoire d'adresse 0x2fff2765. On va donc coder : `METTRE reg1, 0x2fff2765` puis `load reg2, [reg1]`.

Chapitre 4

TD séance 4 : Codage des données (suite)

4.1 Données en mémoire

(rappel) On travaille sur un programme écrit en langage d'assemblage **ARM** qui exécute l'instruction : $x := (a + b + c) - (x - a - 214)$. Dans la pratique, ce n'est pas nous qui fixons les adresses, mais les outils de traduction et/ou de chargement en mémoire et nous, on peut utiliser des étiquettes ...

Le programme ARM :

```
1  .text
2  .global main
3  main: ldr r1, LD_a
4        ldr r1, [r1]
5        ldr r2, LD_b
6        ldr r2, [r2]
7        ldr r3, LD_c
8        ldr r3, [r3]
9        add r4, r1, r2
10       add r4, r4, r3
11       ldr r2, LD_x
12       ldr r3, [r2]
13       sub r3, r3, r1
14       sub r3, r3, #214
15       sub r4, r4, r3
16       str r4, [r2]
17       bx lr
18       .org 0x1000
19  LD_a: .word a
20  LD_b: .word b
21  LD_c: .word c
22  LD_x: .word x
23       .data
24       .org 0x2fa0
25  a:    .word 10
26       .org 0x3804
27  b:    .word 20
28       .org 0x4050
29  c:    .word 30
30       .org 0x50f0
31  x:    .word 1000
```

La directive `.org` permet de fixer l'adresse relative où sera stockée la valeur qui suit. Par exemple, le mot étiqueté `a` sera rangé à l'adresse de début de la zone `data` + `0x2fa0`.

1. Dessiner le contenu de la zone de données en exprimant les valeurs des différentes données en hexadécimal (en faisant apparaître les différents octets).
2. Ajouter des commentaires au programme explicitant chacune des lignes de code.

On traduit le programme en binaire en fixant les adresses de début de la zone `text` et de la zone `data` :

```
arm-eabi-as -o exp_arm.o exp_arm.s -mbig-endian
arm-eabi-ld -o exp_arm exp_arm.o -e main -Ttext 0x800000 -Tdata 0x0 -EB
```

La zone `text` étant stockée à partir de l'adresse `0x800000` (option `-Ttext 00800000`) et la zone `data` à partir de l'adresse `00000000` (option `-Tdata 0x0`), on regarde la traduction obtenue.

Zone text :

```
$ arm-eabi-objdump -d -j .text exp_arm
```

```
exp_arm:      file format elf32-bigarm
```

```
Disassembly of section .text:
```

```
00800000 <main>:
 800000: e59f1ff8    ldr    r1, [pc, #4088]    ; 801000 <LD_a>
 800004: e5911000    ldr    r1, [r1]
 800008: e59f2ff4    ldr    r2, [pc, #4084]    ; 801004 <LD_b>
 80000c: e5922000    ldr    r2, [r2]
 800010: e59f3ff0    ldr    r3, [pc, #4080]    ; 801008 <LD_c>
 800014: e5933000    ldr    r3, [r3]
 800018: e0814002    add    r4, r1, r2
 80001c: e0844003    add    r4, r4, r3
 800020: e59f2fe4    ldr    r2, [pc, #4068]    ; 80100c <LD_x>
 800024: e5923000    ldr    r3, [r2]
 800028: e0433001    sub    r3, r3, r1
 80002c: e24330d6    sub    r3, r3, #214      ; 0xd6
 800030: e0444003    sub    r4, r4, r3
 800034: e5824000    str    r4, [r2]
 800038: e1a0f00e    bx     lr
...

00801000 <LD_a>:
 801000: 00002fa0    andeq  r2, r0, r0, lsr #31

00801004 <LD_b>:
 801004: 00003804    andeq  r3, r0, r4, lsl #16

00801008 <LD_c>:
 801008: 00004050    andeq  r4, r0, r0, asr r0

0080100c <LD_x>:
 80100c: 000050f0    streqd r5, [r0], -r0
```

Zone data :

```
$ arm-eabi-objdump -s -j .data exp_arm
```

```
exp_arm:      file format elf32-bigarm
```

```
Contents of section .data:
```

```
0000 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
...
2f90 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
2fa0 0000000a 00000000 00000000 00000000 .....
2fb0 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
```

```

...
2fc0 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
...
37f0 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
3800 00000000 00000014 00000000 00000000 .....
3810 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
...
4040 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
4050 0000001e 00000000 00000000 00000000 .....
4060 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
...
4070 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
...
50e0 00000000 00000000 00000000 00000000 .....
50f0 000003e8 .....

```

1. En fin de zone **text** on trouve le binaire correspondant aux déclarations des adresses en zone **data**. Repérez les valeurs (attention : ce sont des adresses) associées aux étiquettes **LD_a**, **LD_b**, **LD_c** et **LD_x**.
2. Retrouvez les valeurs rangées à ces adresses dans la zone **data**.
3. Quelle est la traduction de l'instruction **ldr r1, LD_a**? Etudiez le codage binaire de cette instruction et retrouvez-y les différents éléments : le code de **ldr**, le code des registres **r1** et **pc** et la valeur du déplacement.
4. Quelle est la traduction de l'instruction **ldr r1, [r1]**? Etudiez le codage binaire de cette instruction et retrouvez-y les différents éléments : le code de **ldr**, le code des registres **r1** et **r1** et la valeur du déplacement.
5. Comprendre le déplacement codé dans l'instruction **ldr r1, LD_a**?
6. Recommencer le même travail avec l'instruction **ldr r2, LD_x**?

Codage des instructions **ldr et **str** :** La figure 4.1 donne un sous-ensemble des règles de codage des instructions **ldr** et **str**, suffisant pour traiter les exercices précédents. On peut par exemple coder : **ldr rd, [rn, +/-déplacement]** ; le bit **U** code le signe du déplacement (1 pour +, 0 pour -) et le bit **L** vaut 1 pour **ldr** et 0 pour **str**.

31	28	27	24	23	22	21	20	19	16	15	12	11	0
cond	0	1	0	1	U	0	0	L	rn	rd	déplacement		

FIGURE 4.1 – Codage des instructions **ldr** et **str**

4.2 Codage des tableaux

Pour les chaînes de caractères et les tableaux "simples" (à 1 dimension), le placement en mémoire est immédiat : à partir d'une adresse de départ qui est associée à la chaîne de caractère, resp. au tableau, les caractères, resp. les éléments de tableaux, sont disposés dans la mémoire à la suite. Pour les caractères, octet après octet. Pour un tableau d'entiers 32 bits, chaque entier sera donc placé sur un bloc de 4 octets en suivant la convention grand-boutiste (big-endian) ou petit-boutiste (little-endian) adoptée.

1. Combien faudra-t-il de place pour placer la chaîne de caractère "Bonjour !" en mémoire (prendre en compte le codage de fin de chaîne par un 0).

2. Si l'adresse de départ est multiple de 4, quelle sera la prochaine adresse multiple de 4 ? (en déduire la place occupée en pratique).
3. Dessiner la mémoire obtenue pour placer la chaîne de caractère "Bonjour" à partir de l'adresse 0x8080
4. Dessiner la mémoire obtenue pour placer le tableau [0x12345678,0xAABBCCDD,0x0,0x1] à partir de l'adresse 0xA000 (par exemple avec la convention grand-boutiste).
5. Quelles sont les valeurs du tableau vues par Bob si Bob pense que le tableau a été écrit avec la convention petit-boutiste) ?

Pour les tableaux à 2 dimensions, c'est presque la même chose, il suffit de voir le tableau comme un tableau à une dimension de tableaux à une dimension : soit un tableau de lignes, soit un tableau de colonnes.

1. Dessiner la mémoire obtenue pour placer le tableau ci dessous comme tableau de lignes
2. Dessiner la mémoire obtenue pour placer le tableau ci dessous comme tableau de colonnes
3. Dans un tableau d'entiers (32 bits) de 100 lignes et 1000 colonnes quelle sera la distance (en nombre d'octets) entre 2 éléments voisins sur une même ligne si le tableau a été placé en mémoire en utilisant la disposition "tableau de lignes".
4. Même question pour la disposition "tableau de colonnes".
5. Idem pour 2 entiers voisins dans une même colonne pour les deux dispositions.

0x01020304	0x05060708	0x090A0B0C	0x0D0E0F10
0x11121304	0x15161718	0x191A1B1C	0x1D1E1F10
0x21222324	0x25262728	0x292A2B2C	0x2D2E2F10

FIGURE 4.2 – Tableau de nombres

Chapitre 5

TD séances 5 et 6 : Codage des structures de contrôle

5.1 Codage d'une instruction conditionnelle

On veut coder l'algorithme suivant : si $a = b$ alors $c \leftarrow a-b$ sinon $c \leftarrow a+b$.

L'évaluation de l'expression booléenne $a = b$ est réalisée par une soustraction $a-b$ dont le résultat ne nous importe guère; on veut juste savoir si le résultat est 0 ou non. Pour cela on va utiliser l'indicateur Z du code de condition arithmétique positionné après une opération :

Z = 1 si et seulement si le résultat est nul

Z = 0 si et seulement si le résultat n'est pas nul.

De plus nous allons utiliser l'instruction de rupture de séquence BCond qui peut être conditionnée par les codes de conditions arithmétiques Cond (EQ, NE, GT, GE, ...)

On peut proposer beaucoup de solutions dont les deux suivantes assez classiques :

```
@ a dans r0, b dans r1, c dans r2
    CMP r0, r1 @ a-b ??          CMP r0, r1 @ a-b ??
    BNE sinon                    BEQ alors
alors: @ a=b : c <-- a-b          sinon: @ a!=b : c <-- a+b
    B finsi                      B finsi
sinon: @ a!=b : c <-- a+b        alors: @ a=b : c <-- a-b
finisi:                          finisi:
```

Exercices :

1. Comprendre l'évolution du contrôle (compteur de programme, valeur des codes de conditions arithmétiques) pour chacune des deux solutions.
2. Quel est l'effet du programme suivant :

```
    CMP r0, r1
    BNE sinon
    SUB r2, r0, r1
sinon: ADD r2, r0, r1
```

3. Coder en langage d'assemblage ARM l'algorithme suivant :

si x est pair alors $x \leftarrow x \div 2$ sinon $x \leftarrow 3 * x + 1$

la valeur de la variable x étant rangée dans le registre $r5$.

5.2 Notion de tableau et accès aux éléments d'un tableau

Considérons la déclaration de tableau suivante :

TAB : un tableau de 5 entiers représentés sur 32 bits.

Il s'agit d'un ensemble d'entiers stockés dans une zone de mémoire contiguë de taille 5×32 bits (ou 5×4 octets). La déclaration en langage d'assemblage d'une telle zone pourrait être :

debutTAB: .skip 5*4

où **debutTAB** représente l'adresse du premier élément du tableau (considéré comme l'élément numéro 0). **debutTAB** est aussi appelée adresse de début du tableau.

Quelle est l'adresse du 2^{eme} élément de ce tableau ? du 3^{eme} ? du i^{eme} , $0 \leq i \leq 4$?

On s'intéresse à l'algorithme suivant :

```
TAB[0] <-- 11
TAB[1] <-- 22
TAB[2] <-- 33
TAB[3] <-- 44
TAB[4] <-- 55
```

Les deux premières affectations peuvent se traduire :

```
1  .data
2  debutTAB: .skip 5*4
3
4  .text
5  .global main
6  main:
7      ldr r0, LD_debutTAB
8      mov r1, #11
9      str r1, [r0]
10
11     mov r1, #22
12     add r0, r0, #4 @ *
13     str r1, [r0] @ *
14
15     @ a completer
16
17 fin: bx lr
18
19 LD_debutTAB : .word debutTAB
```

A la place des lignes marquées (*) on peut écrire une des deux solutions suivantes :

- **str r1, [r0, #4]** ; le registre **r0** n'est alors pas modifié.
- ou **mov r2, #4** puis **str r1, [r0, r2]** ; le registre **r0** n'est pas modifié.

Exercices : Compléter ce programme de façon à réaliser la dernière affectation. Reprendre le même problème avec un tableau de mots de 16 bits. Reprendre le même problème avec un tableau d'octets.

5.3 Codage d'une itération

Si notre tableau était formé de 10000 éléments, la méthode précédente serait bien laborieuse ... On utilise alors un algorithme comportant une itération.

lexique local :

```

i : un entier compris entre 0 et 4
val : un entier
algorithme :
  val <-- 11
  i parcourant 0..4
    TAB[i] <- val
    val <- val + 11

```

ce qui peut aussi s'écrire :

```

val <-- 11
i <-- 0
tant que i <> 5    @ ou bien : tant que i <= 4 ou encore i < 5
  TAB[i] <- val
  val <- val + 11
  i <-- i + 1

```

A noter : si i était mal initialisé avant le tant que (par exemple $i = 6$), on obtiendrait une boucle infinie avec le test \neq , et une terminaison sans exécuter le corps du tant que avec les conditions $<$ ou \leq .

Nous exprimons le même algorithme en faisant apparaître explicitement l'adresse d'accès au mot de la mémoire : TAB[i].

```

val <-- 11
i <-- 0
tant que i <> 5
  MEM [debutTAB + 4*i] <-- val
  val <- val + 11
  i <-- i + 1

```

Exercices :

1. Coder cet algorithme en langage d'assemblage, en installant les variables `val`, `i` et `debutTAB` respectivement dans les registres : `r3`, `r2` et `r0`.
Pour évaluer l'expression booléenne $i <> 5$, on calcule $i-5$, ce qui nous permet de tester la valeur de $i <> 5$ en utilisant l'indicateur Z code de condition arithmétique : si $Z = 1$, $i-5$ est égal à 0 et si $Z = 0$, $i-5$ est différent de 0.
2. Dérouler l'exécution en donnant le contenu des registres à chaque itération.
3. Modifier le programme si le tableau est un tableau de mots de 16 bits ?
4. Lors de l'exécution du programme précédent on constate que la valeur contenue dans le registre `r0` reste la même durant tout le déroulement de l'exécution ; il s'agit d'un calcul constant de la boucle. On va chercher à l'extraire de façon à ne pas le refaire à chaque fois. Pour cela on introduit une variable `AdElt` qui contient à chaque itération l'adresse de l'élément accédé.

```

val <-- 11; i <-- 0
AdElt <- debutTAB
tant que i <= 4
  { invariant : AdElt = debutTAB + 4 * i }
  MEM [AdElt] <-- val
  i <-- i + 1
  val <- val + 11
  AdElt <- AdElt + 4

```

On peut alors supprimer la variable d'itération i en modifiant le test d'arrêt de l'itération. D'une boucle de parcours de tableau par indice on passe à une boucle de parcours par pointeur (la variable indice i peut être supprimée) :

- multiplication des deux membres de l'inéquation par 4 : $4 * i \leq 4 * 4$
- ajout de `debutTAB` : $debutTAB + 4 * i \leq debutTAB + 4 * 4$
- remplacement de `debutTAB+4*i` par `AdElt`

```
{ i = 0 }
val <-- 11; AdElt <- debutTAB; finTAB <- debutTAB+4*4
tant que AdElt <= finTAB
  { invariant : AdElt = debutTAB + 4 * i }
  MEM [AdElt] <-- val
  val <- val + 11
  AdElt <- AdElt + 4
```

Remarques :

- On peut aussi utiliser les conditions $AdElt \neq finTAB$ ou $AdElt < finTAB$ avec $finTAB < -debutTAB + 4 * 5$, en transformant la condition de départ $i \neq 5$ ou $i < 5$.
- dans le corps du tant que, d'après l'invariant, on pourrait recalculer i à partir de `AdElt` ($i = (AdElt - debutTAB)/4$).

Après avoir compris chacune de ces transformations, traduire la dernière version de l'algorithme en langage d'assemblage.

5.4 Calcul de la suite de “Syracuse”

La suite de Syracuse est définie par :

$$\begin{aligned} U_0 &= \text{un entier naturel} > 0 \\ U_n &= U_{n-1}/2 \text{ si } U_{n-1} \text{ est pair} \\ &= U_{n-1} \times 3 + 1 \text{ sinon} \end{aligned}$$

Cette suite converge vers 1 avec un cycle.

Calculer les valeurs de la suite pour $U_0 = 15$.

Pour calculer les différentes valeurs de cette suite, on peut écrire l'algorithme suivant (à traduire en langage d'assemblage) :

```
lexique :
  x : un entier naturel
algorithme :
  tant que x <> 1
    si x est pair
      alors x <-- x div 2
    sinon x <-- 3 * x + 1
```


Chapitre 6

TD séance 7 : Fonctions : paramètres et résultat

6.1 Branchements aller et retour à une routine (sans question)

L’instruction permettant l’appel de fonction ou de procédure est nommée `bl`. Son effet est de sauvegarder l’adresse de l’instruction qui suit l’instruction `bl ...` (on parle de l’adresse de retour) dans le registre `r14` aussi nommé `lr` (Link Register) avant de réaliser le branchement à la fonction ou procédure. Dans la fonction appelée, Le retour à l’appelante se fait alors par l’instruction `bx lr`.

Le schéma standard d’un programme P appelant une fonction ou procédure Q peut s’écrire :

P: ...	Q: ...	Pbis : <code>mov lr,pc</code>	@ équivalent de <code>bl</code>
<code>bl Q</code>	...	<code>b Q</code>	@ en 2 instructions
...	...	...	@ <code>lr</code> repère ici (<code>pc+2 instr</code>)
	<code>bx lr</code>		

6.2 Un seul niveau d’appel : paramètres et variables locales en registres

6.2.1 Présentation et structure du code

La fonction **`coderfonc`** et la procédure **`coderproc`** effectuent une translation circulaire¹ à droite dans l’alphabet : ‘a’ $\xrightarrow{3}$ `coder(‘a’,3)=‘d’`, ‘g’ $\xrightarrow{4}$ `coder(‘a’,4)=‘k’` et ‘z’ $\xrightarrow{2}$ `coder(‘z’,2)=‘b’`.

Le premier paramètre `c` est un code ASCII de lettre minuscule², ainsi que le résultat. Le deuxième paramètre `n` est un entier naturel : $0 \leq n \leq 26$.

Les deux routines ont la même structure de code ci-dessous, seule la manière de transmettre le résultat à l’appelante change. La traduction de la procédure `coderproc` peut être traitée dans ce TD ou reportée au TD 9 après le cours présentant les paramètres de type adresse.

1. A la base d’une méthode de cryptage simple (code de César)

2. $c \in [‘a’ \dots ‘z’]$, soit $0x61 \leq c \leq 0x7a$

codefonc: @ prologue (sauvegarder)	codeproc: @ prologue (sauvegarder)
code: ... @	code: ... @
... @ code de corps commun	... @ code de corps commun
edoc: @	edoc: @
@ traiter résultat (fonc)	@ traiter résultat (proc)
@ épilogue (restaurer)	@ épilogue (restaurer)
@ branchement retour	@ branchement retour

Le corps des routines est habituellement encadré par une séquence (laissée vide dans cette première partie de td) de sauvegarde en mémoire (prologue) et de restauration (épilogue) des registres modifiés dans le corps de la routine. Le branchement de retour à l'appelante termine l'épilogue.

6.2.2 Traduction du code commun aux 2 routines

Traduire le code suivant : `cdec = c + n; if (cdec > 'z') {cdec = cdec - 26;}`

Convention de stockage :

- registre r0 : paramètre c
- registre r1 : paramètre n
- registre r12 : variable locale cdec

code: ... @ cdec = c + n
... @ if (cdec > 'z') {
... @ cdec = cdec - 26
edoc: @ }

A noter : copier le contenu de cdec dans une variable res stockée en mémoire (section data ou bss ³) nécessite 2 instructions ARM :

```

1           ldr r3,LD_res    @ r3 = adresse de res (&res en C)
2           strb r12,[r3]    @ Mem[r3] = cdec (*r3 = cdec en C)
3           ...
4 LD_res: .word res

```

L'instruction strb d'écriture en mémoire à l'adresse de res appartiendra soit au code de l'appelante de la fonction, soit au code de la procédure.

6.2.3 Transmission du résultat : fonction versus procédure

Il existe deux méthodes pour stocker le résultat coder('d',5) à une variable résultat en mémoire :

- la fonction **coderfonc** stocke la valeur de retour à un endroit convenu (r2) par la convention d'appel associée à coderfonc et la fonction appelante exécute sa recopie dans résultat.
- l'écriture dans résultat est effectuée directement par la procédure **coderproc** à laquelle l'appellante passe en troisième paramètre l'adresse de la variable où stocker le résultat.

<pre> char lu,res1,res2; // L'appelante écrit void main () { res1 = coderfonc('b',4); LireChar(&lu); res2 = coderfonc(lu,2); EcrireChar(res2); } </pre>	<pre> char lu,res1,res2; // L'appelante passe l'adresse void main () { coderproc('b',4,&res1); LireChar(&lu); coderproc(lu,2,&res2)); EcrireChar(res2); } </pre>
--	---

3. Bss : section analogue à data, mais dans laquelle tous les octets seront nuls (pas de valeur initiale). Sert principalement à réduire la taille des fichiers exécutables.

Dans le code ci-dessous :

- Considérer le type `char` comme un entier relatif sur 8 bits
- `Pres` est de type `char *` : `pres` contient une adresse de variable de type `char` où stocker le résultat

<pre>// L'appelée n'écrit pas // Convention d'appel : // c : r0, n : r1, // valeur de retour : r2 char coderfonc (char c, unsigned n) { char cdec; // stockée dans r12 cdec = c + n; if (cdec > 'z') { cdec = cdec - 26; } return cdec; // valeur retournée dans r2 }</pre>	<pre>// L'appelée écrit // Convention d'appel : // c : r0, n : r1 // pres : r2 void coderproc (char c, unsigned n, char *pres) { char cdec; // stockée dans r12 cdec = c + n; if (cdec > 'z') { cdec = cdec - 26; } *pres= cdec; // Mem[pres] = cdec // Résultat dans Mem[r2] }</pre>
--	--

Voici un squelette de code d'appel dans l'appelante pour les deux versions de routine. Il est instancié 2 fois (pour $x=1$ avec $c \leftarrow 'b'$ et $n \leftarrow 4$, et pour $x=2$ avec $c \leftarrow \text{lu}$ et $n \leftarrow 2$) :

<pre>parfoncx: ... @ c_de_coderfonc = @ n_de_coderfonc = ... @ pas de 3ème paramètre</pre>	<pre>parprocx: ... @ c_de_coderproc = @ n_de_coderproc = ... @ pres_de_coderproc = adr(resx)</pre>
<pre>brfoncx: ... @ saut a coderfonc</pre>	<pre>brprocx: ... @ saut a coderproc</pre>
<pre>resfoncx: ... @ resx = valeur_retour</pre>	<pre>resprocx: @</pre>

Quelle(s) instruction(s) faut-il mettre dans le bloc branchement retour des routines. Pourquoi ne peut-on pas utiliser un branchement ordinaire à une étiquette (b resfnc) ?

Traduire côte à côte (et comparer) en code ARM pour les deux versions de routine :

1. le passage des paramètres explicites dans le code de main (blocs `parfonc` et `parproc`)
2. le branchement à `coderfnc` ou `coderproc`
3. pour la fonction : le code traiter_résultat de `coderfnc` et le bloc `resf`
4. pour la procédure : le code traiter_résultat de `coderproc` (le bloc `resproc` est vide)

6.3 Exemple à deux niveaux d'appel : factorielle itérative

6.3.1 Utilisation d'une fonction pour le produit de deux entiers

Une instruction machine et le circuit matériel de multiplication sont devenus courants sur les processeurs RISC modernes, mais leur présence constituait l'exception plutôt que la norme sur les processeurs RISC de première génération. Le code de calcul de $n!$ ci-dessous illustre l'appel d'une fonction `mult` de calcul du produit. Les variables `n`, `res` et `i` sont de type entier naturel.

```
// Code de calcul de n!
res=1;
i = n;
while (i != 1) {
    res = mult(res,i); // res = res * i
    i = i-1;
}
```

```
// Prototype de la fonction mult
// et convention d'appel
// x : registre r0    y : registre r1
// Valeur de retour :
// registre r0 (remplace x)
// Tous entiers naturels 32 bits
uint32_t mult (uint32_t x, uint32_t y);
```

Vous trouverez une réalisation de mult en annexe mais vous n'avez pas besoin d'en comprendre le fonctionnement pour faire l'exercice.

```
calcul:  ... @ res=1;
          ... @ i = n;
          ... @ while (i != 1) {
                @   res = mult(res,i);
corpsw:  ... @   x_de_mult=res
          ... @   y_de_mult=i
          ... @   saut à mult
suitem:  ... @   res = valeur_retour_mult
          ... @   i = i-1;
condw:   ... @ }
          ... @
luclac:   @
```

Traduire le code de calcul de n! ci-contre, avec 2 contraintes :

1. **Placer** le test de la condition après le corps de while.
2. **Respecter** la convention de stockage suivante :
 - (a) res dans le registre r5
 - (b) i dans le registre r6
 - (c) n dans le registre r7

6.3.2 Variables en mémoire : un niveau d'appel

Le code est complété pour calculer factx = x!, x et factx étant des variables stockées en mémoire. **Traduire** les affectations n=x et factx=res.

```
// entiers naturels 32 bits

uint32_t x;
uint32_t factx;
```

```
void main () {
    // Lire32(&x);
```

```
n=x;    // {
```

```
...    // Calcul
```

```
factx=res; // }
```

```
    // EcrNdecimal32(factx);
}
```

```
.bss
.balign 4
x:      .skip 4
factx:  .skip 4
```

```
main:   @sauvegardes omises
        @ Lire32(&x) omis
```

```
... @ r12 = &x
... @ n = *r12 (n=Mem[r12])
```

```
calcul: ... @ res = 1
...
luclac:
```

```
... @ r12 = &factx
... @ *r12 = res (Mem[r12] = res)
```

```
@restaurations omises
b exit @ à améliorer
```

```
px:      .word x
pfactx:  .word factx
```

6.3.3 Deux niveaux d'appel avec fonction fact

Le bloc calcul est transformé en une fonction fact avec convention d'appel :

1. Paramètre n dans registre r7
2. Valeur de retour dans registre r5

Traduire l'affectation factx=fact(x).

<pre>uint32_t mult (uint32_t x, uint32_t y){ ... return ;...; } uint32_t fact(uint32_t n) { ... // Calcul return res; } void main () { // Lire32(&x); factx=fact(x); // EcrNdecimal32(factx); }</pre>	<pre>mult: ... @ >1 instructions bx lr fact: @ sauvegarde omise calcul: ... @ res = 1 ... luclac: @ restauration omise bx lr main: @sauvegarde omise @ Lire32(&x) ... @ r12 = &x ... @ n_de_fact = *r12 brfact: ... @ saut à fact suitef: ... @ r12 = & factx ... @ *r12 = val_retour_fact @ EcrNDecimal32(factx) bx lr</pre>
---	---

Donner le contenu (quelle étiquette) du registre lr à différents instants d'exécution :

1. au début de la fonction fact, lors de l'affectation res=1
2. lors de l'exécution de la première instruction de la fonction mult
3. lors de l'exécution de l'instruction de retour bx lr à la fin de fact : quelle sera la prochaine instruction exécutée ?

Indiquer à quels endroits le registre lr doit être sauvegardé puis restauré pour que l'exécution du programme n'entre pas dans une boucle infinie.

6.4 Appel de routines d'entrées/sorties

On précise les spécifications suivantes :

- la procédure **LireCar** lit un caractère dans le mot mémoire dont l'adresse est donnée en paramètre, dans le registre r1.
- la procédure **EcrCar** prend en paramètre d'entrée le caractère à écrire, dans le registre r1.

```
// Type des procédures d'entrées/sorties :
void LireCar (char *destination); // Mem[destination] = caractère lu au clavier
void EcrCar (char a_ecrire);      // Affiche a_ecrire à l'écran
```

```
1      @ variante possible en section data
2      .bss                .data
3 lu:   .skip 1            lu:  .byte 0
4 res1: .skip 1            res1: .byte 0
5 res2: .skip 1            res2: .byte 0
6      .text
7 main:
8      @ LireCar(&lu)
9      ...                @ A COMPLETER
10     bl Lirecar
11     @ le caractere lu est dans la zone data a l adresse lu
12     @ EcrCar(res2) : le caractere a écrire doit etre dans r1
13     ...                @ A COMPLETER
14     bl EcrCar
15     ...
16 LD_lu:   .word lu
17 LD_res2: .word res2
```

Compléter la traduction des appels à LireCar et EcrCar dans la première partie du TD.

Traduire les appels aux routines de lecture et écriture dans le code fonction de main qui appelle fact.

Chapitre 7

TD séance 8 : Appels/retours de procédures, action sur la pile

7.1 Mécanisme de pile

La pile est une zone de la mémoire. Elle est accessible par un registre particulier appelé **pointeur de pile** (noté **sp**, pour **s**tack **p**ointer) : le registre **sp** contient une adresse qui repère un mot de la zone mémoire en question.

On veut effectuer les actions suivantes :

- empiler : on range une information (en général le contenu d'un registre) au sommet de la pile.
- dépiler : on "prend" le mot en sommet de pile pour le ranger par exemple dans un registre.

Le tableau ci-dessous décrit les différentes façons de mettre en oeuvre une pile en fonction des conventions possibles pour le sens de progression (vers les adresses croissantes ou décroissantes) et pour la contenu de la case mémoire pointée (vide ou pleine).

sens pointage	croissant 1 ^{er} vide	croissant dernier plein	décroissant 1 ^{er} vide	décroissant dernier plein
empiler reg	$M[sp] \leftarrow \text{reg}$ $sp \leftarrow sp+1$	$sp \leftarrow sp+1$ $M[sp] \leftarrow \text{reg}$	$M[sp] \leftarrow \text{reg}$ $sp \leftarrow sp-1$	$sp \leftarrow sp-1$ $M[sp] \leftarrow \text{reg}$
dépiler reg	$sp \leftarrow sp-1$ $\text{reg} \leftarrow M[sp]$	$\text{reg} \leftarrow M[sp]$ $sp \leftarrow sp-1$	$sp \leftarrow sp+1$ $\text{reg} \leftarrow M[sp]$	$\text{reg} \leftarrow M[sp]$ $sp \leftarrow sp+1$

Dans le TD et dans tout le semestre, on travaille avec un type de mise en oeuvre. On choisit celle qui est utilisée dans le compilateur **arm-eabi-gcc** c'est-à-dire "décroissant, dernier plein" (Cf. figure 7.1).

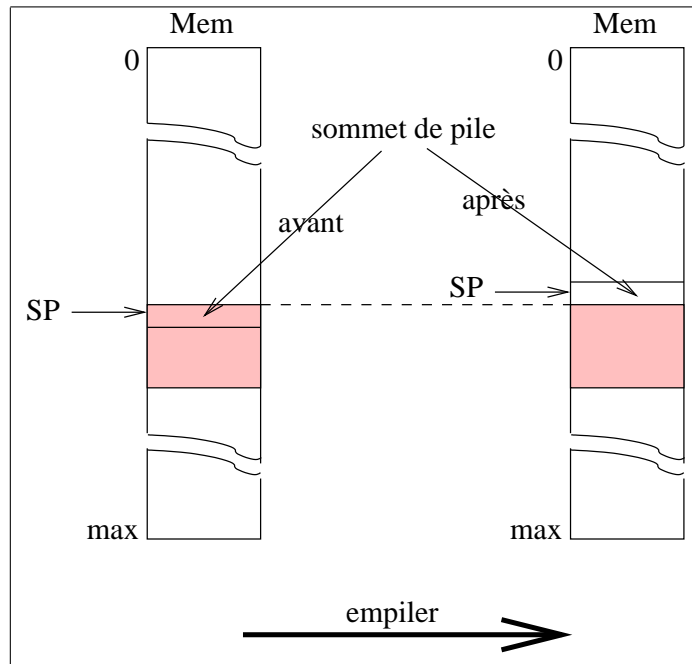


FIGURE 7.1 – Mise en oeuvre de la pile. La pile progresse vers les adresses **décroissantes**, le pointeur de pile repère la **dernière** information empilée

Exercices : utilisation de la pile

Supposons que la pile soit comprise entre les adresses 3000 comprise et 30F0 exclue. Le pointeur de pile est initialisé avec l'adresse 30F0. Dans cet exercice on empile des informations de taille 1 octet.

Questions :

- Quelle est la valeur de `sp` quand la pile est pleine ?
- De combien de mots de 32 bits dispose-t-on dans la pile ?
- De combien d'octets dispose-t-on dans la pile ?
- Ecrire en ARM les deux instructions élémentaires permettant d'empiler le contenu de l'octet de poids faible du registre `r0`. Dans la suite du TD on écrira `empiler r0` ou `push {r0}`.
- Ecrire en ARM les deux instructions élémentaires permettant de dépiler le sommet de pile dans le registre `r0`. Dans la suite du TD on écrira `depiler r0` ou `pop {r0}`.
- Dessiner l'état de la mémoire après chacune des étapes du programme suivant : `mov r0, # 7; push {r0}; mov r0, # 2; push {r0}; mov r0, # 5; push {r0}; mov r0, # 47; pop {r0}; pop {r0}; mov r0, # 9; push {r0}`
- Reprendre l'exercice si on travaille avec des informations codées sur 4 octets. Comment modifier le code de `empiler` et `depiler` ?

7.2 Appel et retours de procédures

On travaille avec le programme ci-dessous ; les procédures "A", "B" et "C" sont rangés aux adresses 10, 60 et 80.

Remarque : il s'agit du programme donné en cours dans lequel on a remplacé les Ai, Bi et Ci par des vraies instructions.

10	A1= mov r0, # 0	60	B1= push {r0}	80	C1= mov r0, # 47
14	A2= push {r0}	68	B2= add r0, r0, # 1	84	b1 60 (B)
1c	b1 60 (B)	6c	B3= pop {r0}	88	C2= push {r0}
20	A3= mov r5, #28	74	bx lr	90	b1 si condX 80 (C)
24	b1 80 (C)			94	C3= mov r2, r5
28	A4= pop {r0}			98	C4= pop {r0}
				a0	bx lr

Questions : Le programme C est incorrect. Expliquer pourquoi et le corriger en conséquence.

Donner une trace de l'exécution du nouveau programme en indiquant après chaque instruction le contenu des registres et de la pile.

pc	inst	sp	r0	m[30f0]	m[30ec]	m[30e8]	m[30e4]	m[30e0]
?	?	30f0	?	?	?	?	?	?
10	mov r0, # 0	30f0	0	?	?	?	?	?
14	push {r0}	30ec	0	?	0	?	?	?

Chapitre 8

TD séance 9 : Correction partiel

Correction du contrôle donné pendant la semaine de partiel.

Chapitre 9

TD séance 10 : Paramètres dans la pile, paramètres passés par l'adresse

9.1 Gestion des paramètres et des variables dans la pile

Reprendre les fonctions `codefonc`, `fact0` et `mul` du TD7.

Exercices :

- transformer la traduction de ces fonctions en langage ARM pour gérer le passage des paramètres et les variables locales dans la pile. Écrire les appels qui correspondent.
- reprendre les exemples traités précédemment dans ce TD et effectuer les sauvegardes nécessaires de temporaires dans la pile.

9.2 Paramètre passé par adresse

9.2.1 Un premier exemple

Traduire (si cela n'a pas été fait au TD7) la fonction `coderproc` et son appel en passant les paramètres par les registres.

Reprendre cette traduction en supposant que les 3 paramètres explicites sont à présent passés dans la pile (paramètre de gauche `c` en sommet de pile). On pourra si nécessaire passer par une première version dans laquelle les paramètres sont dans `data` ou `bss`.

9.2.2 Une version récursive de procédure calculant factorielle

On considère la version suivante du calcul de la factorielle d'un entier :

```
procedure fact2 (donnée n: entier, adresse fn: entier) {  
  int fnmoins1;  
  si (n == 1)  
    alors mem[fn] = 1;  
  sinon  
    fact2 (n-1, adresse de fnmoins1);  
    mem[fn] = n * fnmoins1;  
}
```

`n, fn : entier`

```
Lire (n)
fact2 (n, adresse de fn)
Ecrire (fn)
```

Exercice : donner une traduction en langage d'assemblage ARM de cette procédure.

Chapitre 10

TD séance 11 : Etude du code produit par le compilateur arm-eabi-gcc, optimisations

10.1 Un premier exemple

Soit un programme écrit en langage C dans le fichier `premier.c`.

```
1 #include "stdio.h"
2 #include "string.h"
3
4 #define N 10
5
6 int main () {
7     char chaine [N] ;
8     int i ;
9
10    printf ("Donner une chaine de longueur inferieure a %d:\n", N);
11    fgets (chaine, N, stdin);
12    printf ("la chaine lue est : %s\n",chaine);
13    i = strlen (chaine) ;
14    printf ("la longueur de la chaine lue est : %d\n", i);
15 }
```

Nous le compilons sans optimisations (option `-O0`) et produisons le code en langage d'assemblage ARM (option `-S`) avec la commande suivante : `arm-eabi-gcc -O0 -S premier.c`. Le code en langage d'assemblage est produit dans le fichier `premier.s` (Cf. Annexe 10.5).

Questions :

1. Le premier appel à la fonction `printf` a 2 paramètres : une chaîne de caractères et un entier. Ces paramètres sont passés dans des registres, lesquels ?
2. Observez maintenant l'appel à la fonction `fgets`. Retrouvez ses paramètres dans le code.
3. La fonction `strlen` a un paramètre et un résultat. Où sont rangées ces informations dans le code ?
4. Déduire du code la convention utilisée par le compilateur pour le passage des paramètres et le retour des résultats de fonctions.
5. Quel est l'effet des 3 premières instructions du code assembleur de `main` ?
6. Quel est l'effet des 3 dernières instructions du code assembleur de `main` ?

10.2 Programme avec une procédure qui a beaucoup de paramètres

Considérons le programme `bcp_param.c` écrit en langage C suivant :

```
1 include "stdio.h"
2
3 static long int Somme (long int a1, long int a2, long int a3, long int a4, long int a5,
4                       long int a6, long int a7, long int a8, long int a9, long int a10) {
5 long int x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10;
6 long int y;
7
8     x1=a1+1; x2=a2+1; x3=a3+1; x4=a4+1; x5=a5+1;
9     x6=a6+1; x7=a7+1; x8=a8+1; x9=a9+1; x10=a10+1;
10    y = x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
11    return (y);
12 }
13
14 int main () {
15 long int z;
16
17     z = Somme (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10);
18     printf("La somme des entiers de 1 a 10 plus 10 vaut %d\n", z);
19 }
```

Le code produit dans le fichier `bcp_param.s` par la commande : `arm-eabi-gcc -O0 -S bcp_param.c` est dans le paragraphe 10.6.

Questions :

1. Observez le code du `main`. Etudier le contenu de la pile avant l'appel `bl Somme`. Comment sont passés les paramètres à la fonction `Somme` ?
2. Où est rangé le résultat rendu par la fonction `Somme` ?
3. Où est rangée la variable locale `z` ?
4. Observez le code de la fonction `Somme`. Dessiner la pile et retrouvez comment sont récupérés les paramètres. Où sont rangées les variables locales : `x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10` et `y` ?

10.3 Les variables locales peuvent prendre beaucoup de place

Considérons le programme `var_pile.c` écrit en langage C suivant :

```
1 #include "stdio.h"
2
3 #define N 100
4
5 short int Compare2Chaines (char *s1, char *s2) {
6 char *p1, *p2 ;
7
8     p1 = s1 ; p2 = s2 ;
9     while ( *p1 && *p2 && (*p1 == *p2) ) {
10         p1++ ; p2++ ;
11     }
12     return (*p1 == 0) && (*p2 == 0) ;
13 }
14
```

```

15 int main () {
16     short int      r ;
17     char    chaine1 [N], chaine2[N] ;
18
19     printf("Chaine 1, de moins de 99 caracteres : \n");
20     fgets (chaine1, N, stdin);
21     printf("Chaine 2, de moins de 99 caracteres : \n");
22     fgets (chaine2, N, stdin);
23
24     r = Compare2Chaines (chaine1,chaine2);
25
26     printf("Sont-elles egales ? %s !\n", (r ? "oui" : "non"));
27 }

```

Le code produit dans le fichier `var_pile.s` par la commande : `arm-eabi-gcc -O0 -S var_pile.c` est dans le paragraphe 10.7.

Questions :

1. Dans le `main` le compilateur réserve 208 octets. Comment sont-ils utilisés ?
2. Quels sont les paramètres de la fonction `Compare2Chaines` ?
3. Observez le code suivant le retour de l'appel à `Compare2Chaines`. Commentez précisément les lignes entre `mov r3, r0` et `mov r1, r3`. Quels sont les paramètres passés à la fonction `printf` qui suit ?
4. Commentez le code de la fonction `Compare2Chaines`. Comment est généré le code d'une instruction `while` ?

10.4 Le programmeur peut aussi aider ...

Soit le programme suivant, en langage C, qui compte le nombre de bits 0 et 1 (N_0 et N_1) à 1 pour les entiers N entre 1 et N_{Max} à l'aide d'une double boucle.

```

1 #include "stdio.h"
2 #define NMax 1000000000
3
4 int main() {
5     int i,j,zero,tap[2]; i=NMax;zero=0;tap[0]=0;tap[1]=0;
6     for(i=NMax;i;i--) {
7         for(j=1;j>=0;j--) {
8             if (i&(1<<j)) {
9                 tap[j]++;}
10            if (j==0) {
11                zero++;}}
12     printf("%d - %d - %d\n",tap[0],tap[1],zero);
13     return;}

```

La boucle extérieure, sur i , passe en revue tous les entiers entre 1 et N_{max} (en sens inverse). La boucle intérieure, sur j , compte les 0 pour les bits en position j ($j=1$ puis $j=0$). Selon la théorie, deux boucles imbriquées peuvent être réécrites en une seule boucle et parfois cela permet d'éviter des branchements coûteux ...

- Réécrire le programme en conservant le traitement effectué avec une seule boucle globale. Conserver la gestion de i et de j (en particulier les lignes à l'intérieur de la boucle interne, i.e. les lignes 8, 9, 10 et 11, ne doivent pas être modifiées)

- Réécrire ce programme une seconde fois en déroulant la boucle intérieure, c'est à dire en faisant disparaître j.
- Discuter sur le gain en temps susceptible d'être obtenu avec les deux programmes précédents (pour la réponse effective, attendre le TP)

10.5 Annexe : premier.s

```

1      .cpu arm7tdmi
2      .fpu softvfp
3      .eabi_attribute 20, 1
4      .eabi_attribute 21, 1
5      .eabi_attribute 23, 3
6      .eabi_attribute 24, 1
7      .eabi_attribute 25, 1
8      .eabi_attribute 26, 1
9      .eabi_attribute 30, 6
10     .eabi_attribute 18, 4
11     .file "premier.c"
12     .section      .rodata
13     .align 2
14 .LC0:
15     .ascii "Donner une chaine de longueur inferieure a %d\012\000"
16     .align 2
17 .LC1:
18     .ascii "la chaine lue est : %s\012\000"
19     .align 2
20 .LC2:
21     .ascii "la longueur de la chaine lue est : %d\012\000"
22     .text
23     .align 2
24     .global main
25     .type main, %function
26 main:
27     @ Function supports interworking.
28     @ args = 0, pretend = 0, frame = 16
29     @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
30     stmfd sp!, {fp, lr}
31     add fp, sp, #4
32     sub sp, sp, #16
33     ldr r0, .L2
34     mov r1, #10
35     bl printf
36     ldr r3, .L2+4
37     ldr r3, [r3, #0]
38     ldr r3, [r3, #4]
39     sub r2, fp, #20
40     mov r0, r2
41     mov r1, #10
42     mov r2, r3
43     bl fgets
44     sub r3, fp, #20
45     ldr r0, .L2+8
46     mov r1, r3
47     bl printf
48     sub r3, fp, #20

```



```

49      mov     r0, r3
50      bl      strlen
51      mov     r3, r0
52      str     r3, [fp, #-8]
53      ldr     r0, .L2+12
54      ldr     r1, [fp, #-8]
55      bl      printf
56      mov     r0, r3
57      sub     sp, fp, #4
58      ldmfd   sp!, {fp, lr}
59      bx      lr
60 .L3:
61      .align  2
62 .L2:
63      .word   .LC0
64      .word   _impure_ptr
65      .word   .LC1
66      .word   .LC2
67      .size   main, .-main
68      .ident  "GCC: (GNU) 4.5.3"

```

10.6 Annexe : bcp_param.s

```

1  .cpu arm7tdmi
2  .fpu softvfp
3  .eabi_attribute 20, 1
4  .eabi_attribute 21, 1
5  .eabi_attribute 23, 3
6  .eabi_attribute 24, 1
7  .eabi_attribute 25, 1
8  .eabi_attribute 26, 1
9  .eabi_attribute 30, 6
10 .eabi_attribute 18, 4
11 .file "bcp_param.c"
12 .text
13 .align  2
14 .type Somme, %function
15 Somme:
16  @ Function supports interworking.
17  @ args = 24, pretend = 0, frame = 64
18  @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
19  @ link register save eliminated.
20  str     fp, [sp, #-4]!
21  add     fp, sp, #0
22  sub     sp, sp, #68
23  str     r0, [fp, #-56]
24  str     r1, [fp, #-60]
25  str     r2, [fp, #-64]
26  str     r3, [fp, #-68]
27  ldr     r3, [fp, #-56]
28  add     r3, r3, #1
29  str     r3, [fp, #-8]
30  ldr     r3, [fp, #-60]
31  add     r3, r3, #1
32  str     r3, [fp, #-12]
33  ldr     r3, [fp, #-64]

```

```

34  add    r3, r3, #1
35  str    r3, [fp, #-16]
36  ldr    r3, [fp, #-68]
37  add    r3, r3, #1
38  str    r3, [fp, #-20]
39  ldr    r3, [fp, #4]
40  add    r3, r3, #1
41  str    r3, [fp, #-24]
42  ldr    r3, [fp, #8]
43  add    r3, r3, #1
44  str    r3, [fp, #-28]
45  ldr    r3, [fp, #12]
46  add    r3, r3, #1
47  str    r3, [fp, #-32]
48  ldr    r3, [fp, #16]
49  add    r3, r3, #1
50  str    r3, [fp, #-36]
51  ldr    r3, [fp, #20]
52  add    r3, r3, #1
53  str    r3, [fp, #-40]
54  ldr    r3, [fp, #24]
55  add    r3, r3, #1
56  str    r3, [fp, #-44]
57  ldr    r2, [fp, #-8]
58  ldr    r3, [fp, #-12]
59  add    r2, r2, r3
60  ldr    r3, [fp, #-16]
61  add    r2, r2, r3
62  ldr    r3, [fp, #-20]
63  add    r2, r2, r3
64  ldr    r3, [fp, #-24]
65  add    r2, r2, r3
66  ldr    r3, [fp, #-28]
67  add    r2, r2, r3
68  ldr    r3, [fp, #-32]
69  add    r2, r2, r3
70  ldr    r3, [fp, #-36]
71  add    r2, r2, r3
72  ldr    r3, [fp, #-40]
73  add    r2, r2, r3
74  ldr    r3, [fp, #-44]
75  add    r3, r2, r3
76  str    r3, [fp, #-48]
77  ldr    r3, [fp, #-48]
78  mov    r0, r3
79  add    sp, fp, #0
80  ldmfd  sp!, {fp}
81  bx     lr
82  .size  Somme, .-Somme
83  .section .rodata
84  .align  2
85  .LC0:
86  .ascii  "La somme des entiers de 1 a 10 plus 10 vaut %d\012\000"
87  .text
88  .align  2
89  .global main

```

```

90     .type main, %function
91 main:
92     @ Function supports interworking.
93     @ args = 0, pretend = 0, frame = 8
94     @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
95     stmfd sp!, {fp, lr}
96     add    fp, sp, #4
97     sub    sp, sp, #32
98     mov    r3, #5
99     str    r3, [sp, #0]
100    mov    r3, #6
101    str    r3, [sp, #4]
102    mov    r3, #7
103    str    r3, [sp, #8]
104    mov    r3, #8
105    str    r3, [sp, #12]
106    mov    r3, #9
107    str    r3, [sp, #16]
108    mov    r3, #10
109    str    r3, [sp, #20]
110    mov    r0, #1
111    mov    r1, #2
112    mov    r2, #3
113    mov    r3, #4
114    bl     Somme
115    str    r0, [fp, #-8]
116    ldr    r0, .L3
117    ldr    r1, [fp, #-8]
118    bl     printf
119    mov    r0, r3
120    sub    sp, fp, #4
121    ldmdfd sp!, {fp, lr}
122    bx     lr
123 .L4:
124     .align    2
125 .L3:
126     .word .LC0
127     .size main, .-main
128     .ident    "GCC: (GNU) 4.5.3"

```

10.7 Annexe : var_pile.s

```

1     .cpu arm7tdmi
2     .fpu softvfp
3     .eabi_attribute 20, 1
4     .eabi_attribute 21, 1
5     .eabi_attribute 23, 3
6     .eabi_attribute 24, 1
7     .eabi_attribute 25, 1
8     .eabi_attribute 26, 1
9     .eabi_attribute 30, 6
10    .eabi_attribute 18, 4
11    .file    "var_pile.c"
12    .text
13    .align 2
14    .global Compare2Chaines

```

```

15      .type    Compare2Chaines, %function
16 Compare2Chaines:
17      @ Function supports interworking.
18      @ args = 0, pretend = 0, frame = 16
19      @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
20      @ link register save eliminated.
21      str      fp, [sp, #-4]!
22      add      fp, sp, #0
23      sub      sp, sp, #20
24      str      r0, [fp, #-16]
25      str      r1, [fp, #-20]
26      ldr      r3, [fp, #-16]
27      str      r3, [fp, #-8]
28      ldr      r3, [fp, #-20]
29      str      r3, [fp, #-12]
30      b        .L2
31 .L4:
32      ldr      r3, [fp, #-8]
33      add      r3, r3, #1
34      str      r3, [fp, #-8]
35      ldr      r3, [fp, #-12]
36      add      r3, r3, #1
37      str      r3, [fp, #-12]
38 .L2:
39      ldr      r3, [fp, #-8]
40      ldrb     r3, [r3, #0]      @ zero_extendqisi2
41      cmp      r3, #0
42      beq      .L3
43      ldr      r3, [fp, #-12]
44      ldrb     r3, [r3, #0]      @ zero_extendqisi2
45      cmp      r3, #0
46      beq      .L3
47      ldr      r3, [fp, #-8]
48      ldrb     r2, [r3, #0]      @ zero_extendqisi2
49      ldr      r3, [fp, #-12]
50      ldrb     r3, [r3, #0]      @ zero_extendqisi2
51      cmp      r2, r3
52      beq      .L4
53 .L3:
54      ldr      r3, [fp, #-8]
55      ldrb     r3, [r3, #0]      @ zero_extendqisi2
56      cmp      r3, #0
57      bne      .L5
58      ldr      r3, [fp, #-12]
59      ldrb     r3, [r3, #0]      @ zero_extendqisi2
60      cmp      r3, #0
61      bne      .L5
62      mov      r3, #1
63      b        .L6
64 .L5:
65      mov      r3, #0
66 .L6:
67      mov      r3, r3, asl #16
68      mov      r3, r3, lsr #16
69      mov      r3, r3, asl #16
70      mov      r3, r3, asr #16

```

```

71      mov     r0, r3
72      add     sp, fp, #0
73      ldmfd   sp!, {fp}
74      bx      lr
75      .size   Compare2Chaines, .-Compare2Chaines
76      .section      .rodata
77      .align  2
78 .LC0:
79      .ascii  "Chaine 1, de moins de 99 caracteres : \000"
80      .align  2
81 .LC1:
82      .ascii  "Chaine 2, de moins de 99 caracteres : \000"
83      .align  2
84 .LC2:
85      .ascii  "oui\000"
86      .align  2
87 .LC3:
88      .ascii  "non\000"
89      .align  2
90 .LC4:
91      .ascii  "Sont-elles egales ? %s !\012\000"
92      .text
93      .align  2
94      .global main
95      .type   main, %function
96 main:
97      @ Function supports interworking.
98      @ args = 0, pretend = 0, frame = 208
99      @ frame_needed = 1, uses_anonymous_args = 0
100     stmfd   sp!, {fp, lr}
101     add     fp, sp, #4
102     sub     sp, sp, #208
103     ldr     r0, .L10
104     bl      puts
105     ldr     r3, .L10+4
106     ldr     r3, [r3, #0]
107     ldr     r3, [r3, #4]
108     sub     r2, fp, #108
109     mov     r0, r2
110     mov     r1, #100
111     mov     r2, r3
112     bl      fgets
113     ldr     r0, .L10+8
114     bl      puts
115     ldr     r3, .L10+4
116     ldr     r3, [r3, #0]
117     ldr     r3, [r3, #4]
118     sub     r2, fp, #208
119     mov     r0, r2
120     mov     r1, #100
121     mov     r2, r3
122     bl      fgets
123     sub     r2, fp, #108
124     sub     r3, fp, #208
125     mov     r0, r2
126     mov     r1, r3

```

```

127      bl      Compare2Chaines
128      mov     r3, r0
129      strh    r3, [fp, #-6]    @ movhi
130      ldrsh   r3, [fp, #-6]
131      cmp     r3, #0
132      beq     .L8
133      ldr     r3, .L10+12
134      b       .L9
135 .L8:
136      ldr     r3, .L10+16
137 .L9:
138      ldr     r0, .L10+20
139      mov     r1, r3
140      bl      printf
141      mov     r0, r3
142      sub     sp, fp, #4
143      ldmfd   sp!, {fp, lr}
144      bx      lr
145 .L11:
146      .align  2
147 .L10:
148      .word   .LC0
149      .word   _impure_ptr
150      .word   .LC1
151      .word   .LC2
152      .word   .LC3
153      .word   .LC4
154      .size   main, .-main
155      .ident  "GCC: (GNU) 4.5.3"

```

Chapitre 11

TD séance 12 : Organisation d'un processeur : une machine à pile

11.1 Description du processeur

Cette machine dispose de registres visibles par le programmeur :

- **acc** : accumulateur pour stocker des valeurs,
- **pc** : compteur de programme,
- **sp** : pointeur de pile.

pc est initialisé à 0 et repère la prochaine instruction à exécuter.

La pile suit la convention *progression décroissante, dernier plein*. **sp** est initialisé à 0xFE (la pile commence donc à 0xFD).

Il y a aussi des registres non visibles par le programmeur, c'est-à-dire, qui ne peuvent pas être utilisés dans un programme en langage machine :

- **Rinst** : registre instruction qui contient l'instruction en cours d'exécution,
- **ma** et **mb** : registres qui servent aux accès mémoire,
- **mk1** et **mk2** : registres servant à des calculs internes au processeur.

La mémoire est composée de mots de taille un octet. Les adresses sont aussi sur un octet.

Il existe des entrées sorties rudimentaires : la lecture du mot mémoire d'adresse 0xFE correspond à une lecture au clavier et l'écriture dans le mot mémoire d'adresse 0xFF correspond à un affichage sur l'écran.

Le répertoire d'instructions est donné dans la figure 11.1.

Le compteur programme indique la prochaine instruction à exécuter. Ainsi, lors de l'exécution de l'instruction **jumpifAccnul**, la valeur du déplacement est calculée par rapport à l'adresse de l'instruction suivante (c'est-à-dire, l'instruction qui sera exécutée ensuite si la condition de saut n'est pas vérifiée).

Le code d'une instruction est choisi de telle façon que le décodage soit facilité par le test d'un bit : **load** : 1₁₀, **input** : 2₁₀, **output** : 4₁₀, **push-acc** : 8₁₀, **pop-acc** : 16₁₀, **add** : 32₁₀, **dup** : 64₁₀ et **jumpifAccnul** : 128₁₀.

La figure 11.2 décrit l'organisation générale du processeur et de la mémoire.

instruction	signification	code opération (valeurs en décimal)	taille codage
load# vi	acc <-- vi	1	2 mots
input	acc <-- Mem[0xFE]	2	1 mot
output	Mem[0xFF] <-- acc	4	1 mot
push-acc	empiler acc	8	1 mot
pop-acc	dépiler vers acc	16	1 mot
add	ajouter le sommet et le sous-sommet de la pile, ils sont dépilés, empiler la somme	32	1 mot
dup	l'accumulateur n'est pas modifié dupliquer le sommet de pile	64	1 mot
jumpifAccnul depl	saut conditionnel à pc+depl la condition est "accumulateur nul"	128	2 mot

FIGURE 11.1 – Les intructions de la machine à pile

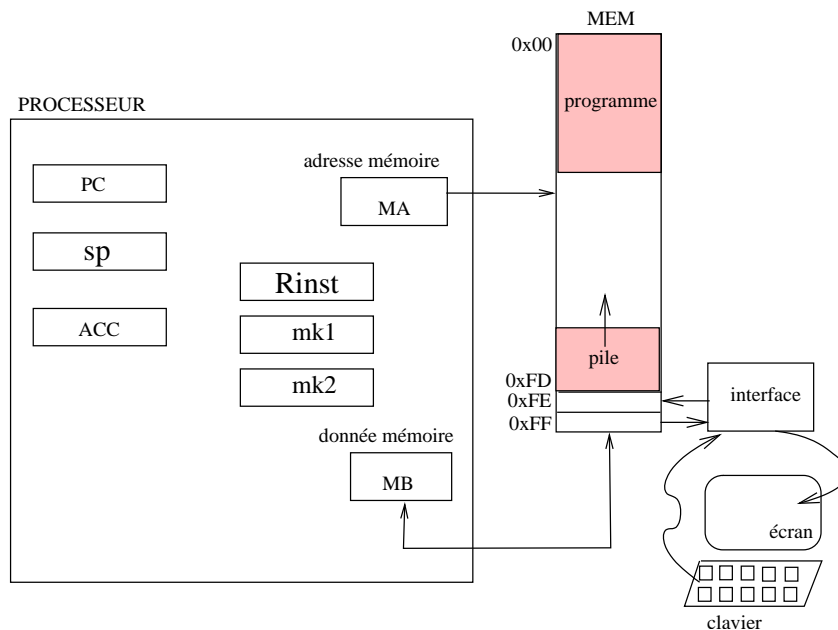


FIGURE 11.2 – La machine à pile et sa mémoire

11.1.1 Représentation en mémoire d'un programme

Donner la représentation en mémoire (en binaire et en hexadécimal) du programme en langage d'assemblage suivant :

```
load# 3
push-acc
push-acc
add
pop-acc
```

11.1.2 Evolution des valeurs des registres lors d'une exécution

Décrire l'évolution des registres acc, pc, sp et de la pile lors de l'exécution du programme précédent.

Que se passe-t-il si le programmeur empile beaucoup ? Et que la pile "marche" sur le programme qui commence lui à l'adresse 0 ? Comment peut-on éviter ce problème ?

11.2 Interprétation des instructions sous forme d'un algorithme

Afin de comprendre comment évoluent les différents registres du processeur au cours de l'exécution d'un programme on peut donner une interprétation du fonctionnement du processeur sous forme d'un algorithme.

11.2.1 Algorithme

Donner l'algorithme d'interprétation des instructions.

11.2.2 Fonctionnement de l'algorithme

Donner les différentes valeurs contenues dans les registres non visibles du processeur au cours de l'interprétation du programme donné en 11.1.1.

11.3 Interprétation des instructions sous forme d'un automate

On précise les opérations de base que le processeur peut effectuer : les **micro-action**. Une micro-action dure un cycle d'horloge.

L'ensemble des micro-actions possibles dépend de l'organisation physique du processeur (cf. figure 11.3).

Pour notre exemple, les actions élémentaires sont les suivantes :

1. micro-actions internes au processeur :

- $\text{reg_i} \leftarrow \text{reg_j}$
- $\text{reg_i} \leftarrow \text{reg_j} + 1$
- $\text{reg_i} \leftarrow \text{reg_j} - 1$ note : $-1 \equiv +ff$
- $\text{reg_i} \leftarrow \text{reg_j} + \text{reg_k}$
- $\text{reg_i} \leftarrow \text{mb}$
- $\text{ma} \leftarrow \text{reg_i}$
- $\text{mb} \leftarrow \text{reg_i}$ (via l'UAL)
- $\text{ma} \leftarrow 0xff$
- $\text{ma} \leftarrow 0xfe$
- $\text{ma} \leftarrow 0$
- $\text{reg_i} \leftarrow 0$

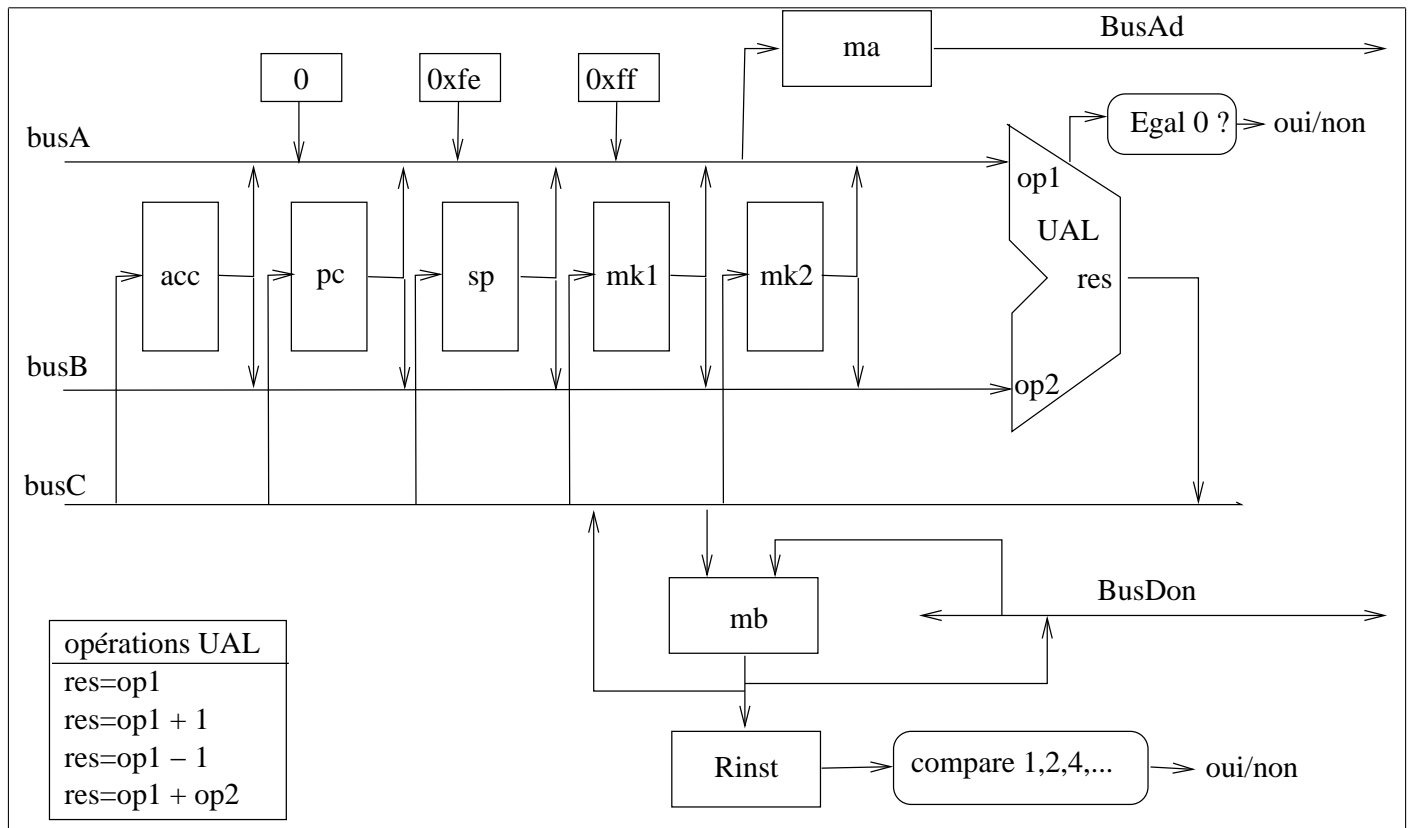


FIGURE 11.3 – Organisation de la machine à pile

2. micro-actions permettant l'accès à la mémoire :

- lecture mémoire : $mb \leftarrow Mem[ma]$
- écriture mémoire : $Mem[ma] \leftarrow mb$

avec $reg_i, reg_j, reg_k \in \{sp, pc, mk1, mk2, acc\}$.

On dispose des tests de la valeur contenue dans le registre $Rinst$: $Rinst = \text{code de load\#}, \text{code de add}, \text{etc.}$

Par ailleurs, le “calcul” $acc = acc + 0$ permet de tester si acc est nul où non.

11.3.1 Séquence de micro-actions pour une instruction

Ecrire la suite d'actions élémentaires (micro-actions) de la liste ci-dessus pour chacune des instructions.

11.3.2 Automate d'interprétation, graphe de contrôle

Proposer un automate d'interprétation des instructions pour la machine à pile. Il s'agit de rassembler l'ensemble des séquences de micro-actions en mettant en évidence des sous-séquences communes.

11.4 Un autre exemple

Voici un programme pour cette machine :

```
load# -1
push
dup
load# 4
push
TITI: add
pop
dup
push
jumpifAccnul TOTO
load# 0
jumpifAccnul TITI
TOTO: load# 5a
output
```

11.4.1 Questions

1. Donner le code en hexadécimal ainsi que son implantation en mémoire à partir de l'adresse 0. La question intéressante est la valeur du déplacement pour les instructions de branchements.
2. Donner l'évolution des valeurs dans les registres et dans la pile lors de l'exécution de ce programme.
3. Donner la trace en terme d'états du graphe de contrôle du processeur lors de l'exécution de ce programme.

11.5 Optimisation du graphe de contrôle

Nous pouvons envisager plusieurs types d'optimisations : diminuer le temps de calcul des instructions ou diminuer le nombre d'états du graphe de contrôle.

11.5.1 Temps de calcul d'une instruction

Une micro-action dure le temps d'une période d'horloge. Choisir une fréquence et calculer le temps de calcul de chaque instruction du processeur étudié pour le graphe de contrôle proposé dans le paragraphe 11.3.2.

Pouvez-vous améliorer ce temps de calcul ? Quelles sont les parties incompressibles ?

11.5.2 Nombre d'états du graphe de contrôle

Est-il possible de diminuer le nombre d'états du graphe proposé :

- avec la même partie opérative ?
- en modifiant la partie opérative : ajout de registres, de bus, etc. ?

Troisième partie

Travaux Pratiques

Chapitre 1

TP séance 1 : Représentation des informations (ex. : images, programmes, entiers)

1.1 Comment est représentée une image ?

On va utiliser le format `bitmap`. Ce format permet de décrire une image extrêmement simple en noir et blanc ; on peut par exemple l'utiliser pour décrire une icône.

Une image est un ensemble de points répartis dans un rectangle. L'image est définie par un texte de programme en langage `C` comprenant la taille du rectangle et la valeur de chacun des points : noir ou blanc. Un point est décrit par 1 bit (vrai = 1 = noir).

On donne ci-dessous le contenu du fichier `image.bm` codant une image de dimensions 16×16 dans laquelle tous les points sont blancs.

```
#define image_width 16
#define image_height 16
static unsigned char image_bits[] = {
    0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
    0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
    0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
    0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00
};
```

1.1.1 Modifier une image “à la main”

Le naturel 0 codé sur 8 bits s'écrit `0x00` en hexadécimal et `0000 0000` en binaire ; il représente 8 points blancs contigus alignés horizontalement.

- Au moyen d'un éditeur de texte (`nedit` par exemple), modifiez le fichier `image.bm` de façon à ce qu'il contienne la description d'une image de dimensions 16×16 dans laquelle la troisième ligne est noire. Vous afficherez votre image avec la commande : `bitmap image.bm`.
Pour sortir, sélectionner **Quit** dans le menu **File**.
- Quelles modifications avez-vous apportées au fichier `image.bm` ?

1.1.2 Codage d'une image

Effectuez la manipulation suivante :

- Créez au moyen de votre éditeur de texte un fichier `monimage.bm` contenant une image de dimensions 16×16 au format `bitmap`.

Tous les points de cette image doivent être blancs, excepté ceux de la première ligne qui doit avoir l'aspect suivant :

■ ■ □ □ □ ■ ■ ■ □ □ □ □ ■ □ ■ □

- Utilisez le programme `bitmap` pour afficher l'image contenue dans le fichier `monimage.bm`. Vérifiez que l'image affichée correspond bien au résultat attendu.
- Ecrivez en binaire les valeurs que vous avez codées dans le fichier. Expliquez le codage que vous avez utilisé pour obtenir l'image demandée.

1.2 Comment est représenté un programme ?

Considérons un programme écrit en langage C : `prog.c`.

```
/* prog.c */
int NN = 0xffff;
char CC[8] = "charlot";

int main() {
    NN = 333;
    NN= NN + 5;
}
```

Vous allez le compiler, c'est-à-dire le traduire dans un langage interprétable par une machine avec la commande : `arm-eabi-gcc -c prog.c`. Vous obtenez le fichier `prog.o`.

C'est du "binaire"... Nous allons le regarder avec différents outils.

1.2.1 Une première expérience

Essayez successivement les quatre expériences suivantes :

- `nedit prog.o`
- `more prog.o`
- `less prog.o`
- `cat prog.o`

Qu'avez-vous observé ? Qu'en concluez-vous ?

1.2.2 Affichage en hexadécimal

Tapez : `hexdump -C prog.o`. Vous observez des informations affichées en hexadécimal et les caractères correspondants sur la droite. Plus précisément, sur la gauche vous avez des adresses, c'est-à-dire des numéros qui comptent les octets (paquets de 8 bits), et au centre l'information qui est affichée en hexadécimal.

Combien d'octets sont codés sur une ligne affichée ? Combien de mots de 32 bits cela représente-t-il ?

Les caractères de la chaîne de caractères `"charlot"` sont codés en ASCII : chaque caractère est représenté sur un octet (8 bits, 2 chiffres hexadécimaux). Pour avoir le code ascii d'un caractère, tapez `man ascii` ou consultez votre documentation technique.

Repérez la chaîne `"charlot"` dans l'affichage à droite et trouvez l'information correspondante au centre. A quelles adresses est rangée cette chaîne ?

La valeur `ffff` de l'entier `NN` n'est pas bien loin de `"charlot"`, la trouver.

La chaîne `NN` est-elle dans ce fichier ? Au même endroit que les deux valeurs précédentes ?

Grâce à la commande `xterm &` on peut ouvrir plusieurs fenêtres et comparer ce qu'affiche `hexdump` et ce qu'affiche `nedit` pour un même fichier. Comparer les caractères dont le code est compris entre `0x20` et `0x7f` et ceux qui ne sont pas dans cet intervalle.

1.2.3 Affichage plus “lisible”

Le programme a été traduit dans le langage machine ARM.

La commande `arm-eabi-objdump -S prog.o` donne la séquence d’instructions ARM qui correspond à nos instructions C. On peut lire l’adresse de l’instruction, puis son code en hexadécimal et enfin les mnémoniques correspondants en langage d’assemblage.

On va repérer le code qui correspond à l’instruction `NN = 333`. C’est fait en deux fois :

```
10:  e3a03f53      mov     r3, #332
14:  e2833001      add     r3, r3, #1
```

La question suivante étant un peu plus complexe, vous en chercherez la réponse chez vous ou en fin de séance si vous avez terminé en avance. Pour cela il faut lire en détail le paragraphe 2.3 de la documentation technique et la remarque du paragraphe 2.1.4. Pourquoi le processeur ARM ne permet-il pas d’écrire `mov r3, #333` ?

`arm-eabi-gcc` traduit un programme écrit dans le langage C en un programme écrit en langage machine du processeur ARM.

Avec d’autres options le compilateur `gcc` traduit dans le langage machine d’autres processeurs. Par exemple, par défaut, `gcc` effectue la traduction pour le processeur contenu dans la machine sur laquelle vous travaillez ; dans votre cas c’est le langage machine du processeur INTEL... Effectuez l’expérience suivante :

```
gcc -c prog.c
hexdump -C prog.o
objdump -S prog.o
```

Regardez la ligne ci-dessous :

```
11:  c7 05 00 00 00 00 4d      movl    $0x14d,0x0
```

Quel nombre représente `0x14d` ?

Combien d’instructions a-t-il fallu pour traduire l’affectation `NN=333` pour chacun des deux processeurs ?

1.3 Langage d’assemblage/langage machine

Le but de cette partie est de traduire des instructions écrites en langage d’assemblage ARM en langage machine.

Une instruction en langage d’assemblage est traduite en une instruction en langage machine par une suite de bits. On exprime cette suite de bits en hexadécimal car c’est plus facile à lire.

A l’aide de la documentation technique ARM, traduire les instructions ci-dessous. Pour chacune, mettre en évidence le codage de la valeur immédiate, la valeur du bit S, la valeur du bit I, le codage du numéro des registres.

```
ADD r10, r2, #10
ADD r10, r2, #17
ADDS r10, r2, #10
ADD r10, r2, r3
```

Pour vérifier vos résultats effectuez l’expérience suivante :

- On fabrique 2 programmes en langage d’assemblage presque identiques. Par exemple, le programme `prog1.s` se différencie du programme `prog1.var1.s` par une instruction. Laquelle ?

- Produire les 2 programmes en langage machine : `arm-eabi-gcc -c prog1.s` et `arm-eabi-gcc -c prog1.var1.s`).
- Observer leur contenu : `arm-eabi-objdump -S prog1.o` et `arm-eabi-objdump -S prog1.var1.o`.
- Comment interprétez-vous les résultats de cette expérience ?

Reproduire la même expérience pour les instructions : `ADDS r10, r2, #10` (programme `prog1.var2.s`) et `ADD r10, r2, r3` (programme `prog1.var3.s`).

Ci-dessous le contenu des fichiers servant à cette expérience.

@----- prog1.s -----

```
.text
.global main
main:
    ADD r10, r2, r0
    ADD r10, r2, #10
fin:  BX LR
```

@----- prog1.var1.s -----

```
.text
.global main
main:
    ADD r10, r2, r0
    ADD r10, r2, #17
fin:  BX LR
```

@----- prog1.var2.s -----

```
.text
.global main
main:
    ADD r10, r2, r0
    ADDS r10, r2, #10
fin:  BX LR
```

@----- prog1.var3.s -----

```
.text
.global main
main:
    ADD r10, r2, r3
    ADD r10, r2, #10
fin:  BX LR
```

1.4 Codage des couleurs

Nous nous intéressons ici au codage des couleurs. On utilise le codage dit RGB. Il s'agit pour coder une couleur de donner une proportion des trois couleurs rouge (**R**ed), vert (**G**reen) et bleu (**B**lue) pour les images fixes ou animées.

Une couleur est codée par un nombre exprimé en hexadécimal sur 3×2 chiffres dans l'ordre : Rouge, Vert, Bleu ; `ff` représentant la proportion maximale. Par exemple, `00ff00` code la couleur verte, `000012` code une nuance de bleu.

Pour plus d'informations vous pouvez regarder :
http://en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_model

La figure 1.1 donne la description d'une image dans le format `xpm`. Cette image comporte deux segments. L'image est décrite dans le langage `C` à l'aide d'un tableau de caractères. On y trouve la taille de l'image (32×32), le nombre de caractères utilisés pour la représenter (3), la couleur (au codage `RGB`) associée à chacun des caractères, et enfin la matrice de points, un caractère étant associé à un point. `None` désigne une couleur prédéfinie dans le système.

On remarque que la proportion d'une couleur est codée sur deux chiffres hexadécimaux, `ff` représentant le maximum.

1.4.1 Fabriquer une image à la main

1. Récupérez le fichier `lignes.xpm` et affichez l'image avec `xli`, `xpmview` ou `mirage`.
2. Quelles sont les couleurs des deux segments ? Donnez le code de chacune de ces deux couleurs.
3. Editez ce fichier avec un éditeur classique et modifiez la couleur d'un segment en modifiant les proportions de la couleur de ses points puis affichez à nouveau l'image. Faites éventuellement plusieurs essais et observez qu'une légère modification de la proportion d'une couleur de base n'est pas visible à l'oeil. A partir de quelle proportion distingue-t-on une différence ?
4. Remplacez un des caractères codant un point d'une couleur donnée par un autre. Par exemple, remplacer `a` par `s`. Pensez à effectuer ce remplacement dans la définition de la couleur du point et dans la matrice de points. Quel est l'effet d'une telle modification ?

```

1
2 /* XPM */
3 static char *lignes[]={      /* le fichier doit s'appeler lignes.xpm */
4 "32_32_3_1",
5 "._c_None",
6 "#_c_#f0f000",
7 "a_c_#ff0000",
8 ".....",
9 ".....",
10 ".....",
11 ".....",
12 ".....",
13 ".....",
14 "...#####.....",
15 ".....",
16 ".....",
17 ".....",
18 ".....a.....",
19 ".....a.....",
20 ".....a.....",
21 ".....a.....",
22 ".....a.....",
23 ".....a.....",
24 ".....a.....",
25 ".....a.....",
26 ".....a.....",
27 ".....a.....",
28 ".....",
29 ".....",
30 ".....",
31 ".....",
32 ".....",
33 ".....",
34 ".....",
35 ".....",
36 ".....",
37 ".....",
38 ".....",
39 "....."};

```

FIGURE 1.1 – Le fichier : lignes.xpm

Chapitre 2

TP séance 2 : Codage et calculs en base 2

2.1 Calculs à effectuer à la main (rappel : 0x \rightarrow base 16)

2.1.1 Conversions

Convertir 277_{10} en bases 2 et 16, $0x4E$ en bases 2 et 10 et 11011001_2 en bases 10 et 16.

2.1.2 Addition

Poser en décimal sur 3 chiffres, en hexadécimal sur 2 chiffres et en binaire sur 8 bits l'addition $57_{10} + 0xa3$. Sur l'opération binaire :

1. faire apparaître les retenues c_i , la dernière retenue $C = c_8$
2. les deux dernières retenues sont-elles égales ?
3. que valent les indicateurs N, Z et V ?
4. que valent les opérandes et le résultat apparent sur 8 bits et l'opération est-elle correcte ?
 - s'il s'agit d'entiers naturels
 - s'il s'agit d'entiers relatifs

Quelles réponses changent si cette même addition est réalisée sur 9 bits ?

2.1.3 Soustraction

Poser en décimal sur 2 chiffres, en hexadécimal sur 1 chiffre et en binaire sur 4 bits les soustractions suivantes : $0xD - 0x8$, $0x8 - 0xD$, $0x7 - 0x7$. Sur l'opération binaire sur 4, puis sur 5 bits en observant les changements :

1. faire apparaître les emprunts e_i et le dernier emprunt $E=e_5$ (puis e_6)
2. que valent les indicateurs N, Z et V ?
3. interpréter l'opération en supposant qu'il s'agisse d'entier naturels, puis d'entiers relatifs
4. la soustraction est-elle possible dans l'ensemble \mathbb{N} ?
5. la soustraction donne-t-elle un résultat correct dans l'ensemble \mathbb{Z} ?

2.1.4 Soustraction par addition du complément à 2

Poser en binaire sur 4 puis sur 5 bits l'addition $0xD + 0x7$ en utilisant une retenue initiale non nulle (i.e. avec $c_0 = 1$, attention, ne pas oublier ce détail qui permet de faire le "+1"). Comparer la ligne des retenues (dont C) avec celles des emprunts (dont E) de la soustraction précédente $0xD - 0x8$.

recommencer avec $0x8 + 0x2$ (+ une retenue initiale non nulle $c_0 = 1$) et la soustraction précédente $0x8 - 0xD$.

Quelle doit être la valeur de C pour que la soustraction dans N soit possible ?

2.2 Présentation de la calculette binaire

Voici le mode d'emploi de la calculette binaire qui vous permettra de vérifier les opérations manuelles précédentes.

Syntaxe d'utilisation

La syntaxe d'utilisation de la calculette est la suivante :

opération nombre_de_bits opérande_gauche opérande_droit

Les opérations disponibles sont les suivantes :

1. **add** et **addsc** : addition
2. **sub** et **subsc** : soustraction
3. **subc2** et **subsc2** : soustraction par addition du complément à deux

Le nombre de bits spécifie la taille de la machine utilisée. Le suffixe **sc** (show carries) pour les additions et soustractions spécifie de détailler la génération des retenues et des emprunts.

Format des opérandes et du nombre de bits

Les entiers utilisés par la calculette binaire peuvent être spécifiés sous trois formats : décimal (par défaut), hexadécimal (avec le préfixe **0x**, comme en langage C) et binaire (avec le préfixe **0b**, inconnu du langage C).

Il est de plus possible de spécifier le complément à 1 (préfixe **/**) ou le complément à deux (ou opposé : préfixe **-**) d'un entier¹.

A titre d'exemple, voici plusieurs manières de spécifier l'entier 111100001001_2 sur 12 bits :

1. en binaire : **0b111100001001 /0b000011110110** ou **-0b000011110111**
2. en hexadécimal : **0xf09 /0x0f6** ou **-0x0f7**
3. et en décimal : **3849 /246** ou **-247**.

1. Ceci s'applique aux opérandes, mais pas au nombre de bits

2.3 Compréhension des indicateurs N,Z,V

Réaliser les additions sur 4 bits détaillées dans le tableau ci-dessous (a et b sont les opérandes écrits en binaire). Pour chaque d'entre elles, compléter les informations suivantes :

1. valeurs décimales de a et b en tant qu'entiers naturels et relatifs
2. écriture binaire du résultat apparent Σ , et valeurs décimales en tant qu'entier naturel et relatif
3. bit de poids forts $N = \Sigma_{n-1}$, a_{n-1} et b_{n-1} .
4. indicateur V, dernière $C = c_n$ et avant-dernière c_{n-1} retenue
5. le résultat apparent Σ est-il correct pour des entiers relatifs, pour des entiers naturels

a			b			Σ			N= Σ_{n-1}	a_{n-1}	b_{n-1}	V	C= c_n	c_{n-1}	Correct ?	
bin	rel	nat	bin	rel	nat	bin	rel	nat							rel	nat
0100			0011													
0100			0101													
1001			0110													
1111			1110													
0100			1000													
1000			1000													

Compléter les phrases suivantes : après une addition

1. Le résultat est correct pour des entiers naturels si et seulement si l'indicateur $N = 0$
2. Le résultat est correct pour des entiers relatifs si et seulement si l'indicateur $V = 0$
3. L'indicateur N n'est pertinent que pour une addition d'entiers (nature d'entiers)
4. L'indicateur V est vrai si et seulement si (propriété portant sur (C, c_{n-1}))
5. L'indicateur V est vrai si $a_{n-1} =$ et $b_{n-1} =$ et $\Sigma_{n-1} =$ ou $a_{n-1} =$ et $b_{n-1} =$ et $\Sigma_{n-1} =$

Effectuer sur 5 bits les additions de relatifs $+4 + +5$ et $-8 + -8$. Comparer aux mêmes addition sur 4 bits. Que peut-on dire de N lorsque le résultat apparent d'une addition d'entiers relatifs est incorrect ?

Expliquer pourquoi après avoir effectué le calcul a-b sur des entiers relatifs, la condition $a < b$ s'écrit $\overline{N} \vee \overline{O} \vee \overline{N} \vee \overline{V}$ ²

Expliquer pourquoi après avoir effectué le calcul a-b sur des entiers naturels, la condition $a < b$ s'écrit \overline{C}

2.4 Extension de format et opérations bit à bit

Considérez l'addition sur 4 bits de 0101_2 et 1011_2 . Trouver l'écriture binaire des opérandes sur 8 bits qui donne la même opération (le bit de poids fort de l'opérande de départ a-t-il une importance?) :

1. sur des entiers naturels
2. sur des entiers relatifs

Effectuer sur 8 bits entre les opérandes $0xcc$ et $0x55$ les opérations suivantes : or, and, xor. Expliquer le résultat obtenu

Effectuer sur 12 bits les opérations suivantes entre les opérandes $0x1f5$ et 3, puis $0x842$ et 2 :

-
2. $(N, V) = (1, 0)$ ou $(0, 1)$

1. lsl (Logic Shift Left)
2. lsr (Logic Shift Right)
3. asr (Arithmetic Shift Right)

Observer les multiplications ou division effectuées (entiers naturels et entiers relatifs).

Chapitre 3

TP séances 3 et 4 : Codage des données

3.1 Déclaration de données en langage d'assemblage

Les données sont déclarées dans une zone appelée : **data**. Pour déclarer une donnée on indique la taille de sa représentation et sa valeur ; on peut aussi déclarer une zone de données non initialisées (sans valeur initiale) ce qui correspond à une réservation de place en mémoire.

Soit le lexique suivant en notation algorithmique :

```
aa : le caractère 'A'
oo : l'entier 15 sur 8 bits (1 octet)
cc : la chaîne "bonjour"
rr : <'B', 3> de type <un caractère, un entier sur 1octet>
T : le tableau d'entiers sur 16 bits [0x1122, 0x3456, 0xfafd]
xx : l'entier 65 sur 8 bits (1 octet)
```

On le traduit en langage d'assemblage ARM. Le fichier **donnees.s** contient une zone **data** dans laquelle sont déclarées les données correspondant aux déclarations ci-dessus.

La directive **.byte** (respectivement **.hword**, **.word**) permet de déclarer une valeur exprimée sur 8 bits (respectivement 16, 32 bits). Une valeur peut être écrite en décimal (65) ou en hexadécimal (0x41).

Pour déclarer une chaîne, on peut utiliser la directive **.asciz** et des guillemets.

Le caractère **@** marque le début d'un commentaire, celui-ci se poursuivant jusqu'à la fin de la ligne.

```
.data
aa: .byte 65    @ .byte 0x41
oo: .byte 15    @ .byte 0x0f
cc: .asciz "bonjour"
rr: .byte 66    @ .byte 0x42
    .byte 3
T:  .hword 0x1122
    .hword 0x3456
    .hword 0xfafd
xx: .byte 65
```

Nous allons maintenant observer le codage en mémoire de cette zone **data**. Traduire le programme **donnees.s** en binaire avec la commande :

```
arm-eabi-gcc -c -mbig-endian donnees.s.
```

Notez que nous utilisons l'option **-mbig-endian** dans le but de faciliter la lecture (rangement par "grands bouts"). Vous pourrez en observer le fonctionnement dans la partie 3.4.2. Vous obtenez le

fichier `donnees.o`. Observez le contenu de ce fichier :

```
arm-eabi-objdump -j .data -s donnees.o
```

Chaque ligne comporte une adresse puis un certain nombre d'octets et enfin leur correspondance sous forme d'un caractère (quand cela a un sens). Dans quelle base les informations sont-elles affichées ? Combien d'octets sont-ils représentés sur chaque ligne ? Donnez pour chacun des octets affichés la correspondance avec les valeurs déclarées dans la zone `data`. Comment est codée la chaîne de caractères, en particulier comment est représentée la fin de cette chaîne ?

Nous voulons maintenant représenter tous les entiers sur 32 bits ; d'où le nouveau lexique :

```
aa : le caractère 'A'
oo : l'entier 15 sur 32 bits
cc : la chaîne "bonjour"
rr : <'B', 3> de type <un caractère, un entier sur 32 bits>
T : le tableau d'entiers sur 32 bits [0x1122, 0x3456, 0xfafd]
xx : l'entier 65 sur 32 bits
```

La directive de déclaration pour définir une valeur sur 32 bits est `.word`.

Copiez le fichier `donnees.s` dans `donnees2.s` et modifiez `donnees2.s`. Compilez `donnees2.s`. Quelle est maintenant la représentation de chacun des entiers de la zone `data` modifiée ?

3.2 Accès à la mémoire : échange mémoire/registres

3.2.1 Lecture d'un mot de 32 bits

Le problème est le suivant : la zone `data` contient des données dont plus particulièrement un entier représenté sur 32 bits à l'adresse `xx` ; on veut copier cet entier dans un registre.

Le programme `accesmem.s` montre comment résoudre le problème. On commence par charger dans le registre `r5` l'adresse `xx` (`LDR r5, LD_xx`), puis on charge dans `r6` le mot mémoire à cette adresse (`LDR r6, [r5]`). La suite du programme permet d'afficher le contenu des registres `r5` et `r6`.

```
1 @ accesmem.s
2     .data
3 aa: .word 24
4 xx: .word 266
5 bb: .word 42
6
7     .text
8     .global main
9 main:
10     LDR r5, LD_xx
11     LDR r6, [r5]
12
13     @ impression du contenu de r5
14     MOV r1, r5
15     BL EcrHexa32
16
17     @ impression du contenu de r6
18     MOV r1, r6
19     BL EcrHexa32
20
21 fin: BX LR
22 LD_xx: .word xx
```

Ce programme utilise une fonction d’affichage `EcrHexa32` qui est définie dans un autre module `es.s` (Cf. chapitre 4). Cette fonction affiche à l’écran en hexadécimal la valeur contenue dans le registre `r1` obligatoirement.

Produisez l’exécutable `accesmem` :

```
arm-eabi-gcc -c es.s
arm-eabi-gcc -c accesmem.s
arm-eabi-gcc -o accesmem accesmem.o es.o
```

Exécutez ce programme : `arm-eabi-run accesmem`. Notez les valeurs affichées. Que représente chacune d’elle ?

3.2.2 Lecture de mots de tailles différentes

Voilà un programme (`accesmem2.s`) utilisant les instructions : `LDR`, `LDRH` et `LDRB`.

Le programme `es.s` vous fournit également les fonctions d’affichage en décimal de la valeur contenue dans le registre `r1` sur 32 bits, 16 bits ou 8 bits : `EcrNdecimal32`, `EcrNdecimal16` et `EcrNdecimal8` (Cf. chapitre 4).

Ajoutez des instructions permettant l’affichage des adresses et des valeurs lues dans la mémoire de la même façon que dans le programme précédent. Compilez de la même façon que précédemment et exécutez.

Relevez les valeurs affichées et en particulier donnez les adresses mémoire où sont rangées les valeurs 266, 42 et 12. Expliquez les différences entre elles.

```
1 @ accesmem2.s
2     .data
3 D1:     .word  266
4 D2:     .hword 42
5 D3:     .byte  12
6
7     .text
8     .global main
9 main:
10     LDR r3, LD_D1
11     LDR r4, [r3]
12
13     LDR r5, LD_D2
14     LDRH r6, [r5]
15
16     LDR r7, LD_D3
17     LDRB r8, [r7]
18
19 fin:  BX LR
20
21 LD_D1: .word D1
22 LD_D2: .word D2
23 LD_D3: .word D3
```

3.2.3 Ecriture en mémoire

L’instruction `STR` (respectivement `STRH`, `STRB`) permet de stocker un mot représenté sur 32 (respectivement 16, 8) bits dans la mémoire.

Le programme `ecrmem.s` affiche la valeur rangée à l’adresse `DW`, puis range à cette adresse la valeur -1 ; le mot d’adresse `DW` est alors lu et affiché. Exécutez ce programme et constatez qu’effectivement le

mot d'adresse DW a été modifié. Modifiez le programme `ecrmem.s` pour faire le même genre de travail mais avec un mot de 16 bits rangé à l'adresse DH et un mot de 8 bits rangé à l'adresse DB.

Remarque : les adresses sont toujours représentées sur 32 bits.

```
1      .data
2 DW:      .word  0
3 DH:      .hword 0
4 DB:      .byte  0
5
6      .text
7      .global main
8 main:
9          LDR r0 , LD_DW
10         LDR r1 , [r0]
11         BL  EcrHexa32
12         BL  EcrZdecimal32
13
14         MOV r4 , #-10
15         LDR r5 , LD_DW
16         STR r4 , [r5]
17
18         LDR r0 , LD_DW
19         LDR r1 , [r0]
20         BL  EcrHexa32
21         BL  EcrZdecimal32
22
23 fin:   BX LR
24
25 LD_DW: .word DW
26 LD_DH: .word DH
27 LD_DB: .word DB
```

3.3 Un premier programme en langage d'assemblage

Considérons le programme `caracteres.s`.

```
1      .data
2 cc: @ ne pas modifier cette partie
3      .byte 0x42
4      .byte 0x4f
5      .byte 0x4e
6      .byte 0x4a
7      .byte 0x4f
8      .byte 0x55
9      .byte 0x52
10     .byte 0x00          @ code de fin de chaine
11         @ la suite pourra etre modifiee
12         .word 12
13         .word 0x11223344
14     .asciz "au_revoir..."
15
16     .text
17     .global main
18 main:
19
20 @ impression de la chaine de caracteres a une adresse cc
```

```

21      LDR r1, LD_cc
22      BL EcrChaine
23
24 @ modification de la chaine
25 @ A COMPLETER
26
27 @ impression de la chaine modifiee
28      LDR r1, LD_cc
29      BL EcrChaine
30
31 fin: BX LR
32
33 LD_cc: .word cc

```

Compilez ce programme et exécutez-le ; vous constatez qu'il affiche deux fois la chaîne de caractères d'adresse `cc`.

Modifiez ce programme pour qu'il affiche la chaîne "BONJOUR" sur une ligne puis la chaîne "au revoir..." sur la ligne suivante. Il y a plusieurs façons de traiter cette question, vous pouvez essayer plusieurs solutions (c'est même conseillé) mais celle qui nous intéresse le plus ici consiste à utiliser l'indirection avec un pointeur relais. Plus précisément vous devez identifier l'adresse de début de chaque chaîne (avec une étiquette) et utiliser cette étiquette pour réaliser l'affichage souhaité.

La chaîne d'adresse `cc` est formée de caractères majuscules. Modifiez le programme en ajoutant une suite d'instructions qui transforme chaque caractère majuscule en minuscule. On peut résoudre ce problème sans écrire une boucle. Compilez et exécutez votre programme.

Indication : inspirez-vous de l'exercice fait en TD1. L'opération `OU` peut être réalisée avec l'instruction `ORR`.

3.4 Alignements et "petits bouts"

3.4.1 Questions d'alignements

Voici une nouvelle zone de données à définir en langage d'assemblage :

```

x: l'entier 9 sur 8 bits
   l'entier 8 sur 8 bits
   l'entier 3 sur 8 bits
z: l'entier 1024 sur 32 bits

```

En vous inspirant du programme `accesmem.s`, écrivez le programme `alignements1.s` comportant la zone de données décrite ci-dessus, et une zone `text` consistant à lire le mot d'adresse `z` et à afficher sa valeur. Que constatez-vous ?

Le problème vient du fait que les mots de 32 bits doivent être placés à des adresses multiples de 4. De même les entiers représentés sur 2 octets doivent être stockés à des adresses multiples de 2.

Pour rétablir l'alignement insérer la ligne suivante :

```
.balign 4
```

juste avant la déclaration de l'entier `z`, et appelez ce nouveau programme `alignements2.s`.

Vérifiez que le problème est résolu.

Ecrivez un programme dans lequel vous déclarez une valeur représentée sur 16 bits et dont l'adresse n'est pas un multiple de 2 (il suffit de placer un octet devant). Reproduisez une expérience similaire à la précédente (pour rétablir un alignement sur une adresse multiple de 2 utilisez la directive `.balign 2`).

3.4.2 Questions de "petits bouts"

Reprendre l'exercice de lecture de mots de 32 bits dans la mémoire (paragraphe 3.2.1).

Observer le contenu de la zone `data` du fichier `accesmem` avec la commande : `arm-eabi-objdump -j .data -s accesmem` et retrouver les valeurs et les adresses des 3 mots déclarés dans la zone `data`.

Noter que la convention utilisée est le rangement par "petits bouts" (Cf. paragraphe 2.3). Pour obtenir un rangement par "grands bouts" recompiler les fichiers source avec l'option `-mbig-endian`.

Faire le même exercice avec l'exercice du paragraphe 3.2.2.

Chapitre 4

TP séance 5 : Codage de structures de contrôle et le metteur au point gdb

4.1 Accès à un tableau

On considère l'algorithme suivant :

lexique:

TAB : un tableau de 5 entiers représentés sur 32 bits

algorithme:

TAB[0] <-- 11

TAB[1] <-- 22

TAB[2] <-- 33

TAB[3] <-- 44

TAB[4] <-- 55

1. Récupérez le fichier `tableau.s`. On y a traduit en langage d'assemblage les deux premières affectations.
2. Complétez le programme de façon à réaliser l'algorithme donné en entier.
3. Compilez avec la commande : `arm-eabi-gcc -Wa,--gdwarf2 tableau.s -o tableau`¹
4. Observez son exécution pas à pas sous `gdb` ou `ddd` (lire ce qui suit et vous référer au paragraphe 2.4.2).

`gdb` est un metteur au point (ou “débogueur”); il permet de suivre l'exécution d'un programme en pas à pas c'est-à-dire une ligne de programme après l'autre ou à modifier un programme en cours d'exécution.

Nous verrons par la suite qu'un metteur au point sert aussi à chercher des erreurs dans un programme en stoppant celui-ci justement à l'endroit où l'on soupçonne l'erreur...

Pour utiliser `gdb` le programme doit avoir été compilé avec l'option `-g`, ce que vous avez fait (option `-gdwarf2`).

Exécutez le programme sous `gdb` en tapant les commandes suivantes :

1. `arm-eabi-gdb tableau`

On lance le débogueur, nous sommes désormais dans l'environnement `gdb`.

1. attention, ne pas mettre d'espace avant le `--gdwarf2`

2. `target sim`
On active le simulateur, ce qui permet d'exécuter des instructions en langage d'assemblage ARM.
3. `load`
On charge le programme à exécuter dont on a donné le nom à l'appel de `gdb`.
4. `break main`
On met un point d'arrêt juste avant l'étiquette `main`.
5. `run`
Le programme s'exécute jusqu'au premier point d'arrêt exclu : ici, l'exécution du programme est donc arrêtée juste avant la première instruction.
6. `list`
On voit 10 lignes du fichier source.
7. `list`
On voit les 10 suivantes.
8. `list 10,13`
On voit les lignes 10 à 13.
9. `info reg`
Permet d'afficher en hexadécimal et en décimal les valeurs stockées dans tous les registres. Notez la valeur de `r15` aussi appelé `pc`, le compteur de programme. Elle représente l'adresse de la prochaine instruction qui sera exécutée.
10. `s`
Une instruction est exécutée. `gdb` affiche une ligne du fichier source qui est la prochaine instruction (et qui n'est donc pas encore exécutée).
11. etc.

Pour l'observation de l'exécution du programme `tableau`, notez, en particulier, les valeurs successives (à chaque itération) de `r0`, le contenu de la mémoire à partir de l'adresse `debutTAB` en début de programme et après l'exécution de toutes les instructions. Sous `gdb`, pour afficher 5 mots en hexadécimal, à partir de l'adresse `debutTAB`, utilisez la commande : `x/5w &debutTAB`.

4.2 Codage d'une itération

On considère l'algorithme suivant :

```
val <-- 11
i <-- 0
tant que i <> 5
    TAB[i] <- val
    i <-- i + 1
    val <- val + 11
```

Après transformations, on l'a codé en langage d'assemblage par :

```
1  .data
2  debutTAB: .skip 5*4
3
4  .text
5  .global main
6  main:
```

```

7
8      mov r3, #11                @ val <- 11
9      mov r2, #0                 @ i <- 0
10 tq:  cmp r2, #5                 @ i-5 ??
11      beq fintq
12      @ i-5 <> 0
13      ldr r0, LD_debutTAB         @ r0 <- debutTAB
14      add r0, r0, r2, LSL #2     @ r0 <- r0 + r2*4 = debutTAB + i*4
15      str r3, [r0]               @ MEM[debutTAB+i*4] <- val
16      add r2, r2, #1             @ i <- i + 1
17      add r3, r3, #11            @ val <- val + 11
18      b tq
19 fintq: @ i-5 = 0
20
21 fin:  BX LR
22
23 LD_debutTAB : .word debutTAB

```

1. Récupérez le fichier `iteration.s` Compilez ce programme et exécutez-le sous `gdb` ou `ddd`.
2. Quelle est la valeur contenue dans `r0` à chaque itération ?
3. Quelle est la valeur contenue dans `r2` à chaque itération ?
4. Quelle est la valeur contenue dans `r2` à la fin de l'itération, c'est-à-dire lorsque le contrôle est à l'étiquette `fintq` ?
5. Supposons que l'algorithme soit écrit avec **tant que** `i <= 4` au lieu de **tant que** `i <> 5` ; le tableau contient-il les mêmes valeurs à la fin de l'itération ? Comment doit-on alors traduire ce nouveau programme ?
6. Supposons que le tableau soit maintenant un tableau de mots de 16 bits. Comment devez-vous modifier le programme ? Faire la modification et rendre le nouveau programme et les valeurs dans les registres.
7. Même question pour un tableau d'octets.

4.3 Calcul de la suite de “Syracuse”

La suite de Syracuse est définie par :

$$\begin{aligned}
 U_0 &= \text{un entier naturel} > 0 \\
 U_n &= U_{n-1}/2 \text{ si } U_{n-1} \text{ est pair} \\
 &= U_{n-1} \times 3 + 1 \text{ sinon}
 \end{aligned}$$

Cette suite converge vers 1 avec un cycle.

Calculer les valeurs de la suite pour $U_0 = 15$.

Pour calculer les différentes valeurs de cette suite, on peut écrire l'algorithme suivant :

```

lexique :
  x : un entier naturel
algorithme :
  tant que x <> 1
    si x est pair
      alors x <-- x div 2
    sinon x <-- 3 * x + 1

```

Vous allez traduire cet algorithme en langage d'assemblage et vérifier que son exécution calcule bien les éléments de la suite de Syracuse.

Quelques indications :

- L’algorithme comporte une itération dans laquelle est incluse une instruction conditionnelle. Vous pouvez traduire chacune des deux constructions en utilisant un des schémas de traduction précédents. N’hésitez pas à utiliser autant d’étiquettes que vous voulez si cela vous rend le travail plus lisible.
- Pour tester si un entier est pair il suffit de regarder si son bit de poids faible (le plus à droite) est égal à 0. Pour cela vous pouvez utiliser une instruction “et logique” avec la valeur 1 ou l’instruction **TST** qui exécute la même chose.
- Pour diviser un entier par 2 il suffit de le décaler à droite de 1 position.
- Pour calculer $3 * x$ on peut calculer $2 * x + x$ et pour multiplier un entier par 2, il suffit de le décaler à gauche de 1 position.

Chapitre 5

TP séances 6 et 7 : Parcours de tableaux

5.1 Tables de multiplications

On vous propose de réaliser un programme qui remplit un tableau avec les tables de multiplication de 1 à 10 et qui l'affiche à l'écran comme sur la figure 5.1.

Le remplissage du tableau peut être réalisé de façon itérative, suivant l'algorithme :

```
//Remplissage d'un tableau des multiplications de 1 à 10
//table[n-1,m-1] = n*m pour n et m compris entre 1 et 10.
```

LEXIQUE :

N_MAX : l'entier 10
Ligne : le type tableau sur [0..N_MAX-1] d'entiers
table : le tableau sur [0..N_MAX-1] de Ligne
n_lig,n_col : deux entiers

ALGORITHME :

```
pour n_lig parcourant [1..N_MAX] :
  pour n_col parcourant [1..N_MAX] :
    // produit de n_col par n_lig
    table[n_lig-1][n_col-1] <-- n_lig * n_col;
```

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

FIGURE 5.1 – Tables de multiplication de 1 à 10

Questions concernant le remplissage du tableau

1. Dans quelle case du tableau `table` se trouve le produit $1*1$?
2. Dans quelle case du tableau `table` se trouve le produit $1*2$?
3. Dans quelle case du tableau `table` se trouve le produit $7*9$?
4. Dans quelle case du tableau `table` se trouve le produit $10*10$?

Organisation du travail Dans ce tp, vous avez à écrire une séquence de deux blocs de codes distincts :

1. le premier initialise (remplit) un tableau en mémoire
2. le second affiche à l'écran le contenu du tableau stocké en mémoire

Il est fortement recommandé de ne tester qu'un bloc de code à la fois : affichage puis remplissage ou remplissage puis affichage. Les binômes peuvent même effectuer le travail en parallèle et fusionner les codes ensuite.

5.2 Affichage du tableau

On donne ci-dessous un algorithme pour afficher le tableau conformément à la figure 5.1, une fois celui-ci rempli. On utilise les fonctions d'entrée/sortie suivantes :

- `ecrire_car(c)` : affiche sans retour à la ligne le caractère de code ascii `c`.
- `ecrire_chn(s)` : affiche sans retour à la ligne la chaîne de caractères `s`.
- `ecrire_int(e)` : affiche sans retour à la ligne la forme décimale de l'entier `e`.
- `a_la_ligne()` : provoque un retour à la ligne

LEXIQUE :

```
N_MAX      : l'entier 10
ESPACE     : le caractère ' ' // code ascii 32
BARRE      : le caractère '|' // code ascii 124
TIRETS     : le caractère '---' // code ascii 45
Ligne      : le type tableau sur [0..N_MAX-1] d'entiers
table      : le tableau sur [0..N_MAX-1] de Ligne
n_lig,n_col : deux entiers
mult       : un entier
```

ALGORITHME :

```
pour n_lig parcourant [0..N_MAX-1] :
  pour n_col parcourant [0..N_MAX-1] :
    ecrire_car(BARRE);
    mult <-- table[n_lig][n_col];
    si mult < 100 alors ecrire_car(ESPACE);
    si mult < 10 alors ecrire_car(ESPACE);
    ecrire_int(mult);
  ecrire_car(BARRE);
  a_la_ligne();
  répéter N_MAX fois :
    ecrire_car(BARRE);
    ecrire_chn(TIRETS);
  ecrire_car(BARRE);
  a_la_ligne();
```

Traduire en langage d'assemblage cet algorithme, récupérer le fichier `tabmult.s` et compléter la partie affichage. Tester cette partie, pour le tableau évidemment pour l'instant vide ; c'est-à-dire que l'affichage que vous devez observer est le même que celui de la figure 5.1 mais avec des zéros.

Pour la traduction des fonctions d'entrées-sorties utiliser les fonctions suivantes définies dans le fichier `es.s` :

- `EcrChn` pour implémenter `ecrire_car` et `ecrire_chn`. Pour écrire un caractère sans retour à la ligne déclarer le caractère comme chaîne.
- `EcrNdecim32` pour implémenter `ecrire_int`.
- `AlaLigne` pour implémenter `a_la_ligne`.

5.3 Remplissage du tableau

Il s'agit maintenant de traduire en langage d'assemblage l'algorithme de remplissage du tableau donné au paragraphe 5.1.

Transformer cet algorithme dans une forme adaptée à la traduction en langage d'assemblage (i.e. suppression des constructions `pour`).

Dans un premier temps, on garde telle quelle l'écriture de l'accès à un élément du tableau (`table[n_lig][n_col]`).

Pour réaliser la multiplication de deux entiers positifs vous pouvez utiliser l'instruction `MUL Rd, Rg, Rd`, l'algorithme de multiplication par additions successives selon l'algorithme qui suit, ou un algorithme par additions et décalages (non présenté ici). Algorithme de multiplication par additions successives :

LEXIQUE :

`mult`, `a` et `b` : trois entiers positifs ou nuls

ALGORITHME :

```
mult <-- 0;
répéter a fois : mult <-- mult + b;
```

Votre compte-rendu comportera cette version intermédiaire de la traduction.

5.3.1 Codage d'un tableau à 2 dimensions

Pour stocker en mémoire un tableau à 2 dimensions, on peut le transformer en un tableau à une dimension en rangeant les lignes du tableau, les unes après les autres. Chaque ligne est une suite de cases contenant chacune un élément du tableau.

Par exemple, un tableau avec 4 lignes et 6 colonnes pourra être représenté par un tableau de $4 \times 6 = 24$ cases.

table :						e00
						e01
						e02
						e03
e00	e01	e02	e03	e04	e05	e04
e10	e11	e12	e13	e14	e15	e05
e20	e21	e22	e23	e24	e25	e10
e30	e31	e32	e33	e34	e35	e11
						...
						e35

questions

1. `table` étant l'adresse de début du tableau (i.e. du premier élément), exprimer la formule du donne l'adresse de `table[x][y]` en fonction de `table`, `x` et `y` ?.
2. Donner le langage d'assemblage correspondant à la ligne suivante (calcul d'adresse, puis écriture de la valeur en mémoire) : `table[x][y] <-- valeur`.

5.3.2 Codage du programme de multiplication (version 1)

En rassemblant les différents algorithmes que vous avez traduits, vous avez maintenant une version complète et vous pouvez compléter le fichier `tabmult.s` le compiler, l'exécuter et vérifier vos résultats ...

Pour vérifier que votre tableau est correctement rempli, vous pouvez utiliser `gdb` ou `ddd` pour afficher le contenu de la mémoire à l'adresse `debutTab`. Vous pouvez aussi utiliser la partie affichage si celle-ci a été complètement testée car dans le cas contraire vous n'êtes pas à l'abri d'un bug dans cette première partie.

5.3.3 Codage du programme de multiplication (version 2)

Pour parcourir le tableau à 2 dimensions, on pourrait aussi parcourir le tableau à 1 dimension du début à la fin, en utilisant une seule boucle. L'algorithme de remplissage du tableau peut alors être réécrit sans utiliser de multiplication.

questions

1. Donnez la nouvelle forme de l'algorithme complet.
2. Traduire cette version en langage d'assemblage. Reprenez la version initiale du fichier `tabmult.s`, complétez-le avec la traduction de votre algorithme.
3. Compilez votre programme, exécutez le et vérifiez vos résultats ...

Pour le compte-rendu :

les différentes lignes de vos algorithmes doivent apparaître de façon claire sous forme de commentaire dans votre programme en langage d'assemblage. Vous donnerez aussi les conventions d'implantation des différentes variables dans les registres

5.4 tabmult.s

```
1 NMAX= 10
2     .data
3 barre :  .byte  '|'
4         .byte  0
5 espace : .byte  ' '
6         .byte  0
7 tirets : .asciz  "——"
8 debutTab: .skip NMAX*NMAX*4    @ adresse du debut du tableau
9     .text
10    .global main
11 main: @ Programme tabmult : Affiche les tables de multiplication de de 1 a 10
12     @ remplissage du tableau
13     @ a completer...
14     @ affichage du tableau
15     @ a completer...
16    BX LR
```

```
17 LD_debutTab : .word debutTab
18 LD_barre : .word barre
19 LD_espace : .word espace
20 LD_tirets : .word tirets
```

Chapitre 6

TP séances 8, 9 et 10 : Procédures, fonctions et paramètres

6.1 Traitement des fichiers au format bitmap : objectifs

Une image donnée au format bitmap peut recevoir des traitements spéciaux via l'utilisation de plusieurs types d'algorithmes. L'objectif de ces TP est de réaliser plusieurs fonctions en langage d'assemblage ARM capables de traiter différemment une image donnée en entrée au format bitmap.

Pour faciliter votre tâche la consigne est d'utiliser des hauteurs et largeurs d'image multiples de 8 pixels, et égales dans le cas de la réalisation des rotations.

En partant des exemples des sections suivantes, vous devez produire les fonctions qui réalisent les effets ci-dessous sur l'image :

1. Négatif;
2. Symétries comme dans la figure 6.1 ci-après ;
3. Rotations comme dans la figure 6.1 ci-après.

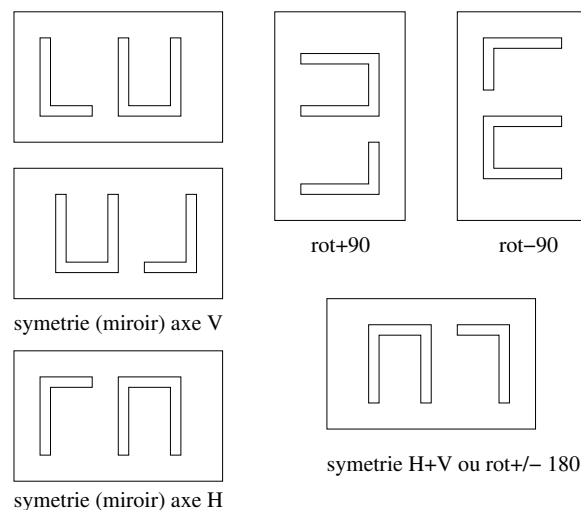


FIGURE 6.1 – Exemples d'opérations de symétrie et rotation d'une image

6.2 Découverte des transformations écrites en C

1. Extraire l'archive fournie : **tar xvzf tp_image_etu.tgz** et se placer dans le répertoire SRC_ETU.
2. Créer un lien symbolique de image_test.bm vers l'image à traiter (**ln -s ../IMAGES/charlot.bm image_test.bm**).
3. Compiler le programme : **make**
4. Exécuter : **arm-eabi-run transformer n**
5. Afficher le résultat : **xli -pixmap resultat.bm** ou **bitmap esultat.bm**
6. Exécuter et afficher d'autres traitements : **arm-eabi-run transformer option** (option parmi n, h, v, nv, nh, hv, nhv)

Le travail consiste à coder en langage d'assemblage les traitements d'inversion vidéo (negatif.asm.S), les symétries (symetrie.asm.S) et en dernier lieu, l'écriture du fichier résultat (afficher_contenu.asm.S).

6.3 Négatif d'une image

Afficher l'exemple d'image qui vous est fourni : **xli charlot.bm**.

La commande **./extract_image.sh image_test.bm** génère deux fichiers indispensables à la génération du fichier exécutable (à refaire à chaque changement d'image à traiter) :

1. image_bits_content.c inclus dans main.c, qui déclare un tableau d'octets représentant les points de l'image (1 bit par pixel)
2. image_bits_include.h à inclure dans les fichiers .c et .S, qui définit les constantes symboliques liées à la taille de l'image (WIDTH, HEIGHT, BYTES et BYTES_PER_LINE), qui seront donc utilisables en langage d'assemblage¹

Les fichiers negatif.c et negatif.asm.S (à compléter) sont tous les deux traités par le préprocesseur C. Le code du corps d'une fonction *fonc* compilé dépend des macros définies dans le fichier Makefile : par défaut le code C dans negatif.c, le code (à compléter) dans negatif.S lorsque la ligne C_NEGATIF+=-DC_fonc est commentée (# en début de ligne) dans le Makefile

Par exemple, en commentant uniquement C_NEGATIF+=-DC_NEG_OCTET, vous pouvez tester (make; arm-eabi-run transformer n) le code C fourni de la fonction neg_image et votre fonction neg_octet écrite en langage d'assemblage.

En commentant les **2 lignes** de la forme C_NEGATIF+=, vous compilez votre version totalement en langage d'assemblage du traitement d'inversion.

Compléter, compiler et tester le fichier negatif.asm.S.

6.4 Symétries d'une image

Compléter, compiler et tester le fichier symetrie.asm.S.

1. Exemple : ldr r8,LD_bytes avec plus loin LD_bytes : .word BYTES

Sur le même principe que précédemment, les lignes `C_SYMMETRY+=` permettent pour chaque fonction de conserver le code C initial ou de tester votre traduction en langage d'assemblage.

La symétrie la plus intéressante à traiter est celle selon l'axe vertical.

6.5 Affichage de contenu

Ecrire votre propre version de la fonction `afficher_contenu`. Pour la tester, remplacer `afficher_contenu.o` par `afficher_contenu_asm.o` dans la définition de `OBJS`.

Chapitre 7

TP séance 11 : Etude du code produit par le compilateur arm-eabi-gcc, optimisations

Le code en langage d'assemblage ARM d'un programme en C peut être produit sans optimisation par le compilateur `gcc` avec l'option `-O0`. Dans ce TP, nous allons observer ce qu'un compilateur peut optimiser. Nous allons reprendre les mêmes programmes et codes du chapitre II.10, éventuellement modifiés mais en les compilant avec un niveau d'optimisation important (option `-O2`).

Pour ce TP n'hésitez pas à faire d'autres essais que ceux qui sont proposés.

Un autre objectif du TP est de distinguer :

- ce qui est du domaine du “statique”, c'est-à-dire ce qui peut être calculé lors de la compilation,
- ce qui est du domaine du “dynamique”, c'est-à-dire ce qui ne peut être calculé que lors de l'exécution.

7.1 Un premier exemple

Récupérez le programme écrit en langage C dans le fichier `premier.c`.

Compilez ce programme avec un bon niveau d'optimisations (option `-O2`) avec la commande suivante : `arm-eabi-gcc -O2 -S premier.c`. Etudiez le code en langage d'assemblage ARM produit dans le fichier `premier.s` et comparez avec le code étudié dans le chapitre II.10.

7.2 Programme avec une procédure qui a beaucoup de paramètres

7.2.1 Premier essai

On considère le programme contenu dans le fichier `bcp_param.c`. Compilez ce programme avec la commande : `arm-eabi-gcc -O2 -S bcp_param.c`. Etudiez le programme produit dans `bcp_param.s` et comparez avec le code étudié dans le chapitre II.10.

7.2.2 Deuxième essai

Modifier le programme précédent de la façon suivante :

```
1 #include "stdio.h"
2
3 static long int Somme (long int a1, long int a2, long int a3, long int a4, long
int a5,
```

```

4             long int a6, long int a7, long int a8, long int a9, long
int a10) {
5 long int x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10;
6 long int y;
7
8     x1=a1+1; x2=a2+1; x3=a3+1; x4=a4+1; x5=a5+1;
9     x6=a6+1; x7=a7+1; x8=a8+1; x9=a9+1; x10=a10+1;
10    y = x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
11    return (y);
12 }
13
14 int main () {
15 long int z; long int u1, u2, u3, u4, u5, u6, u7, u8, u9, u10;
16
17     scanf ("%d", &u1);
18     scanf ("%d", &u2);
19     scanf ("%d", &u3);
20     scanf ("%d", &u4);
21     scanf ("%d", &u5);
22     scanf ("%d", &u6);
23     scanf ("%d", &u7);
24     scanf ("%d", &u8);
25     scanf ("%d", &u9);
26     scanf ("%d", &u10);
27     z = Somme (u1, u2, u3, u4, u5, u6, u7, u8, u9, u10);
28     printf("La somme des entiers vaut %d\n", z);
29 }

```

Compilez ce programme, étudiez le code produit, comparez avec la version précédente.

7.2.3 Troisième essai

Modifier le programme précédent de la façon suivante :

```

1 #include "stdio.h"
2
3 static long int Somme (long int a1, long int a2, long int a3, long int a4, long
int a5,
4             long int a6, long int a7, long int a8, long int a9, long
int a10) {
5 long int x1,x2,x3,x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10;
6 long int y;
7
8     x1=a1+1; x2=a2+1; x3=a3+1; x4=a4+1; x5=a5+1;
9     x6=a6+1; x7=a7+1; x8=a8+1; x9=a9+1; x10=a10+1;
10    y = x1+x2+x3+x4+x5+x6+x7+x8+x9+x10;
11    return (y);
12 }
13
14 int main () {
15 long int z; long int u;
16
17     scanf ("%d", &u);
18     z = Somme (1, 2, 3, 4, u, 6, 7, 8, 9, 10);
19     printf("La somme des entiers vaut %d\n", z);
20 }

```

Compilez ce programme, étudiez le code produit, comparez avec la version précédente.

7.3 Les variables locales peuvent prendre beaucoup de place

Soit le programme contenu dans le fichier `var_pile.c`. Compilez ce programme avec la commande : `arm-eabi-gcc -O2 -S var_pile.c`. Etudiez le programme produit dans `var_pile.s` et comparez avec le code étudié dans le chapitre II.10.

7.4 Le programme peut aussi aider ...

Reprendre le programme vu en TD II.10. et les réécritures de ce programme pour éliminer la double boucle et tester l'efficacité des réécritures.

Chercher avec les options de compilations ou d'autres réécritures à améliorer le temps de calcul de ce programme.

Programme initial :

```
1 #include "stdio.h"
2 #define NMax 1000000000
3
4 int main() {
5     int i,j,zero,tab[2]; i=NMax;zero=0;tab[0]=0;tab[1]=0;
6     for(i=NMax;i--){
7         for(j=1;j>=0;j--){
8             if (i&(1<<j)) {
9                 tab[j]++;}
10            if (j==0) {
11                zero++;}}
12     printf("%d - %d - %d\n",tab[0],tab[1],zero);
13     return;}
```

Chapitre 8

TP séances 12 : Procédures et paramètres

8.1 Application d'une fonction à tous les éléments d'un tableau

On considère le lexique suivant :

```
. Ent8 : entier sur [-128 .. + 127]

. NMAX : constante de type entier >= 0 et <= 255

. EntN : entier sur [0 .. NMAX]

. TabEnt8 : tableau sur [0 .. NMAX - 1] d'entiers du type Ent8

. FoncMapEnt8 : adresse d'une fonction avec un paramètre du type Ent8 et un
retour du type Ent8 aussi

. saisir_tab : procédure avec deux paramètres des types : TabEnt8 et EntN
{
saisir_tab(t, n) : saisit le contenu des n premiers entiers du type Ent8
dans un tableau t
}

. afficher_tab : procédure avec deux paramètres des types : TabEnt8 et EntN
{
afficher_tab(t, n) : affiche le contenu des n premiers entiers du type Ent8
qui sont dans un tableau t
}

. map : procédure avec quatre paramètres des types : TabEnt8, EntN, TabEnt8 et FoncMapEnt8
{
map(t1, n, t2, f) : t1 est un tableau qui contient une séquence de n entiers
du type Ent8, déjà t2 est un tableau qui contient la séquence avec les résultats
du type Ent8 de la fonction f du type FoncMapEnt8 : [f(t1[0]), f(t1[1]), ..., f(t1[n-1])]
}
```

On s'intéresse à la procédure `map`. Une réalisation en est donnée par l'algorithme suivant :

```

map(t1, n, t2, f) :
i : entier du type EntN
i <- 0
tant que i != n
t2[i] <- f(t1[i])
i <- i + 1

```

On se propose de coder cette procédure en langage d'assemblage. On convient que :

- l'adresse du tableau **t1** est passée dans le registre **r0**
- la taille **n** de la séquence est passée dans le registre **r1**
- l'adresse du tableau résultat **t2** est passée dans le registre **r2**
- l'adresse de la fonction **f** est passée dans le registre **r3**

D'autre part, pour l'appel de la fonction **f** on convient que :

- l'entier donné est passé dans le registre **r3**
- le résultat calculé par la fonction est produit dans le registre **r4**

Note : Pour appeler une fonction dont l'adresse est dans un registre on utilise l'instruction ARM BLX (Cf. paragraph 2.1.6).

De même, la convention d'appel des procédures **saisir_tab** et **afficher_tab** est la suivante :

- l'adresse du tableau **t** est passée dans le registre **r0**
- le nombre **n** d'éléments à afficher est passé dans le registre **r1**

Exercice 1 :

1. Traduire l'algorithme en langage d'assemblage Arm : compléter la définition de la procédure **map** (fichier **map.s**, cf. annexe I).
2. Compléter le corps de la procédure principale **main** du fichier **essai-map.s** (cf. annexe III) : vous devez ajouter aux endroits voulus de ce fichier deux appels à la procédure **map** et pour chacun d'eux un appel à la procédure auxillaire **afficher_tab** (fichier **gestion_tab.s**, cf. annexe VI). La procédure **map** sera invoquée une première fois avec la fonction **plus_un** comme un paramètre telle que : $plus_un(x) = x + 1$ et une seconde fois avec la fonction **carre** telle que : $carre(x) = x^2$ (fichier **fg.s**, cf. annexe II).
3. Compilez et testez le programme (faites un fichier **Makefile** permettant d'utiliser la commande **make** pour compiler le programme).

8.2 Réduction d'un tableau à une valeur

8.2.1 Calcul de $\sum_{i=0}^{n-1} T[i]$

On ajoute les éléments suivants dans le lexique de la question précédente :

. Ent32 : entier naturel sur 32 bits

. FoncRedEnt8 : adresse d'une fonction avec un paramètre du type Ent8 et un retour du type Ent32

. red : fonction avec quatre paramètres des types TabEnt8, EntN, Ent8 et FoncRedEnt8 et un retour du type Ent32

```

{
si n > 0 : red(t, n, vi, g) = g( ... (g(g(g(vi, t[0]), t[1]), t[2]), ..., t[n - 1]) ... )
    si n = 0 : red(t, 0, vi, g) = vi

```

}

Si g est la fonction *somme* telle que : $somme(x, y) = x + y$, alors $red(t, n, 0, somme) = \sum_{i=0}^{n-1} t[i]$.

Une réalisation de la fonction **red** est donnée par l'algorithme suivant :

```
red(t, n, vi, g) :  
i : entier du type EntN  
acc : entier du type Ent32  
i <- 0  
acc <- vi  
tant que i != n  
  acc <- g(acc, t[i])  
  i <- i + 1  
retour acc
```

Pour coder cette fonction en langage d'assemblage, on convient que :

- l'adresse du tableau **t** est passée dans le registre **r0**
- la taille **n** de la séquence à traiter est passée dans le registre **r1**
- la valeur initiale du calcul est passée dans le registre **r2**
- l'adresse de la fonction **g** est passée dans le registre **r3**
- le résultat calculé par la fonction est produit dans le registre **r4**

D'autre part, pour l'appel de la fonction **g** on convient que :

- les données sont passées dans les registres **r0** et **r1**
- le résultat calculé par la fonction est produit dans le registre **r2**

Exercice 2 :

1. Traduire l'algorithme en langage d'assemblage Arm : compléter la définition de la fonction **red** (fichier **red.s**, cf. annexe IV).
2. Compléter le corps de la procédure principale **main** du fichier **essai-red.s** (cf. annexe V). Vous devez ajouter aux endroits voulus de ce fichier un appel à la fonction **red** ainsi qu'un appel à l'une des deux procédures auxillaires **EcrZdecimal32** ou **EcrZdecim32** (cf. fichier **es.s**).

La fonction **red** sera invoquée avec la fonction **somme** comme un paramètre telle que : $somme(x, y) = x + y$ (fichier **fg.s**, cf. annexe II).

3. Compilez et testez le programme.

8.2.2 Calcul de $\prod_{i=0}^{n-1} T[i]$

Exercice 3 :

1. Quels sont-ils les paramètres à passer à la fonction **red** pour effectuer le calcul du produit $\prod_{i=0}^{n-1} T[i]$?
2. Quelle est la fonction qui remplace **g** de l'exercice précédent ?
3. Ajoutez au programme **main** de l'exercice précédent une invocation de la fonction **red** permettant de réaliser ce calcul.
4. Compilez et testez le programme modifié.

8.3 Passage de paramètres par la pile

Exercice 4 :

On veut réaliser une nouvelle version de la procédure `map`, ou de la fonction `red`, en utilisant cette fois-ci le passage de paramètres *par la pile* plutôt que par les registres. Choisissez une organisation de la pile appropriée pour le passage des paramètres (le schéma correspondant sera à inclure dans le compte-rendu du TP), puis réalisez une nouvelle version du programme (dans les fichiers `map2.s` et `essai-map2.s`, ou `red2.s` et `essai-red2.s`, par exemple).

Annexe I : le fichier `map.s`

```
1 @ procedure map
2 @ parametres : A COMPLETER
3 @ algorithme : A COMPLETER
4 @ allocation des registres : A COMPLETER
5
6         .text
7         .global map
8 map:
9         @@@@@@@@@@@@@@@@
10        @ A COMPLETER
11        @@@@@@@@@@@@@@@@
```

Annexe II : le fichier `fg.s`

```
1         .global plus_un, carre
2         .global somme, produit
3         .text
4 @ fonction plus_un : incremente un entier passe en parametre
5 @ r3 : donnee
6 @ r4 : resultat
7 plus_un: add     r4, r3, #1
8             bx lr
9
10 @ fonction carre : eleve au carre un entier passe en parametre
11 @ r3 : donnee
12 @ r4 : resultat
13 carre:  push {lr}
14         push {r2}
15         push {r1}
16         push {r0}
17
18         mov     r0, r3
19         mov     r1, r3
20         bl      mult
21         mov     r4, r0
22
23         pop {r0}
24         pop {r1}
25         pop {r2}
26         pop {lr}
27         bx lr
```



```

28
29 @ fonction somme : ajoute les deux entiers passes en parametre
30 @ r0, r1 : donnees
31 @ r2 : resultat
32 somme:    add      r2, r0, r1
33          bx lr
34
35 @ fonction produit : multiplie les deux entiers passes en parametre
36 @ r0, r1 : donnees
37 @ r2 : resultat
38 produit:
39          @@@@@@@@@@@@@@@@
40          @ A COMPLETER
41          @@@@@@@@@@@@@@@@

```

Annexe III : le fichier `essai-map.s`

```

1      .set      NMAX, 10      @ nombre elements
2
3      .data
4 invite1: .asciz  "Saisir une sequence de_"
5 invite2: .asciz  "_entiers_:"
6 afftab1: .asciz  "Sequence donnee S_:"
7 afftab2: .asciz  "map(S, plus_un)_"
8 afftab3: .asciz  "map(S, carre)_"
9 tab1:    .skip   NMAX        @ tableau de NMAX octets
10 tab2:    .skip   NMAX        @ tableau de NMAX octets
11
12      .text
13      .global   main
14 @ procedure principale
15 main:
16      @ saisir la sequence donnee
17      ldr      r1, LD_invite1
18      bl      EcrChn
19      mov      r1, #NMAX
20      bl      EcrNdecim32
21      ldr      r1, LD_invite2
22      bl      EcrChaine
23      ldr      r0, LD_tab1
24      mov      r1, #NMAX
25      bl      saisir_tab
26
27      @ afficher la sequence donnee
28      bl      AlaLigne
29      ldr      r1, LD_afftab1
30      bl      EcrChaine
31      ldr      r0, LD_tab1
32      mov      r1, #NMAX
33      bl      afficher_tab
34
35      @ appel de la procedure map(tab1, NMAX, tab2, plus_un)
36      @@@@@@@@@@@@@@@@@
37      @ A COMPLETER
38      @@@@@@@@@@@@@@@@@

```

```

39
40     @ afficher la sequence resultat
41     bl      AlaLigne
42     ldr     r1, LD_afftab2
43     bl      EcrChaine
44     @@@@@@@@@@@@@@@@
45     @ A COMPLETER
46     @@@@@@@@@@@@@@@@
47
48     @ appel de la procedure map(tab1, NMAX, tab2, carre)
49     @@@@@@@@@@@@@@@@
50     @ A COMPLETER
51     @@@@@@@@@@@@@@@@
52
53     @ afficher la sequence resultat
54     bl      AlaLigne
55     ldr     r1, LD_afftab3
56     bl      EcrChaine
57     @@@@@@@@@@@@@@@@
58     @ A COMPLETER
59     @@@@@@@@@@@@@@@@
60
61     @ fin du programme principal
62     bx lr
63
64 @ relais vers la zone data
65 LD_invite1:
66     .word   invite1
67 LD_invite2:
68     .word   invite2
69 LD_afftab1:
70     .word   afftab1
71 LD_afftab2:
72     .word   afftab2
73 LD_afftab3:
74     .word   afftab3
75 LD_tab1:
76     .word   tab1
77 LD_tab2:
78     .word   tab2
79
80 @ relais vers la zone text
81 LD_plus_un:
82     .word   plus_un
83 LD_carre:
84     .word   carre

```

Annexe IV : le fichier red.s

```

1     .text
2 @ fonction red
3 @ parametres : A COMPLETER
4 @ algorithmme : A COMPLETER
5
6 red:

```

```

7      @@@@@@@@@@@@@@@@
8      @ A COMPLETER
9      @@@@@@@@@@@@@@@@

```

Annexe V : le fichier essai-red.s

```

1      .set      NMAX, 10          @ nombre elements
2
3      .data
4 invite1:      .asciz    "Saisir une sequence de "
5 invite2:      .asciz    " entiers : "
6 afftab:       .asciz    "Sequence donnee S:"
7 affres1:      .asciz    "red(S, somme) ="
8 tab :         .skip     NMAX      @ tableau de NMAX octets
9 var_somme:    .byte     0
10
11      .text
12      .global  main
13 @ procedure principale
14 main:
15      @ saisir la sequence donnee
16      ldr      r1, LD_invite1
17      bl       EcrChn
18      mov      r1, #NMAX
19      bl       EcrNdecim32
20      ldr      r1, LD_invite2
21      bl       EcrChaine
22      ldr      r0, LD_tab
23      mov      r1, #NMAX
24      bl       saisir_tab
25
26      @ afficher la sequence donnee
27      bl       AlaLigne
28      ldr      r1, LD_afftab
29      bl       EcrChaine
30      mov      r1, #NMAX
31      bl       afficher_tab
32
33      @ appel de la fonction red(tab, NMAX, 0, somme)
34      @@@@@@@@@@@@@@@@@@
35      @ A COMPLETER
36      @@@@@@@@@@@@@@@@@@
37
38      @ afficher le resultat
39      bl       AlaLigne
40      ldr      r1, LD_affres1
41      bl       EcrChn
42      @@@@@@@@@@@@@@@@@@
43      @ A COMPLETER
44      @@@@@@@@@@@@@@@@@@
45
46      @ fin du programme principal
47      bx lr
48
49 @ relais vers la zone data

```

```

50 LD_invite1:
51     .word    invite1
52 LD_invite2:
53     .word    invite2
54 LD_afftab:
55     .word    afftab
56 LD_affres1:
57     .word    affres1
58 LD_tab:
59     .word    tab
60 LD_var_somme:
61     .word    var_somme
62
63 @ relais vers la zone text
64 LD_somme:
65     .word    somme

```

Annexe VI : le fichier gestion_tab.s

```

1  .data
2 entier: .byte    0                @ entiers de la sequence
3
4  .text
5  .global  saisir_tab , afficher_tab
6
7 @ procedure saisir_tab : saisit la sequence des entiers
8 @ r0 = T : adresse de debut du tableau contenant la sequence
9 @ r1 = N : nombre elements de la sequence
10 @ algorithmme : i parcourant 0 .. N - 1 : Lire8(T[i])
11
12 saisir_tab:
13     push {lr}        @ sauvegarde adresse de retour
14     push {r6}        @ sauvegarde temporaires
15     push {r5}
16     push {r2}
17     push {r1}
18
19     mov     r5, #0        @ indice dans le tableau
20     mov     r6, r1        @ nombre elements
21
22 tantquel:
23     cmp     r5, r6
24     beq     fintq1
25     ldr     r1, LD_entier @ lire un entier
26     bl      Lire8
27     ldrb    r2, [r1]
28     strb    r2, [r0, r5]  @ le ranger dans le tableau
29     add     r5, r5, #1    @ octet suivant
30     b       tantquel
31 fintq1:
32     pop {r1}        @ restauration temporaires
33     pop {r2}
34     pop {r5}
35     pop {r6}
36     pop {lr}        @ restauration adresse de retour

```

```

37         bx lr           @ retour appelant
38 LD_entier:
39         .word    entier
40
41 @ procedure afficher_tab : affiche la sequence des entiers
42 @ r0 = T : adresse de debut du tableau contenant la sequence
43 @ r1 = N : nombre elements de la sequence
44 @ algorithme : i parcourant 0 .. N - 1 : EcrZdecimal8(T[i])
45
46 afficher_tab:
47         push {lr}       @ sauvegarde adresse de retour
48         push {r7}       @ sauvegarde temporaires
49         push {r6}
50         push {r5}
51         push {r1}
52
53         @ corps de la procedure
54         mov     r5, #0    @ indice dans tableau
55         mov     r6, r0    @ adresse de debut
56         mov     r7, r1    @ taille du tableau
57
58 tantque2:
59         cmp     r5, r7
60         beq     fintq2
61         ldrb    r1, [r6, r5] @ on recupere octet courant
62         bl     EcrZdecim8    @ qui est imprime
63         mov     r1, #'_'
64         bl     EcrCar        @ en le separant du suivant par un espace
65         add     r5, r5, #1    @ octet suivant
66         b      tantque2
67
68 fintq2:
69         bl     AlaLigne
70         pop {r1}    @ restauration temporaires
71         pop {r5}
72         pop {r6}
73         pop {r7}
74         pop {lr}    @ restauration adresse de retour
75         bx lr      @ retour appelant

```

Quatrième partie

Annexes

Chapitre 1

Annexe I : Codage ASCII des caractères

Dec	Hex	Char	Dec	Hex	Char	Dec	Hex	Char	Dec	Hex	Char
0	00	NUL	32	20	SPACE	64	40	@	96	60	‘
1	01	SOH	33	21	!	65	41	A	97	61	a
2	02	STX	34	22	”	66	42	B	98	62	b
3	03	ETX	35	23	#	67	43	C	99	63	c
4	04	EOT	36	24	\$	68	44	D	100	64	d
5	05	ENQ	37	25	%	69	45	E	101	65	e
6	06	ACK	38	26	&	70	46	F	102	66	f
7	07	BEL	39	27	,	71	47	G	103	67	g
8	08	BS	40	28	(	72	48	H	104	68	h
9	09	HT	41	29	)	73	49	I	105	69	i
10	0A	LF	42	2A	*	74	4A	J	106	6A	j
11	0B	VT	43	2B	+	75	4B	K	107	6B	k
12	0C	FF	44	2C	,	76	4C	L	108	6C	l
13	0D	CR	45	2D	-	77	4D	M	109	6D	m
14	0E	SO	46	2E	.	78	4E	N	110	6E	n
15	0F	SI	47	2F	/	79	4F	O	111	6F	o
16	10	DLE	48	30	0	80	50	P	112	70	p
17	11	DC1	49	31	1	81	51	Q	113	71	q
18	12	DC2	50	32	2	82	52	R	114	72	r
19	13	DC3	51	33	3	83	53	S	115	73	s
20	14	DC4	52	34	4	84	54	T	116	74	t
21	15	NAK	53	35	5	85	55	U	117	75	u
22	16	SYN	54	36	6	86	56	V	118	76	v
23	17	ETB	55	37	7	87	57	W	119	77	w
24	18	CAN	56	38	8	88	58	X	120	78	x
25	19	EM	57	39	9	89	59	Y	121	79	y
26	1A	SUB	58	3A	:	90	5A	Z	122	7A	z
27	1B	ESC	59	3B	;	91	5B	[	123	7B	{
28	1C	FS	60	3C	<	92	5C	\	124	7C	|
29	1D	GS	61	3D	=	93	5D	]	125	7D	}
30	1E	RS	62	3E	>	94	5E	^	126	7E	~
31	1F	US	63	3F	?	95	5F	-	127	7F	DEL

Chapitre 2

Annexe II : Entiers en base 2, types C

La figure 2.1 illustre les représentations d'entiers naturels et signés pour une taille de mot de 4 bits. A chaque entier peut être associé un angle. Effectuer une addition revient à ajouter les angles correspondant. Un débordement de produit au-delà d'un demi-tour en arithmétique signée ou d'un tour complet en arithmétique naturelle.

n				2 ⁿ		
décimal	hexa	octal	binaire	décimal	hexa	commentaire
0	0	00	0000	1	1	
1	1	01	0001	2	2	
2	2	02	0010	4	4	
3	3	03	0011	8	8	
4	4	04	0100	16	10	un quartet = un chiffre hexa
5	5	05	0101	32	20	
6	6	06	0110	64	40	
7	7	07	0111	128	80	
8	8	10	1000	256	100	un octet = deux chiffres hexa
9	9	11	1001	512	200	
10	A	12	1010	1024	400	1K _b
11	B	13	1011	2048	800	2K _b
12	C	14	1100	4096	1000	4K _b
13	D	15	1101	8192	2000	8K _b
14	E	16	1110	16384	4000	16K _b
15	F	17	1111	32768	8000	32K _b
16	10	20	10000	65536	10000	64K _b
20	14	24	10100	1048576	100000	1M _b = 1K _b ² = 5 chiffres
30	1E	36	11110	~1.07 × 10 ⁹	40000000	1G _b = 1K _b ³

Les tableaux ci-dessus et ci-dessous récapitulent les principales puissances de 2 utiles, avec leur représentation en hexadécimal et les puissances de 10 approchées correspondantes, ainsi que les types C entiers de taille précise (utiliser la taille en octets pour les réservations de mémoire et les alignements).

types d'entier relatif		taille		types d'entier naturel	
synonyme sur ARM 32 bits	type	bits	octets : sizeof(type)	type	synonyme sur ARM 32 bits
char	int8_t	8	1	uint8_t	unsigned char
short	int16_t	16	2	uint16_t	unsigned short
int	int32_t	32	4	uint32_t	unsigned int

Chapitre 3

Annexe III : fonction de multiplication

Voici une réalisation possible raisonnablement efficace de la fonction de multiplication :

```
1 @ Algorithme de multiplication par addition et decalage
2 @ Principe : pour chaque bit i de a valant 1, ajouter b << i
3 @ unsigned int mult (unsigned int a, unsigned int b) {
4 @     unsigned int resultat=0;
5 @     while (a != 0) {
6 @         if ((a & 1) != 0) { // ajouter b si a_0 == 1
7 @             resultat = resultat + b; }
8 @         b = b << 1; a = a >> 1; }
9 @     return resultat; }
10
11 @ Convention appel :
12 @ en entree, a : r0 ; b : r1 ; parametre temporaire, resultat : r2;
13 @ valeur retour : r0 (attention le r0 en entree est ecrase)
14     .text
15     .global    mult
16 mult:
17     stmfd sp!, {r1,r2}
18     mov     r2,#0
19     b       ctq
20 tq:  tst     r0,#1           @ (a&1)
21     addne   r2,r2,r1         @ ajouter b si a_0 == 1
22     mov     r1,r1, LSL #1
23     mov     r0,r0, LSR #1
24 ctq:  cmp     r0,#0
25     bne     tq
26     mov     r0,r2           @ return resultat
27     ldmdfd sp!,{r1,r2}
28     bx      lr
```

Chapitre 4

Annexe IV : Spécification des fonctions d'entrée/sortie définies dans es.s

```
1 @ fichier es.s
2 @ fonctions entrees sorties
3
4 @ AlaLigne :
5 @   retour a la ligne
6
7 @ EcrCar :
8 @   ecriture caractère dont la valeur est dans r1
9
10 @ EcrChn :
11 @   ecriture de la chaine sans retour à la ligne avec adresse est dans r1
12
13 @ EcrChaine :
14 @   ecriture de la chaine avec adresse  dans r1
15
16 @ EcrHexa32 :
17 @   ecriture mot de 32 bits en hexadécimal
18 @   la valeur a afficher est dans r1
19
20 @ EcrZdecimalf32 :
21 @   ecriture en decimal entier relatif represente sur 32 bits
22 @   entier  dans r1
23
24 @ EcrZdecimal16 :
25 @   ecriture en decimal entier relatif represente sur 16 bits
26 @   entier  dans les 16 bits de poids faibles de r1
27
28 @ EcrZdecimal8 :
29 @   ecriture en decimal entier relatif represente sur 8 bits
30 @   entier dans les 8 bits de poids faibles de r1
31 @   attention : les bits 15 a 8 de r1 sont eventuellement modifies
32
33 @ EcrNdecimal32 :
34 @   ecriture en decimal entier naturel represente sur 32 bits
35 @   entier dans r1
36
37 @ EcrNdecimal16 :
38 @   ecriture en decimal entier naturel represente sur 16 bits
39 @   entier dans les 16 bits de poids faibles de r1
```

```
40|
41| @ EcrNdecimal8 :
42| @   ecriture en decimal entier naturel represente sur 8 bits
43| @   entier dans les 8 bits de poids faibles de r1
44| @   attention : les bits 15 a 8 de r1 sont mis a 0
45|
46| @ Lire32 :
47| @   lecture entier represente sur 32 bits
48| @   adresse entier doit etre donnee dans r1
49|
50| @ Lire16 :
51| @   lecture entier represente sur 16 bits
52| @   adresse de entier doit etre donnee dans r1
53|
54| @ Lire8 :
55| @   lecture entier represente sur 8 bits
56| @   adresse entier doit etre donnee dans r1
57|
58| @ LireCar :
59| @   lecture caractere tape au clavier
60| @   adresse caractere (code en ascii) doit etre donnee dans r1
```