

Architectures des ordinateurs (une introduction)

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Bibliographie

- *Architectures logicielles et matérielles*, Amblard, Fernandez, Lagnier, Maraninchi, Sicard, Waille, Dunod 2000
- *Architecture des ordinateurs*, Cazes, Delacroix, Dunod 2003.
- *Computer Organization and Design : The Hardware/Software Interface*, Patterson and Hennessy, Dunod 2003.
- *Processeurs ARM*, Jorda. DUNOD 2010.
- <https://im2ag-moodle.univ-grenoble-alpes.fr/course/view.php?id=336>
- <https://moodle.caseine.org/course/view.php?id=716>

Organisation

(1/2)

- **Cours** : bruno.ferres@univ-grenoble-alpes.fr & kevin.marquet@univ-grenoble-alpes.fr
- **TD et TDE**
 - INM-01 : augustin.bonnel@univ-grenoble-alpes.fr
 - INM-02 : denis.bouhineau@imag.fr (TD) & neven.villani@univ-grenoble-alpes.fr (TP);
 - INM-03 : denis.bouhineau@imag.fr;
 - INM-04 : gomezбай@univ-grenoble-alpes.fr;
 - MIN-01 : kevin.marquet@univ-grenoble-alpes.fr;
 - MIN-02 : david.rios.uga@gmail.com;
 - MIN-03 : david.rios.uga@gmail.com;
 - MIN-04 : bruno.ferres@univ-grenoble-alpes.fr;
 - MIN-Int : olivier.romane@univ-grenoble-alpes.fr.
- **Note** : 0.25 CC1 (partiel) + 0.25 CC2 (note de TP) + 0.5 examen
- **Partiel** : mi-mars
- **Examen** : mi-mai

Modèle de von Neumann : qu'est ce qu'un ordinateur ?

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Description du modèle de von Neumann

(2/5)

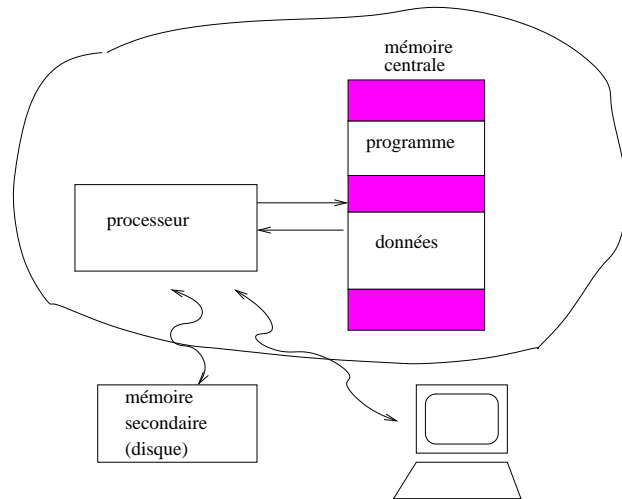


Figure – Processeur, mémoire et périphériques

Mémoire centrale (vision abstraite)

La mémoire contient des **informations** prises dans un certain domaine
 La mémoire contient un certain nombre (fini) d'**informations**
 Les informations sont **codées** par des vecteurs binaires d'une certaine taille

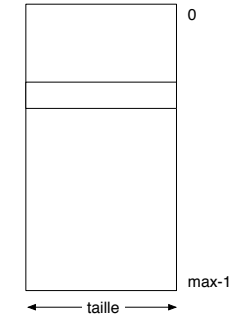


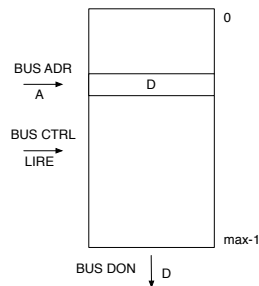
Figure – Mémoire abstraite

Actions sur la mémoire : LIRE

La mémoire reçoit :

- un vecteur binaire (représentant une adresse A) sur le bus adresses,
- un signal de commande de lecture sur le bus de contrôle.

Elle délivre un vecteur binaire représentant la donnée D sur le bus données.



On note : $D \leftarrow mem[A]$

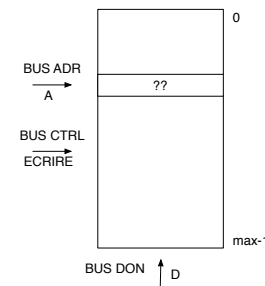
$mem[A]$: emplacement mémoire dont l'adresse est A

Actions sur la mémoire : ECRIRE

La mémoire reçoit :

- un vecteur binaire (représentant une adresse A) sur le bus adresses,
- un vecteur binaire (représentant la donnée D) sur le bus données,
- un signal de commande d'écriture sur le bus de contrôle.

Elle inscrit (*peut-être*, voir tableau ci-après) la donnée D comme contenu de l'emplacement mémoire dont l'adresse est A



On écrit : $mem[A] \leftarrow D$

Remarque : le bus de données est bidirectionnel

Résumé : processeur/mémoire

Processeur : circuit relié à la **mémoire** (bus adresses, données et contrôle)

La mémoire contient des informations de nature différentes :

- des données : représentation binaire d'une couleur, d'un entier, d'une date, etc.
- des instructions : représentation binaire d'une ou plusieurs actions à réaliser.

Le processeur, relié à une mémoire, peut :

- **lire** un mot : le processeur fournit une adresse, un signal de commande de lecture et reçoit le mot.
- **écrire** un mot : le processeur fournit une adresse ET une donnée et un signal de commande d'écriture.
- ne pas accéder à la mémoire.
- **exécuter** des instructions, ces instructions étant des informations lues en mémoire.

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA)	Modèle de von Neumann	15 décembre 2025	6
Introduction	Notion de modèle ○	La mémoire (centrale) ○○○●	Les E/S ○○●
Le processeur ○○			

Les bus

Un **bus** informatique désigne l'ensemble des lignes de communication (câbles, pistes de circuits imprimés, ...) connectant les différents composants d'un ordinateur.

- **Le bus de données** permet la circulation des données.
- **Le bus d'adresse** permet au processeur de **désigner à chaque instant la case mémoire ou le périphérique** auquel il veut faire appel.
- **Le bus de contrôle** indique quelle est l'**opération que le processeur veut exécuter**, par exemple, s'il veut faire une écriture ou une lecture dans une case mémoire.

On trouve également, dans le bus de contrôle, une ou plusieurs lignes qui permettent aux périphériques d'effectuer des demandes au processeur ; ces lignes sont appelées **lignes d'interruptions matérielles (IRQ)**.

Entrées/Sorties : définitions

On appelle **périphériques d'entrées/sortie** les composants qui permettent :

- L'interaction de l'ordinateur (mémoire et processeur) avec l'**utilisateur** (clavier, écran, ...)
- L'interaction de l'ordinateur avec le **réseau** (carte réseau, carte WIFI, ...)
- L'accès aux **mémoires secondaires** (disque dur, clé USB...)

L'accès aux périphériques se fait par le biais de **ports** (usb, serie, pci, ...).

Sortie : ordinateur → extérieur

Entrée : extérieur → ordinateur

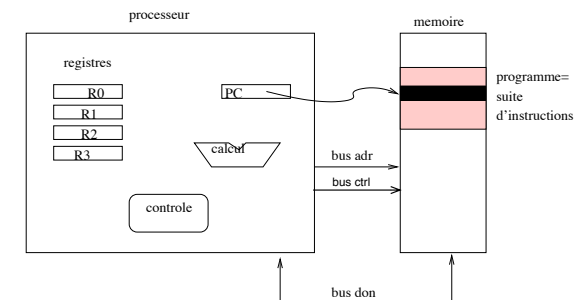
Entrée/Sortie : ordinateur ↔ extérieur

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA)	Modèle de von Neumann	15 décembre 2025	7
Introduction	Notion de modèle ○	La mémoire (centrale) ○○○●	Les E/S ○○●
Le processeur ○○●			

Composition du processeur

Le processeur est composé d'unités (ressources matérielles internes) :

- **des registres** : cases de mémoire interne
Caractéristiques : désignation, lecture et écriture "simultanées"
- **des unités de calcul (UAL)**
- **une unité de contrôle** : (UC, *Central Processing Unit*)
- **un compteur ordinal** ou **compteur programme** : PC



Codage des instructions : langage machine

- Représentation d'une instruction en mémoire : **un vecteur de bits**
- **Programme** : **suite de vecteurs binaires** qui codent les instructions qui doivent être exécutées.
- Le codage des instructions constitue le **Langage machine** (ou *code machine*).
- Chaque modèle de processeur a son propre langage machine (on dit que le langage machine est **natif**)

Codage des informations et représentation des nombres par des vecteurs binaires

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Exemples (3/3) : Code ASCII (Ensemble des caractères affichables)

ASCII = « American Standard Code for Information Interchange »

On obtient le tableau ci-dessous par la commande Unix `man ascii`

32	␣	33	!	34	"	35	#	36	\$	37	%	38	&	39	'
40	(	41	)	42	*	43	+	44	,	45	-	46	.	47	/
48	0	49	1	50	2	51	3	52	4	53	5	54	6	55	7
56	8	57	9	58	:	59	;	60	<	61	=	62	>	63	?
64	@	65	A	66	B	67	C	68	D	69	E	70	F	71	G
72	H	73	I	74	J	75	K	76	L	77	M	78	N	79	O
80	P	81	Q	82	R	83	S	84	T	85	U	86	V	87	W
88	X	89	Y	90	Z	91	[	92	\	93	]	94	^	95	_
96	`	97	a	98	b	99	c	100	d	101	e	102	f	103	g
104	h	105	i	106	j	107	k	108	l	109	m	110	n	111	o
112	p	113	q	114	r	115	s	116	t	117	u	118	v	119	w
120	x	121	y	122	z	123	{	124	|	125	}	126	~	127	del

`Code_ascii(9) = 113`; `Decode_ascii(51) = 3`.

Application en langage C

```
printf("%c", 'A' + 'b' - 'a');
printf("%c", 'A' + 3);
```

```
char c;
scanf("%c",&c);
if(c>='a' && c<='z') {
    printf("%c est une lettre minuscule",c);
}
```

'A'+'b'-'a' → affichage de la lettre B
'A'+3 → affichage de la lettre D
char c; → entier sur 5 bits
if (c>='a' && c<='z') → comparaison entier et code ascii

UTF-8

- Codage extensible, compatible avec ASCII
- Permet de représenter plus d'un million de caractères

Caractères codés	Représentation binaire UTF-8	Signification
U+0000 à U+007F	0xxxxxxx	1 octet codant 1 à 7 bits
U+0080 à U+07FF	110xxxxx 10xxxxxx	2 octets codant 8 à 11 bits
U+0800 à U+0FFF	11100000 10xxxxxx 10xxxxxx	3 octets codant 12 à 16 bits

Source wikipédia.

Conclusion sur le codage : Où est le code ?

- Le code n'est pas dans l'information codée.
Par exemple : 14 est :
 - le code du jaune dans le code des couleurs du PC ...
 - ou le code du couple (2,4) ...
 - ou le code du bleu pâle dans le code du commodore 64 ...
- Pour interpréter, comprendre une information codée il faut connaître la règle de codage.
Le code seul de l'information ne donne rien, c'est le système de traitement de l'information (logiciel ou matériel) qui « connaît » la règle de codage, sans elle il ne peut pas traiter l'information.

Produit cartésien : correspondance entre n-uplet et naturel (2/2)

	0	1	2	3	4
0	(0,0) 0	(0,1) 1	(0,2) 2	(0,3) 3	(0,4) 4
1	(1,0) 5	(1,1) 6	(1,2) 7	(1,3) 8	(1,4) 9
...	
3	(3,0) 15	(3,1) 16	(3,2) 17	(3,3) 18	(3,4) 19

2 formules à savoir :
COD_COUPLE4_5 (a, b) = a x 5 + b
DECOD_COUPLE4_5 (n) = (n div 5, n reste 5)
Remarque : Quelles seraient ces formules si nous avions numéroté à partir de 1 au lieu de 0 ?

Numération de position

En numération de position, avec N chiffres en base b on peut représenter les b^N naturels de l'intervalle [0, b^N-1]

Exemple : en base 10 avec 3 chiffres on peut représenter les 10³ naturels de l'intervalle [0, 999].

Avec N chiffres binaires (base 2) on peut écrire les 2^N naturels de l'intervalle [0, 2^N - 1]

Exercice : Enumérer les nombres représentables sur 3 chiffres binaires.

0	:	0	0	0
1	:	0	0	1
2	:	0	1	0
3	:	0	1	1
4	:	1	0	0
5	:	1	0	1
6	:	1	1	0
7	:	1	1	1

Quelques valeurs à connaître

X	2^X
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16
8	256
10	1 024 ($\approx 1\ 000$, 1 Kilo)
16	65 536
20	1 048 576 ($\approx 1\ 000\ 000$, 1 Méga)
30	1 073 741 824 ($\approx 1\ 000\ 000\ 000$, 1 Giga)
31	2 147 483 648
32	4 294 967 296

Logarithme et taille de donnée (1/2)

On ne s'intéresse qu'à la base 2 : un chiffre binaire est appelé **bit**.

Logarithme : opération réciproque de l'élévation à la puissance

Si $Y = 2^X$, on a $X = \log_2 Y$

Pour représenter en base 2, K naturels différents

\hookrightarrow il faut $\lceil \log_2 K \rceil$ chiffres en base 2

- si K est une puissance de 2 ($K = 2^N$), il faut N bits.
- si K n'est pas une puissance de 2, soit P la plus petite puissance de 2 telle que $P > K$, il faut $\log_2 P$ bits.

Conversion base 10 vers base 2 : Troisième méthode

169	|	1	(169 = 84 × 2 + 1)
84	|	0	(84 = 42 × 2 + 0)
42	|	0	(42 = 21 × 2 + 0)
21	|	1	
10	|	0	
5	|	1	
2	|	0	
1	|	1	
0	|		

On a ainsi $169_{10} = 10101001_2$

Conversion base 2 vers base 10

Soit $a_{n-1}a_{n-2} \dots a_1a_0$ un nombre entier en base 2

En utilisant les puissances de 2 :

2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
128	64	32	16	8	4	2	1

$(a_{n-1}a_{n-2} \dots a_1a_0)_2$ vaut $(a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0)_{10}$

Exemple

1010 vaut $1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0$
 $= 2^3 + 2^1$
 $= 8 + 2 = 10$

Complément à deux sur 8 bits : tous les entiers relatifs

entier relatif	Code(base10)	CodeC2(base2)
-128	128	1000 0000
-127	129	1000 0001
-126	130	1000 0010
...		
-1	255	1111 1111
0	0	0000 0000
1	1	0000 0001
2	2	0000 0010
...		
12	12	0000 1100
...		
127	127	0111 1111

Représentation des relatifs, solution : Complément à deux

Sur n bits, en choisissant 00...000 pour le codage de zéro, il reste $2^n - 1$ possibilités de codage : la moitié pour les positifs, la moitié pour les négatifs.

Attention, ce n'est pas un nombre pair, l'intervalle des entiers relatifs codés ne sera pas symétrique.

Principe :

- Les entiers positifs sont codés par leur code en base 2
- Les entiers négatifs sont codés de façon à ce que $\text{code}(a) + \text{code}(-a) = 0$

D'où sur 8 bits, intervalle représenté $[-128, +127] = [-2^7, 2^7 - 1]$

- $x \geq 0 \quad x \in [0, +127] : \text{CodeC2}(x)=x$
- $x < 0 \quad x \in [-128, -1] : \text{CodeC2}(x)=x+256 = x+2^8$
(x étant négatif et ≥ -128 , $x+2^8$ est « codable » sur 8 bits)
($x+2^8 > 127$, donc pas d'ambiguïté)

$\text{CodeC2}(a)+\text{CodeC2}(-a) = a-a+2^8 = 0$ (sur 8 bits)

Complément à deux : trouver le code d'un entier négatif

Soit un entier relatif positif a codé par les n chiffres binaires :

$(a_{n-1}a_{n-2} \dots a_1a_0)_2$

valeur(-a) = $2^n - \text{valeur}(a)$
= $2^n - (a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12 + a_0)$
= $(2^{n-1} + 2^{n-1}) - (a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12 + a_0)$
= $(1 - a_{n-1})2^{n-1} + 2^{n-1} - (a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12 + a_0)$
=
= $(1 - a_{n-1})2^{n-1} + (1 - a_{n-2})2^{n-2} + \dots + (1 - a_0) + 1$

Règle pour un entier négatif

- 1 écrire le code de la valeur absolue
- 2 inverser tous les bits
- 3 ajouter 1

Complément à deux : autre version

Comment retrouver l'opposé d'un entier A ?

- ① prendre $A = a_{n-1}a_{n-2}\dots a_1a_0$
- ② remarquer que

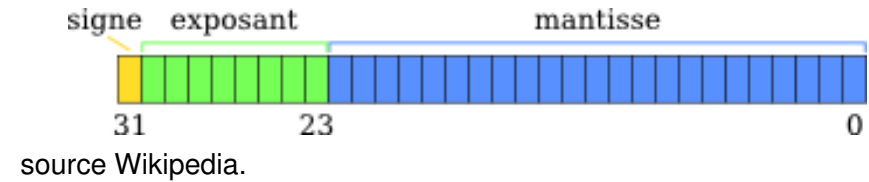
$$A + \bar{A} = 11\dots 11 = -1$$

- ③ en déduire que

$$-A = \bar{A} + 1$$

Les nombres à virgule flottante

(1/2)



Les nombres à virgule flottante

(2/2)

- Norme IEEE 754
- Codage par champ (exemple sur 32 bits) :
Signe (1 bit), Exposant (8 bits), Mantisse (23 Bits)
- Valeur = $(-1)^{\text{signe}} * 1, \text{Mantisse} * 2^{\text{Exposant}-127}$
- Exceptions : 0, +Infini, -Infini, NaN, nombres proches de 0 ...
- Intervalle : $[-3.4 \cdot 10^{38}; 3.4 \cdot 10^{38}]$
avec la moitié des nombres entre $[-2; 2]$

Indicateurs

	naturel	relatif
débordement addition	$C = 1$	$V = 1$
débordement soustraction	$C = 0$	$V = 1$

2 autres indicateurs (flags) :

- **N** : bit de signe (1 si négatif)
- **Z** : test si nulle ($Z = 1$ si nulle)

Les indicateurs permettent aussi d'évaluer les conditions ($<$, $>$, \leq , \geq , $=$, \neq).

Pour évaluer une condition entre A et B , le processeur positionne les indicateurs en fonction du résultat de $A - B$.

Exemple : Supposons que A et B sont des entiers naturels. Alors, $A - B$ provoque un débordement (c'est-à-dire, $C = 0$) si et seulement si $A < B$.

Table d'addition (3 bits)

Récapitulatif : Pour 3 bits,

- il y a 8 vecteurs de bits possibles,
- comme entiers naturels : 0 ... 7,
- comme entiers relatifs : -4 ... 3,
- mais une seule addition.

+	000	001	010	011	100	101	110	111
000								
001								
010								
011								
100								
101								
110								
111								

+	000	001	010	011	100	101	110	111
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Table d'addition (3 bits, naturels)

Récapitulatif :

Pour 3 bits et les entiers naturels :

- il y a 8 entiers naturels : 0 ... 7,
- et l'addition suivante

+	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	4	5	6	7	0
2	2	3	4	5	6	7	0	1
3	3	4	5	6	7	0	1	2
4	4	5	6	7	0	1	2	3
5	5	6	7	0	1	2	3	4
6	6	7	0	1	2	3	4	5
7	7	0	1	2	3	4	5	6

Question

À votre avis : Pour 3 bits,

- A) il n'y a pas d'erreur d'addition ni pour les naturels ni les relatifs
- B) il y a autant d'erreurs d'addition pour les naturels que pour les relatifs
- C) il y a plus d'erreurs d'addition pour les naturels que pour les relatifs
- D) il y a moins d'erreurs d'addition pour les naturels que pour les relatifs

Table d'addition (3 bits, relatifs)

Récapitulatif :

Pour 3 bits et les entiers relatifs codés en complément à 2 :

- il y a 8 entiers relatifs : -4 ... 3,
- et l'addition suivante

+	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
-4	0	1	2	3	-4	-3	-2	-1
-3	1	2	3	-4	-3	-2	-1	0
-2	2	3	-4	-3	-2	-1	0	1
-1	3	-4	-3	-2	-1	0	1	2
0	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3
1	-3	-2	-1	0	1	2	3	-4
2	-2	-1	0	1	2	3	-4	-3
3	-1	0	1	2	3	-4	-3	-2

Equations

Question : d'après ce qui précède, vous sauriez résoudre les équations suivantes (sur 3 bits) ?

$$x + x = 0$$

$$y + y = 1$$

$$z + z = 2$$

$$a + a = -2$$

Langage d'assemblage, langage machine

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025

Equations

Question : d'après ce qui précède, vous sauriez résoudre les équations suivantes (sur 3 bits) ?

$$x + x = 0$$

Réponse : 2 solutions, 000+000 et 100+100

$$y + y = 1$$

Réponse : pas de solution

$$z + z = 2$$

Réponse : 2 solutions, 001+001 et 101+101

$$a + a = -2$$

Réponse : 2 solutions (seulement C2), 011+011 et 111+111

Etapas de compilation

- **Précompilation :** `arm-eabi-gcc -E monprog.c > monprog.i`
source : `monprog.c` → source « enrichi » `monprog.i`
- **Compilation :** `arm-eabi-gcc -S monprog.i`
source « enrichi » → langage d'assemblage : `monprog.s`
- **Assemblage :** `arm-eabi-gcc -c monprog.s`
langage d'assemblage → binaire translatable : `monprog.o` (fichier objet)
même processus pour `malib.c` → `malib.o`
- **Edition de liens :** `arm-eabi-gcc monprog.o malib.o -o monprog`
un ou plusieurs fichiers objets → binaire exécutable : `monprog`

Vie d'un programme ●○○○	Les langages	Lang. machine ○○○	Lang. asm ○	Mode d'adressage ○○○○○○○	Adresses ○○○
----------------------------	--------------	----------------------	----------------	-----------------------------	-----------------

Précompilation (*pre-processing*) (1/2)

```
arm-eabi-gcc -E monprog.c > monprog.i
```

produit **monprog.i**

La **précompilation** réalise plusieurs opérations de substitution sur le code, notamment :

- suppression des commentaires.
- inclusion des profils des fonctions des bibliothèques dans le fichier source.
- traitement des directives de compilation.
- remplacement des macros

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA)	Langage d'assemblage, langage machine	15 décembre 2025	3
----------------------------------	---------------------------------------	------------------	---

Vie d'un programme ○○○●	Les langages	Lang. machine ○○○	Lang. asm ○	Mode d'adressage ○○○○○○○	Adresses ○○○
----------------------------	--------------	----------------------	----------------	-----------------------------	-----------------

Assemblage (1/2)

```
arm-eabi-gcc -c monprog.s
```

produit **monprog.o**

Le code en langage d'assemblage (lisible) est transformé en **code machine**.

Le code machine se présente comme une succession de vecteurs binaires.

Le code machine ne peut pas être directement édité et lu. On peut le rendre lisible en utilisant une commande `od -t x4z monprog.o`.

Le fichier `monprog.o` contient des instructions en langage machine et des données mais il n'est pas **exécutable**.

↪ On parle de binaire **translatable**.

Vie d'un programme ○○●○	Les langages	Lang. machine ○○○	Lang. asm ○	Mode d'adressage ○○○○○○○	Adresses ○○○
----------------------------	--------------	----------------------	----------------	-----------------------------	-----------------

Compilation (1/2)

```
arm-eabi-gcc -S monprog.i
```

produit **monprog.s**

Le code source « enrichi » est transformé en langage d'assemblage (lisible)

↪ il contient des **instructions** et des **données**.

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA)	Langage d'assemblage, langage machine	15 décembre 2025	4
----------------------------------	---------------------------------------	------------------	---

Vie d'un programme ○○○●	Les langages	Lang. machine ○○○	Lang. asm ○	Mode d'adressage ○○○○○○○	Adresses ○○○
----------------------------	--------------	----------------------	----------------	-----------------------------	-----------------

Edition de liens (1/2)

```
arm-eabi-gcc monprog.o malib.o -o monprog
```

produit **monprog**

L'édition de liens permet de rassembler le code de différents fichiers.

À l'issue de cette phase le fichier produit contient du **binaire exécutable**.

Remarque : ne pas confondre **exécutable**, lié à la nature du fichier, et « muni du droit d'être exécuté », lié au système d'exploitation.

Instruction de calcul entre des informations mémorisées

L'instruction désigne la(les) **source(s)** et le **destinataire**. Les *sources* sont des cases mémoires, registres ou des valeurs. Le *destinataire* est un élément de mémorisation.

L'instruction code : destinataire, source1, source2 et l'opération.

désignation du destinataire	←	désignation de source1	oper	désignation de source2
mém, reg		mém, reg		mém, reg, valIMM

mém signifie que l'instruction fait référence à un mot dans la mémoire

reg signifie que l'instruction fait référence à un registre (nom ou numéro)

valIMM signifie que l'information source est contenue dans l'instruction

Exemples

- $\text{reg12} \leftarrow \text{reg14} + \text{reg1}$
- $\text{registre4} \leftarrow \text{le mot mémoire d'adresse 36000} + \text{le registre A}$
- $\text{reg5} \leftarrow \text{reg5} - 1$
- $\text{le mot mémoire d'adresse 564} \leftarrow \text{registre7}$

Convention de noms

mov, ldr, str, add, sub, and, orr

Instruction de rupture de séquence

- **Fonctionnement standard** : Une instruction est écrite à l'adresse X ; l'instruction suivante (dans le temps) est l'instruction écrite à l'adresse $X+t$ (où t est la taille de l'instruction). C'est implicite pour toutes les instructions de calcul.
- **Rupture de séquence** : Une instruction de *rupture de séquence* peut désigner la prochaine instruction à exécuter (à une autre adresse).

Exemples

- Branch #125 : l'instruction suivante est désignée par une **adresse < fixe >**.
- Branch -40 : l'instruction suivante est une **adresse calculée**.
- Branch SiZero +10 : si le résultat du calcul précédent est ZERO, alors la prochaine instruction à exécuter est celle d'adresse « adresse courante+10 », sinon la prochaine instruction à exécuter est la suivante dans l'ordre d'écriture, c'est-à-dire à l'adresse « adresse courante » + t .

Exemples

En ARM :

- **add r4, r5, r6** signifie $r4 \leftarrow r5 + r6$.
r5 désigne le contenu du registre, on parle bien sûr du **contenu** des registres, on n'ajoute pas des ressources physiques !

En X86 (Intel) :

- **add eax, 10** signifie $eax \leftarrow eax + 10$.

En 6800 ou 68000 (Motorola) :

- **addA 5000** signifie $regA \leftarrow regA + Mem[5000]$
- **MOVE.W #500,D0** signifie $regD0 \leftarrow 500$

Remarque : pas de règle générale, interprétations différentes selon les fabricants, quelques habitudes cependant concernant les mnémoniques (add, sub, load, store, jump, branch, clear, inc, dec) ou la notation des opérandes (#, [xxx])

Désignation des objets : par registre

(2/7)

Désignation registre/registre.

L'objet désigné (une donnée) est le contenu d'un registre. L'instruction contient le nom ou le numéro du registre.

- **En 6502 (MOS Technology)** : 2 registres A et X (entre autres)
TAX signifie transfert de A dans X
 $X \leftarrow \text{contenu de A (on écrira } X \leftarrow A)$.
- **ARM** : **mov r4, r5** signifie $r4 \leftarrow r5$.

Désignation des objets

(1/7)

On parle parfois, improprement, de **modes d'adressage**. Il s'agit de dire comment on écrit, par exemple, la valeur contenue dans le registre numéro 5, la valeur -8, la valeur rangée dans la mémoire à l'adresse 0xff, ...

Il n'y a pas de **standard de notations**, mais des **standards de signification** d'un constructeur à l'autre.

L'**objet** désigné peut être **une instruction** ou **une donnée**.

Désignation des objets : immédiate

(3/7)

Désignation registre/valeur immédiate.

La donnée dont on parle est littéralement **écrite dans l'instruction**

- **En ARM** : **mov r4, #5** ; signifie $r4 \leftarrow 5$.

Remarque : la valeur immédiate qui peut être codée dépend de la place disponible dans le codage de l'instruction.

Désignation des objets : directe ou absolue (4/7)

Désignations registre/directe ou absolue.

On donne dans l'instruction l'adresse de l'objet désigné. L'objet désigné peut être une instruction ou une donnée.

- **En 68000 (Motorola) :** `move.l D3, $FF9002` signifie $\text{Mem}[\text{FF9002}] \leftarrow \text{D3}$.
la deuxième opérande (ici une donnée) est désigné par son adresse en mémoire.
- **En SPARC :** `jump 0x2000` signifie l'instruction suivante (qui est l'instruction que l'on veut désigner) est celle d'adresse 0x2000.

Désignation des objets : indirect par registre & déplacement (6/7)

Désignation registre/indirect par registre et déplacement

L'adresse de l'objet désigné est obtenue en ajoutant le contenu d'un registre précisé dans l'instruction et d'une valeur (ou d'un autre registre) précisé aussi dans l'instruction.

- **En ARM :** `ldr r3, [r5, #4]` signifie $r3 \leftarrow \text{mem}[r5 + 4]$.
La notation `[r5, #4]` désigne le mot mémoire (une donnée ici) d'adresse $r5 + 4$.
- **En 6800 :** `jump [PC - 12]` = le registre est PC, le déplacement -12.
L'instruction suivante (qui est l'instruction que l'on veut désigner) est celle à l'adresse obtenue en calculant, au moment de l'exécution, $\text{PC} - 12$.

Désignation des objets : indirect par registre (5/7)

Désignation registre/indirect par registre

L'objet désigné est dans une case mémoire dont l'adresse est dans un registre précisé dans l'instruction.

- **En ARM :** `ldr r3, [r5]` signifie $r3 \leftarrow$ (le mot mémoire dont l'adresse est contenue dans le registre 5)
On note $r3 \leftarrow \text{mem}[r5]$.

Désignation des objets : relative au compteur programme (7/7)

Désignation relative au compteur programme

L'adresse de l'objet désigné (en général une instruction) est obtenue en ajoutant le contenu du compteur de programme et une valeur précisée aussi dans l'instruction.

En ARM : `b + 20` signifie $\text{pc} \leftarrow \text{pc} + 20$

Séparation données/instructions

Le texte du programme est organisé en **zones** (ou **segments**) :

- **zone TEXT** : code, programme, instructions
- **zone DATA** : données initialisées
- **zone BSS** : données non initialisées, réservation de place en mémoire

On peut préciser où chaque zone doit être placée en mémoire : la directive **ORG** permet de donner l'adresse de début de la zone (ne fonctionne pas toujours!).

Etiquettes : exemple

(2/4)

```
zone TEXT
DD: move r4, #42
    load r5, [YY]
    jump DD
```

```
zone DATA
XX: entier sur 4 octets : 0x56F3A5E2
YY: entier sur 4 octets : 0xAAF43210
```

Etiquettes : définition

(1/4)

Etiquette : nom choisi librement (quelques règles lexicales quand même) qui désigne une case mémoire. Cette case peut contenir une donnée ou une instruction.

Une **étiquette** correspond à une **adresse**.

Pourquoi ?

- L'emplacement des programmes et des données n'est à priori pas connu
la directive ORG ne peut pas toujours être utilisée
- Plus facile à manipuler

Etiquettes : correspondance étiquette/adresse

(4/4)

Supposons les adresses de début des zones TEXT et DATA respectivement 2000 et 5000

Il faut remplacer DD par 2000 et YY par 5004.

```
zone TEXT                                contenu de Mem[2000], ...
DD: move r4, #42                        move r4, #42
    load r5, [YY]                        load r5, [5004]
    jump DD                              jump 2000
```

```
zone DATA
XX: entier sur 4 octets : 0x56F3A5E2
YY: entier sur 4 octets : 0xAAF43210
```

Programmation des structures de contrôles

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Différents types de séquençement

- initialisation ou lancement d'un programme
- séquençement « normal »
- rupture de séquence inconditionnelle
- rupture de séquence conditionnelle
- appels et retours de procédure/fonction
- interruptions
- exécution « parallèle »

Exécution séquentielle vs. rupture de séquence : rôle du PC

registre *PC* : Compteur de programme, repère l'instruction à exécuter

A chaque cycle :

- 1 *bus d'adresse* $\leftarrow PC$; *bus de contrôle* \leftarrow lecture
- 2 *bus de donnée* $\leftarrow \text{Mem}[PC] = \text{instruction courante}$
- 3 Décodage et exécution
- 4 Mise à jour de *PC* (par défaut, incrémentation)

Les instructions sont exécutées séquentiellement
sauf **ruptures de séquence !**

Séquençement

(2/7)

Séquençement « normal »

Après chaque instruction le registre *PC* est incrémenté.

Si l'instruction est codée sur *k* octets : $PC \leftarrow PC + k$

Cela dépend des processeurs, des instructions et de la taille des mots.

- En **ARM**, toutes les instructions sont codées sur 4 octets. Les adresses sont des adresses d'octets. **PC progresse de 4 en 4**
- Sur certaines machines (ex. Intel), les instructions sont de longueur variable (1, 2 ou 3 octets). **PC prend successivement les adresses des différents octets de l'instruction**

Codage des structures de contrôle : exemples traités

- I1; **si** ExpCondSimple **alors** {I2; I3; I4;} I5;
- I1; **si** ExpCondSimple **alors** {I2; I3;} **sinon** {I4; I5; I6;} I7;
- I1; **tant que** ExpCond **faire** {I2; I3;} I4;
- I1; **répéter** {I2; I3;} **jusqu'à** ExpCond; I4;
- I1; **pour** (i←0 à N) {I2; I3; I4;} I5;
- **si** C1 **ou** C2 **ou** C3 **alors** {I1;I2;} **sinon** {I3;} I4;
- **si** C1 **et** C2 **et** C3 **alors** {I1;I2;} **sinon** {I3;} I4;
- **selon** a,b
 - a<b : I1;
 - a=b : I2;
 - a>b : I3;

Une première solution

```

I1
si a=b alors {I2; I3; I4}
I5

      I1
      calcul de a-b + positionnement de ZNCV
      branch si (egal a 0) a etiq_alors
      branch a etiq_suite
etiq_alors: I2
           I3
           I4
etiq_suite: I5

```

Instruction *Si* « simple »

```

I1
si a=b alors {I2; I3; I4}
I5

```

a et b deux entiers dont les valeurs sont rangées respectivement dans les registres r1 et r2.

Codage en ARM

```

x←0; a←5; b←6
si a=b alors {x←1;}
x←x+10;

a et b dans r0, r2, x dans r1
      mov r1, #0
      mov r0, #5
      mov r2, #6
      cmp r0,r2      @ ou subs r3, r0, r2
      beq alors      @ égal à 0
      b finsi        @ always
alors:  mov r1, #1
finisi: add r1, r1, #10

```

Remarque : égal à 0 équivalent à Z

Une autre solution

```

I1
si a=b alors {I2; I3; I4}
I5
    I1
    calcul de a-b + positionnement de ZNCV
    branch si (non egal a 0) a etiq_suite
    I2
    I3
    I4
    etiq_suite: I5
    
```

Question

Combien d'instructions nécessaires pour la traduction de
 $a \leftarrow 5; b \leftarrow 6; \text{ si } a=b \text{ alors } \{x \leftarrow 1;\} \text{ sinon } \{x \leftarrow 0;\}$
 a et b dans r0, r2, x dans r1
 traduction avec respect de l'ordre alors/sinon (condition opposée).

- A) 5 instructions
- B) 6 instructions
- C) 7 instructions
- D) 10 instructions

Instruction *Si alors sinon* : Une solution

```

I1
si ExpCond alors {I2; I3} sinon {I4; I5; I6}
I7;

    I1
    evaluer ExpCond + ZNCV
    branch si faux a etiq_sinon
    I2
    I3
    branch etiq_finsi
    etiq_sinon: I4
    I5
    I6
    etiq_finsi: I7
    
```

Codage en ARM

Traduction :

```

a ← 5; b ← 6; si a=b alors {x ← 1;} sinon {x ← 0;}
a et b dans r0, r2, x dans r1
    mov r0, #5
    mov r2, #6
    cmp r0, r2
    bne sinon
    mov r1, #1    @ alors
    b finisi
    sinon: mov r1, #0
    finisi:
    
```

Question

Combien d'instructions nécessaires pour la traduction de
 $a \leftarrow 5; b \leftarrow 6; \text{ si } a=b \text{ alors } \{x \leftarrow 1;\} \text{ sinon } \{x \leftarrow 0;\}$
 a et b dans r0, r2, x dans r1
 traduction avec respect de l'ordre alors/sinon (condition opposée).

- A) 5 instructions
- B) 6 instructions
- C) 7 instructions
- D) 10 instructions

Réponse attendue : C) 7 instructions (et une étiquette)

Exécution

```

l.0      mov r0, #5
l.1      mov r2, #6
l.2      cmp r0,r2
l.3      bne sinon
l.4 alors: mov r1, #1
l.5      b finisi
l.6 sinon: mov r1, #0
l.7 finisi: nop
    
```

Ligne	r0	r2	?= ?	r1	proch Ligne
-1	?	?	?	?	0
0	5	?	?	?	1
1		6	?	?	2
2			faux	?	3
3				?	6
6				0	7
7					

Question

Combien d'instructions effectuées lors de l'exécution de
 $a \leftarrow 5; b \leftarrow 6; \text{ si } a=b \text{ alors } \{x \leftarrow 1;\} \text{ sinon } \{x \leftarrow 0;\}$
 a et b dans r0, r2, x dans r1
 traduction avec respect de l'ordre alors/sinon (condition opposée).

- A) 5 instructions
- B) 6 instructions
- C) 7 instructions
- D) 10 instructions

Réponse attendue : A) 5 instructions

Question

Combien d'instructions effectuées lors de l'exécution de
 $a \leftarrow 5; b \leftarrow 6; \text{ si } a=b \text{ alors } \{x \leftarrow 1;\} \text{ sinon } \{x \leftarrow 0;\}$
 a et b dans r0, r2, x dans r1
 traduction avec respect de l'ordre alors/sinon (condition opposée).

- A) 5 instructions
- B) 6 instructions
- C) 7 instructions
- D) 10 instructions

Une autre solution

```

I1
si ExpCond alors {I2; I3;} sinon {I4; I5; I6;}
I7;

      I1
      evaluer ExpCond + ZNCV
      branch si vrai a etiq_alors
      I4
      I5
      I6
      branch etiq_finsi
etiq_alors: I2
          I3
etiq_finsi: I7
    
```

Codage en ARM

```

a←0; b←5; tant que a<b faire {x←a; a←a+1;} ; x←b;
a, b dans r0, r2, x dans r1
      mov r0, #0
      mov r2, #5
tq:    cmp r0,r2
      bge fintq @ ou bhs
      mov r1,r0 @ corps de boucle
      add r0,r0,#1
      b tq
fintq: mov r1,r2
    
```

Une première solution

```

I1
tant que ExpCond faire {I2; I3;}
I4;

      I1
debut: evaluer ExpCond + ZNCV
      branch si faux fintq
      I2
      I3
      branch debut
fintq: I4
    
```

Question

(1/2)

Quelles seront les valeurs prises par r0 ?

- A) 0, 1, 2, 3, 4
- B) 0, 1, 2, 3, 4, 5
- C) 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6

Exécution (1/2)

```
l.0      mov r0, #0
l.1      mov r2, #5
l.2 tq:  cmp r0,r2
l.3      bge fintq
l.4      mov r1,r0
l.5      add r0,r0,#1
l.6      b tq
l.7 fintq: mov r1,r2
```

Ligne	r0	r2	?>= ?	r1	proch Ligne
-1	?	?	?	?	0
0	0	?	?	?	1
1		5	?	?	2
2			faux	?	3
3				?	4
4				0	5
5	1				6
6					2
2			faux		3
3					4
4				1	5
5	2				6
6					2
...					

Question (1/2)

Quelles seront les valeurs prises par r0 ?

- A) 0, 1, 2, 3, 4
- B) 0, 1, 2, 3, 4, 5
- C) 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6

Réponse attendue : B) 0, 1, 2, 3, 4, 5

Exécution (2/2)

```
l.0      mov r0, #0
l.1      mov r2, #5
l.2 tq:  cmp r0,r2
l.3      bge fintq
l.4      mov r1,r0
l.5      add r0,r0,#1
l.6      b tq
l.7 fintq: mov r1,r2
```

Ligne	r0	r2	?>= ?	r1	proch Ligne
...	3				5
5	4				6
6					2
2			faux		3
3					4
4				4	5
5	5				6
6					2
2			vrai		3
3					7
4				5	...

Question (2/2)

Combien d'instructions seront exécutées

- A) 20 ou moins
- B) entre 21 et 25
- C) entre 26 et 30
- D) 31 ou plus

Réponse attendue : C) entre 26 et 30

Une autre solution

```

I1
tant que ExpCond faire {I2; I3;}
I4;

      I1
      branch etiqcond
debutbcle: I2
      I3
etiqcond:  evaluer ExpCond
          branch si vrai debutbcle
fintq:    I4
    
```

Exercice

Deux boucles imbriquées

```

pour (i=0 a N)
    pour (j=0 a K)
        I2;I3
    
```

Solution

```

I1
répéter {I2; I3;} jusqu'à ExpCond;
I4;

      I1
debutbcle: I2
      I3
      evaluer ExpCond
      branch si faux debutbcle
      I4
    
```

Observer les différences entre ce codage et la solution du tant que avec test à la fin.

Expression conditionnelle complexe avec des et : solution 1

```

si C1 et C2 et C3 alors { I1; I2 } sinon I3
    evaluer C1
    branch si faux etiq.sinon
    evaluer C2
    branch si faux etiq.sinon
    evaluer C3
    branch si faux etiq.sinon
etiq_alors: I1
            I2
            branch etiq_fin
etiq_sinon: I3
etiq_fin:
    
```

Expression conditionnelle complexe avec des *et* : solution 2

```

si C1 et C2 et C3 alors { I1; I2 } sinon I3
    evaluer C1
    branch si faux etiq.sinon
    evaluer C2
    branch si faux etiq.sinon
    evaluer C3
    branch si vrai etiq.alors
etiq.sinon: I3
            branch etiq.fin
etiq.alors: I1
            I2
etiq.fin:

```

Expression conditionnelle complexe avec des *ou* : Solution 1

```

si C1 ou C2 ou C3 alors { I1;I2 } sinon I3
    evaluer C1
    branch si vrai etiq.alors
    evaluer C2
    branch si vrai etiq.alors
    evaluer C3
    branch si faux etiq.sinon
etiq.alors: I1
            I2
            branch etiq.fin
etiq.sinon: I3
etiq.fin:

```

Expression conditionnelle complexe avec des *et*

```

si C1 et C2 et C3 alors { I1; I2 } sinon I3

```

Solution avec évaluation **complète** des conditions

- Evaluer chaque **Ci** dans un registre
- Utiliser l'instruction **AND** du processeur.

Expression conditionnelle complexe avec des *ou* : Solution 2

```

si C1 ou C2 ou C3 alors { I1;I2 } sinon I3
    evaluer C1
    branch si vrai etiq.alors
    evaluer C2
    branch si vrai etiq.alors
    evaluer C3
    branch si vrai etiq.alors
etiq.sinon: I3
            branch etiq.fin
etiq.alors: I1
            I2
etiq.fin:

```


Expression conditionnelle complexe avec des *ou*

si C1 ou C2 ou C3 alors { I1; I2 } sinon I3

Solution avec évaluation **complète** des conditions

- Evaluer chaque **Ci** dans un registre
- Utiliser l'instruction **ORR** du processeur.

Construction *selon*

```
selon a,b:
  a<b : I1
  a=b : I2
  a>b : I3
```

Une solution consiste à traduire en **si alors sinon**.

```
si a<b alors I1
sinon si a=b alors I2
      sinon si a>b alors I3
```

ARM offre (ou offrait) une autre possibilité

Solution

Instructions ARM conditionnelle.

Dans le codage d'une instruction, champ condition (bits 28 à 31).

Sémantique d'une instruction : si la condition est vraie, exécuter l'instruction sinon passer à l'instruction suivante.

```
selon a,b:          a dans r0, b dans r1, x dans r2
  a<b : x<-x+5      cmp r0,r1
  a=b : x<-x+1      addlt r2, r2, #5
  a>b : x<-x+9      addeq r2, r2, #1
                   addgt r2, r2, #9
```

Que se passe-t-il si on remplace le **addeq** par un **addeqs** ?

Enoncé : le nombre de 1

Traduisez l'algorithme suivant en ARM :

```
x, nb : entiers >= 0

nb<-0
tant que x<>0 faire
    si x mod 2 <> 0 alors nb<-nb+1
    x<-x div 2
fin tant que

afficher nb
```

Programmation des appels et retours de procédures simples

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Un exemple en langage de « haut niveau » (1/2)

```
int PP(int x) {
    int z, p;

    z = x + 1;
    p = z + 2;
    return p;}

int main() {
    int i, j, k;

    i = 0;
    j = i + 3;
    j = PP(i + 1);
    k = PP(2 * (i + 5));
    return 0;}
```

Analyse

- Le main, nommé **appelant** fait appel à la fonction PP, nommée **appelée**
- La fonction PP a un **paramètre** qui constitue une **donnée**, on parle de **paramètre formel**
- La fonction PP calcule une valeur de type entier, le **résultat de la fonction**
- Les variables **z** et **p** sont appelées **variables locales** à la fonction PP

Utilité - nécessité des fonctions et procédures

A quoi servent les fonctions et procédures :

- Structurer** le code (nommer un bloc d'instruction)
- Eviter de dupliquer du code
- Eviter les structures de contrôles imbriquées
- Permettre l'utilisation de variables **locales**
- Permettre la définition de bibliothèques
- Programmer avec de la **récurtivité**
- Préparer la programmation orientée objet

Rappel

En C, et dans beaucoup de langage, tout ou presque est fonction.
Il n'y a pas de script C (*i.e.*, code hors fonction).
Par contre, il peut y avoir des variables globales (!)

Un exemple en langage de « haut niveau » (2/2)

```
int PP(int x) {
    int z, p;

    z = x + 1;
    p = z + 2;
    return p;}

int main() {
    int i, j, k;

    i = 0;
    j = i + 3;
    j = PP(i + 1);
    k = PP(2 * (i + 5));
    return 0;}
```

- Il y a deux **appels** à la fonction PP
- Lors de l'appel PP(i + 1), la valeur de l'expression i+1 est passée à la fonction, c'est le **paramètre effectif** que l'on appelle aussi **argument**
- Après l'appel le résultat de la fonction est rangé dans la variable **j** : j = PP(i+1)
- Le 1^{er} appel revient à exécuter le corps de la fonction en remplaçant x par i+1 ; le 2^{ème} appel consiste en l'exécution du corps de la fonction en remplaçant x par 2*(i+5)

Quelle convention d'appel choisir ?

Objectif du module

Prise en main de la convention utilisée par gcc :

- passage des arguments : \hookrightarrow les 4 premiers dans $r0$ à $r3$
 \hookrightarrow le reste par la pile
- valeur de retour : stockée dans $r0$
- gestion du contexte : certains registres sont sauvegardés par l'**appelant**, d'autres par l'**appelée** (voir la documentation technique dans le poly du cours)

Mais la convention de gcc manipule des **concepts complexes**...

- nous allons progressivement étudier différentes propositions de *conventions temporaires* (\mathcal{CT}_0 , \mathcal{CT}_1 , ...), et leurs limites
- pour aboutir à la convention utilisée par un compilateur récent.

Utilisation de registres

\mathcal{CT}_0

Chaque valeur représentée par **une variable ou un paramètre** doit être rangée quelque part en **mémoire** : mémoire centrale ou registres.

Dans un premier temps, utilisons **des registres**.

On fait un choix (pour l'instant complètement arbitraire) :

- i, j, k dans $r0, r1, r2$
- z dans $r3$, p dans $r4$
- la valeur x dans $r5$
- le **résultat** de la fonction dans $r6$
- si on a besoin d'un registre pour faire des calculs on utilisera $r7$ (**variable temporaire**)

Remarque :

Une fois, ces conventions fixées, on peut écrire le code de **la fonction indépendamment du code correspondant à l'appel**, mais cela demande beaucoup de registres.

Tentative de traduction en ARM

Ce qui précède fonctionne mais ce n'est pas la solution préconisée par ARM.

Nouvelle tentative de traduction en ARM : convention \mathcal{CT}_0

Code en langage d'assemblage

\mathcal{CT}_0

```
PP :    add r3, r5, #1    @ z ← x + 1
        add r4, r3, #2    @ p ← z + 2
        mov r6, r4        @ rendre p
        retourner

main :  mov r0, #0        @ i ← 0
        add r1, r0, #3    @ j ← i + 3
@ —Début-1er-appel—
        add r5, r0, #1    @ x ← i + 1
        appeler PP
        mov r1, r6        @ j ← ...
@ —Fin-1er-appel—
@ —Début-2ème-appel—
        add r7, r0, #5    @ r7 ← i + 5
        mov r5, r7, lsl #1 @ x ← 2 * r7
        appeler PP
        mov r2, r6        @ k ← ...
@ —Fin-2ème-appel—
```

Problème :

appeler et retourner ?

Quel est le problème ?

 \mathcal{CT}_0

Appel = branchement

instruction de rupture de séquence inconditionnelle (B) ?

MAIS Comment revenir ensuite ?

Le problème du retour : comment, à la fin de l'exécution du corps de la fonction, indiquer au processeur l'adresse à laquelle il doit se brancher ?

Point de vigilance : garantir le bon usage des registres.

Où est gardée cette adresse ?

 \mathcal{CT}_0

Dans le processeur **ARM**, l'instruction **BL** réalise un branchement inconditionnel avec **sauvegarde de l'adresse de retour** dans le registre nommé **lr** (*i.e.*, `r14`).

BL signifie *branch and link*

Attention : ne pas confondre BL et B

Attention : il ne faut pas modifier le registre `lr` pendant l'exécution de la fonction.

Adresse de retour

 \mathcal{CT}_0

Il existe une instruction de rupture de séquence **particulière** qui permet au processeur de **garder** l'adresse de l'instruction qui suit le branchement avant qu'il ne réalise le branchement, *i.e.*, avant qu'il ne transfère le contrôle.

Cette adresse est appelée **adresse de retour**.

On peut simuler cette instruction et la notion d'adresse de retour :

- Ajout d'une étiquette de retour (mais avec une utilisation très limitée, à un seul endroit d'appel/retour)
- Calcul de l'adresse de retour avant l'appel (mais attention : le PC avance au cours de l'exécution, PC vaut PC+8 à la fin de B)

L'instruction de rupture de séquence **particulière** recherchée est une facilité justifiée pour des raisons d'efficacité et de garantie de respect des conventions.

EcrNdecim32 dans `es.s`

Rappel procédures d'affichage (`es.s`) :

```
.global EcrNdecim32

@ EcrNdecim32 : ecriture en decimal de l'entier dans r1
EcrNdecim32 :
    mov ip, sp
    stmfd sp!, {r0, r1, r2, r3, fp, ip, lr, pc}
    sub fp, ip, #4
    ldr r0, LD_fe_na32
    bl printf
    ldmea fp, {r0, r1, r2, r3, fp, sp, pc}

LD_fe_na32 :
    .word fe_na32

fe_na32 :
    .asciz "%u"
```

(extrait de `es.s`)

Codage complet de l'exemple

\mathcal{CT}_0

```
PP :      add r3, r5, #1      @ z ← x + 1
          add r4, r3, #2      @ p ← z + 2
          mov r6, r4          @ rendre p
          bx lr               retour

main :    mov r0, #0          @ i ← 0
          add r1, r0, #3      @ j ← i + 3
@ —Début-1er-appel—
          add r5, r0, #1      @ x ← i + 1
          bl PP               appel
          mov r1, r6          @ j ← PP(x)
@ —Fin-1er-appel—
@ —Début-2eme-appel—
          add r7, r0, #5      @ r7 ← i + 5
          mov r5, r7, lsl #1  @ x ← 2 * r7
          bl PP               appel
          mov r2, r6          @ k ← PP(x)
@ —Fin-2eme-appel—
```

Exécution

\mathcal{CT}_0

	l.	r0	r1	r3	r4	r5	r6	lr	> l.
l.0 PP :	-1	?	?	?	?	?	?	?	4
l.1	4	0	?	?	?	?	?	?	5
l.2	5		3	?	?	?	?	?	6
l.3	6			?	?	1	?	?	7
l.4 main :	7			?	?		?	8	0
l.5	0			2	?		?		1
l.6	1				4		?		2
l.7	2						4		3
l.8	3								8
l.9	8		4						9
l.10	9								10
l.11	10					10			11
l.12	11							12	0
	...								

Conclusion

Un deuxième problème : fonctions récursives

(1/2)

Conclusions :

- Il est possible d’avoir un ensemble d’instructions géré comme un bloc indépendant sous certaines conditions très limitatives : un seul appel bl ma_proc, convention commune à l’appel, si main==appel, retour bx lr, ...)
- Pour s’affranchir de ces conditions :
 - Paramètres** : il faut une zone de stockage dynamique **commune** à l’appelant et à l’appelé. L’appelant y range les valeurs **avant** l’appel, et l’appelé y prend ces valeurs et les utilise
 - Variables locales** : il faut une zone de mémoire dynamique **privée** pour chaque procédure *appelée* pour y stocker ses variables locales : il ne faut pas que cette zone interfère les variables globales ou locales à l’appelant
 - Variables temporaires** : elles ne doivent pas interférer avec les autres variables
 - Généralisation** : il faut que la méthode choisie soit généralisable afin de pouvoir générer du code

Remarque : on a généralement peu de registre à notre disposition (16 en ARM, mais plusieurs sont dédiés à des tâches spécifiques, i.e. PC, LR, ...)

```
int fact (int x)
    if (x==0) then return 1
    else return x * fact(x-1);

// appel principal
int n, y;
.... lecture d'un entier dans n
y = fact(n);
.... utilisation de la valeur de y
```

Fonctions récursives

(2/2)

Même chose avec les variables locales !

```
int fact (int x) {
    int loc;
    if x==0 {
        loc = 1;
    } else {
        loc = x ;
        loc = fact (x-1) * loc;
    }
    return loc;
}
```

Programmation de procédures (suite)

Utilisation de la pile

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025

Conclusion : fonctions récursives

Conclusion 1

On ne peut pas travailler avec une seule zone de paramètres, il en faut une pour chaque appel et pas pour chaque fonction.

↪ **Les paramètres effectifs (ou arguments) sont attachés à l'appel d'une fonction et pas à l'objet "fonction" lui-même**

Conclusion 2

On ne peut pas travailler avec une seule zone pour les variables locales, il en faut une pour chaque appel et pas pour chaque fonction.

↪ **Les variables locales sont attachées à l'appel d'une fonction et pas à l'objet "fonction" lui-même**

Zones de mémoire dynamique

Parmi les zones de mémoire dynamique :

- le tas (*heap*) (*malloc*, *free*; *new*, *delete*),
- la file mécanisme dit **FIFO** :
First In First Out (Premier entré, premier sorti) (enfiler, défiler)
- la pile mécanisme dit **LIFO** :
Last In First Out (Dernier entré, premier sorti) (empiler, dépiler)

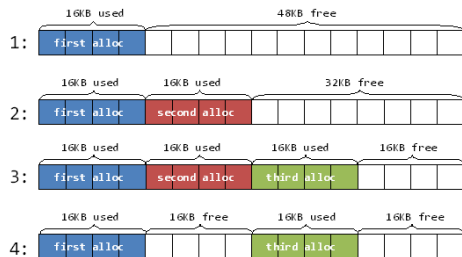
Remarque

Attention, le tas (*heap*) est aussi une structure de données qui permet de représenter un arbre dans un tableau (ex. : tri par tas), mais cela n'a que peu de rapport avec la zone de mémoire dynamique.

Notion de tas

Exemple :

```
malloc(first); malloc(second); malloc(third); free(second);
```



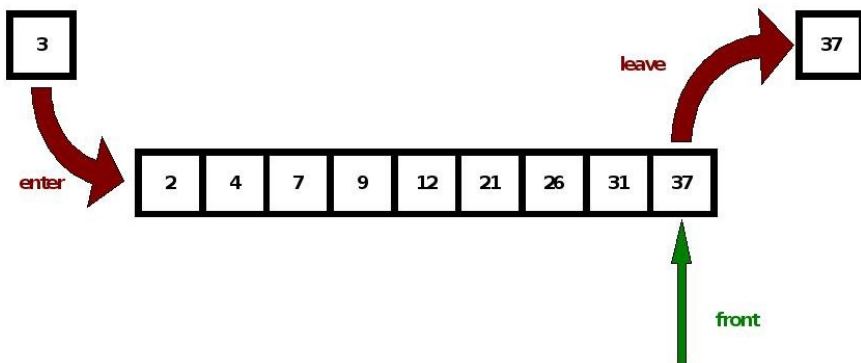
(source Qualcomm)

Notions associées

- fragmentation (et défragmentation), ramasse miette (*garbage collecting*),
- realloc.

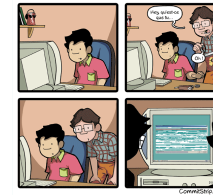
Notion de file

Exemple : enfiler(3) ; défiler(X) ;

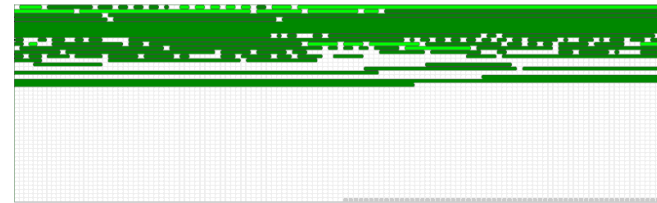


(source wikipedia)

Défragmentation, realloc dans le tas



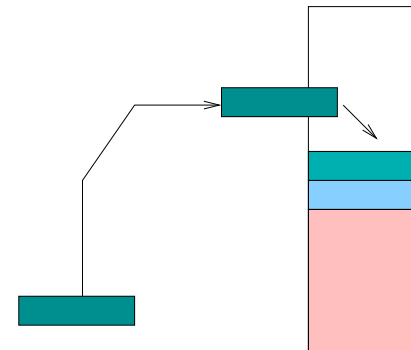
(source CommitStrip)



(source Dmitry Frank)

Notion de pile

Exemple : empiler(X), ...(autres instruction hors pile) ..., dépiler(Y)



Meilleur choix

Parmi les zones de mémoire dynamique :

- le tas (*heap*) (*malloc*, *free*; *new*, *delete*),
- la file mécanisme dit **FIFO** :
First In First Out (Premier entré, premier sorti) (enfiler, défiler)
- la pile mécanisme dit **LIFO** :
Last In First Out (Dernier entré, premier sorti) (empiler, dépiler)

Meilleur choix : la pile.

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA)

Fonctions et procédures (suite)

15 décembre 2025

9

Problème du retour

Structure de pile
○○○○○●○○○○○○○○○○

Gestion des variables et paramètres
○○○○○○○○○○○○

Divers

Comment réaliser une pile ? (1/4)

- Une **zone de mémoire**,
- Un **repère** sur le haut de la pile
SP : pointeur de pile, *stack pointer*
- Deux choix indépendants :
 - Comment **progresser** la pile :
↔ le sommet est **en direction des adresses croissantes (*ascending*) ou décroissantes (*descending*)**
 - Le pointeur de pile **pointe vers une case vide (*empty*) ou pleine (*full*)**

Mécanisme de pile

Notion de **haut de pile** : dernier élément entré
L'élément en haut de la pile est appelé *sommet*.

Deux opérations possibles :

Dépiler : suppression de l'élément en haut de la pile

Empiler : ajout d'un élément en haut de la pile

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA)

Fonctions et procédures (suite)

15 décembre 2025

10

Problème du retour

Structure de pile
○○○○○●○○○○○○○○○○

Gestion des variables et paramètres
○○○○○○○○○○○○

Divers

Comment réaliser une pile ? (2/4)

Mem désigne la mémoire
sp désigne le pointeur de pile
reg désigne un registre quelconque

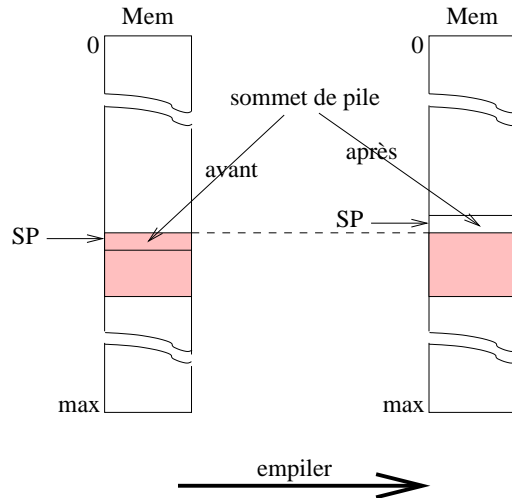
sens évolution	croissant	croissant	décroissant	décroissant
repère	1 ^{er} vide	der ^{er} plein	1 ^{er} vide	der ^{er} plein
empiler reg	Mem[sp]←reg sp←sp+1	sp←sp+1 Mem[sp]←reg	Mem[sp]←reg sp←sp-1	sp←sp-1 Mem[sp]←reg
dépiler reg	sp←sp-1 reg←Mem[sp]	reg←Mem[sp] sp←sp-1	sp←sp+1 reg←Mem[sp]	reg←Mem[sp] sp←sp+1

Remarque

Il existe des instructions **Arm** dédiées à l'utilisation de la pile
(exemple : pour la gestion **full descending** on utilise *stmfd* ou *push* pour empiler et *ldmfd* ou *pop* pour dépiler)

Comment réaliser une pile ?

(3/4)



Comment réaliser une pile ?

(4/4)

En Arm, empiler R3 (convention *full descending*) :

- push {R3}
- stmfd SP!, {R3}
- str R3, [SP, #-4]!
- add SP, SP, #-4
- str R3, [SP]

En Arm, dépiler R3 (convention *full descending*) :

- pop {R3}
- ldmfd SP!, {R3}
- ldr R3, [SP], #4
- ldr R3, [SP]
- add SP, SP, #4

Appel/retour : utilisation d'une pile

 \mathcal{CT}_1

Appel de procédure, deux actions exécutées par le processeur :

- sauvegarde de l'adresse de retour dans une pile
c'est-à-dire **empiler(PC + taille)**
- modification du compteur programme (rupture de séquence)
c'est-à-dire **PC ← adresse de la procédure**

Au retour, PC prend pour valeur l'adresse en sommet de pile puis le sommet est dépilé : **PC ← depiler()**.

Remarque

Ce n'est pas la solution utilisée par le processeur Arm.

↪ mais c'est presque le cas.

Application sur l'exemple

 \mathcal{CT}_1

La taille de codage d'une instruction est supposée être égale à 1

10	A1	20	B1
11	A2	21	B2
12	empiler 13; sauter à 20 (B)	22	B3
13	A3	23	retour: dépiler PC
14	empiler 15; sauter à 30 (C)		
15	A4		
30	C1		
31	empiler 32; sauter à 20 (B)		
32	C2		
33	si X alors empiler 34; sauter à 30		
34	C3		
35	C4		
36	retour: dépiler PC		

PC	instructions	état de la pile
10	A1	{}
11	A2	{}
12	saut 20 (B)	empile 13
20	B1	{13}
21	B2	{13}
22	B3	{13}
23	retour	sommet = 13
13	A3	{}
14	saut 30 (C)	empile 15
30	C1	{15}
31	saut 20 (B)	empile 32
20	B1	{32; 15}
21	B2	{32; 15}
22	B3	{32; 15}
23	retour	sommet = 32
32	C2	{15}

33	cond :saut 30 (C)		empile 34
30		C1	{34; 15}
31	saut 20 (B)		empile 32
20		B1	{32; 34; 15}
21		B2	{32; 34; 15}
22		B3	{32; 34; 15}
23		retour	sommet = 32
32		C2	{34; 15}
33	cond :saut 30		(pas d'appel à C)
34		C3	{34; 15}
35		C4	{34; 15}
36	retour		sommet = 34
34	C3		{15}
35	C4		{15}
36	retour		sommet = 15
15	A4		{ }

Lors de l'appel, l'instruction **BL** réalise un branchement inconditionnel **avec sauvegarde de l'adresse de retour** dans le registre nommé **lr** (*i.e.*, r14).

C'est le programmeur qui doit gérer les sauvegardes dans la pile!

si nécessaire ...

La taille de codage d'une instruction est supposée être égale à 1

10	A1	20	empiler LR
11	A2	21	B1
12	sauver 13 dans LR;sauter à 20 (B)	22	B2
13	A3	23	B3
14	sauver 15 dans LR;sauter à 30 (C)	24	retour: dépiler dans PC
15	A4		

30	empiler LR
31	C1
32	sauver 33 dans LR ; sauter à 20 (B)
33	C2
34	si X alors sauver 35 dans LR;sauter à 30 (C)
35	C3
36	C4
37	retour: dépiler dans PC

Application sur l'exemple (version avec le BL d'Arm)

 \mathcal{CT}_2

En utilisant l'instruction BL (Branch and Link) d'Arm :

10	A1		20	empiler <i>LR</i>
11	A2		21	<i>B1</i>
12	BL <i>B</i>	(appel)	22	<i>B2</i>
13	A3		23	<i>B3</i>
14	BL <i>C</i>	(appel)	24	retour: dépiler dans <i>PC</i>
15	A4			

30	empiler <i>LR</i>
31	<i>C1</i>
32	BL <i>B</i>
33	<i>C2</i>
34	si <i>X</i> alors BL <i>C</i>
35	<i>C3</i>
36	<i>C4</i>
37	retour: dépiler dans <i>PC</i>

Remarque

Lorsqu'une procédure n'en appelle pas d'autres,

on parle de procédure **feuille**

↪ la sauvegarde dans la pile n'est pas nécessaire.

C'est le cas de la procédure *B* dans l'exemple.

10	A1 (idem prec.)	20	<i>B1</i>
11	A2	21	<i>B2</i>
12	BL <i>B</i>	22	<i>B3</i>
13	A3	23	BX <i>LR</i>
14	BL <i>C</i>		
15	A4		

30	empiler <i>LR</i> (idem prec.)
31	<i>C1</i>
32	BL <i>B</i>
33	<i>C2</i>
34	si <i>X</i> alors BL <i>C</i>
35	<i>C3</i>
36	<i>C4</i>
37	retour: dépiler dans <i>PC</i>

Gestion des variables, des paramètres : généralisation

La gestion des appels en cascade nous a montré que les adresses de retour nécessitent une gestion « en pile »

En fait, c'est le fonctionnement général des appels de procédure qui a cette structure : **chaque variable locale et/ou paramètre est rangé dans la pile** et la case mémoire associée est repérée par son adresse.

Exemple

```
//procédure principale, sans parametre
```

```
procedure A
```

```
var u : entier
```

```
    u=2; B(u+3); u=5+u; B(u)
```

```
procedure B (donnee x : entier)
```

```
var s, v : entier
```

```
    s=x+4 ; C(s+1); v=2; C(s+v)
```

```
procedure C (donnee y : entier)
```

```
var t : entier
```

```
    t=5; ecrire(t*4); t=t+1
```


Comment accéder aux variables locales et aux paramètres ?

On pourrait utiliser le pointeur de pile SP :

accès indirect avec déplacement : $[SP, \#dpl]$

$dpl \geq 0$

Mais si on utilise la pile, par exemple pour sauvegarder la valeur d'un registre que l'on souhaite utiliser, il faut re-calculer les déplacements.

Pas pratique !

Pose des problèmes de généralisation

Accès aux variables et paramètres : *frame pointer* (1/2)

Utiliser un repère sur l'environnement courant (paramètres et variables locales) qui reste **fixe** pendant toute la durée d'exécution de la procédure.

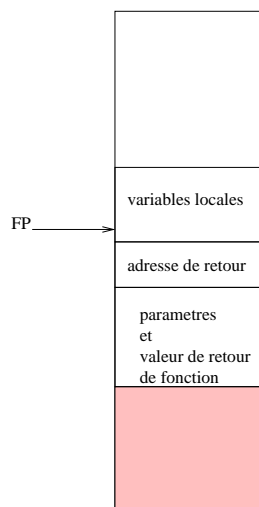
Ce repère est traditionnellement appelé **frame pointer** en compilation

Un registre **frame pointer** existe dans la plupart des architectures de processeur : il est noté **fp** dans le processeur **Arm**.

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA) Fonctions et procédures (suite) 15 décembre 2025 30

Problème du retour Structure de pile Gestion des variables et paramètres Divers

Accès aux variables et paramètres : *frame pointer* (2/2)



Accès à un paramètre :

$[fp, \#dpl_param]$

$dpl_param > 0$

Accès à une variable locale :

$[fp, \#dpl_varloc]$

$dpl_varloc < 0$

Ferres, Marquet, Bouhineau (UGA) Fonctions et procédures (suite) 15 décembre 2025 31

Problème du retour Structure de pile Gestion des variables et paramètres Divers

Organisation du code en utilisant le registre *frame pointer* \mathcal{CT}_4

Comme pour le registre mémorisant l'adresse de retour, le registre **fp** doit être sauvegardé avant d'être utilisé.

appelant P :

préparer les paramètres

BL Q

libérer la place allouée aux paramètres

appelé Q :

sauver l'adresse de retour

sauver l'ancienne valeur de **fp**

placer **fp** pour repérer les nouvelles variables

allouer la place pour les variables locales

corps de la fonction

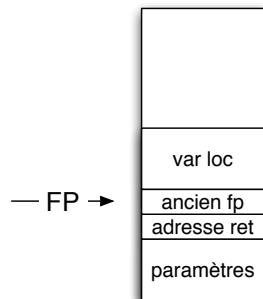
libérer la place réservée pour les var. locales

restaurer **fp**

recupérer adresse de retour

retour

Organisation de la pile lors de l'exécution avec *frame pointer* CT₄



Si les adresses sont sur **4 octets** :

- Accès aux variables locales :
adresse de la forme **fp - 4 - déplacement**
- Accès aux paramètres :
adresse de la forme **fp + 8 + déplacement**

Pour le code suivant :

```
procedure B(donnee x : entier)
var s, v : entier
  s=x+4 ; C(s+1); v=2; C(s+v)
```

- **A.)** x se trouve en fp-8 et s et v se trouvent en fp-4 et fp-8
- **B.)** x se trouve en fp-8 et s et v se trouvent en fp+4 et fp+8
- **C.)** x se trouve en fp+8 et s et v se trouvent en fp-4 et fp-8
- **D.)** x se trouve en fp+8 et s et v se trouvent en fp+4 et fp+8
- **E.)** Je ne sais pas

Réponse :

C.) x se trouve en fp+8 et s et v se trouvent en fp-4 et fp-8

En Arm : code de B CT₄

<pre>B: @ sauvegarde adresse retour push {lr} @ sub sp,sp,#4 @ str lr,[sp] push {fp} @ sauvegarde ancien fp mov fp,sp @ mise en place nouveau fp sub sp,sp,#8 @ reservation variables locales s,v @@@ debut du corps de B @@@ ldr r1, [fp,#+8] @ s <- x+4 add r1,r1,#4 str r1,[fp,#-4] @@@ debut de l'appel a C @@@ ldr r1, [fp,#-4] @ passage de s+1 en parametre de C add r1,r1,#1 push {r1} bl C @ appel C add sp,sp,#4 @ depile le parametre @@@ fin de l'appel a C @@@</pre>	<pre>@ v<-2 mov r1,#2 str r1,[fp,#-8] @ passe de s+v en parametre de C ldr r1, [fp,#-4] ldr r2, [fp,#-8] add r1,r1,r2 push {r1} bl C @ appel C add sp,sp,#4 @ depile parametre @@@ fin du corps de B @@@ add sp,sp,#8 @ depile s,v pop {fp} @ retour a l'ancien fp @ recuperation adresse retour pop {lr} @ ldr lr, [sp] @ add sp,sp,#4 bx lr @ retour</pre>
--	--

Programmation des appels de procédure et fonction (fin)

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Résultat d'une fonction (Qui ? Quand ? Où ?)

- 1 Le résultat d'une fonction est calculé **par l'appelée**
- 2 Le résultat doit être rangé à un emplacement **accessible par l'appelante** de façon à ce que cette dernière puisse le récupérer.

Il faut donc utiliser une zone mémoire **commune** à l'appelante et l'appelée.

Par l'exemple, **la pile**.

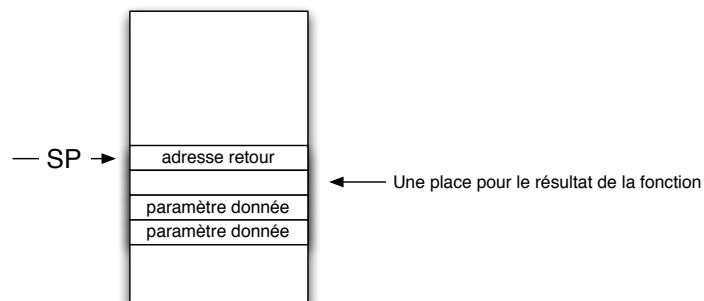
Résultat dans la pile (\mathcal{CT}_5) (1/3)

- 1 **Avant l'appel**, l'**appelant** réserve une place pour le résultat dans la pile
- 2 L'**appelée** rangera son résultat dans cette case
- 3 L'**appelant** récupère le contenu du résultat **après le retour** et libère la place.

Résultat dans la pile (\mathcal{CT}_5) (2/3)

Avant l'appel d'une fonction qui a deux paramètres données

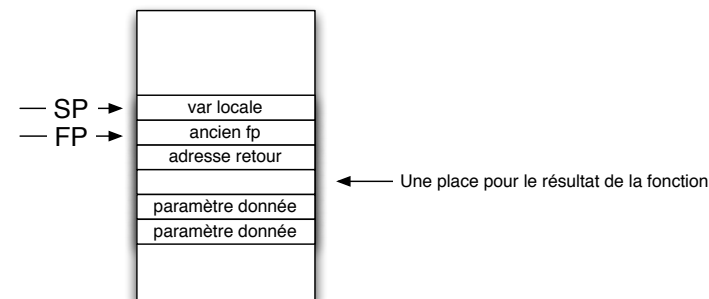
- Les valeurs des deux paramètres sont empilés
- Une case est réservée pour le résultat de la fonction



Résultat dans la pile (\mathcal{CT}_5) (3/3)

Lors de l'exécution du corps de la fonction.

- 1 Les variables locales sont accessibles par une adresse de la forme : $fp - 4 - depl$ avec $depl \geq 0$,
- 2 Les paramètres données par les adresses : $fp + 8 + 4$ et $fp + 8 + 8$ et
- 3 La case résultat par l'adresse $fp + 8$.



Structure du code de l'appel et du corps de la fonction \mathcal{CT}_5

appellant \mathbb{P} :

- préparer et empiler les paramètres
- réserver la place du résultat dans la pile
- appeler $Q : BL \ Q$
- recupérer le résultat
- libérer la place allouée aux paramètres
- libérer la place allouée au résultat

appelé \mathbb{Q} :

- empiler l'adresse de retour
- empiler la valeur de `fp`
- placer `fp` pour repérer les nouvelles variables
- allouer la place pour les variables locales

corps de la fonction Q

le résultat est rangé **en fp+8**

libérer la place allouée aux variables locales

dépiler fp

dépiler l'adresse de retour

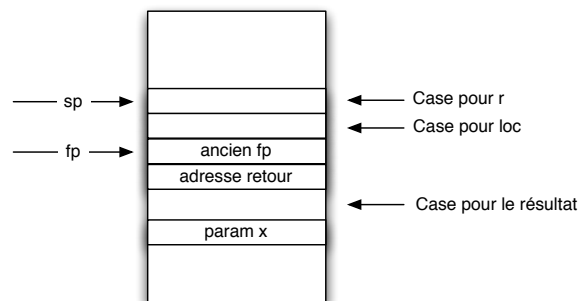
retour à l'appelant (P) : BX 1r

Application : fonction `fact` avec des variables locales \mathcal{CT}_5

```
int fact(int x) {
    int loc, r;
    if (x==0) { r = 1; }
    else { loc = fact(x-1); r = x * loc; }
    return r;
}
```

```
main() {
    int n, y;
    ...
    y = fact(n);
    ...
}
```

Etat de la pile lors de l'exécution de `fact` juste après l'appel dans `main`

Nouvelle version de la fonction `fact` \mathcal{CT}_5

```
fact:    @ empiler adr retour
        push {lr}
        @ mise en place fp
        @ place pour loc et r
        push {fp}
        mov fp, sp
        sub sp, sp, #8
        @ if x==0 ...
        ldr r0, [fp, #+12]          @ r0=x
        cmp r0, #0
        bne sinon
        alors: mov r2, #1
        str r2, [fp, #-8]          @ r = 1
        b finis
        sinon: @ appel fact(x-1)
        @ preparer param et resultat
        sub sp, sp, #4
        str r1, r0, #1             @ r1=x-1
        str r1, [sp]

        sub sp, sp, #4
        bl fact
        ldr r1, [sp]
        add sp, sp, #8
        @ apres l'appel
        str r1, [fp, #-4]          @ loc=fact(x-1)
        ldr r0, [fp, #+12]         @ r0=x
        ldr r1, [fp, #-4]          @ r1=loc
        mul r2, r0, r1             @ x*loc
        str r2, [fp, #-8]          @ r=x*loc

        ldr r2, [fp, #-8]
        str r2, [fp, #+8]          @ return r
        @ recuperer place var loc
        add sp, sp, #8
        pop {fp}                   @ recuperer fp
        @ retour
        pop {lr}                   @ recuperer lr
        bx lr
```


Variables temporaires

Application à l'exemple de la fonction fact

Problème :

- Les registres utilisés par une procédure ou une fonction pour des calculs intermédiaires locaux sont modifiés
- Or il serait sain de les retrouver inchangés après un appel de procédure ou fonction

Solution :

- Sauvegarder les registres utilisés : r0, r1, r2... dans la pile.
- Et cela doit être fait avant de les modifier donc en tout début du code de la procédure ou fonction.

Le code de la fonction fact utilise les registres r0, r1, r2.

```
fact:  @ empiler adr retour
      push {lr}
      @ mise en place fp et allocation loc et r
      push {fp}
      mov fp, sp
      sub sp, sp, #8
      @ sauvegarde de r0, r1, et r2 (empiler)
      push {r2}
      push {r1}
      push {r0}
      @ if x==0 ...
      ...

      @ restaurer les registres r0, r1, r2 (depiler)
      pop {r0}
      pop {r1}
      pop {r2}
      @ desallouer var locales
      add sp, sp, #8
      pop {fp} @ ancien fp
      @ depiler adr retour dans lr
      pop {lr}
      bx lr @ retour
```

Convention générique CG à retenir à l'issue du cours

Comparaison entre CG et Cgcc

On aboutit enfin à une convention générique permettant de générer du code de façon systématique.

↪ la convention CG, à utiliser par la suite.

Notion d'ABI (Application Binary Interface)

- La convention utilisée pour les appels de fonction fait partie de l'ABI :
- un contrat entre appelante et appelée
 - ↪ qui est responsable de sauvegarder les registres ?
 - ↪ de réserver l'espace ?
 - un compilateur doit respecter l'ABI pour que le code produit fonctionne
 - ↪ en particulier si on utilise des fonctions de bibliothèques externes !

La convention CG est différente de la convention Cgcc que l'on manipulera en TP.

↪ voir plus loin dans le cours pour un résumé de la convention Cgcc

↪ en TD, et aux examens, on manipulera la convention CG, à moins qu'on ne précise autre chose

Structure générale du code d'un appel et du corps de la fonction ou procédure

CG

appelant P :

- 1) préparer et empiler les paramètres (valeurs et/ou adresses)
- 2) si fonction, réserver une place dans la pile pour le résultat
- 3) appeler Q : BL Q
- 4) si fonction, récupérer le résultat
- 5) libérer la place allouée aux paramètres
- 6) si fonction, libérer la place allouée au résultat

appelée Q :

- 1) empiler l'adresse de retour (lr)
- 2) empiler la valeur fp de l'appelant
- 3) placer fp pour repérer les variables de l'appelée
- 4) allouer la place pour les variables locales
- 5) empiler les variables temporaires (registres) utilisées
- 6) **corps de la fonction**
- 7) si fonction, le résultat est rangé en **fp+8**
- 8) dépiler les variables temporaires (registres) utilisées
- 9) libérer la place allouée aux variables locales
- 10) dépiler fp
- 11) dépiler l'adresse de retour (lr)
- 12) retour à l'appelant : BX lr

Question

(2/2)

Quelle place sur la pile est nécessaire pour l'exécution d'une fonction ayant 2 paramètres, 3 variables locales, 4 registres temporaires ?

- A.) 40 octets
- B.) 44 octets
- C.) 48 octets
- D.) 52 octets
- E.) Je ne sais pas

Réponse : (2+3+4+1 (LR)+1 (FP)+1 (résultat fonction)*4 = 48 octets

Question

(1/2)

Quelle place sur la pile est nécessaire pour l'exécution d'une fonction ayant 2 paramètres, 3 variables locales, 4 registres temporaires ?

- A.) une vingtaine d'octets
- B.) entre 24 et 44 octets
- C.) au moins 48 octets
- D.) Je ne sais pas

pour être plus précis, continuer...

Précisions sur la convention *Cgcc*

Pour des raisons d'optimisation et de facilités de programmation, gcc utilise la convention suivante :

- les 4 premiers paramètres sont passés dans les registres R0 à R3
↪ s'il y a plus de 4 paramètres, les suivants sont stockés dans la pile
- la valeur de retour de la fonction est stockée dans R0 (et R1 si besoin)
- certains registres à sauvegarder par l'**appelante**, d'autres par l'**appelée**

Cette convention est assez similaire à la convention *CG*, mais utilise moins la pile

↪ elle est donc un peu moins "générique" (traitement différent des registres)

Question

Les codes suivants fonctionnent-ils ?

```
procedure incr(x:entier)      procedure minus(str:chaîne)
x = x+1;                      str[0] = str[0] ou 32
```

```
n : entier                    ch : ''Bonjour''
incr(n);                      minus(ch)
...                            ...
```

- A.) oui (pour les deux)
- B.) oui pour incrmente, non pour minuscule
- C.) non pour incrmente, oui pour minuscule
- D.) non (pour les deux)
- E.) Je connais la réponse, mais je ne sais pas dire pourquoi
- F.) Je ne sais pas

Réponse : C.) non pour incrmente, oui pour minuscule

Remarque : des fois, ça marche ou pas ?

Comment faire +1 sur le premier élément d'un tableau ?

- Par procédure :

```
procedure inc (t : tableau d'entiers)
  t [0] = t [0] +1;
```

Ns : tableau d'entiers
inc(Ns);
- Cette fois, ça marche !
- Ns (ou t) sont des références ...
- C'est la suite du drame du passage de paramètre par valeur

Situation : comment faire +1 via une fonction ?

- Directe :

```
n : entier
n = n+1;
```

```
procedure inc (x : entier)
  x = x+1;
```
- Par procédure :

```
n : entier
inc(n);
```
- Catastrophe, cela ne marche pas
- Le +1 s'effectue pour l'élément situé sur la pile, pas sur l'original !
- C'est le drame du passage de paramètre par valeur
- Solution : passage de paramètre par référence, ou par adresse
(paramètre donnée vs paramètre résultat)

Autre solution

Si on ne peut pas accéder à une référence...

- Par fonction (et confier l'affectation à l'appelant) :

```
fonction inc (x : entier)
  retourne x+1;
```

```
n : entier
n=inc(n);
```
- Par macro (si disponible)

Réalisation, vocabulaire

On se place maintenant dans le cas d'une procédure ayant **des paramètres de type donnée et des paramètres de type résultat**.

```
procedure XX (donnees x, y : entier; resultat z : entier)
u,v : entier
...
u=x;
v=y+2;
...
z=u+v;
...
```

- Les paramètres donnés **ne doivent pas être modifiés par l'exécution de la procédure** : les paramètres effectifs associés à *x* et *y* sont des expressions qui sont évaluées avant l'appel, leurs valeurs étant substituées aux paramètres formels avant de l'exécution du corps de la procédure.
- Le paramètre effectif associé au paramètre formel *resultat z* est une variable **dont la valeur n'est significative qu'après l'appel de la procédure**; cette valeur est calculée dans le corps de la procédure et affectée à la variable *z* passée en argument.

L'exemple d'appel traité

```
a,b,c : entier

b=3;
....
XX (b, 7, adresse de c);
```

Notations

Il existe différentes façons de gérer le paramètre *z*.
Nous n'en étudions qu'une seule : la méthode dite du **passage par adresse**.

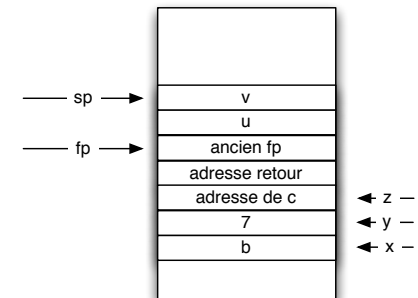
Nous utilisons la notation suivante :

```
procedure XX (donnees x, y : entier; adresse z : entier)
u,v : entier

...
u=x;
v=y+2;
...
mem[z]=u+v; @ mem[z] designe le contenu de la memoire d'adresse z
...
```

Solution : état de la pile lors de l'exécution de la procédure XX

CG



Code de main CG

```

.bss
a:      .skip 4
b:      .skip 4
c:      .skip 4
.text
main:
...
ldr r0, LD_b      @ r0 ← valeur de b
push {r0}         @ empiler b
...
LD_a:  .word a
LD_b:  .word b
LD_c:  .word c

mov r0, #7        @ r0 ← 7
push {r0}         @ empiler 7

ldr r0, LD_c      @ r0 ← adresse de c
push {r0}         @ empiler adresse de c
bl XX
...

```

Conclusion/Rappel : Structure générale du code d'un appel et du corps de la fonction ou procédure CG

appelant P :

- 1) préparer et empiler les paramètres (valeurs et/ou adresses)
- 2) si fonction, réserver une place dans la pile pour le résultat
- 3) appeler Q : BL Q
- 4) si fonction, récupérer le résultat
- 5) libérer la place allouée aux paramètres
- 6) si fonction, libérer la place allouée au résultat

appelée Q :

- 1) empiler l'adresse de retour (lr)
- 2) empiler la valeur fp de l'appelant
- 3) placer fp pour repérer les variables de l'appelée
- 4) allouer la place pour les variables locales
- 5) empiler les variables temporaires (registres) utilisées
- 6) **corps de la fonction**
- 7) si fonction, le résultat est rangé en fp+8
- 8) dépiler les variables temporaires (registres) utilisées
- 9) libérer la place allouée aux variables locales
- 10) dépiler fp
- 11) dépiler l'adresse de retour (lr)
- 12) retour à l'appelant : BX lr

Procédure XX CG

XX:

```

...
ldr r0, [fp, #+16] @ u ← x
str r0, [fp, #+4]

ldr r0, [fp, #+12] @ v ← y + 2
add r0, r0, #2
str r0, [fp, #+8]
...
ldr r0, [fp, #+4]
ldr r1, [fp, #+8]
add r0, r0, r1      @ calcul de u + v

ldr r2, [fp, #+8]   @ r2 ← z, i.e., adresse c
str r0, [r2]        @ mem[z] ← u + v, i.e., mem[adresse c] ← u + v
...

```

La vie des programmes

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Plan

- 1 Introduction
- 2 Synthèse
- 3 Compilation haut niveau
- 4 Compilation assembleur
- 5 Editeur de liens

Analyse et synthèse

La compilation comporte deux phases :

- 1 Phase d'analyse
 - Pré-traitement
 - Analyse lexicale
 - Analyse syntaxique
 - Analyse sémantique
- 2 Phase de synthèse de code
 - Génération de code intermédiaire
 - Optimisation de code intermédiaire
 - Génération de code cible

Dans ce cours, nous nous préoccupons surtout de la seconde phase.

Aujourd'hui

Nous allons étudier en détail **les différentes étapes de compilation** permettant de produire un exécutable à partir d'un ou plusieurs fichiers sources.

Remarque : lorsque l'on compile plusieurs fichiers sources en un seul exécutable, on parle de **compilation séparée**.

Compilation et interprétation

L'exécution d'un programme peut être effectué via :

- un compilateur (le programme est transformé en langage machine par le compilateur, puis chargé en mémoire vive par le chargeur et exécuté par la machine)
- un interpréteur (le programme est transformé et interprété par l'interpréteur [qui s'exécute sur la machine])

Compilateurs et interpréteurs partagent la première phase de travail (phase d'analyse).

Compilateurs et interpréteurs se distinguent au moment de l'exécution :

- le code cible produit par un compilateur est exécuté directement par la machine cible
- la structure intermédiaire obtenue par l'interpréteur est exécutée par l'interpréteur lui-même (comme sur une machine virtuelle)

Un exemple en langage C

```
/* fichier fonctions.c */
int somme (int *t, int n) {
    int i, s;
    s = 0;
    for (i=0;i<n;i++) s = s + t[i];
    return (s); }

int max (int *t, int n) {
    int i, m;
    m = t[0];
    for (i=1;i<n;i++) if (m < t[i]) m = t[i];
    return (m); }
```

```
/* fichier main.c */
extern int somme (int *t, int n);
extern int max (int *t, int n);

#define TAILLE 10
static int TAB [TAILLE];

main () {
    int i,u,v;
    for (i=0;i<TAILLE;i++) scanf ("%d", &TAB[i]);
    u = somme (TAB, TAILLE);
    v = max (TAB, TAILLE); }

```

- Dans le fichier `main.c` les fonctions `somme` et `max` sont dites **importées** : elles sont définies dans un autre fichier.
- Dans le fichier `fonctions.c`, `somme` et `max` sont dites **exportées** : elles sont utilisables dans un autre fichier.

Exemple avec ARM : `essai.s` et `lib.s`

essai.s

```

.text
.global main
main:
    mov r0, #0
bcle: cmp r0, #10
    beq fin
    ldr r3, LD_xx
    ldr r2, [r3]
    bl add1
    str r2, [r3]
    add r0, r0, #1
    b bcle
fin:  bx lr
LD_xx: .word xx
    .data
    .word 99
xx:  .word 3

```

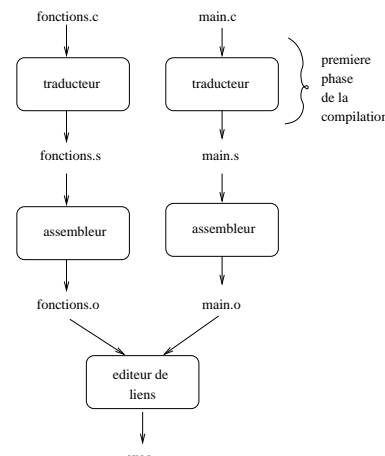
lib.s

```
.text

.global add1

add1 : add r2, r2, #1
      bx lr
```

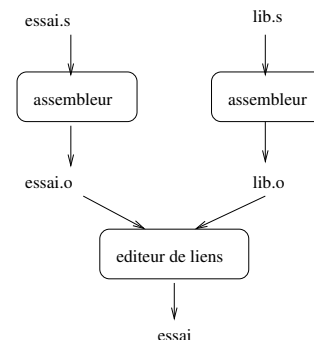
Compilation haut niveau



Remarque : la phase de traduction comporte une phase de pré-traitement dite phase de « pré-compilation » où le code source est transformé en code source « enrichi » (les directives de pré-compilations — # — sont traitées)

- Pour « compiler », produire un exécutable, on enchaîne les commandes :
 - `gcc -c fonctions.c`
 - `gcc -c main.c`
 - `gcc -o exec main.o fonctions.o`
- La commande `gcc -c main.c` produit un fichier appelé `main.o`.
- La commande `gcc -c fonctions.c` produit un fichier `fonctions.o`.
- Les fichiers `fonctions.o` et `main.o` contiennent du **binaire translatable**, c'est-à-dire, du code binaire qui ne peut pas directement être exécuté en mémoire.
- La commande `gcc -o exec main.o fonctions.o` produit le fichier `exec` qui contient du **binaire exécutable**. Ce fichier résulte de la liaison des deux fichiers **objets** (`.o`). On parle d'**édition de liens**.
- **Remarque** : `gcc` cache l'appel à différents outils (logiciels).

Compilation en assembleur



- Pour « compiler », on enchaîne les commandes :
 - `arm-eabi-gcc -c essai.s`
 - `arm-eabi-gcc -c lib.s`
 - `arm-eabi-gcc -o essai essai.o lib.o`
- Les commandes `arm-eabi-gcc -c essai.s` et `arm-eabi-gcc -c lib.s` produisent les fichiers `essai.o` et `lib.o`.
- Les fichiers `essai.o` et `lib.o` contiennent du **binaire translatable**.
- La commande `arm-eabi-gcc -o essai essai.o lib.o` produit le fichier `essai` qui contient du **binaire exécutable**. Ce fichier résulte de la liaison des deux fichiers **objets** (.o). On parle d'**édition de liens**.
- **Remarque :** `arm-eabi-gcc` cache différents outils.
 - La commande `arm-eabi-gcc` appliqué à un fichier .s avec l'option `-c` correspond à la commande `arm-eabi-as`.
 - La commande `arm-eabi-gcc` avec l'option utilisée avec `-o` correspond à la commande d'édition de liens `arm-eabi-ld`.

Du langage C vers l'assembleur (ou un code intermédiaire)

- L'objectif d'un langage de haut niveau type langage C est de permettre au programmeur de **s'abstraire** des détails inhérents au fonctionnement de la machine.
- Il permet de manipuler des concepts bien plus **élaborés**.
- Mais il empêche la gestion de certains de ces détails.
- La première phase de la compilation consiste en **la traduction systématique** d'une syntaxe complexe en un langage plus simple et plus proche de la machine (langage machine ou code intermédiaire).

Les schémas de traduction

Il y a ainsi, des schémas (récursifs) de traduction prévus pour toutes les règles de grammaire décrivant les concepts du langage de programmation. Ces schémas sont définis pour un type de machine (large).

Exemples de schémas :

- pour l'évaluation d'opérateurs arithmétiques
- pour l'évaluation d'opérateurs relationnels
- pour l'affectation
- pour les structures de contrôle
- pour la définition de fonctions
- etc.

Exemple : traduction d'une conditionnelle

Prenons une conditionnelle :

```
si Condition alors { ListeInstructions }
```

elle sera traduite selon le schéma (récursif) :

```
etiq_debut:
    traduction(Condition) avec positionnement de ZNCV
    branch si (non vérifiée) a etiq_suite
    traduction(ListeInstruction)
etiq_suite:
```

Problématique

L'objectif de l'assembleur est de **produire du code binaire** à partir du langage d'assemblage.

Il n'est pas toujours possible de produire du binaire qui puisse être directement copié en mémoire pour deux raisons principalement :

- Cas 1** On ne connaît pas en général l'adresse à laquelle les zones **text** et **data** doivent être rangées en mémoire.
- Cas 2** Le programme peut faire référence à des noms qui ne sont pas définis dans le fichier en cours de traduction.
- Dans le premier cas, on peut produire une **image** du binaire à partir de l'adresse 0, à charge du matériel de **traduire** l'image à l'adresse de chargement pour l'exécution (il faut garder les informations permettant de savoir quelles sont les adresses à traduire)
 - Dans le deuxième cas on ne peut rien faire.

Premier cas

```
.text
.global main
main:
    mov r0, #0
bcle: cmp r0, #10
    beq fin
    ldr r3, LD_xx
    ldr r2, [r3]
    bl add1
    str r2, [r3]
    add r0, r0, #1
    b bcle
fin:   bx lr
LD_xx: .word xx
    .data
    .word 99
xx: .word 3
```

L'adresse associée au symbole `xx` est :
adresse de début de la zone `data` + 4
mais encore faut-il connaître l'adresse
de début de la zone `data` !

Si on considère que la zone `data` est
chargée à l'adresse **0**, l'adresse
associée à `xx` est alors **4**. Si on doit
traduire le programme à l'adresse
2000, il faut se rappeler que à l'adresse
`LD_xx` on doit modifier la valeur **4** en
2000 + 4.

Cette information à mémoriser est
appelée **une donnée de translation**
(**relocation** en anglais).

Deuxième cas

(2/2)

Que faire pour trouver la(/les) adresse(s), le(s) déplacement(s) ?

- Dans le deuxième cas on ne peut rien faire
- Pour l'instant, la traduction va être incomplète

Deuxième cas

(1/2)

```
.text
.global main
main:
    mov r0, #0
bcle: cmp r0, #10
    beq fin
    ldr r3, LD_xx
    ldr r2, [r3]
    bl add1
    str r2, [r3]
    add r0, r0, #1
    b bcle
fin:   bx lr
LD_xx: .word xx
    .data
    .word 99
xx: .word 3
```

- Dans le fichier `essai.o` il n'est pas possible de calculer le déplacement de l'instruction `bl add1` puisque l'on ne sait pas où est l'étiquette `add1` quand l'assembleur traite le fichier `essai.s`. En effet l'étiquette est dans un autre fichier : `lib.s`
- Reprenons l'exemple en langage C. Suite à la traduction en langage d'assemblage, dans le fichier `main.s` les références aux fonctions `somme` et `max` ne peuvent être complétées car les fonctions en question ne sont pas définies dans le fichier `main.c` mais dans `fonctions.c`.

Que contient un fichier `.s` ?

```
.text
.global main
main:
    mov r0, #0
bcle: cmp r0, #10
    beq fin
    ldr r3, LD_xx
    ldr r2, [r3]
    bl add1
    str r2, [r3]
    add r0, r0, #1
    b bcle
fin:   bx lr
LD_xx: .word xx
    .data
    .word 99
xx: .word 3
```

- **des directives** : `.data`, `.bss`, `.text`, `.word`, `.hword`, `.byte`, `.skip`, `.asciz`, `.align`
- **des étiquettes** appelées aussi symboles
- **des instructions** du processeur
- **des commentaires** : `@ blabla`

Note : Parfois une directive (`.org`) permet de fixer l'adresse où sera logé le programme en mémoire. Cette facilité permet alors de calculer certaines adresses dès la phase d'assemblage.

Que contient un fichier .o ?

- un **entête** contenant la taille du fichier, les adresses des différentes tables, la taille de la zone de données non initialisées (bss), etc.
- la **zone de données** (data) parfois incomplète
- la **zone des instructions** (text) parfois incomplète
- les informations associées à chaque symbole rangées dans une section appelée : **table des symboles**.
- les informations permettant de compléter ce qui n'a pu être calculé... On les appelle **informations de translation** et l'ensemble de ces informations est rangé dans une section particulière appelée **table de translation**.
- une **table des chaînes** à laquelle la table des symboles fait référence.

Exemple : essai.o, organisation des tables

On obtient l'entête avec la commande `arm-eabi-readelf -a essai.o (suite)`.

```
Section Headers:
[Nr] Name           Type           Addr       Off       Size   ES Flg Lk Inf Al
[ 0]                 NULL           00000000   000000   000000 00      0  0  0
[ 1] .text            PROGBITS       00000000   000034   00002c 00  AX  0  0  1
[ 2] .rel.text        REL            00000000   00033c   000018 08      7  1  4
[ 3] .data            PROGBITS       00000000   000060   000008 00  WA  0  0  1
[ 4] .bss             NOBITS         00000000   000068   000000 00  WA  0  0  1
[ 5] .ARM.attributes  ARM_ATTRIBUTES 00000000   000068   000010 00      0  0  1
[ 6] .shstrtab         STRTAB         00000000   000078   000040 00      0  0  1
[ 7] .symtab           SYMTAB         00000000   000220   0000f0 10      8 12  4
[ 8] .strtab           STRTAB         00000000   000310   000029 00      0  0  1
```

Key to Flags:

W (write), A (alloc), X (execute), M (merge), S (strings)

I (info), L (link order), G (group), x (unknown)

O (extra OS processing required) o (OS specific), p (processor specific)

Exemple : essai.o, entête

On obtient l'entête avec la commande `arm-eabi-readelf -a essai.o`.

```
ELF Header:
Magic:   7f 45 4c 46 01 01 01 61 00 00 00 00 00 00 00 00
Class:                           ELF32
Data:                             2's complement, little endian
Version:                           1 (current)
OS/ABI:                             ARM
ABI Version:                         0
Type:                               REL (Relocatable file)
Machine:                             ARM
Version:                             0x1
Entry point address:                0x0
Start of program headers:            0 (bytes into file)
Start of section headers:            184 (bytes into file)
Flags:                               0x0
Size of this header:                 52 (bytes)
Size of program headers:              0 (bytes)
Number of program headers:            0
Size of section headers:              40 (bytes)
Number of section headers:            9
Section header string table index:    6
```

Exemple : essai.o, zone data

On obtient la zone `.data` avec la commande `arm-eabi-objdump -s -j .data essai.o`.

essai.o: format de fichier elf32-littlearm

Contenu de la section `.data`:

```
0000 63000000 03000000
```

Exemple : essai.o, zone text

On obtient la zone `.text` avec la commande `arm-eabi-objdump -j .text -s essai.o`.

essai.o: format de fichier elf32-littlearm

Contenu de la section `.text`:

```
0000 0000a0e3 0a0050e3 0500000a 14309fe5
0010 002093e5 feffffffeb 002083e5 010080e2
0020 f7ffffea feffffffea 04000000
```

Rappel : essai.o, organisation des tables

On obtient l'entête avec la commande `arm-eabi-readelf -a essai.o (suite)`.

```
Section Headers:
[Nr] Name           Type           Addr       Off       Size   ES Flg Lk Inf Al
[ 0]                NULL          00000000   000000   000000 00      0  0  0
[ 1] .text            PROGBITS      00000000   000034   00002c 00  AX  0  0  1
[ 2] .rel.text        REL           00000000   00033c   000018 08      7  1  4
[ 3] .data            PROGBITS      00000000   000060   000008 00  WA  0  0  1
[ 4] .bss             NOBITS        00000000   000068   000000 00  WA  0  0  1
[ 5] .ARM.attributes  ARM_ATTRIBUTES 00000000   000068   000010 00      0  0  1
[ 6] .shstrtab         STRTAB         00000000   000078   000040 00      0  0  1
[ 7] .symtab           SYMTAB         00000000   000220   0000f0 10      8 12  4
[ 8] .strtab           STRTAB         00000000   000310   000029 00      0  0  1

Key to Flags:
W (write), A (alloc), X (execute), M (merge), S (strings)
I (info), L (link order), G (group), x (unknown)
O (extra OS processing required) o (OS specific), p (processor specific)
```

Exemple : essai.o, zone text

La zone `.text` avec désassemblage avec la commande `arm-eabi-objdump -j .text -d essai.o`.

```
Disassembly of section .text:

00000000 <main>:
0: e3a00000  mov r0, #0

00000004 <bcle>:
4: e350000a  cmp r0, #10
8: 0a000005  beq 24 <fin>
c: e59f3014  ldr r3, [pc, #20] ; 28 <LD_xx>
10: e5932000  ldr r2, [r3]
14: ebfffffe  bl 0 <add1>
18: e5832000  str r2, [r3]
1c: e2800001  add r0, r0, #1
20: eafffff7  b 4 <bcle>

00000024 <fin>:
24: eafffffe  b 0 <exit>

00000028 <LD_xx>:
28: 00000004  .word 0x00000004
```

Exemple : essai.o, table des symboles

On obtient l'entête avec la commande `arm-eabi-readelf -s essai.o`.

```
Symbol table '.symtab' contains 15 entries:
Num:   Value      Size Type      Bind      Vis      Ndx Name
0: 00000000      0 NOTYPE   LOCAL   DEFAULT   UND
1: 00000000      0 SECTION LOCAL   DEFAULT    1
2: 00000000      0 SECTION LOCAL   DEFAULT    3
3: 00000000      0 SECTION LOCAL   DEFAULT    4
4: 00000000      0 NOTYPE  LOCAL   DEFAULT    1 $a
5: 00000004      0 NOTYPE  LOCAL   DEFAULT    1 bcle
6: 00000024      0 NOTYPE  LOCAL   DEFAULT    1 fin
7: 00000028      0 NOTYPE  LOCAL   DEFAULT    1 LD_xx
8: 00000028      0 NOTYPE  LOCAL   DEFAULT    1 $d
9: 00000004      0 NOTYPE  LOCAL   DEFAULT    3 xx
10: 00000000      0 NOTYPE  LOCAL   DEFAULT    3 $d
11: 00000000      0 SECTION LOCAL   DEFAULT    5
12: 00000000      0 NOTYPE  GLOBAL  DEFAULT    1 main
13: 00000000      0 NOTYPE  GLOBAL  DEFAULT   UND add1
14: 00000000      0 NOTYPE  GLOBAL  DEFAULT   UND exit
```


Rôle de l'éditeur de liens

Le travail de l'éditeur de liens consiste à :

- Identifier les symboles définis et exportés d'un côté et les symboles non définis de l'autre (importés).
- Rassembler les zones de même type et effectuer les corrections nécessaires.

Remarque : L'édition de liens rassemble des fichiers objets. L'assembleur ne peut pas produire du binaire exécutable
→ il produit un binaire incomplet dans lequel il conserve des informations permettant de le compléter plus tard.

La phase d'édition de liens, bien qu'elle permette de résoudre les problèmes de noms globaux, produit elle aussi du binaire incomplet car les adresses d'implantation des zones text et data ne sont pas connues.

```
ELF Header:
Magic: 7f 45 4c 46 01 01 01 61 00 00 00 00 00 00 00 00
Class: ELF32
Data: 2's complement, little endian
Version: 1 (current)
OS/ABI: ARM
ABI Version: 0
Type: EXEC (Executable file)
Machine: ARM
Version: 0x1
Entry point address: 0x810c
Start of program headers: 52 (bytes into file)
Start of section headers: 144432 (bytes into file)
Flags: 0x2, has entry point, GNU EABI
Size of this header: 52 (bytes)
Size of program headers: 32 (bytes)
Number of program headers: 2
Size of section headers: 40 (bytes)
Number of section headers: 24
Section header string table index: 21
```

Phase de chargement : production de binaire exécutable

Le calcul des adresses définitives peut avoir lieu de façon statique ou de façon dynamique (au moment où on en a besoin).

Deux solutions possibles :

- édition de liens au moment du chargement en mémoire (au lieu de rassembler le contenu de deux fichiers complets, on ne charge que le code des fonctions utilisées, par ex. pour les bibliothèques) ou
- édition de liens au moment de l'exécution (appel de la fonction) ce qui permet de partager des fonctions et de ne pas charger en mémoire plusieurs fois le même code.

Section Headers:												
[Nr]	Name	Type	Addr	Off	Size	ES	Flg	Lk	Inf	Al		
[0]		NULL	00000000	000000	000000	00		0	0	0		
[1]	.init	PROGBITS	00008000	008000	000020	00	AX	0	0	4		
[2]	.text	PROGBITS	00008020	008020	002500	00	AX	0	0	4		
[3]	.fini	PROGBITS	0000a520	00a520	00001c	00	AX	0	0	4		
[4]	.rodata	PROGBITS	0000a53c	00a53c	000000c	00	A	0	0	4		
[5]	.eh_frame	PROGBITS	0000a548	00a548	00083c	00	A	0	0	4		
[6]	.ctors	PROGBITS	00012d84	00ad84	000008	00	WA	0	0	4		
[7]	.dtors	PROGBITS	00012d8c	00ad8c	000008	00	WA	0	0	4		
[8]	.jcr	PROGBITS	00012d94	00ad94	000004	00	WA	0	0	4		
[9]	.data	PROGBITS	00012d98	00ad98	00095c	00	WA	0	0	4		
[10]	.bss	NOBITS	000136f4	00b6f4	000108	00	WA	0	0	4		
[11]	.comment	PROGBITS	00000000	00b6f4	0001e6	00		0	0	1		
[12]	.debug_aranges	PROGBITS	00000000	00b8e0	000350	00		0	0	8		
[13]	.debug_pubnames	PROGBITS	00000000	00bc30	00069c	00		0	0	1		
[14]	.debug_info	PROGBITS	00000000	00c2cc	00ea53	00		0	0	1		
[15]	.debug_abbrev	PROGBITS	00000000	01ad1f	002956	00		0	0	1		
[16]	.debug_line	PROGBITS	00000000	01d675	002444	00		0	0	1		
[17]	.debug_str	PROGBITS	00000000	01fab9	001439	01	MS	0	0	1		
[18]	.debug_loc	PROGBITS	00000000	020ef2	002163	00		0	0	1		
[19]	.debug_ranges	PROGBITS	00000000	023058	0002e8	00		0	0	8		
[20]	.ARM.attributes	ARM_ATTRIBUTES	00000000	023340	000010	00		0	0	1		
[21]	.shstrtab	STRTAB	00000000	023350	0000df	00		0	0	1		
[22]	.symtab	SYMTAB	00000000	0237f0	0013e0	10		23	213	4		
[23]	.strtab	STRTAB	00000000	024bd0	0007d1	00		0	0	1		

Que contient un fichier exécutable ?

table des symboles

Symbol table '.symtab' contains 318 entries:

Num:	Value	Size	Type	Bind	Vis	Ndx	Name
0:	00000000	0	NOTYPE	LOCAL	DEFAULT	UND	
1:	00008000	0	SECTION	LOCAL	DEFAULT	1	
2:	00008020	0	SECTION	LOCAL	DEFAULT	2	
3:	0000a520	0	SECTION	LOCAL	DEFAULT	3	
.....							
9:	00012ea8	0	SECTION	LOCAL	DEFAULT	9	
.....							
74:	0000821c	0	NOTYPE	LOCAL	DEFAULT	2	bcle
75:	0000823c	0	NOTYPE	LOCAL	DEFAULT	2	fin
76:	00008240	0	NOTYPE	LOCAL	DEFAULT	2	LD_xx
77:	00008240	0	NOTYPE	LOCAL	DEFAULT	2	\$d
78:	00012eb4	0	NOTYPE	LOCAL	DEFAULT	9	xx
.....							
230:	00008244	0	NOTYPE	GLOBAL	DEFAULT	2	add1
.....							

Que contient un fichier exécutable ?

section text

```

00008218 <main>:
8218: e3a00000  mov r0, #0

0000821c <bcle>:s
821c: e350000a  cmp r0, #10
8220: 0a000005  beq 823c <fin>
8224: e59f3014  ldr r3, [pc, #20] ; 8240 <LD_xx>
8228: e5932000  ldr r2, [r3]
822c: eb000004  bl 8244 <add1>
8230: e5832000  str r2, [r3]
8234: e2800001  add r0, r0, #1
8238: eafffff7  b 821c <bcle>

0000823c <fin>:
823c: ea000007  b 8260 <exit>

00008240 <LD_xx>:
8240: 00012eb4  .word 0x00012eb4

00008244 <add1>:
8244: e2822001  add r2, r2, #1
8248: e1a0f00e  bx      lr
    
```

Que contient un fichier exécutable ?

section data

Contents of section .data:

```

.....

12ea8 00000000 00000000 63000000 03000000

.....
    
```

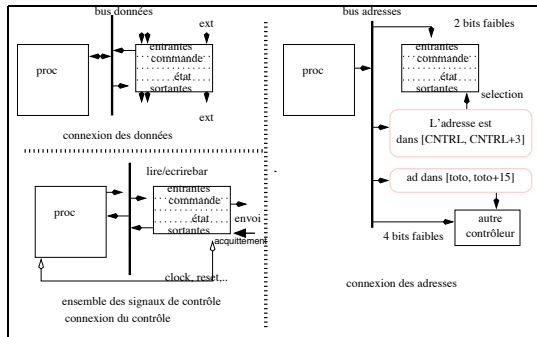
Organisation interne d'un ordinateur

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

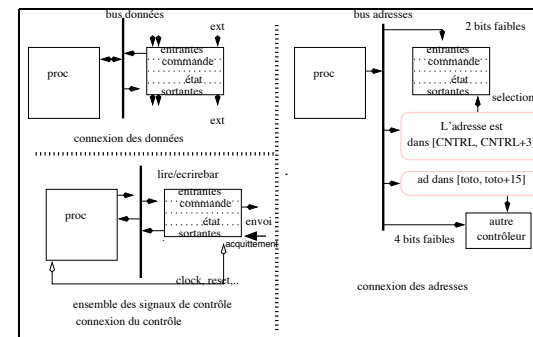
Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



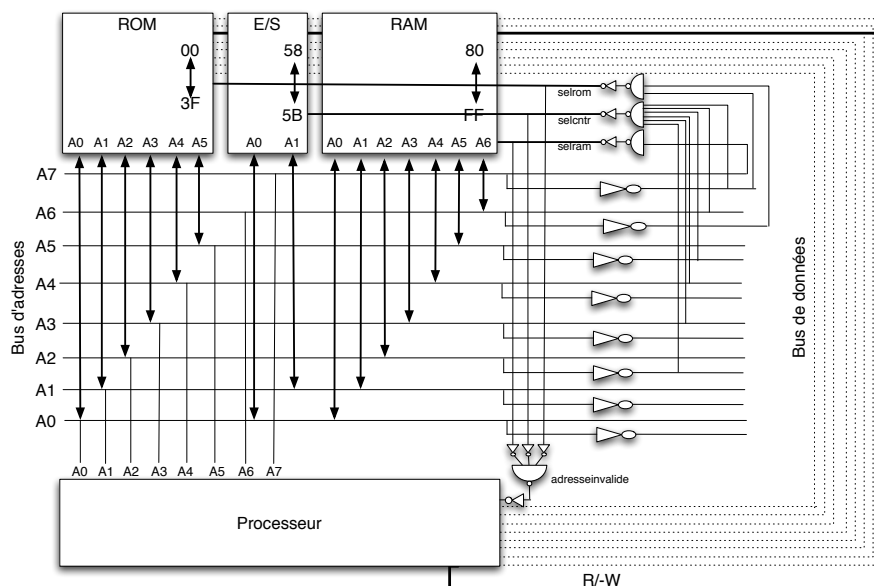
Etude du matériel d'entrées-sorties : *les entrées*

- bus données (lié au processeur)
- deux bits de bus adresses (pour sélectionner l'un des 4 mots CNTRL +0, +1, +2 ou +3)
- un signal de sélection provenant du **décodeur d'adresses**
- le signal *Read/Write* du processeur
- un paquet de données (8 fils) venant du monde extérieur. Disons pour simplifier 8 interrupteurs
- le signal d'horloge (par exemple le même que le processeur). On peut raisonner comme si, à chaque front de l'horloge la valeur venant des interrupteurs était échantillonnée dans le registre *Mdonnéesentr*.
- une entrée **ACQUITTEMENT** si c'est un contrôleur de sortie.

Etude du matériel d'entrées-sorties : *les sorties*

- Il délivre sur le bus données du processeur le contenu du registre *Mdonnéesentr* si il y a **sélection, lecture et adressage** de *Mdonnéesentr*, c'est-à-dire si le processeur exécute une instruction *LOAD* à l'adresse CNTRL +3
- Il délivre sur le bus données du processeur le contenu du registre *Métat* si il y a **sélection, lecture et adressage** de *Métat*, c'est-à-dire si le processeur exécute une instruction *LOAD* à l'adresse CNTRL +1.
- On peut raisonner comme si le contenu du registre *Mdonnéesentr* était affiché en permanence sur 8 pattes de sorties vers l'extérieur (8 diodes, par exemple).
- Une sortie **ENVOI** si c'est un contrôleur de sortie.

Connexions processeur/contrôleur/mémoires/décodeur



Introduction à la structure interne des processeurs : une machine à 5 instructions

Bruno Ferres Kevin Marquet Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025

Les instructions

Les instructions sont décrites ci-dessous. On donne pour chacune une **syntaxe de langage d'assemblage**, ainsi que l'effet (la **sémantique**) de l'instruction.

- **clr** : mise à zéro du registre ACC.
- **ld #vi** : chargement de la valeur immédiate vi dans ACC.
- **st ad** : rangement en mémoire à l'adresse ad du contenu de ACC.
- **jmp ad** : saut à l'adresse ad.
- **add ad** : mise à jour de ACC avec la somme du contenu de ACC et du mot mémoire d'adresse ad.

```
ld #3
st 8
et: add 8
jmp et
```

Que contient la mémoire après assemblage (traduction en binaire) et chargement en mémoire ? On suppose que l'adresse de chargement est 0.

@	val.	asm
0	2	ld #3
1	3	
2	3	st 8
3	8	
et: 4	5	add 8
5	8	
6	4	jmp 4 (jmp et)
7	4	
8	?	

Codage des instructions

Les instructions sont codées sur **1 ou 2 mots de 4 bits** chacuns :

- le premier mot représente le code de l'opération : **clr**, **ld**, **st**, **jmp**, **add**);
- le deuxième mot, s'il existe, contient une **opérande** (une adresse ou bien une constante).

Le codage est le suivant :

clr	1	
ld #vi	2	vi
st ad	3	ad
jmp ad	4	ad
add ad	5	ad

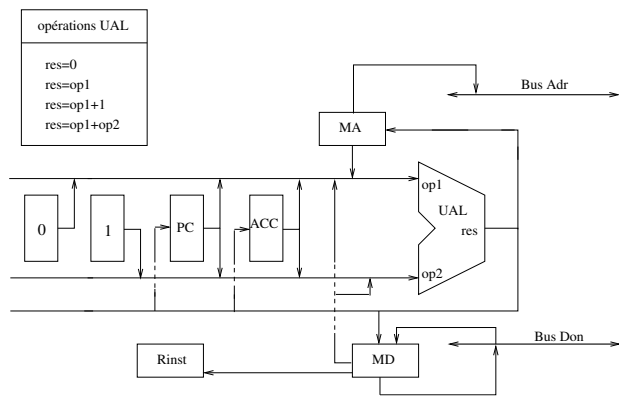
En adoptant un point de vue fonctionnel, en considérant les ressources du processeur comme les variables d'un programme, l'algorithme d'interprétation des instructions peut être décrit de la façon suivante :

```
pc ← 0
tantque vrai
    selon mem[pc]
    mem[pc]=1 {clr} : acc ← 0 pc ← pc+1
    mem[pc]=2 {ld} : acc ← mem[pc+1] pc ← pc+2
    mem[pc]=3 {st} : mem[mem[pc+1]] ← acc pc ← pc+2
    mem[pc]=4 {jmp} : pc ← mem[pc+1]
    mem[pc]=5 {add} : acc ← acc + mem[mem[pc+1]] pc ← pc+2
```

Exercice : Dérouler l'exécution du programme précédent en utilisant cet algorithme.

Partie opérative

Le processeur comporte une partie qui permet de stocker des informations dans des registres (visibles ou non du programmeur), de faire des calculs (+, -, &, ...). Cette partie est reliée à la mémoire par les bus adresses et données. On l'appelle **Partie Opérative** (ou PO).



Micro-actions et micro-conditions

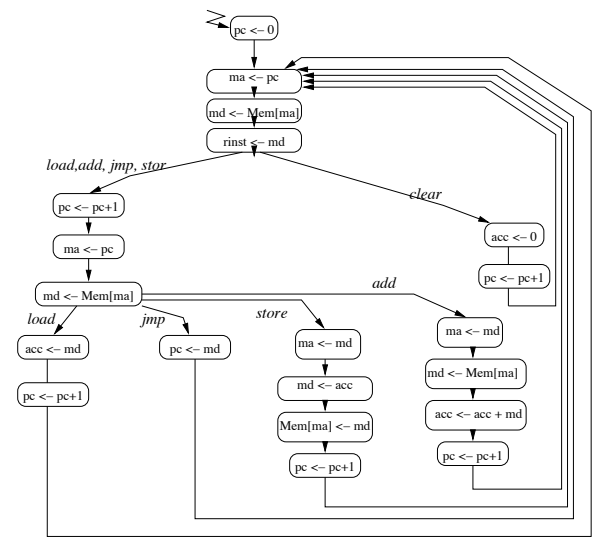
On fait des hypothèses FORTES sur les transferts possibles :

$md \leftarrow mem[ma]$	lecture d'un mot mémoire.	C'est la seule possibilité en lecture !
$mem[ma] \leftarrow md$	écriture d'un mot mémoire	C'est la seule possibilité en écriture !
$rinst \leftarrow md$	affectation	C'est la seule affectation possible dans $rinst$
$reg_0 \leftarrow 0$	affectation	reg_0 est pc, acc, ma, ou md
$reg_0 \leftarrow reg_1$	affectation	reg_0 est pc, acc, ma, ou md
		reg_1 est pc, acc, ma, ou md
$reg_0 \leftarrow reg_1 + 1$	incréméntation	reg_0 est pc, acc, ma, ou md
		reg_1 est pc, acc, ma, ou md
$reg_0 \leftarrow reg_1 + reg_2$	opération	reg_0 est pc, acc, ma, ou md
		reg_1 est pc, acc, ma, ou md
		reg_2 est pc, acc, ou md

On fait aussi des hypothèses sur les tests : ($rinst = \text{entier}$)

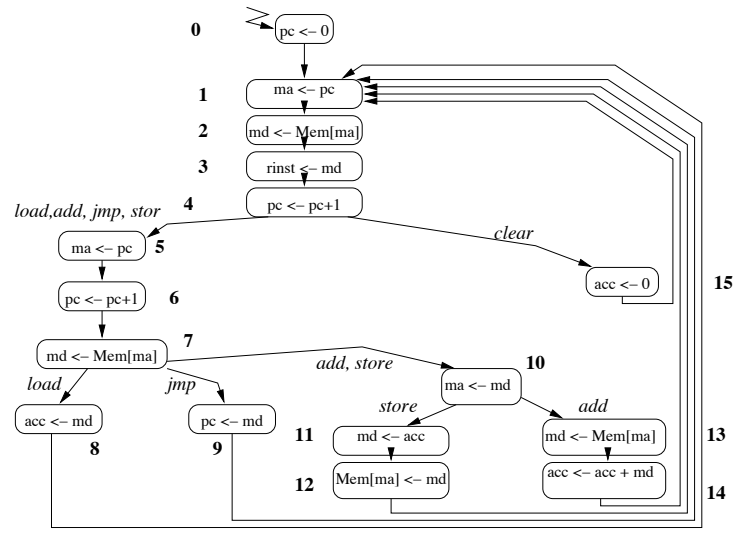
Ces types de transferts et les tests constituent le langage des micro-actions et des micro-conditions.

Une première version



Remarque : La notation de la condition clear doit être comprise comme le booléen $rinst = 1$.

Version amélioré de l'automate



Version améliorée de l'automate d'interprétation du langage machine (**Partie Contrôle**)

Question (1/2)

Combien de “temps” pour un `ld` ? (en considérant que les lectures prennent 2 “temps” et les écritures 3 “temps”)

- A.) 9 “temps” ou moins
- B.) 10-11 “temps”
- C.) 12-13 “temps”
- D.) 14 “temps” ou plus
- E.) Je ne sais pas

Réponse : B.) 10 “temps”

Exemple de code

étiquette	mnémonique ou directive	référence	mode adressage
	.text		
debut :	clr		
	ld	#8	immédiat
ici :	st	xx	absolu ou direct
	add	xx	absolu ou direct
	jmp	ici	absolu ou direct
	.data		
xx :			

Exercice : Que contient la mémoire après chargement en supposant que l'adresse de chargement est 0 et que xx est l'adresse 15.

Question (2/2)

Combien de “temps” pour un `st` ? (en considérant que les lectures prennent 2 “temps” et les écritures 3 “temps”)

- A.) 9 “temps” ou moins
- B.) 10-11 “temps”
- C.) 12-13 “temps”
- D.) 14 “temps” ou plus
- E.) Je ne sais pas

Réponse : D.) 14 “temps”

Contenu en mémoire

adresse	valeur	origine
0	1	clr
1	2	load
2	8	val immédiate
3	3	store
4	15	adresse zone data
5	5	add
6	15	adresse zone data
7	4	jump
8	3	adresse de "ici"
...
15	variable	non initialisée

Exercice : Donnez le déroulement au cycle près du programme.

Dérroulement
(2/2)

état	pc	ma	md	rinst	acc	mem[15]	état	pc	ma	md	rinst	acc	mem[15]
0	0						11			8			
1		0					12						8
2			1				1		5				
3				1			2			5			
4	1						3				5		
15					0		4	6					
1		1					5		6				
2			2				6	7					
3				2			7			15			
4	2						10		15				
5		2					13			8			
6	3						14					16	
7			8				1		7				
8					8		2			4			
1		3					3				4		
2			3				4	8					
3				3			5		8				
4	4						6	9					
5		4					7			3			
6	5						9	3					
7			15				1	etc.					
10		15											

Plan

- 1

Arithmétique
- 2

Structures de contrôle
- 3

Fonctions
- 4

Pipeline
- 5

Mémoire cache
- 6

Conclusions

Optimisations

Bruno Ferres
Kevin Marquet
Denis Bouhineau
basé sur un cours de Fabienne Carrier & Stéphane Devismes

Université Grenoble Alpes

15 décembre 2025



Résultats connus
(1/2)

- Calcul avec des constantes (version attendue)

#include <stdio.h>

int main () {
 int i=4, j=5;
 printf("4+5=%d\n",i+j);
 return;}

.file "progConstantes.c"
.section .rodata
.align 2
.LC0:
.ascii "4+5=%d\012\000"
.text
.align 2
.global main
.type main, %function
main:
stmfd sp!, {fp, lr}
add fp, sp, #4
sub sp, sp, #8
mov r3, #4
str r3, [fp, #-8]
mov r3, #5
str r3, [fp, #-12]
ldr r2, [fp, #-8]
ldr r3, [fp, #-12]
add r3, r2, r3
ldr r0, .L2
mov r1, r3
bl printf
mov r0, r3
sub sp, fp, #4
ldmfd sp!, {fp, lr}
bx lr

Résultats connus

(2/2)

- Calcul avec des constantes (version optimisée)

```
#include <stdio.h>

int main () {
    int i=4, j=5;
    printf("4+5=%d\n",i+j);
    return;}

.file "progConstantes.c"
.text
.align 2
.global main
.type main, %function
main:
    stmfid sp!, {r3, lr}
    ldr r0, .L2
    mov r1, #9
    bl printf
    ldmfd sp!, {r3, lr}
    bx lr
.L3:
    .align 2
.L2:
    .word .LC0
    .size main, .-main
.section .rodata.str1.4,"aMS",%progbits,1
    .align 2
.LC0:
    .ascii "4+5=%d\012\000"
    .ident "GCC: (GNU) 4.5.3"
```

Division arbitraire

- Division arbitraire (version attendue)

```
#include <stdio.h>

int main () {
    int i,j;
    scanf("%d",&i);
    scanf("%d",&j);
    printf("%d / %d=%d\n",i,j,i/j);
    return;}

main:
    stmfid sp!, {r4, r5, fp, lr}
    add fp, sp, #12
    sub sp, sp, #8
    sub r3, fp, #16
    ldr r0, .L2
    mov r1, r3
    bl scanf
    sub r3, fp, #20
    ldr r0, .L2
    mov r1, r3
    bl scanf
    ldr r5, [fp, #-16]
    ldr r4, [fp, #-20]
    ldr r2, [fp, #-16]
    ldr r3, [fp, #-20]
    mov r0, r2
    mov r1, r3
    bl __aeabi_idiv
    mov r3, r0
    ldr r0, .L2+4
    mov r1, r5
    mov r2, r4
    bl printf
    mov r0, r3
    sub sp, fp, #12
    ldmfd sp!, {r4, r5, fp, lr}
```

Opérations équivalentes

- Divisions équivalentes

Division par 2

- Division par 2 (version optimisée)

```
#include <stdio.h>

int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("%d / 2 =%d\n",i,i/2);
    return;}

main:
    stmfid sp!, {fp, lr}
    add fp, sp, #4
    sub sp, sp, #8
    sub r3, fp, #8
    ldr r0, .L2
    mov r1, r3
    bl scanf
    ldr r2, [fp, #-8]
    ldr r3, [fp, #-8]
    mov r1, r3, lsr #31
    add r3, r1, r3
    mov r3, r3, asr #1
    ldr r0, .L2+4
    mov r1, r2
    mov r2, r3
    bl printf
    mov r0, r3
    sub sp, fp, #4
    ldmfd sp!, {fp, lr}
    bx lr
.L3:
    .align 2
.L2:
    .word .LC0
    .word .LC1
    .size main, .-main
    .ident "GCC: (GNU) 4.5.3"
```

Arithmétique (conclusions)

- Les expressions calculées ne sont pas nécessairement celles programmées
- Le programmeur peut conserver les expressions sous forme logiques / littérales
- Le compilateur optimise !
- Gain espéré : temps de calcul

Conditionnelles

(2/2)

- Conditionnelle (version optimisée)
- (version assembleur X86)

```
#include <stdio.h>

int main () {
    int i=4;
    if (i&1) {
        printf("4 est impair\n");
    }
    else {
        printf("4 est pair\n");
    }
    return 0;
}
```

```
main:
.LFB24:
.cfi_startproc
subq $8, %rsp
.cfi_def_cfa_offset 16
movl $.LC0, %edi
call puts
addq $8, %rsp
.cfi_def_cfa_offset 8
ret
.cfi_endproc
```

Conditionnelles

(1/2)

- Conditionnelle (version attendue)
- (version assembleur X86)

```
#include <stdio.h>

int main () {
    int i=4;
    if (i&1) {
        printf("4 est impair\n");
    }
    else {
        printf("4 est pair\n");
    }
    return 0;
}
```

```
main:
.LFB0:
.cfi_startproc
pushq %rbp
.cfi_def_cfa_offset 16
.cfi_offset 6, -16
movq %rsp, %rbp
.cfi_def_cfa_register 6
subq $16, %rsp
movl $4, -4(%rbp)
movl -4(%rbp), %eax
andl $1, %eax
testl %eax, %eax
je .L2
movl $.LC0, %edi
call puts
jmp .L3
.L2:
movl $.LC1, %edi
call puts
.L3:
movl $0, %eax
leave
.cfi_def_cfa 7, 8
ret
.cfi_endproc
```

Boucles

(1/2)

- Boucle (version attendue)
- (version clang)

```
#include <stdio.h>

int main () {
    int i, s=0, a;
    for(i=0;i<10;i++) {
        scanf("%d",&a);
        s=s+a;
    }
    printf("Somme : %d\n",s);
    return 0;
}
```

```
main:                                # @main
[...] subq $32, %rsp
movl $0, -4(%rbp)
movl $0, -12(%rbp)
movl $0, -8(%rbp)
.LBB0_1:                             # =>This Inner Loop Header
cmpl $10, -8(%rbp)
jge .LBB0_4
# BB#2:                             # in Loop: Header
movabsq $.L.str, %rdi
leaq -16(%rbp), %rsi
movb $0, %al
callq __isoc99_scanf
movl -12(%rbp), %ecx
addl -16(%rbp), %ecx
movl %ecx, -12(%rbp)
movl %eax, -20(%rbp)                # 4-byte Spill
# BB#3:                             # in Loop: Header
movl -8(%rbp), %eax
addl $1, %eax
movl %eax, -8(%rbp)
jmp .LBB0_1
.LBB0_4:
movabsq $.L.str1, %rdi
movl -12(%rbp), %esi
movb $0, %al
callq printf
movl $0, %esi
movl %eax, -24(%rbp)                # 4-byte Spill
movl %esi, %eax
```


Fonctions récursives

(1/6)

- Fonction récursive (version attendue)
- Somme (version attendue)

```
int somme(int a,int s) {
    if (!a) {
        return s;
    }
    else {
        return somme(a-1,a+s);
    }
}

int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i,0));
    return 0;
}
```

```
somme:
    stmfd sp!, {fp, lr}
    add fp, sp, #4
    sub sp, sp, #8
    str r0, [fp, #-8]
    str r1, [fp, #-12]
    ldr r3, [fp, #-8]
    cmp r3, #0
    bne .L2
    ldr r3, [fp, #-12]
    b .L3
.L2:
    ldr r3, [fp, #-8]
    sub r2, r3, #1
    ldr r1, [fp, #-8]
    ldr r3, [fp, #-12]
    add r3, r1, r3
    mov r0, r2
    mov r1, r3
    bl somme
    mov r3, r0
.L3:
    mov r0, r3
    sub sp, fp, #4
    ldmfd sp!, {fp, lr}
    bx lr
```

Fonctions récursives

(3/6)

- Fonction récursive (version optimisée)
- Somme (version optimisée)

```
int somme(int a,int s) {
    if (!a) {
        return s;
    }
    else {
        return somme(a-1,a+s);
    }
}

int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i,0));
    return 0;
}
```

```
somme:
    stmfd sp!, {r3, lr}
    subs r3, r0, #0
    beq .L2
    sub r0, r3, #1
    add r1, r1, r3
    bl somme
    mov r1, r0
.L2:
    mov r0, r1
    ldmfd sp!, {r3, lr}
    bx lr
```

Fonctions récursives

(2/6)

- Fonction récursive (version attendue)
- Main (version attendue)

```
int somme(int a,int s) {
    if (!a) {
        return s;
    }
    else {
        return somme(a-1,a+s);
    }
}

int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i,0));
    return 0;
}
```

```
main:
    stmfd sp!, {r4, fp, lr}
    add fp, sp, #8
    sub sp, sp, #12
    sub r3, fp, #16
    ldr r0, .L5
    mov r1, r3
    bl scanf
    ldr r4, [fp, #-16]
    ldr r3, [fp, #-16]
    mov r0, r3
    mov r1, #0
    bl somme
    mov r3, r0
    ldr r0, .L5+4
    mov r1, r4
    mov r2, r3
    bl printf
    mov r3, #0
    mov r0, r3
    sub sp, fp, #8
    ldmfd sp!, {r4, fp, lr}
    bx lr
```

Fonctions récursives

(4/6)

- Fonction récursive (version optimisée)
- Main (version optimisée)

```
int somme(int a,int s) {
    if (!a) {
        return s;
    }
    else {
        return somme(a-1,a+s);
    }
}

int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i,0));
    return 0;
}
```

```
main:
    stmfd sp!, {r4, lr}
    sub sp, sp, #8
    ldr r0, .L4
    add r1, sp, #4
    bl scanf
    ldr r4, [sp, #4]
    mov r0, r4
    mov r1, #0
    bl somme
    mov r2, r0
    ldr r0, .L4+4
    mov r1, r4
    bl printf
    mov r0, #0
    add sp, sp, #8
    ldmfd sp!, {r4, lr}
    bx lr
```

Fonctions récursives

(5/6)

- Fonction récursive (version + optimisée)
- Somme (version + optimisée)

```
int somme(int a,int s) {
    if (!a) {
        return s;}
    else {
        return somme(a-1,a+s);}}
```

```
int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i,0));
    return 0;}
```

```
somme:
    subs r3, r0, #0
    bne .L5
    b .L2
.L4:
    mov r3, r2
.L5:
    subs r2, r3, #1
    add r1, r1, r3
    bne .L4
.L2:
    mov r0, r1
    bx lr
```

Fonctions récursives : exemples d'exécutions

(1/2)

- Somme récursive non terminale

```
int somme(int a) {
    if (!a) {
        return 0;}
    else {
        return a+somme(a-1);}}
```

```
int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i));
    return 0;}
```

- Somme récursive terminale

```
int somme(int a,int s) {
    if (!a) {
        return s;}
    else {
        return somme(a-1,a+s);}}
```

```
int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i,0));
    return 0;}
```

Fonctions récursives

(6/6)

- Fonction récursive (version + optimisée)
- Main (version + optimisée)

```
int somme(int a,int s) {
    if (!a) {
        return s;}
    else {
        return somme(a-1,a+s);}}
```

```
int main () {
    int i;
    scanf("%d",&i);
    printf("1+2+...+%d=%d\n",i,somme(i,0));
    return 0;}
```

```
main:
    str lr, [sp, #-4]!
    sub sp, sp, #12
    add r1, sp, #4
    ldr r0, .L14
    bl scanf
    ldr r1, [sp, #4]
    cmp r1, #0
    movne r3, r1
    movne r2, #0
    bne .L9
    b .L13
.L11:
    mov r3, r0
.L9:
    subs r0, r3, #1
    add r2, r2, r3
    bne .L11
.L8:
    ldr r0, .L14+4
    bl printf
    mov r0, #0
    add sp, sp, #12
    ldr lr, [sp], #4
    bx lr
.L13:
    mov r2, r1
```

Fonctions récursives : exemples d'exécutions

(2/2)

- Version récursive non terminale : plante à 300 000 (segmentation fault)
- Version récursive non terminale optimisée par le compilateur : plante à 600 000 (segmentation fault)
- Version récursive terminale : plante à 300 000 (segmentation fault)
- Version récursive terminale optimisée par le compilateur : plante à 600 000 (segmentation fault)
- Version + optimisée par le compilateur : 3 000 000 000 termes calculés en 1s

Fonctions (conclusions)

- Les fonctions utilisées ne sont pas nécessairement celles programmées
- Le programmeur peut conserver les fonctions les plus claires
- Le compilateur optimise !
- Gain espéré : temps d'exécution des appels (branchement+gestion paramètres)
- Gain espéré : place dans la pile (et cela peut fonctionner !)
- Gain espéré : et plus ? [branchement ... voir la suite]

Exécution de trois instructions

Exécution "simple" de trois instructions :



(source wikipedia)

- temps d'exécution : 15 Δ

Pipeline (rappel)

Hypothèse :

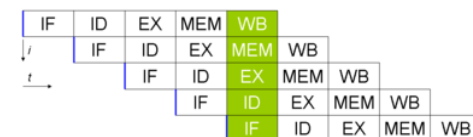
La chaîne de traitement d'une instruction comporte 5 étapes :

- IF : récupération de l'instruction
- ID : récupération des opérandes
- EX : exécution de l'opération
- MEM : écriture ou lecture mémoire
- WB : écriture registre

Exécution de cinq instructions

Avec pipeline

Exécution pipelinée de cinq instructions, les unes à la suite des autres :



(source wikipedia)

- temps d'exécution : 9 Δ

Rupture de pipeline

Mais !

les pipelines peuvent être rompus :

- Branchement
- Dépendance entre données
- ...

Pipeline (Conclusions)

Les processeurs modernes fonctionnent avec un **pipeline d'instructions**, afin d'optimiser les performances.

Ce fonctionnement en pipeline peut être altéré :

- rupture de séquence
→ quelle instruction ajouter dans le pipeline après un branchement conditionnel ?
- dépendance de données
→ besoin d'attendre un résultat avant d'avancer dans le pipeline

Pour gérer cela, des "bulles" sont insérées dans le pipeline, lors de l'exécution du programme.

Pipeline et branchement

Ruptures de pipeline et branchement, cela concerne :

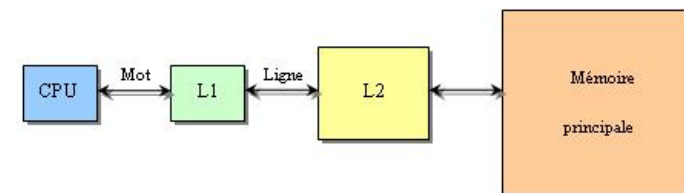
- Conditionnelles
- Boucles
- Appels de fonction

Le compilateur peut s'en occuper

↪ Le programmeur peut aider

Organisation mémoire avec cache (rappels)

Structuration en caches de plusieurs niveaux



source wikipedia.

Pour le processeur, il n'y a qu'une mémoire : la Mémoire.

Mémoire cache (rappels)

Principes de localité et utilisation :

- Principe de localité spatiale :
 - ↪ l'accès à une donnée X va probablement être suivi d'accès à d'autres données Y, Z proches de X.
- Principe de localité temporelle :
 - ↪ l'accès à une donnée X à un instant donné va probablement être suivi d'autres accès à cette même donnée
- Le cache répond aux demandes du processeur :
 - si la donnée est disponible dans le cache : ok
 - si la donnée n'est pas disponible
 - ↪ il faut aller la chercher en mémoire
 - ↪ et faire de la place dans le cache

Optimisations (conclusions)

- Le compilateur peut optimiser
- Le programmeur peut aussi optimiser !
 - ↪ il faut travailler l'**algorithmique** et, plus tard, le **parallélisme**
- Comprendre l'exécution en regardant le code machine
 - ↪ voire, contrôler le code machine ...
- Utiliser des *profiler* pour déterminer où se trouvent les coûts
 - ↪ n'optimiser que ce qui est bloquant ...
- **Mais surtout, avant d'optimiser : programmer juste !**