

Examen UE INF401 : Architectures des Ordinateurs

Mai 2019, durée 2 h 00

Document autorisé : 1 feuille A4 Recto/Verso de notes manuscrites.

Les calculettes et téléphones portables sont interdits.

La plupart des questions sont indépendantes, si vous avez des difficultés avec une question, passez à la suivante.

Le barème est donné à titre indicatif.

1 Question de cours ARM (3 points)

Donner trois des registres du processeur ARM (parmi $R_{10} - R_{15}$) ayant une fonction particulière. Pour chacun, donner

- son nom abrégé et son nom usuel complet (en français ou en anglais) ;
- sa fonction (une phrase) et
- un exemple d'utilisation (une à deux instructions) avec une explication (une phrase).

Éléments de correction.

- **lr (r14)** : link register ou pointeur d'adresse de retour. À chaque appel de fonction (**bl**), l'adresse de retour (c-à-d, l'adresse de l'instruction qui suit l'appel est stocké dans **lr**. On l'utilise pour retourner dans le code de l'appelant juste après l'appel (**mov pc, lr**).
- **sp (r13)** : stack pointer ou pointeur de pile. Contient l'adresse qui repère le sommet de pile. On empile, par exemple la valeur dans **r0**, en full descending en exécutant **sub sp, sp, #4** suivi de **str r0, [sp]**.
- **fp (r11)** : frame pointer ou pointeur de cadre, pointeur d'environnement. Ce registre contient un repère fixe attaché à l'appel courant. Les paramètres et variables locales d'un appel sont tous à distance fixe de **fp**. Par exemple, pour récupérer la valeur de la première variable locale dans **r1**, on exécute **ldr r1, [fp, #4]**.
- **pc (r15)** : program counter ou compteur programme. Ce registre contient l'adresse de l'instruction courante. On l'utilise pour retourner dans le code de l'appelant juste après l'appel (**mov pc, lr**).

2 Programmation en langage d'assemblage ARM (10 points)

Le but de cet exercice est de calculer le maximum des éléments d'un tableau d'entiers naturels puis d'afficher cette valeur en binaire. Pour cela, on considère la zone `.data` suivante :

```
.data
R:   .asciz "Max en binaire : "
@           1234567890123456   @indication pour compter les caractères
    .balign 4
T:   .word 12
    .word 11
    .word 14
    .word 44
    .word 99
    .word 452
    .word 1
    .word 4
    .word 42
    .word 241
```

Questions.

- (a) Rappelez comment est représentée une chaîne de caractères en mémoire et donnez la taille en octets de la chaîne de caractères R. **(0.5 point)**

Éléments de correction. Un tableau d'octets, un octet par caractère + le caractère de fin de chaîne. Donc, R est stockée sur 17 octets.

- (b) Quel est le rôle de la directive `.balign 4`? Pourquoi s'en sert-on ici? **(0.5 point)**

Éléments de correction. Cette directive assure que la prochaine valeur sera stockée à la première adresse libre multiple de 4. Les contraintes d'alignement sur le stockage des words imposent que le mot « 12 » soit stocké à une adresse multiple de 4.

- (c) Quelle est la taille en octets du tableau T? **(0.5 point)**

Éléments de correction. $10 \times 4 = 40$ octets.

- (d) En supposant que la zone `.data` est stockée à partir de l'adresse `0xC000`, quelle sera l'adresse (en hexadécimale) du début du tableau T? **(0.5 point)**

Éléments de correction. R occupe les positions `0xC000` à `0xC011`. La première adresse multiple de 4 libre est `0xC014`.

2.1 Écrire une procédure

```
1: Procédure affBinaire(a: entier naturel)
2:     si a != 0 alors
3:         affBinaire(a/2)
4:         si a est pair alors
5:             EcrCar('0')
6:         sinon
7:             EcrCar('1')
8:         fin si
9:     fin si
```

- (e) En appliquant la **méthode systématique vue en cours**, traduisez en ARM le corps de la procédure `affBinaire` ci-dessus en tenant compte des indications suivantes :
- a est un paramètre passé par la pile.
 - `EcrCar` est une procédure du fichier `es.s` utilisé en TP (un rappel des fonctions de `es.s` est donné en annexe 0).
 - Pour les variables temporaires vous utiliserez les registres `r0`, `r1` et `r2`, qui devront être sauvegardés en pile avant utilisation, puis restaurés suivant la convention du cours.

(4 points)

Éléments de correction.

```
affBinaire:
    sub sp,sp,#4
    str lr,[sp]

    sub sp,sp,#4
    str fp,[sp]

    mov fp,sp

    sub sp,sp,#4    @ sequence equivalente : push {r0-r2}
    str r2,[sp]
    sub sp,sp,#4
```

```

    str r1,[sp]
    sub sp,sp,#4
    str r0,[sp]

    ldr r0,[fp,#8]
    cmp r0,#0
    beq finF

    mov r2,r0,lsr #1
    sub sp,sp,#4
    str r2,[sp]
    bl  affBinaire
    add sp,sp,#4

    tst r0,#1
    bne impair
    @ impair
    mov r1,#'0'
    bl EcrCar
    b  finF

impair:
    mov r1,#'1'
    bl EcrCar

finF: ldr r0,[sp]      @ sequence equivalente pop {r0-r2}
    add sp,sp,#4
    ldr r1,[sp]
    add sp,sp,#4
    ldr r2,[sp]
    add sp,sp,#4

    ldr fp,[sp]
    add sp,sp,#4

    ldr lr,[sp]
    add sp,sp,#4

    bx lr

```

- (f) En supposant un appel d'affBinaire(42) à partir du programme principal (main), dessinez l'état de la pile juste avant le premier appel récursif effectif (bl) en ligne 3 de cette procédure. (1 point)

Éléments de correction.

RAM

Adr.	Valeurs
00..0	-----
	...
	...
	...
	a=21 <- SP
	r0(main)
	r1(main)
	r2(main)
	fp(main) <- FP
	lr(main)

```

    | a=42   |
    | ...   |
    | ...   |
    | ...   |
FF..F |-----|

```

2.2 Manipulation d'un tableau et appel d'une procédure

Nous allons maintenant compléter la zone `.text` suivante :

```

.text
.global main
main:
    @ partie à compléter
    b exit
ptrT: .word T
ptrR: .word R

```

- (g) Complétez la zone `.text` ci-dessus avec le code ARM de l'algorithme ci-dessous en tenant compte des indications suivantes :
- Pour les variables `max` et `i`, vous utiliserez les registres `r2` et `r3`.
 - `T` est défini dans la zone `.data` proposée au début de la section 2.
- (2 points)**

```

20: Programme principal
21:     max := T[0]
22:     pour i de 1 à 9 faire
23:         si max < T[i] alors
24:             max := T[i]
25:         fin si
26:     fin pour

```

Éléments de correction.

```

    ldr r0,ptrT
    ldr r2,[r0]

    mov r3,#1
pour: cmp r3,#10
    beq fin
    mov r4,r3,ls1 #2
    ldr r5,[r0,r4]

    cmp r2,r5
    bcs finsi
    mov r2,r5

finsi:
    add r3,r3,#1
    b pour
fin:

```

- (h) Traduisez en ARM les deux appels de fonctions ci-dessous en tenant compte des indications suivantes :
- On suppose que `max` est stocké dans le registre `r2`.
 - `EcrChaine` est une procédure du fichier `es.s` utilisé en TP (un rappel des fonctions de `es.s` est donné en annexe 0).

— Le paramètre de la procédure `affBinaire` doit être stocké en pile, d'après la convention du cours.
(1 point)

```
27:    EcrChaine("Max en binaire :")
28:    affBinaire(max)
```

Éléments de correction.

```
@ EcrChaine("Max en binaire :")
    ldr r1,ptrR
    bl EcrChaine
```

```
@ affBinaire(max)
    sub sp,sp,#4
    str r2,[sp]
    bl affBinaire
    add sp,sp,#4
```

3 Automate, microprogrammation et processeur (7 points)

Dans cette partie, nous enrichissons le processeur fictif vu lors du cours et dont la partie opérative est représentée dans la figure ci-dessous :

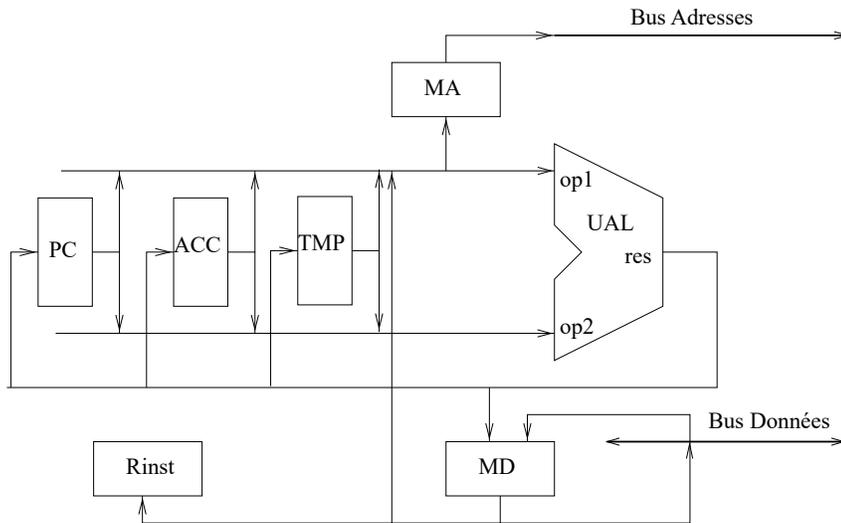


FIGURE 1 – Partie opérative du processeur

Structure de la partie opérative : micro-actions et micro-conditions. Dans la partie opérative on a les registres suivants : PC, ACC, Rinst, MA (memory address), MD (memory data) et TMP. Les transferts possibles sont les suivants :

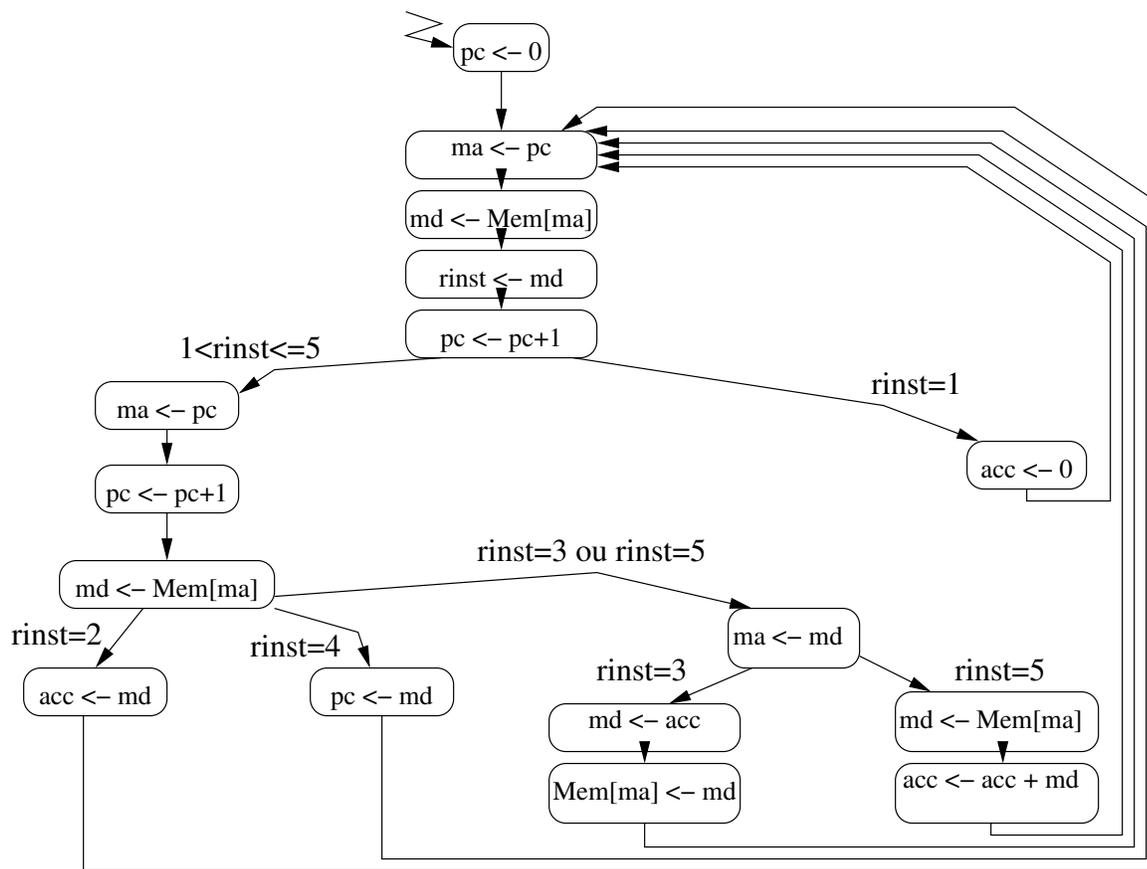


FIGURE 2 – Graphe de contrôle

$MD \leftarrow Mem[MA]$	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	Affectation spécifique à $Rinst$
$PC \leftarrow PC + 1$	incrémentat	Incrémentat spécifique à PC
$reg_0 \leftarrow 0$	mise à zéro	reg_0 est PC , ACC , ou TMP
$reg_0 \leftarrow reg_1$	affectation	reg_0 est PC , ACC , TMP , MA , ou MD reg_1 est PC , ACC , TMP , ou MD
$reg_0 \leftarrow reg_1 \ll$	décalage à gauche d'un bit	reg_0 est PC , ACC , TMP , ou MD reg_1 est PC , ACC , TMP , ou MD
$reg_0 \leftarrow reg_1 \text{ op } reg_2$	opération	reg_0 est PC , ACC , TMP , ou MD reg_1 est PC , ACC , TMP , ou MD reg_2 est PC , ACC , TMP , ou MD op : + ou -
$reg_0 \leftarrow (reg_1 \ll) \text{ op } reg_2$	opération avec décalage	reg_0 est PC , ACC , TMP , ou MD reg_1 est PC , ACC , TMP , ou MD reg_2 est PC , ACC , TMP , ou MD op : + ou -

Seul le registre $Rinst$ permet de faire des tests : $Rinst = \text{entier}$ (c'est donc la seule micro-condition).

Le langage d'assemblage. Nous rappelons que ce processeur comporte un seul registre de données directement visible par le programmeur : ACC (pour accumulateur). La taille du codage d'une adresse et d'une donnée est un mot de 4 bits. La mémoire comporte donc 16 mots adressables.

Les instructions sont décrites ci-dessous. On donne pour chacune une syntaxe de langage d'assemblage, le code machine, la sémantiques et la taille du codage :

instruction	code	signification	mots
clr	1	mise à zéro du registre ACC	1
ld# vi	2	chargement de la valeur immédiate vi dans ACC	2
st ad	3	rangement en mémoire à l'adresse ad du contenu de ACC	2
jmp ad	4	saut incondtionnel à l'adresse ad	2
add ad	5	mise à jour de ACC avec la somme de ACC et du mot d'adresse ad	2

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

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

L'automate d'interprétation de ce langage est donné dans la figure 2.

Enrichissement du langage. Nous souhaitons enrichir le langage de notre processeur en ajoutant une instruction de multiplication réduite (pour *3, *5), avec deux modes d'adressage (adressage implicite pour ACC et mode d'adressage direct).

Sémantique opérationnelle des instructions à ajouter. Les instructions à ajouter, leur code, leur sémantiques et la taille de leur codage sont données dans la table ci-dessous :

instruction	code	signification	mots
3ac	9	multiplication de ACC par 3	1
5ac	10	multiplication de ACC par 5	1
m3@ ad	11	multiplication du mot à l'adresse mémoire ad par 3	2
m5@ ad	12	multiplication du mot à l'adresse mémoire ad par 5	2

État initial de la mémoire. On suppose que le programme suivant est stocké en mémoire, la zone `.text` commence à l'adresse `0` et la zone `.data` commence à l'adresse `14`.

Adresse	Valeur en mémoire
0	2
1	1
2	3
3	15
4	5
5	15
6	5
7	15
8	5
9	14
10	4
11	2
12	0
13	0
14	1
15	0

Questions.

- (a) Expliquez l'interprétation d'une instruction `st` suivant le graphe de contrôle de la figure 2, vous pouvez utiliser un exemple. **(1 point)**.

Éléments de correction. Si on interprète le premier `st` du programme précédent (à partir de la ligne 2). Rappel `acc` vaut 1. On a trois phases, la première consiste à récupérer l'instruction (`st`). La seconde phase, reconnaissant une instruction comportant un paramètre, consiste à récupérer le paramètre (`ad`). La dernière phase consiste à réaliser effectivement l'écriture en mémoire de l'accumulateur à l'adresse spécifiée.

```

ma := 2          %% phase 1 : récupération de l'instruction
md := 3 (mem[2])
rinst := 3
pc := 3
ma := 3          %% phase 2 : récupération de l'adresse
pc := 4
md := 15 (mem[3])
ma := 15        %% phase 3 : écriture en mémoire
md := 1 (acc)
mem[15] := 1

```

Ainsi, `mem[15]` a été affecté à 1.

- (b) Proposez un programme assembleur ayant une image mémoire identique à celle donnée pour l'état initial de la mémoire (**1 point**).

Éléments de correction.

```

.text
.org 0
main: ld# 1
tq:   st X
      add X
      add X
      add Un
      jmp tq
.data
.org 14
Un:   .valeur 1
X:    .valeur 0

```

- (c) Simulez, en suivant le graphe de contrôle de la figure 2, l'exécution au niveau des micro-actions du début du programme stocké en mémoire. Pour répondre, vous remplirez un tableau de simulation similaire à celui défini ci-après (avec une ligne par micro-action, 10 lignes en tout) (**1 point**).

Éléments de correction. On a exécuté `ld# 1` :

```

1: pc := 0
2: ma := 0 (pc)
3: md := 2 (mem[ma])
4: rinst:= 2 (md)
5: pc := 1 (pc++)
6: ma := 1 (pc)
7: pc := 2 (pc++)
8: md := 1 (mem[ma])
9: acc := 1 (md)
10: ma := 2 (pc)

```

- (d) Simulez, au niveau assembleur, l'exécution de treize instructions du programme en donnant en particulier les valeurs de ACC. Vous pourrez utiliser un tableau de simulation adapté à la situation. (**1 point**).

Éléments de correction.

```

acc := 1

X := 1
acc := 2
acc := 3
acc := 4

X := 4
acc := 8

```

```
acc := 12
acc := 13
```

```
X:= 13
acc := 10 @ on s'arrete ici
acc := 7
acc := 8
```

```
X:= 8
acc := 0
acc := 8
acc := 9
```

(e) Donnez les modifications à apporter à l'automate fourni par le graphe de contrôle de la figure 2 afin d'interpréter les instructions supplémentaires :

- 3ac et 5ac (1,5 points)
- m3@ ad et m5@ ad (1,5 points)

Indication : vous pourrez utiliser le registre TMP et les micro-actions de décalage.

Éléments de correction. Ci-dessous à optimiser en fusionnant les partie communes avec l'existant.

```
3ac :
ma := pc
md := mem[ma]
rinst := md
pc := pc + 1
si rinst = 9 alors
  tmp := acc
  acc := (acc <<) + tmp
fin si
```

```
5ac :
ma := pc
md := mem[ma]
rinst := md
pc := pc + 1
si rinst = 10 alors
  tmp := acc
  acc := acc <<
  acc := (acc <<) + tmp
fin si
```

```
m3@ :
ma := pc
md := mem[ma]
rinst := md
pc := pc + 1
ma := pc
pc := pc + 1
md := mem[ma]
si rinst = 11 alors
  ma := md
  md := mem[ma]
  tmp := md
  md := (md <<) + tmp
  mem[ma] := md
fin si
```

```

m5@ :
ma := pc
md := mem[ma]
rinst := md
pc := pc + 1
ma := pc
pc := pc + 1
md := mem[ma]
si rinst = 12 alors
  ma := md
  md := mem[ma]
  tmp := md
  md := md <<
  md := (md <<) + tmp
  mem[ma] := md
fin si

```

Tableau de simulation (pour la question c, à recopier sur votre copie)

	Micro-Action (exécutée)	PC	Rinst	ACC	MA	MD	Mem[14]	Mem[15]
0		?	?	?	?	?	1	0
1	pc ← 0	0						
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

4 ANNEXE 0 : fonctions d'entrée/sortie

Nous rappelons les principales fonctions d'entrée/sortie du fichier `es.s`.

- `b1 EcrHexa32` affiche le contenu de `r1` en hexadécimal.
- `b1 EcrZdecimal32` affiche le contenu de `r1` en décimal sous la forme d'un entier relatif de 32 bits.
- `b1 EcrZdecimal16` affiche le contenu de `r1` en décimal sous la forme d'un entier relatif de 16 bits.
- `b1 EcrZdecimal8` affiche le contenu de `r1` en décimal sous la forme d'un entier relatif de 8 bits.
- `b1 EcrNdecimal32` affiche le contenu de `r1` en décimal sous la forme d'un entier naturel de 32 bits.
- `b1 EcrNdecimal16` affiche le contenu de `r1` en décimal sous la forme d'un entier naturel de 16 bits.
- `b1 EcrNdecimal8` affiche le contenu de `r1` en décimal sous la forme d'un entier naturel de 8 bits.
- `b1 EcrChaine` affiche la chaîne de caractères dont l'adresse est dans `r1`.
- `b1 EcrCar` affiche le caractère dont le code ASCII est dans `r1`.
- `b1 Lire32` récupère au clavier un entier 32 bits et le stocke à l'adresse contenue dans `r1`.

- bl Lire16 récupère au clavier un entier 16 bits et le stocke à l'adresse contenue dans r1.
- bl Lire8 récupère au clavier un entier 8 bits et le stocke à l'adresse contenue dans r1.
- bl LireCar récupère au clavier un caractère et stocke son code ASCII à l'adresse contenue dans r1.

5 ANNEXE I : instructions du processeur ARM

Nom	Explication du nom	Opération	Remarque
AND	AND	et bit à bit	
EOR	Exclusive OR	ou exclusif bit à bit	
SUB	SUBstract	soustraction	
RSB	Reverse SuBstract	soustraction inversée	
ADD	ADDition	addition	
ADC	ADDition with Carry	addition avec retenue	
SBC	SuBstract with Carry	soustraction avec emprunt	
RSC	Reverse Substract with Carry	soustraction inversée avec emprunt	
TST	TeST	et bit à bit	pas rd
TEQ	Test EQuivalence	ou exclusif bit à bit	pas rd
CMP	CoMPare	soustraction	pas rd
CMN	CoMpare Not	addition	pas rd
ORR	OR	ou bit à bit	
MOV	MOVe	copie	pas rn
BIC	Bit Clear	et not bit à bit	
MVN	MoVe Not	not (complément à 1)	pas rn
MUL	MULTiplication	multiplication tronquée	pas r15
B**	Branch	rupture de séquence conditionnelle	** = condition, cf. ci-dessous
BL	Branch and Link	appel sous-programme	adresse de retour dans r14
LDR	Load Register	lecture mémoire	
STR	Store Register'	écriture mémoire	

L'opérande source d'une instruction MOV peut être une valeur immédiate notée #5 ou un registre noté Ri, i désignant le numéro du registre. Il peut aussi être le contenu d'un registre sur lequel on applique un décalage de k bits; on note Ri, DEC #k, avec DEC ∈ {LSL, LSR, ASR, ROR}.

6 ANNEXE II : codes conditions du processeur ARM

La table suivante donne les codes de conditions arithmétiques ** pour l'instruction de rupture de séquence B**.

mnémotique	signification	condition testée
EQ	égal	Z
NE	non égal	\bar{Z}
CS/HS	≥ dans N	C
CC/LO	< dans N	\bar{C}
MI	moins	N
PL	plus	\bar{N}
VS	débordement	V
VC	pas de débordement	\bar{V}
HI	> dans N	$C \wedge \bar{Z}$
LS	≤ dans N	$\bar{C} \vee Z$
GE	≥ dans Z	$(N \wedge V) \vee (\bar{N} \wedge \bar{V})$
LT	< dans Z	$(N \wedge \bar{V}) \vee (\bar{N} \wedge V)$
GT	> dans Z	$\bar{Z} \wedge ((N \wedge V) \vee (\bar{N} \wedge \bar{V}))$
LE	≤ dans Z	$Z \vee (N \wedge \bar{V}) \vee (\bar{N} \wedge V)$
AL	toujours	