Architectures des processeurs langages d'assemblage et assembleur en ligne

Benoît Morgan

IRIT, ENSEEIHT, INP Toulouse

26 septembre 2019

Introduction – *plan du cours*

- Volume : 2 cours magistraux
- Architectures matérielles des processeurs
- Rappels compilation et langage C
- Outils binaires
- Assembleur
- Assembleur en ligne

Introduction – *motivation*

Prérequis des cours

- Rétro-ingénierie
- Sécurité logicielle et sécurité logicielle avancée
- Sécurité des noyaux et des hyperviseurs

Introduction – *langage d'assemblage*

- Langage de programmation
  - Dont l'objectif est la génération d'un programme
- Très proche du jeu d'instructions et de l'architecture d'un processeur
  - Intel x86, AMD x86, ARMv8, famille PowerPC, MI
- Apporte un niveau d'abstraction du jeu d'instruction des processeurs
- Généralement : une famille de processeurs = un langage d'assemblage

Plan du cours

Architectures matérielles des processeurs

Intel x86

Assembleur

Assembleur GNU

... en ligne

Plan du cours

Processeur / Microprocesseur *quésaco ?*[1]

Processeur

- Composant matériel d'une machine
- Exécute les instructions machine d'un programme
- Capacités généralistes
- "Intelligence" d'une machine

Microprocesseur = processeur + mémoire + entrées / sorties + etc.

1. Qu'est-ce que c'est ? patois de mon village

Architectures machine historiques

Microprocesseur / machine simplifiée

- Unité Aritmétique et Logique (UAL) : calculs
- Mémoire atomique court terme : registres.
  Utilisés directement par l'UAL comme paramètre et stockage des opérations arithmétiques
- Mémoire long terme : i.e. RAM. Stockage des instruction ou des données d'un programme (variables temporaires, locales, globales)
- Entrées / sorties : périphériques (clavier ; écran ; imprimante).
  Chemin final ou initial emprunté par l'information

Instructions machine ?

Ou instructions

- Opération élémentaire exécutée par un processeur
- Types principaux d'instructions :
  - UAL : arithmétique ; logique ; *bit-wise*
  - Accès mémoire : stockage de l'information à moyen terme
  - Entrées / sorties : lecture ou écriture
  - Gestion du flot d'exécution : sauts ; fonctions ; interruptions
  - Système : configuration ; noyau ; machines virtuelles ; énergie

UAL : Instructions arithmétiques et logiques

Opérateur binaires

Exemple : $A + B$

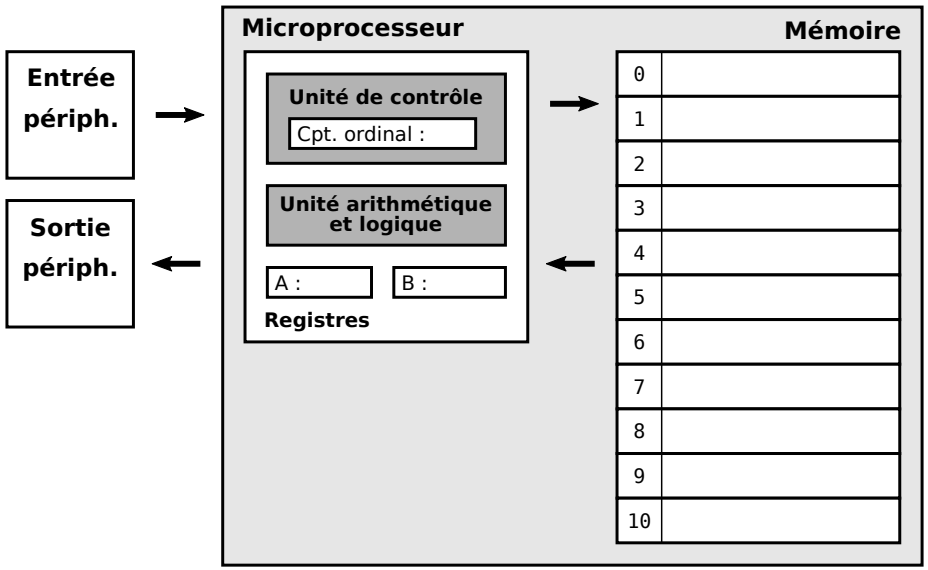
- Logique : $\wedge$; $\vee$; $\oplus$; etc.
  Exemple : $\top \wedge \bot = \bot$
- Arithmétique : $+$; $-$; $\times$; $\div$
- Binaire : *and* ; *or* ; *xor*
  Exemple : 1001 or 0010 = 1011

Opérateurs unaire

Exemple : $\neg B$

- Logique : $\neg$, etc.
  Exemple : $\neg\top = \bot$
- Arithmétique : $-$, etc.
- Binaire : ˜ ou not
  Exemple : ˜ 1001 = 0110

Architecture générique typique et simplifiée



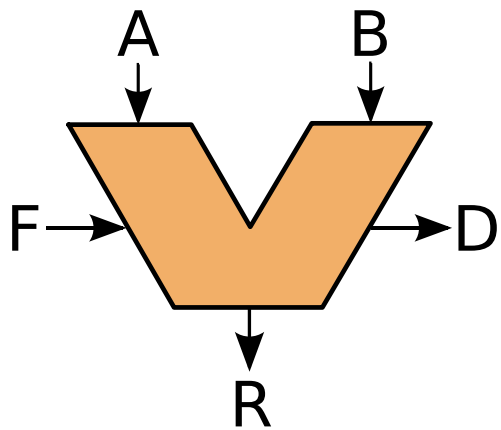
Ensemble des instructions supportées par ce processeur : **jeu d'instruction**.

- Lire une entrée utilisateur : $x = \text{entrée} | x \in \{A, B\}$
- Écrire une entrée utilisateur : $\text{sortie} = x | x \in \{A, B\}$
- Addition : $x = y + z | x, y, z \in \{A, B\}$
- Soustraction : $x = y - z | x, y, z \in \{A, B\}$
- Lecture mémoire : $x = \text{MEM}[y] | x \in \{A, B\} \wedge y \in [0, 10]$
- Écriture mémoire : $\text{MEM}[x] = y | y \in [0, 10] \wedge x \in \{A, B\}$

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



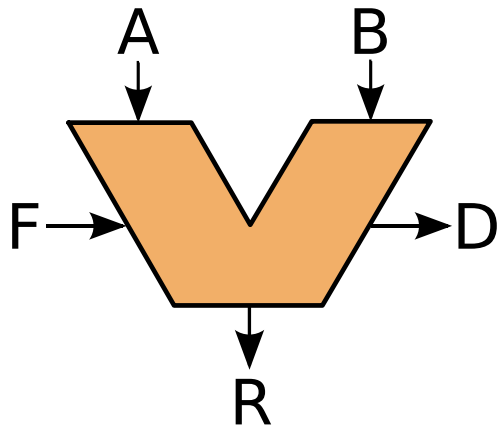
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



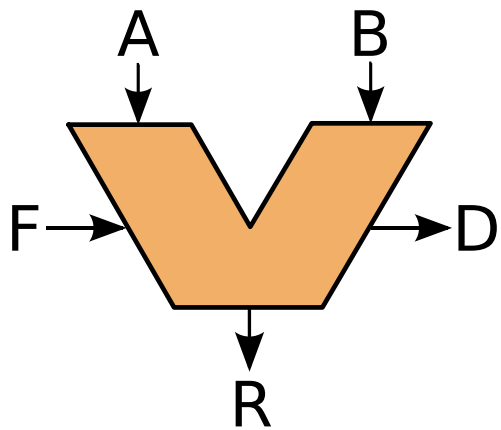
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



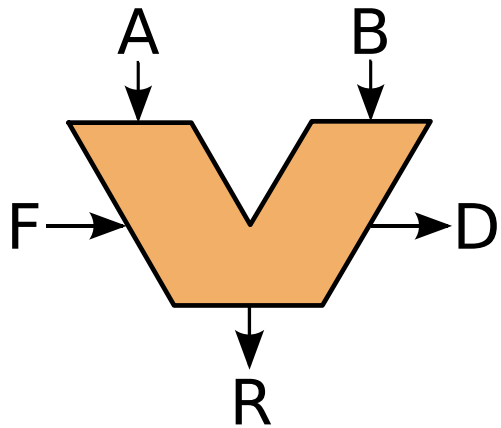
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



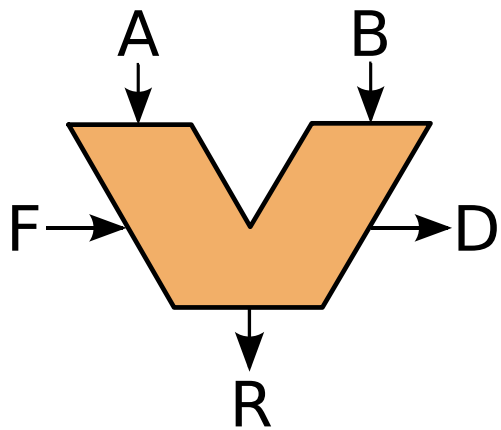
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



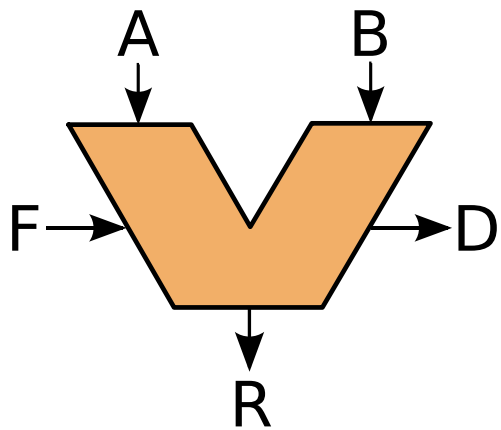
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



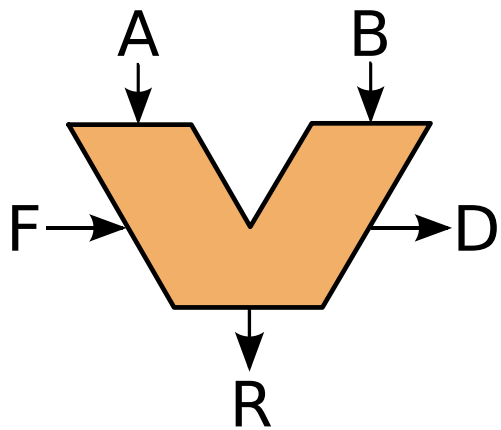
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



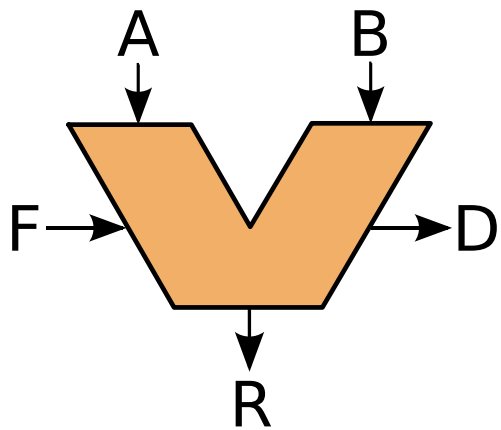
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



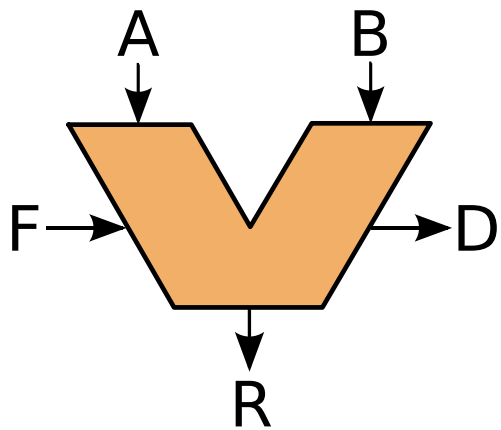
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



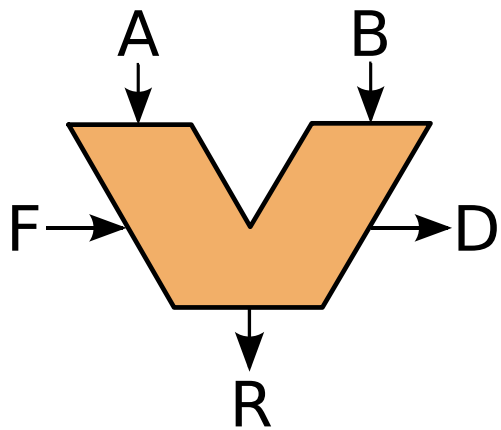
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :

sortie((entrée() + entrée()) × (entrée() + entrée()))

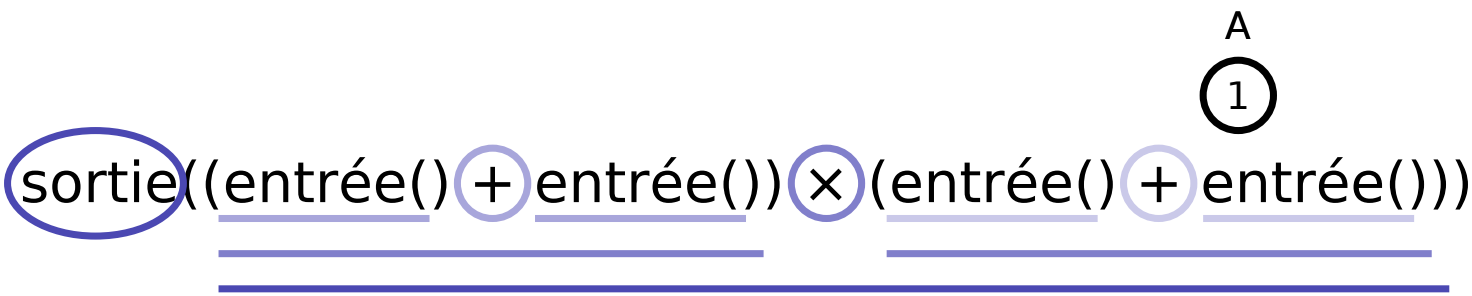
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



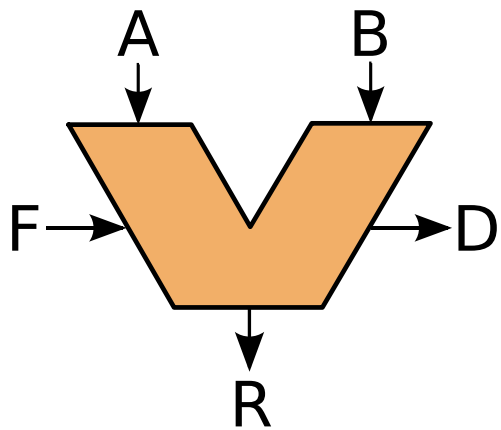
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



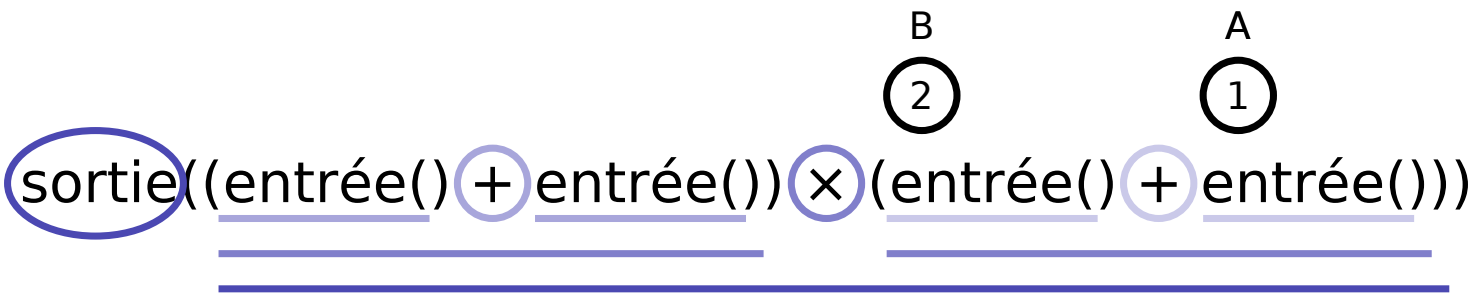
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



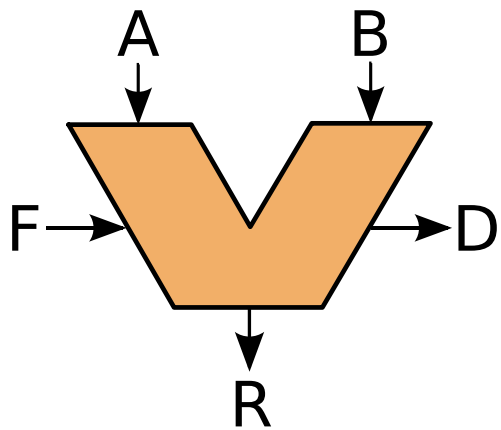
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



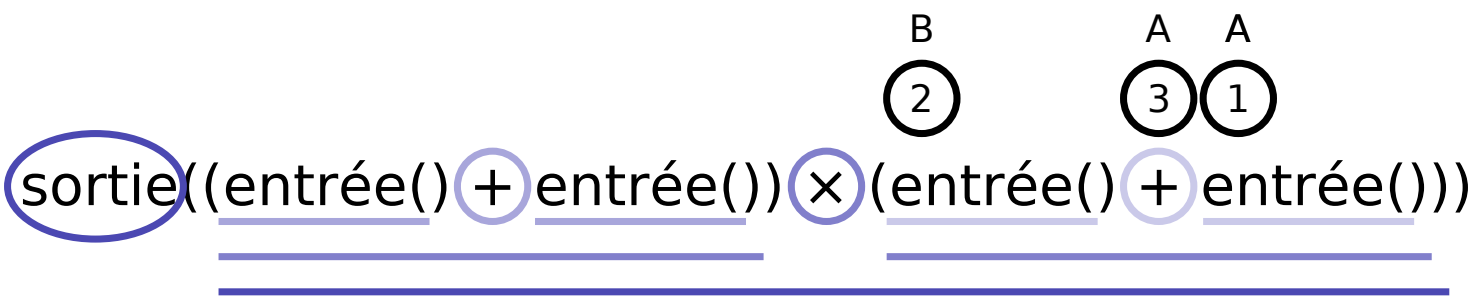
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



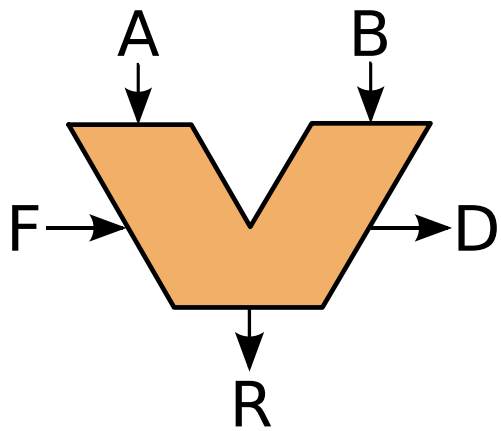
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



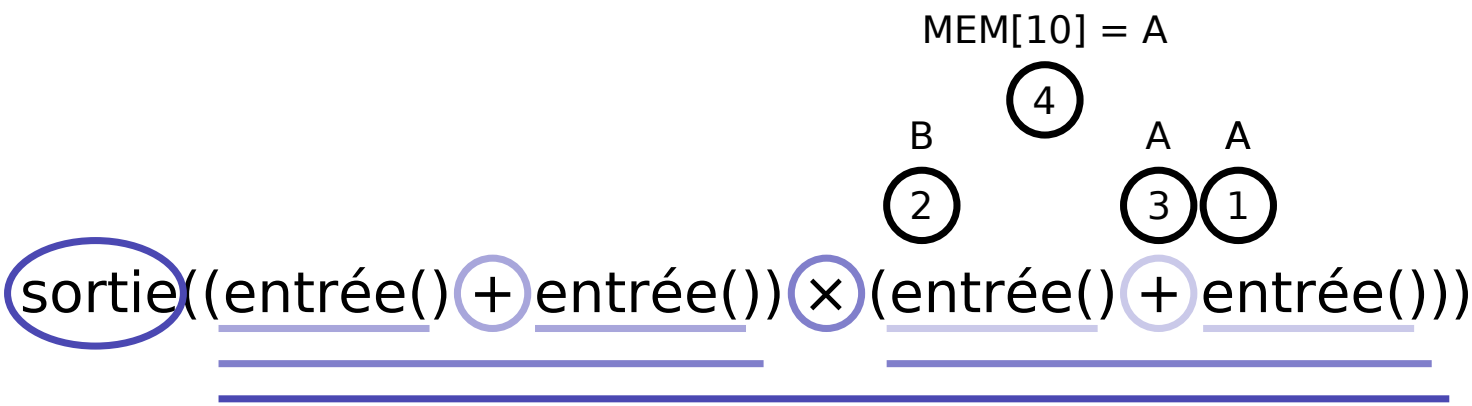
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



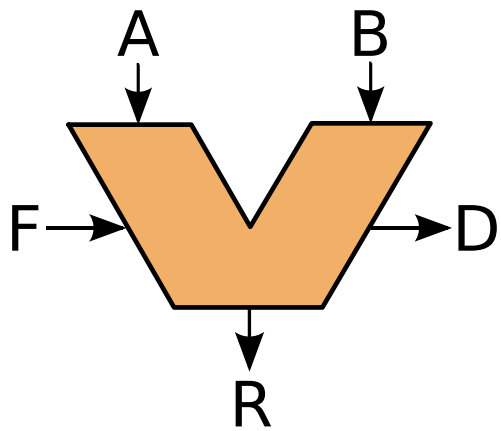
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



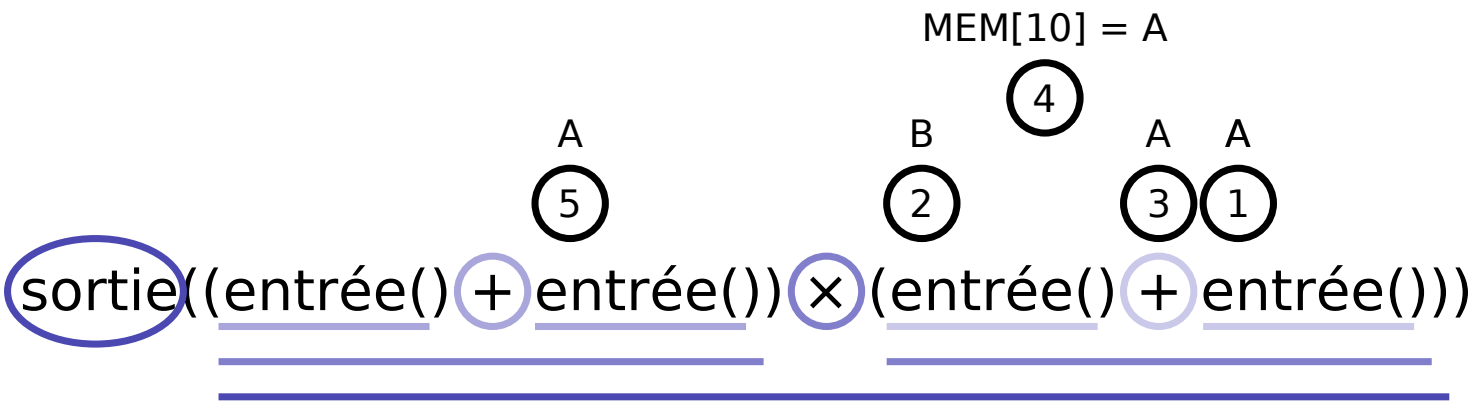
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



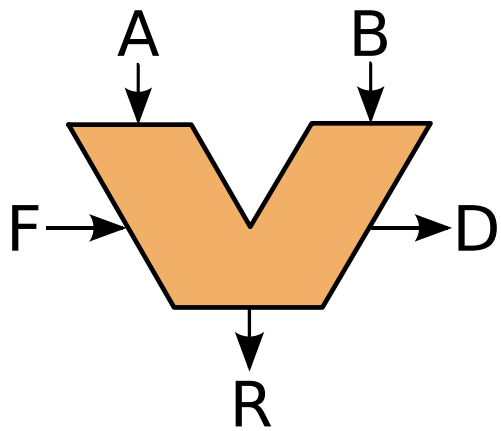
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



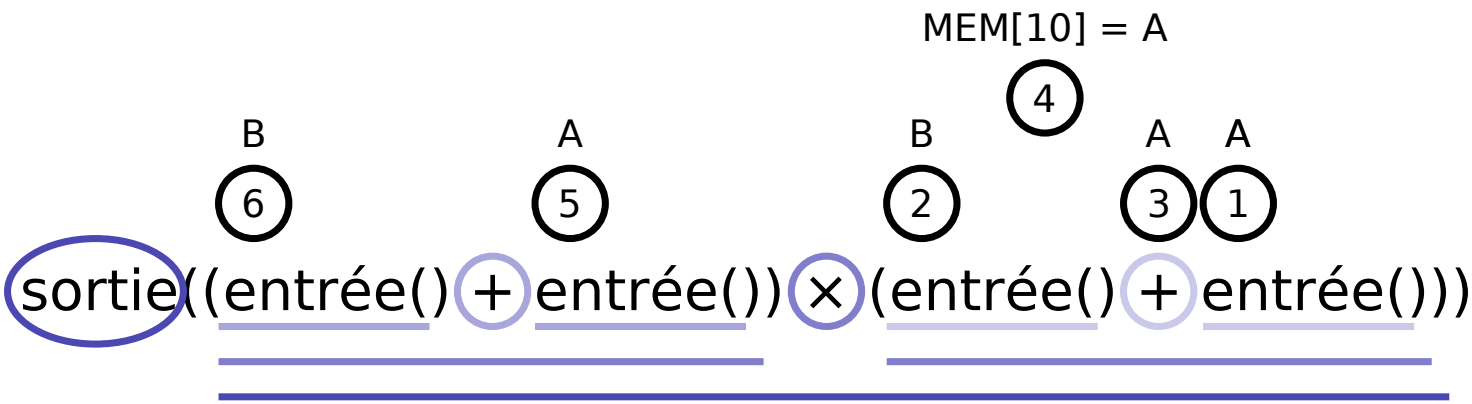
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



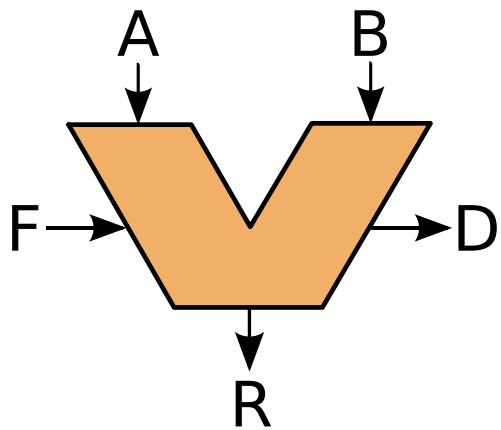
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



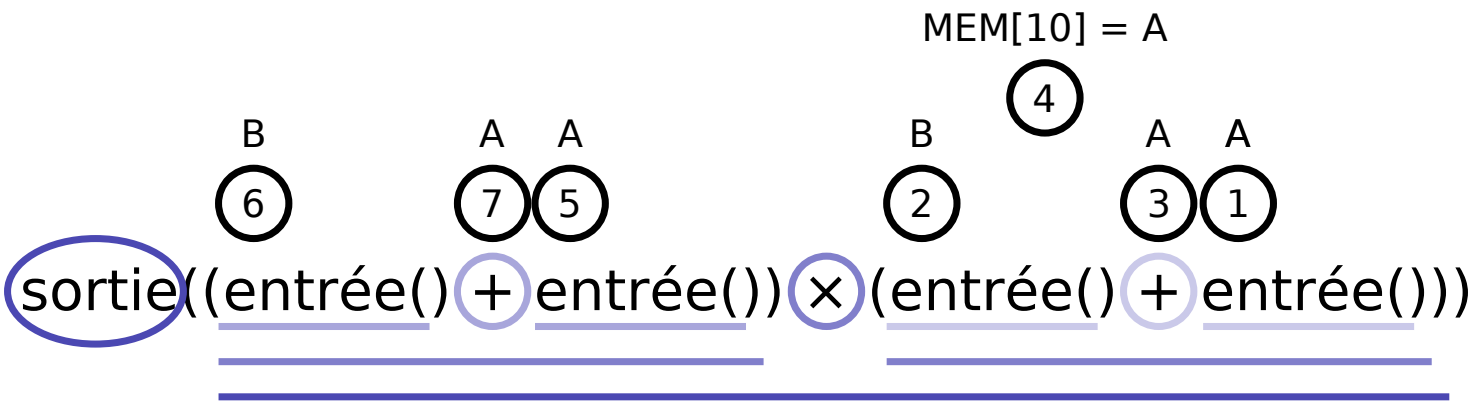
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



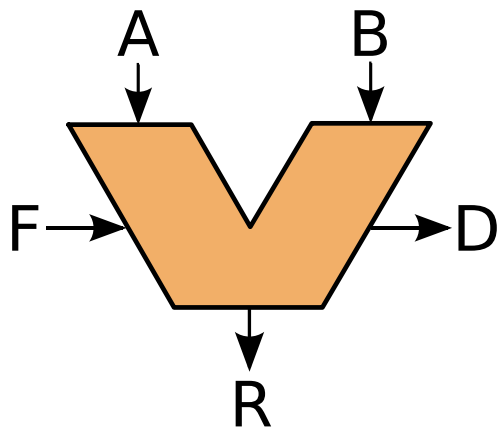
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



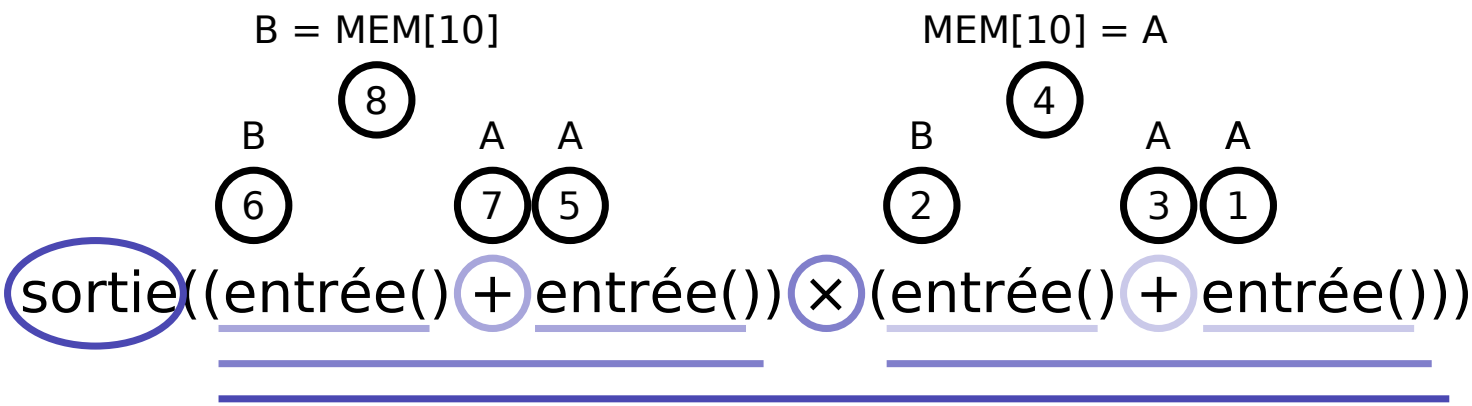
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



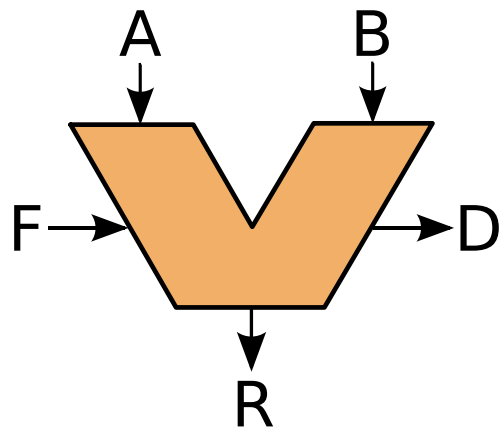
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



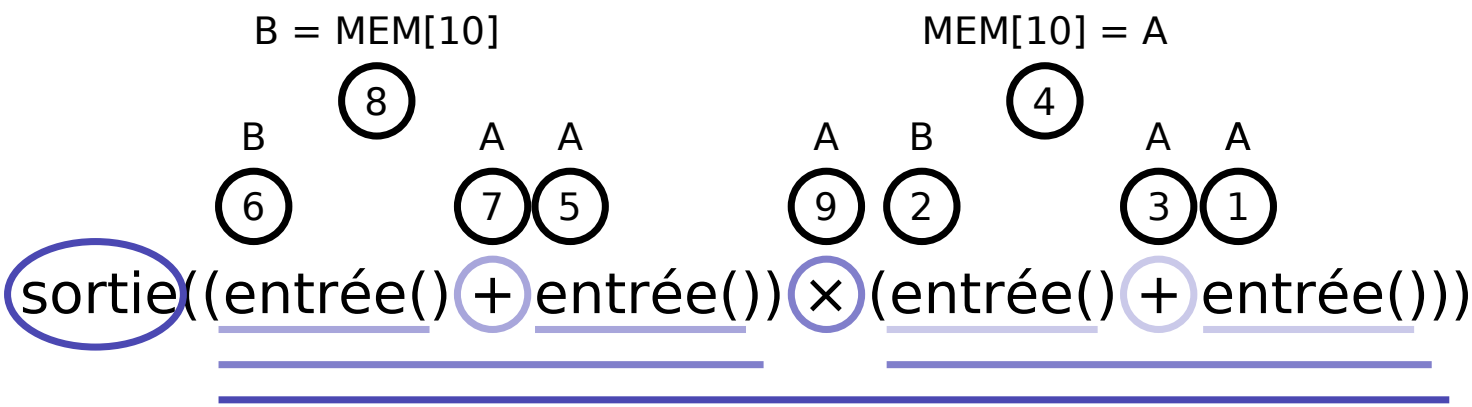
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



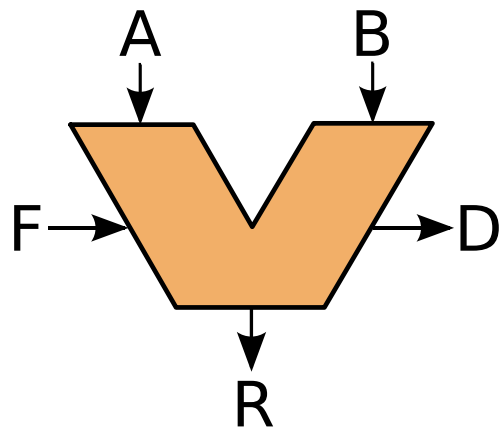
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



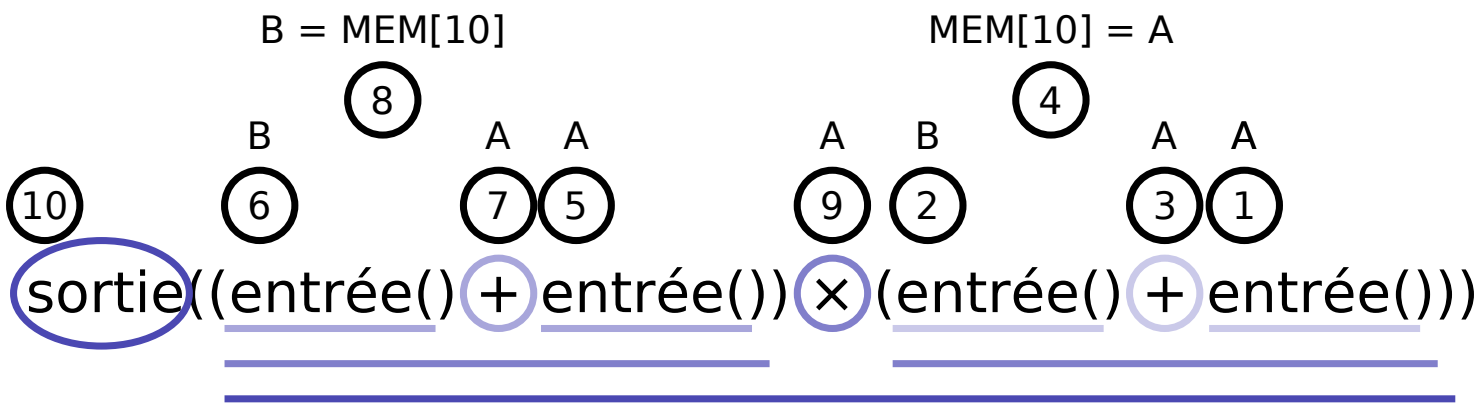
UAL : calcul arithmétique avec une UAL

Interface matérielle d'une UAL

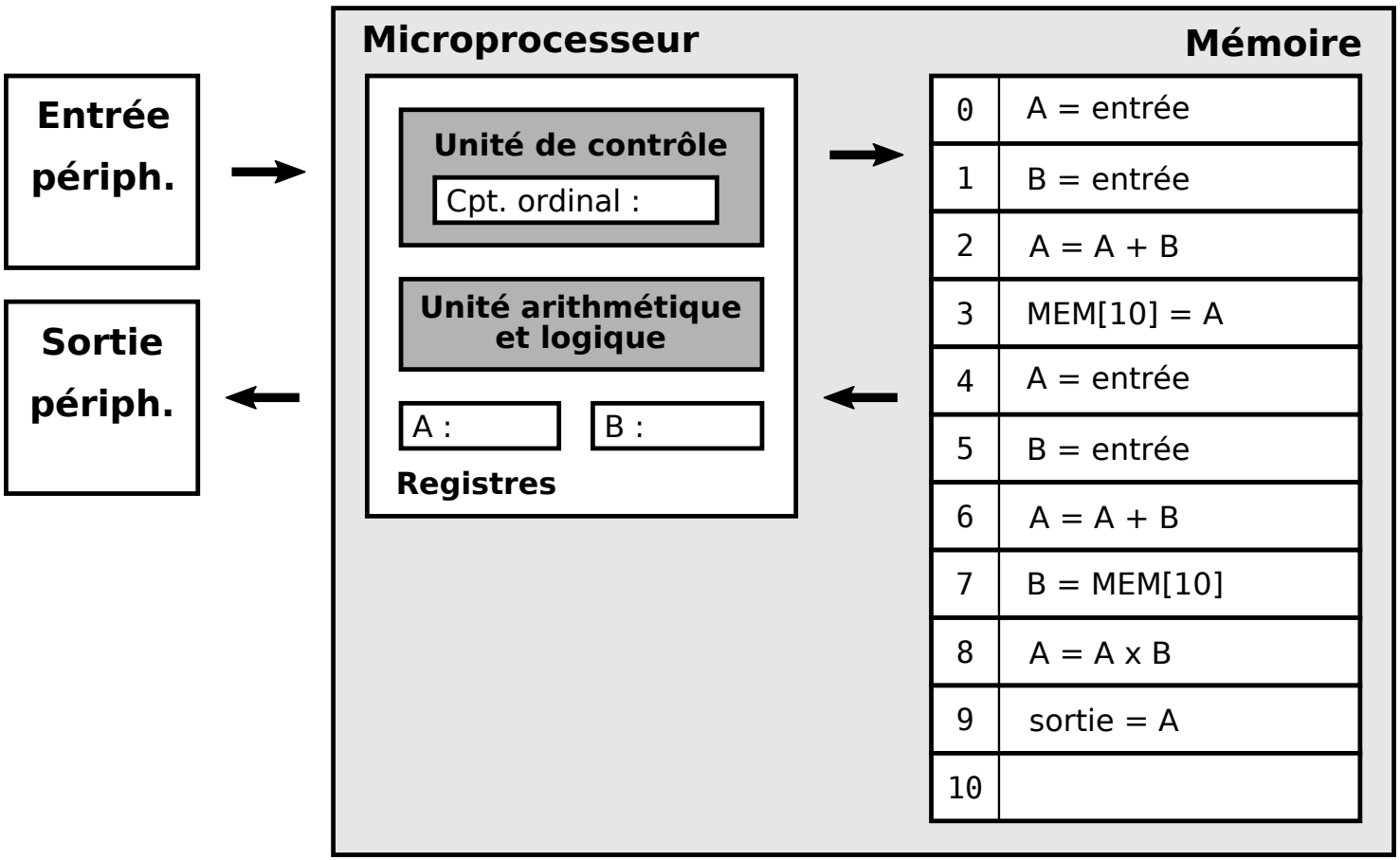
- Généralements 2 entrées dans un processeur (Pas une carte vidéo)
- Généralement 1 sortie
- Processeur `x-bit` ⇔ UAL `x-bit` Et registres généraux `x-bit`



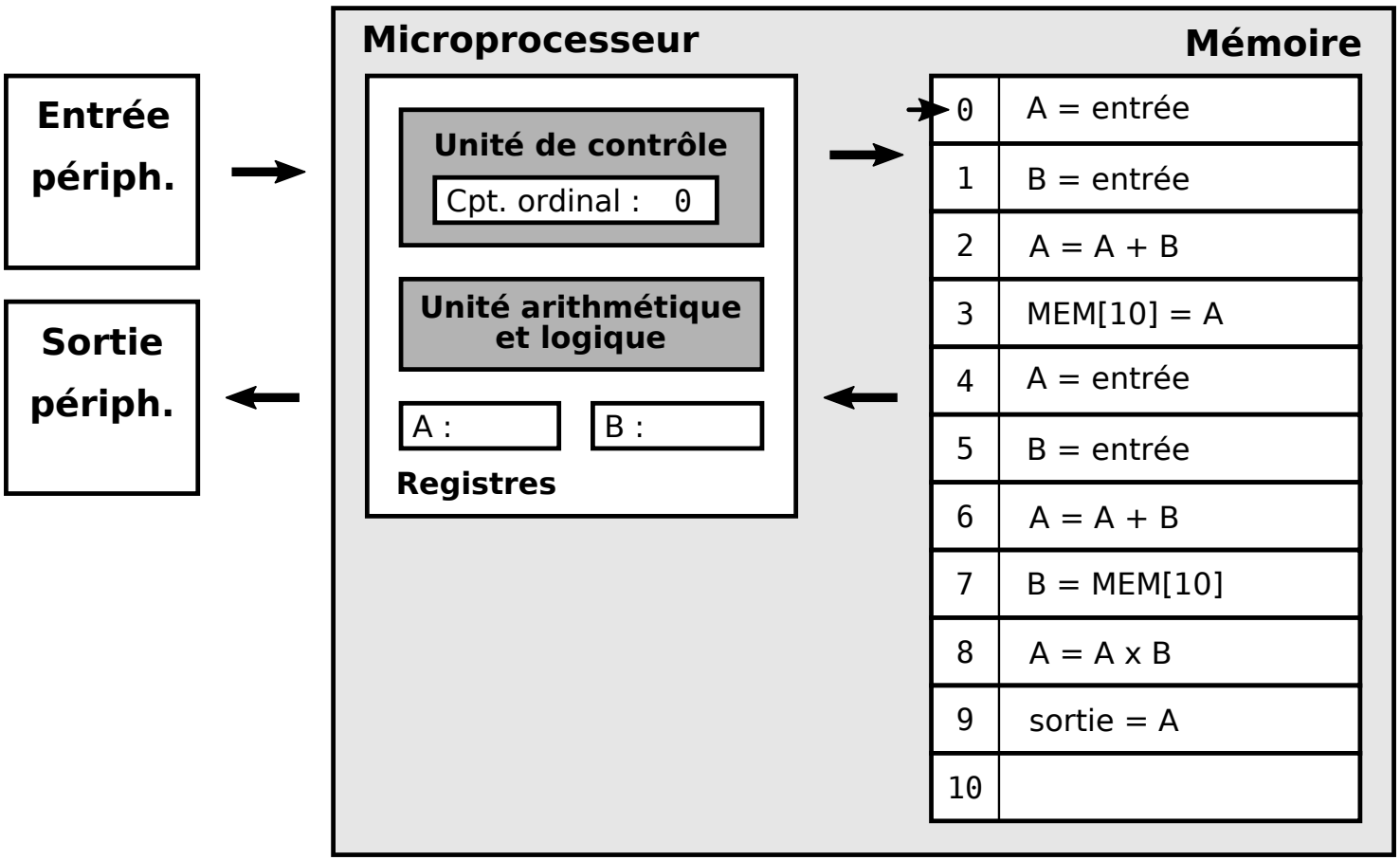
Décomposition en suite d'instruction arithmétiques :



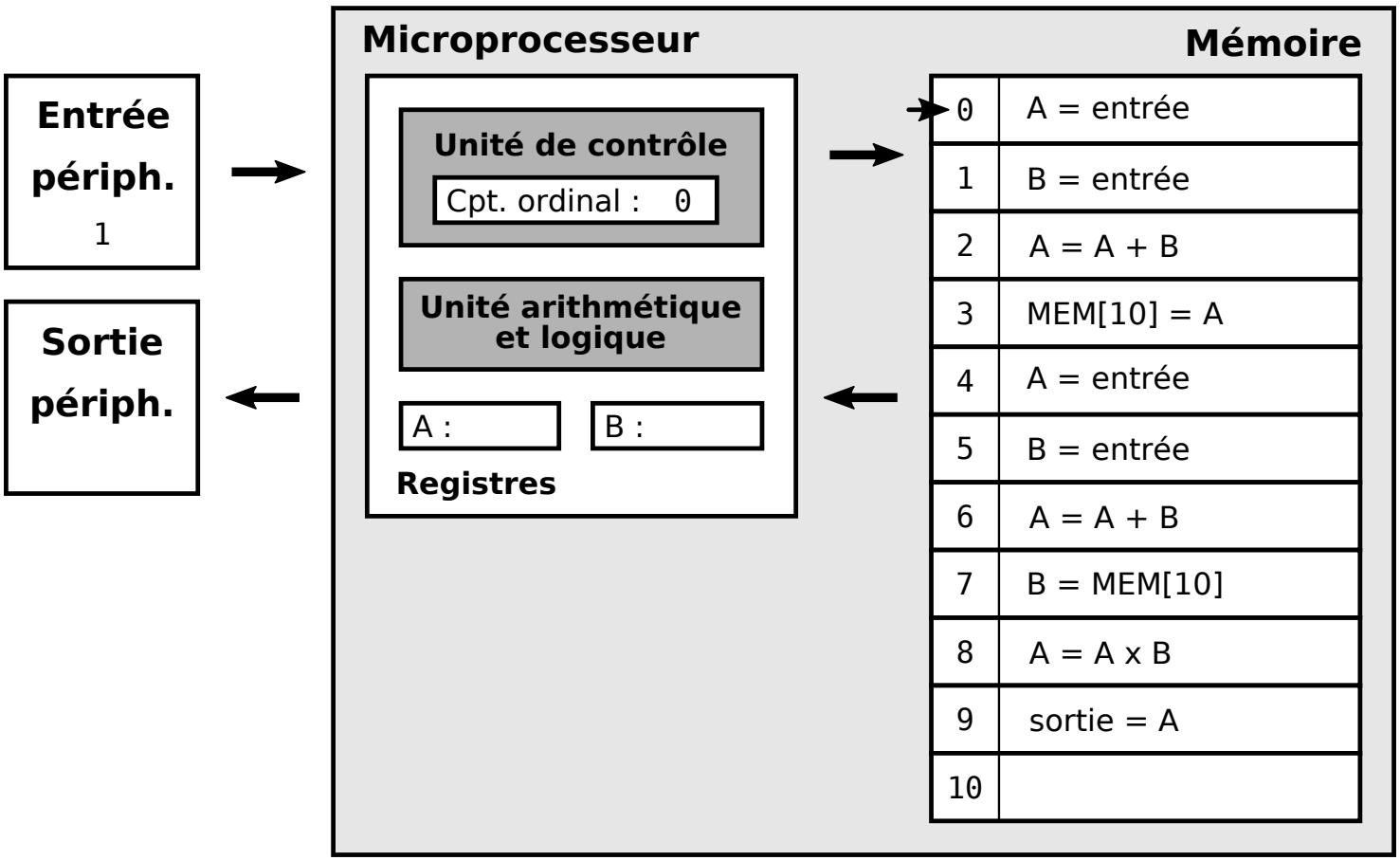
Exécution du programme



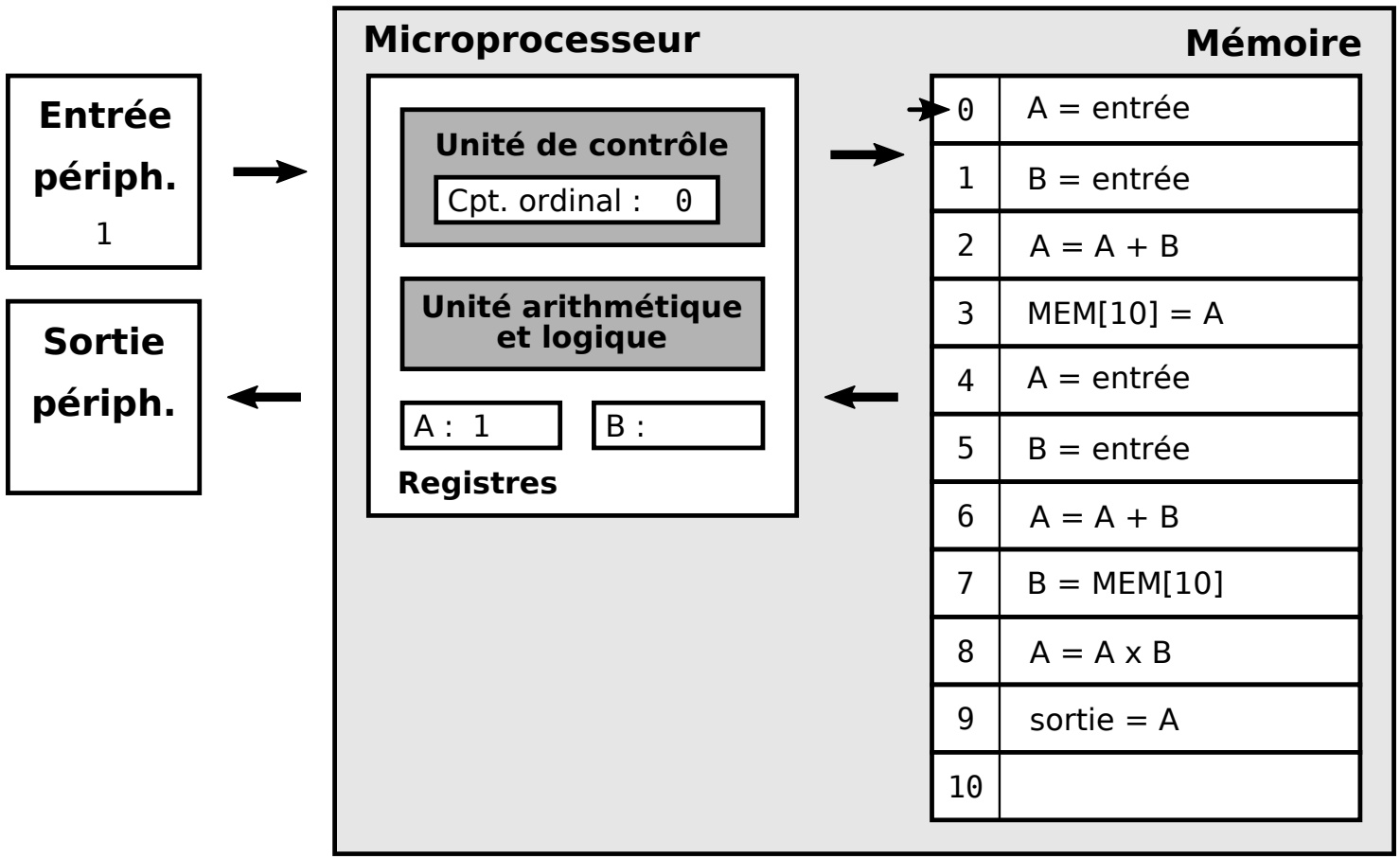
Exécution du programme



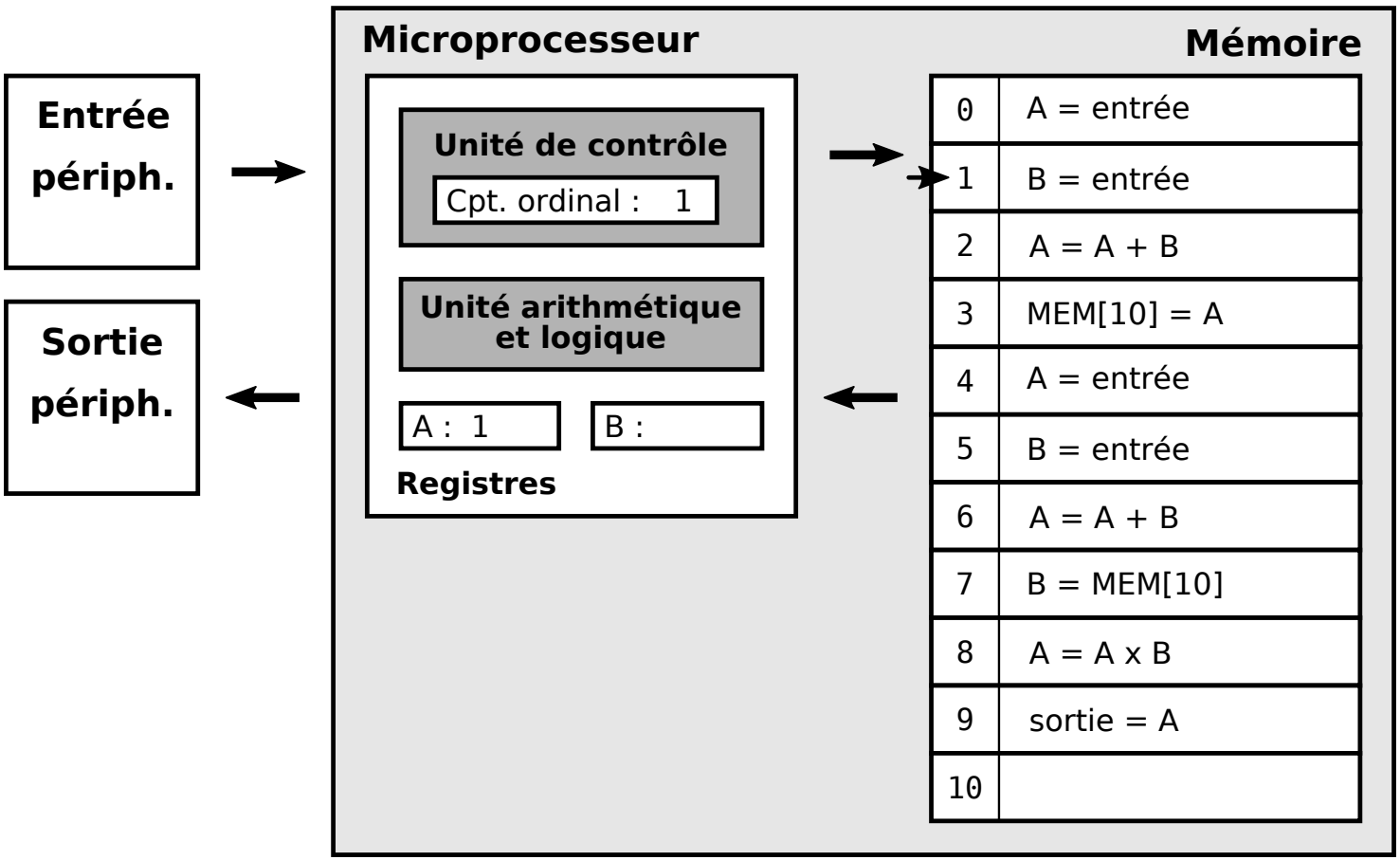
Exécution du programme



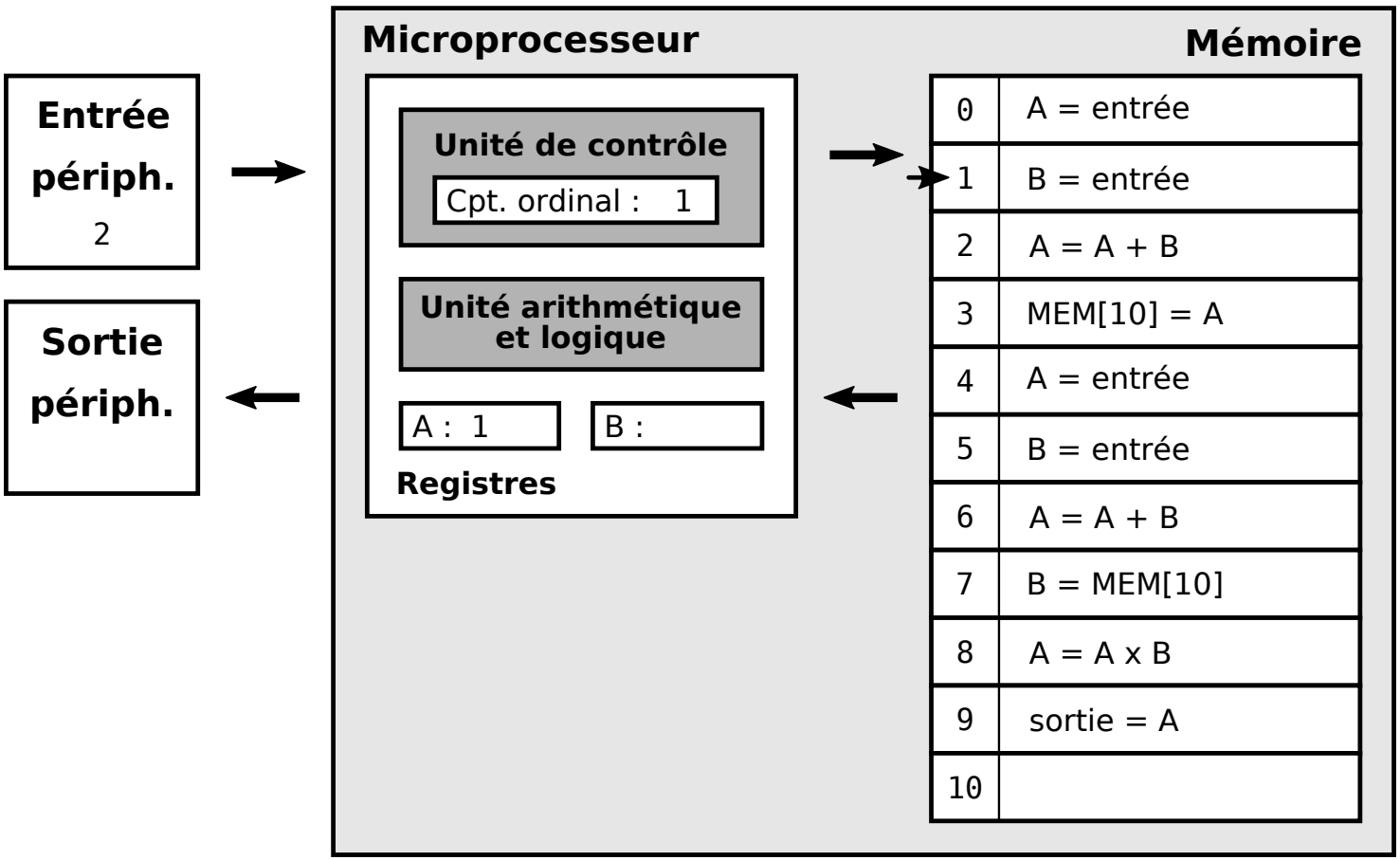
Exécution du programme



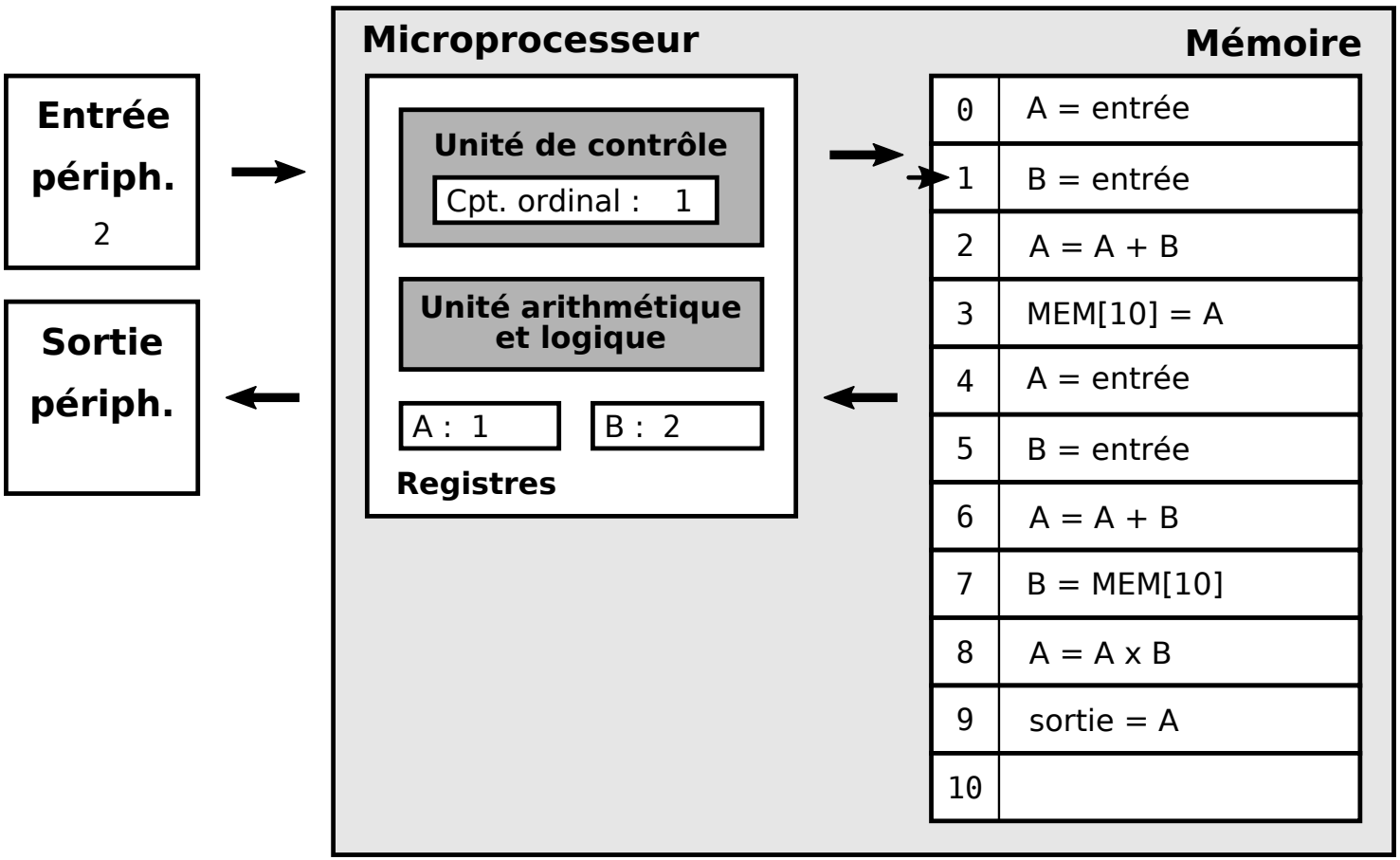
Exécution du programme



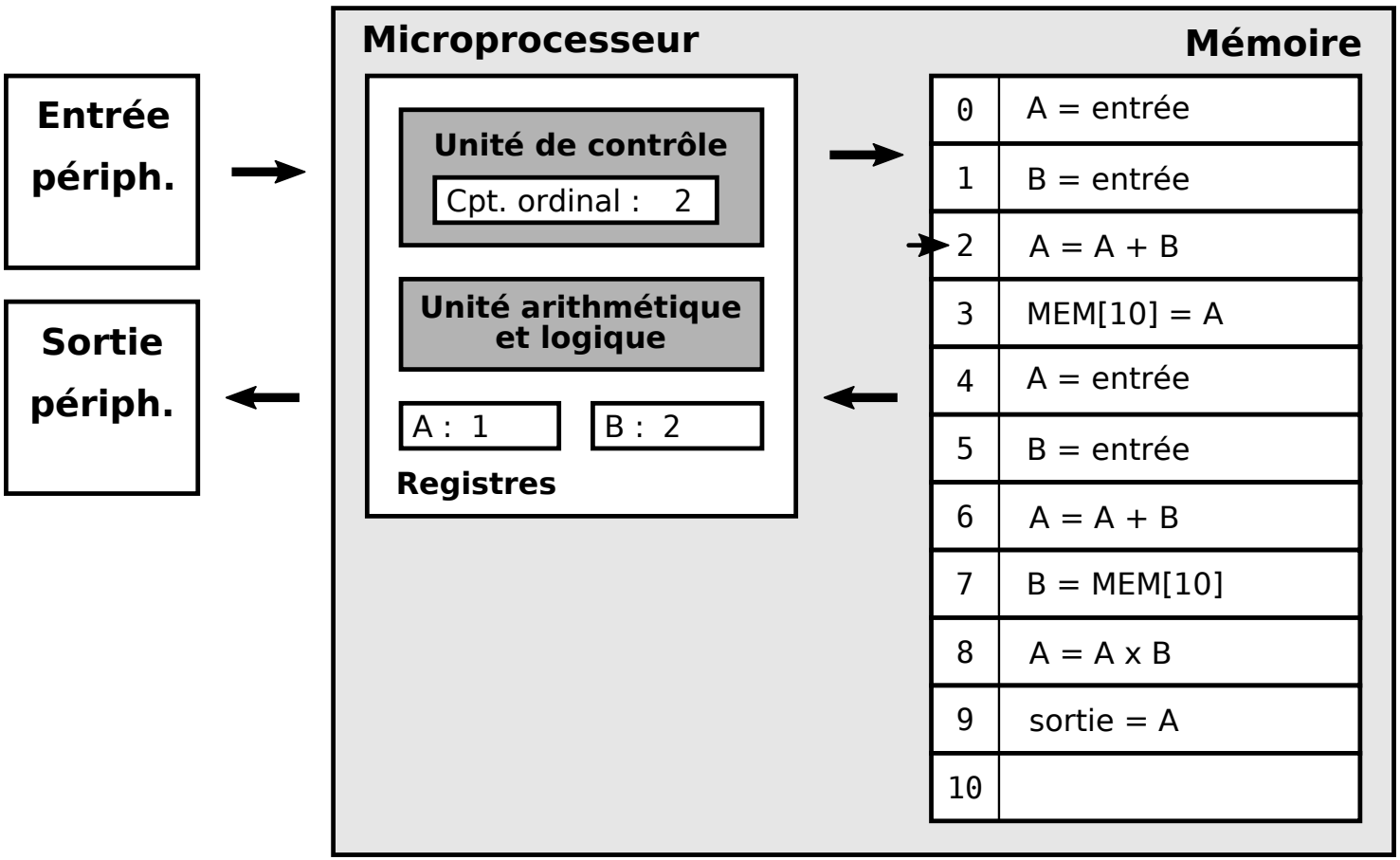
Exécution du programme



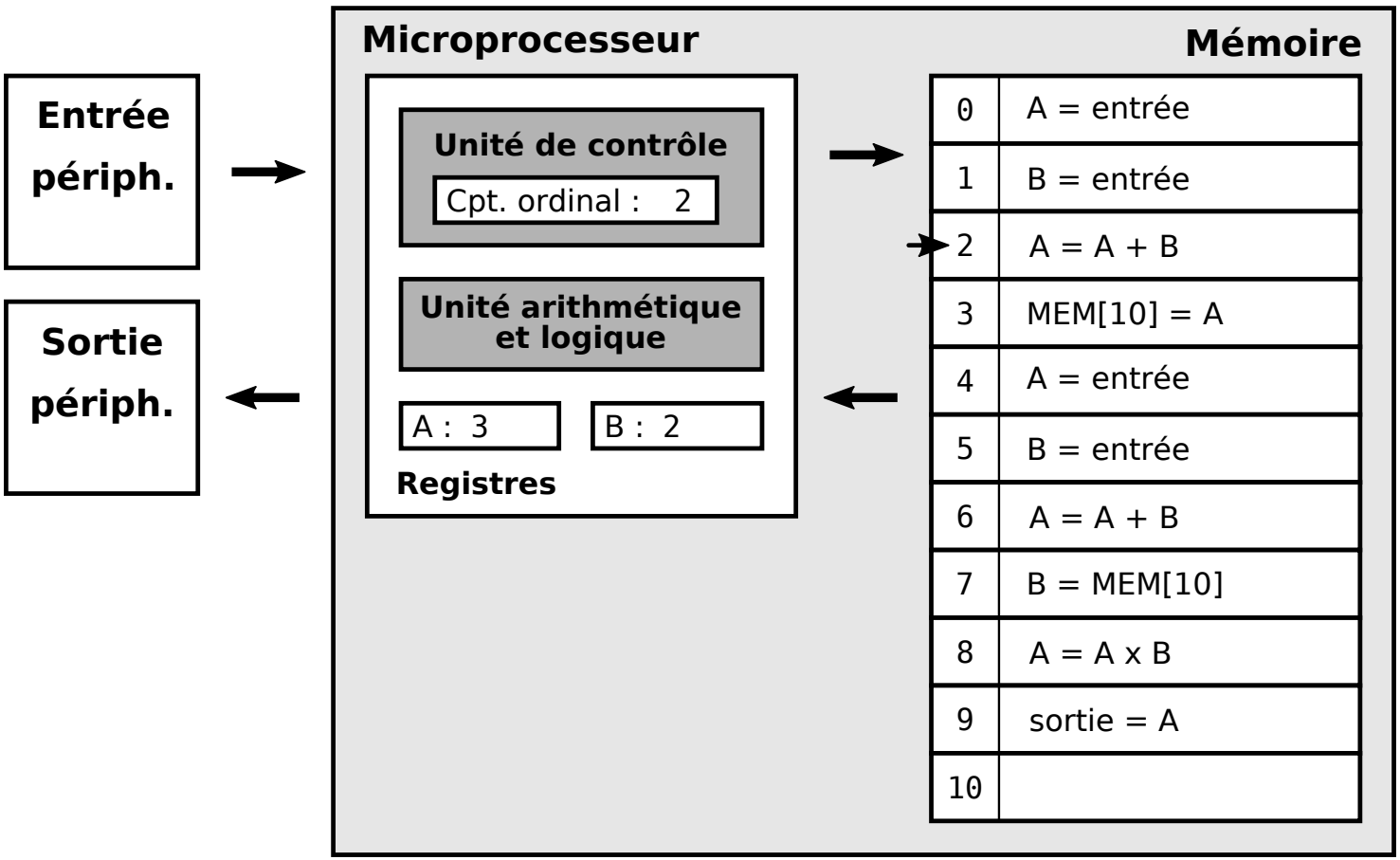
Exécution du programme



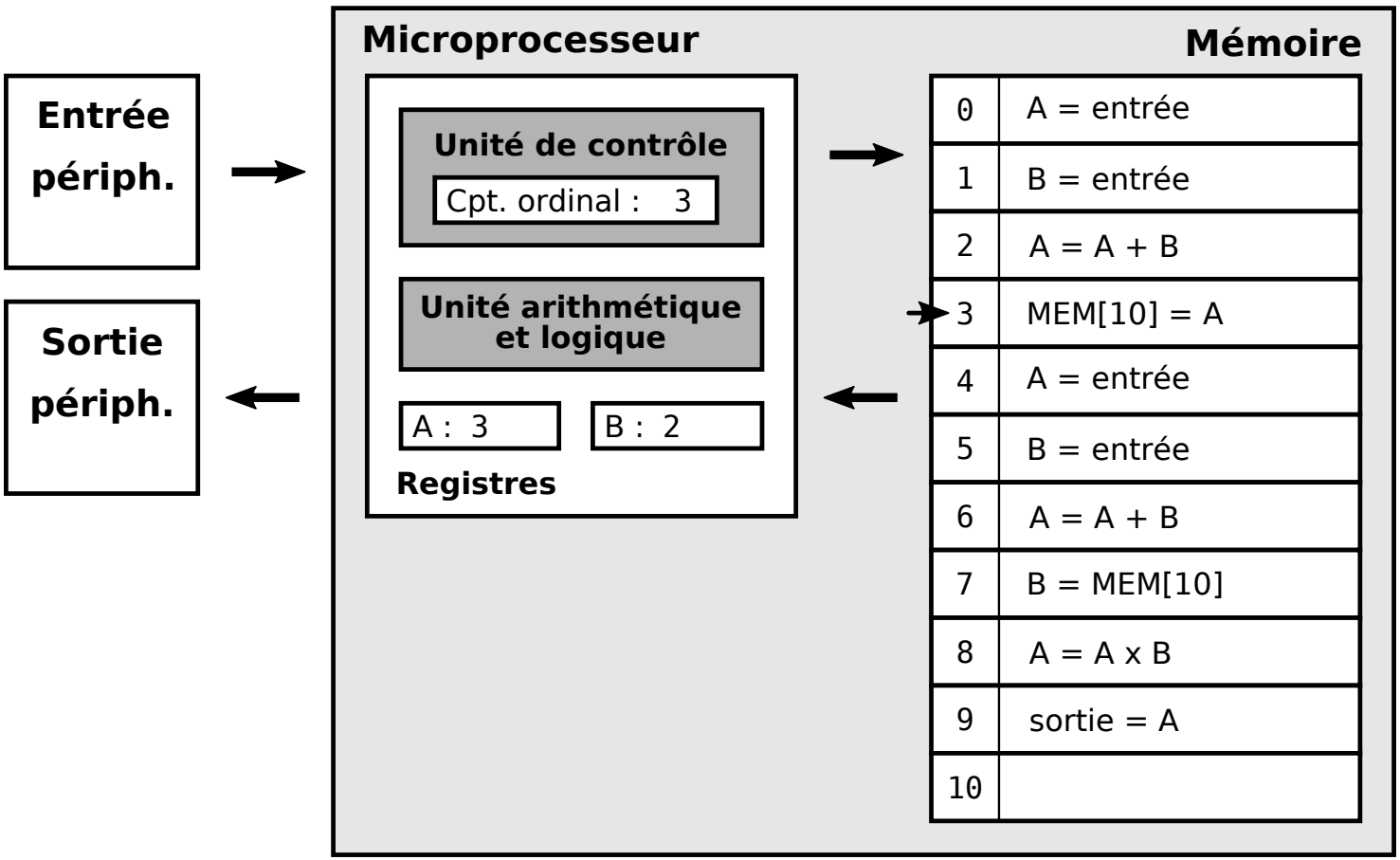
Exécution du programme



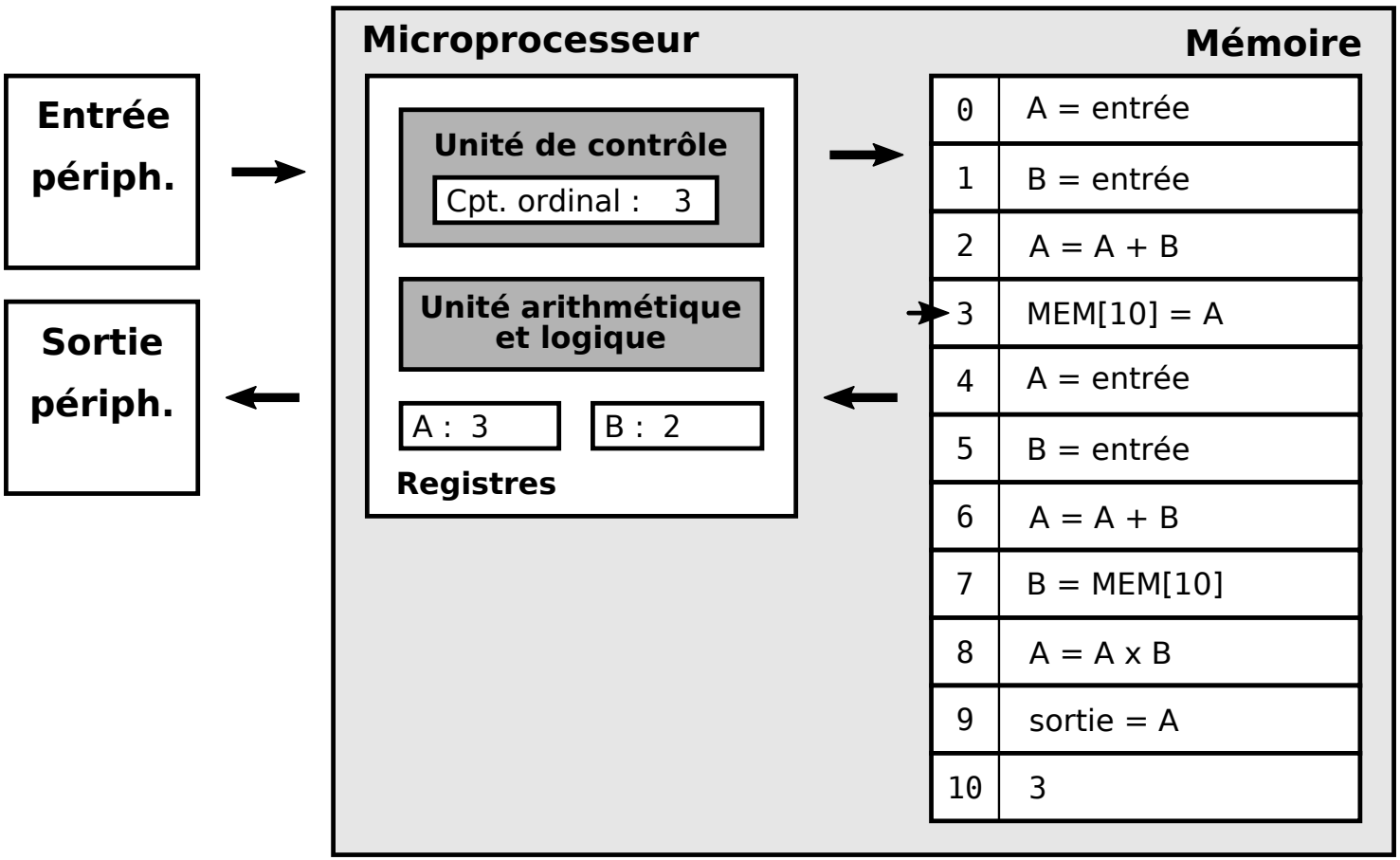
Exécution du programme



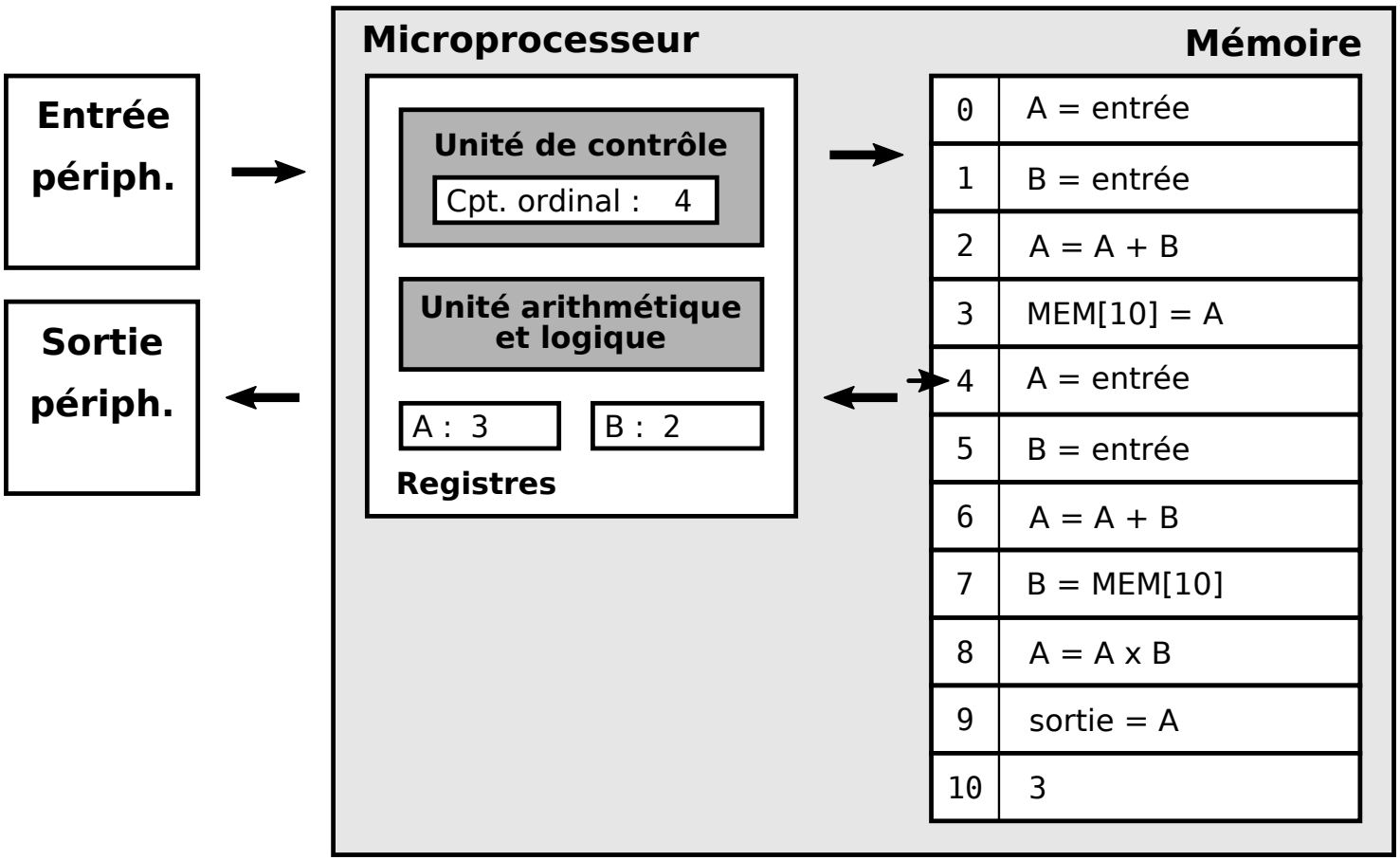
Exécution du programme



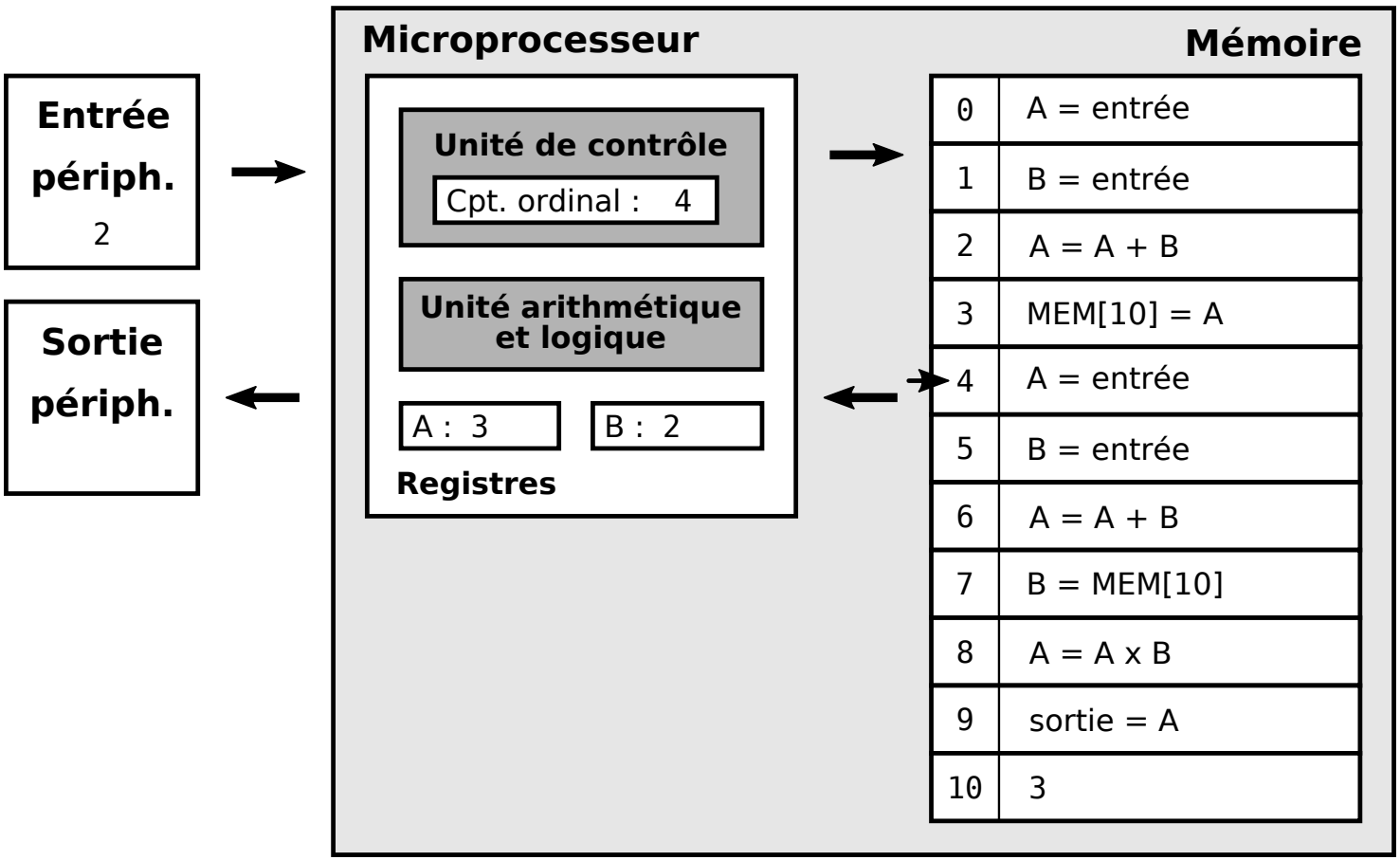
Exécution du programme



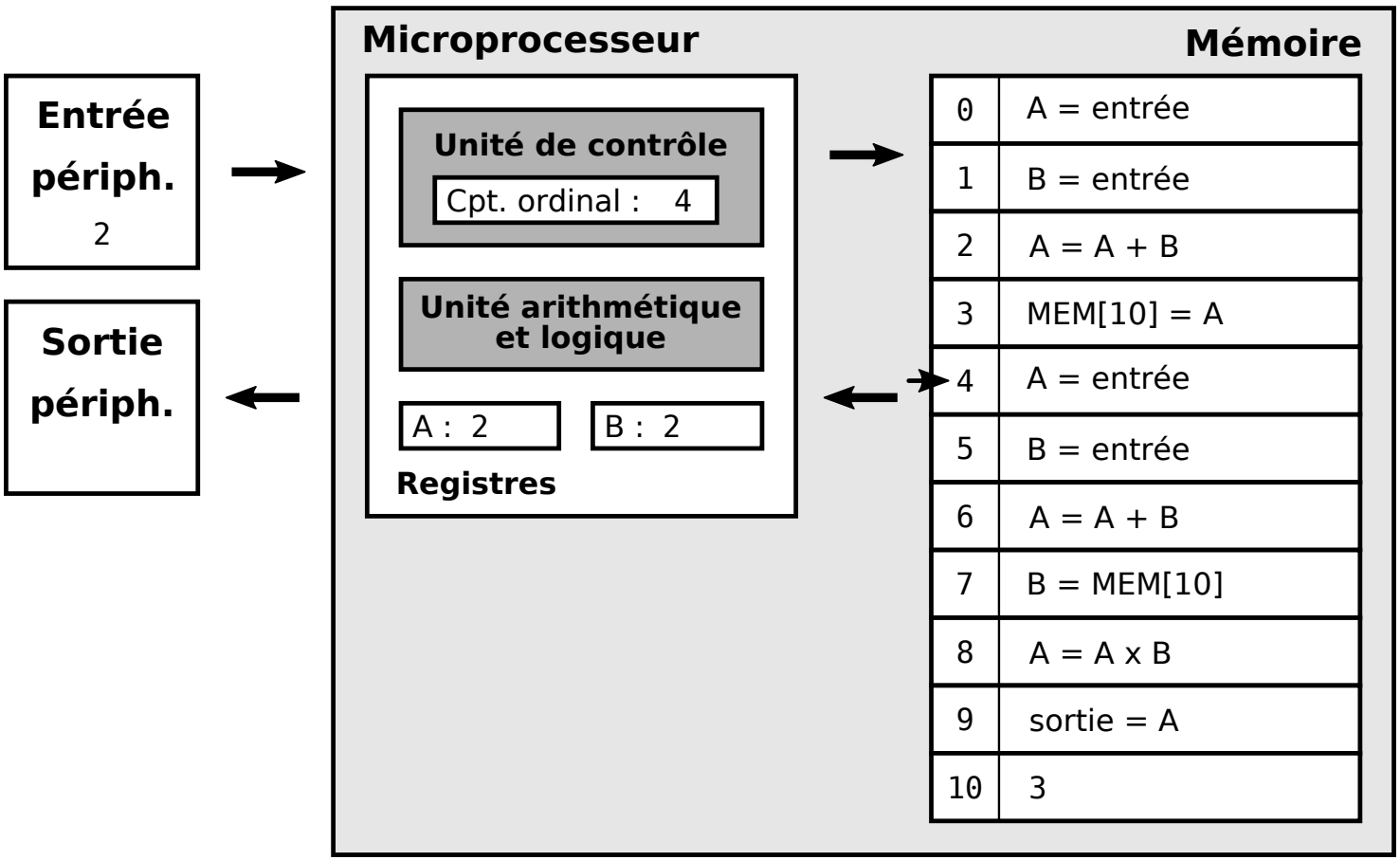
Exécution du programme



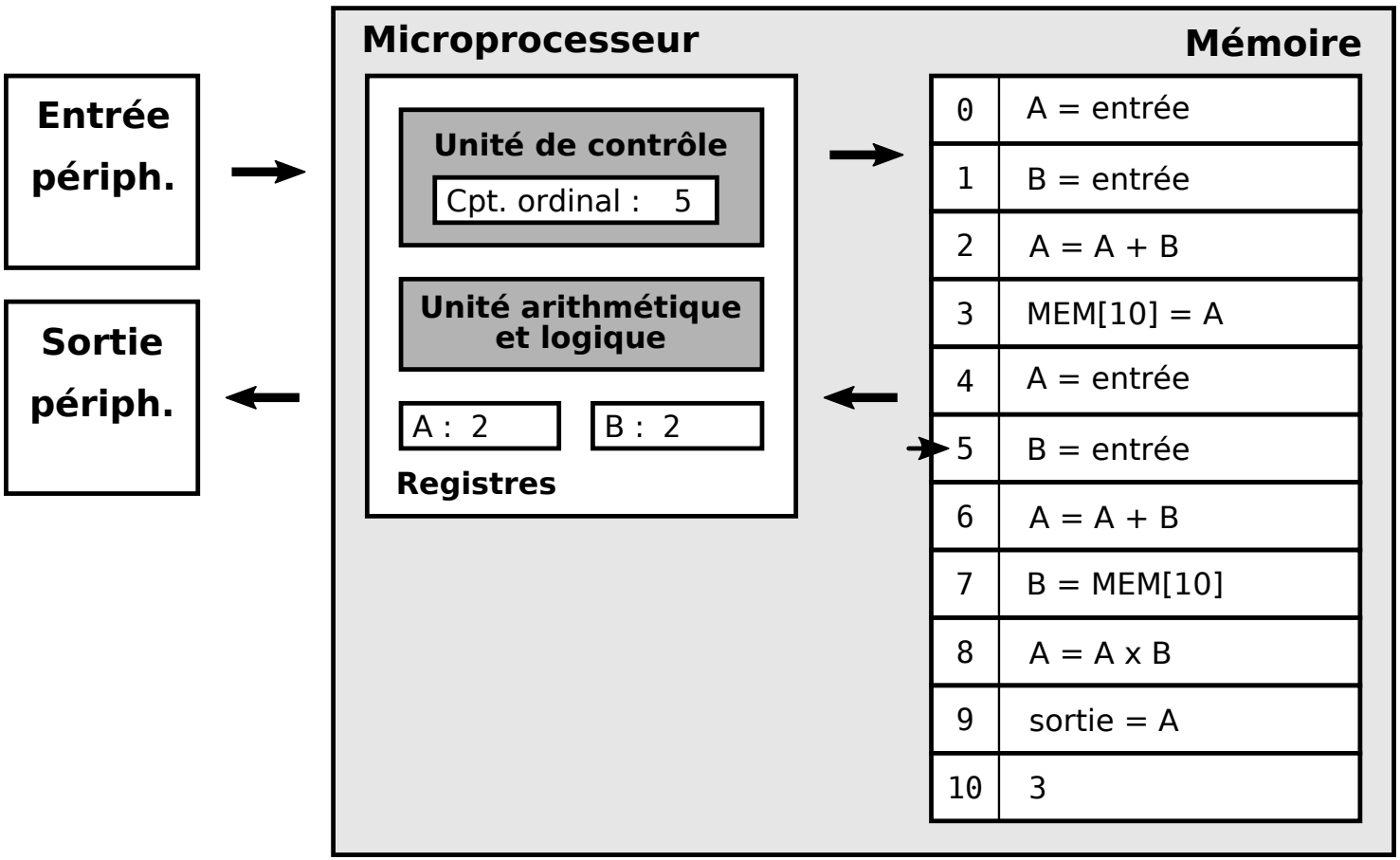
Exécution du programme



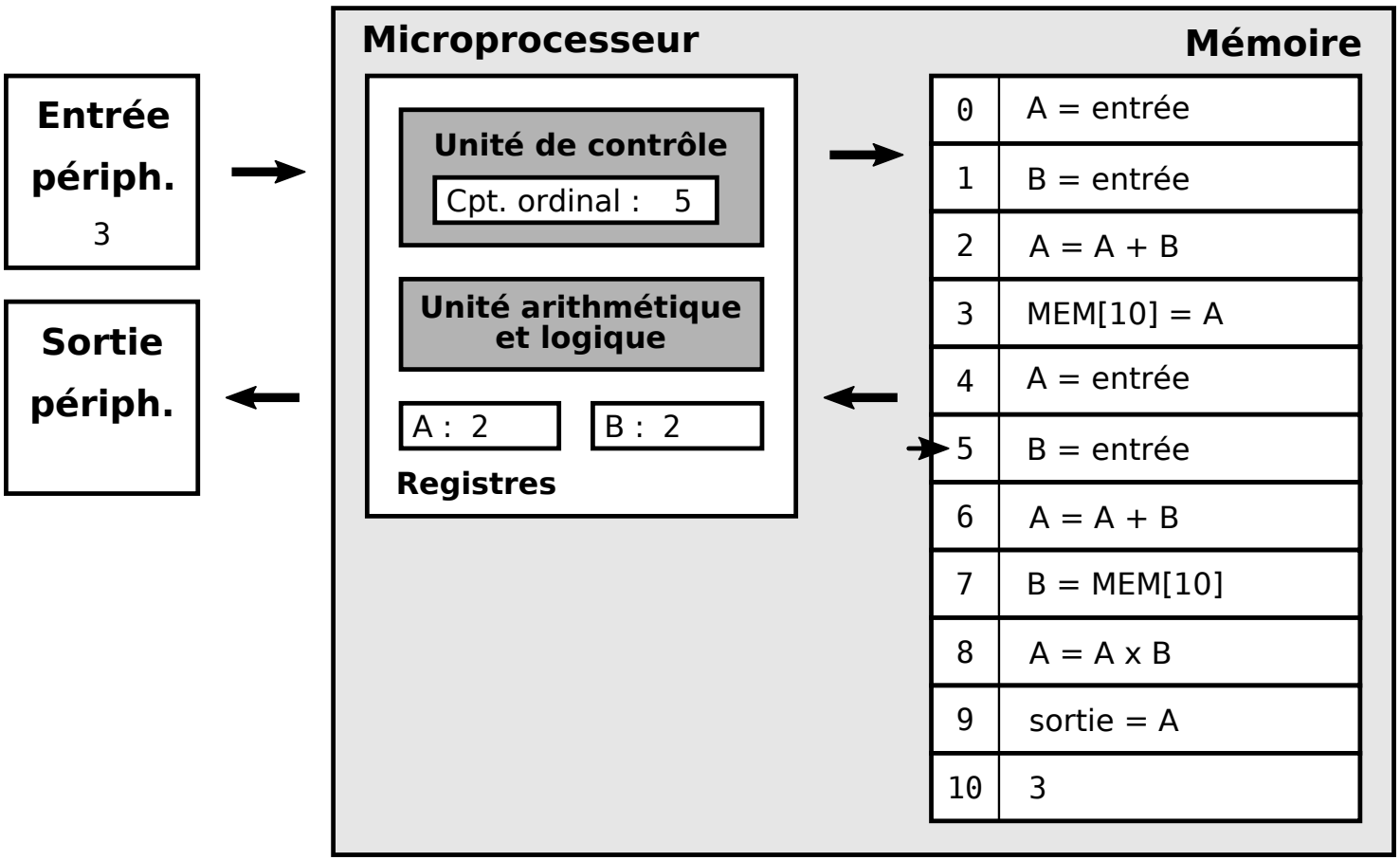
Exécution du programme



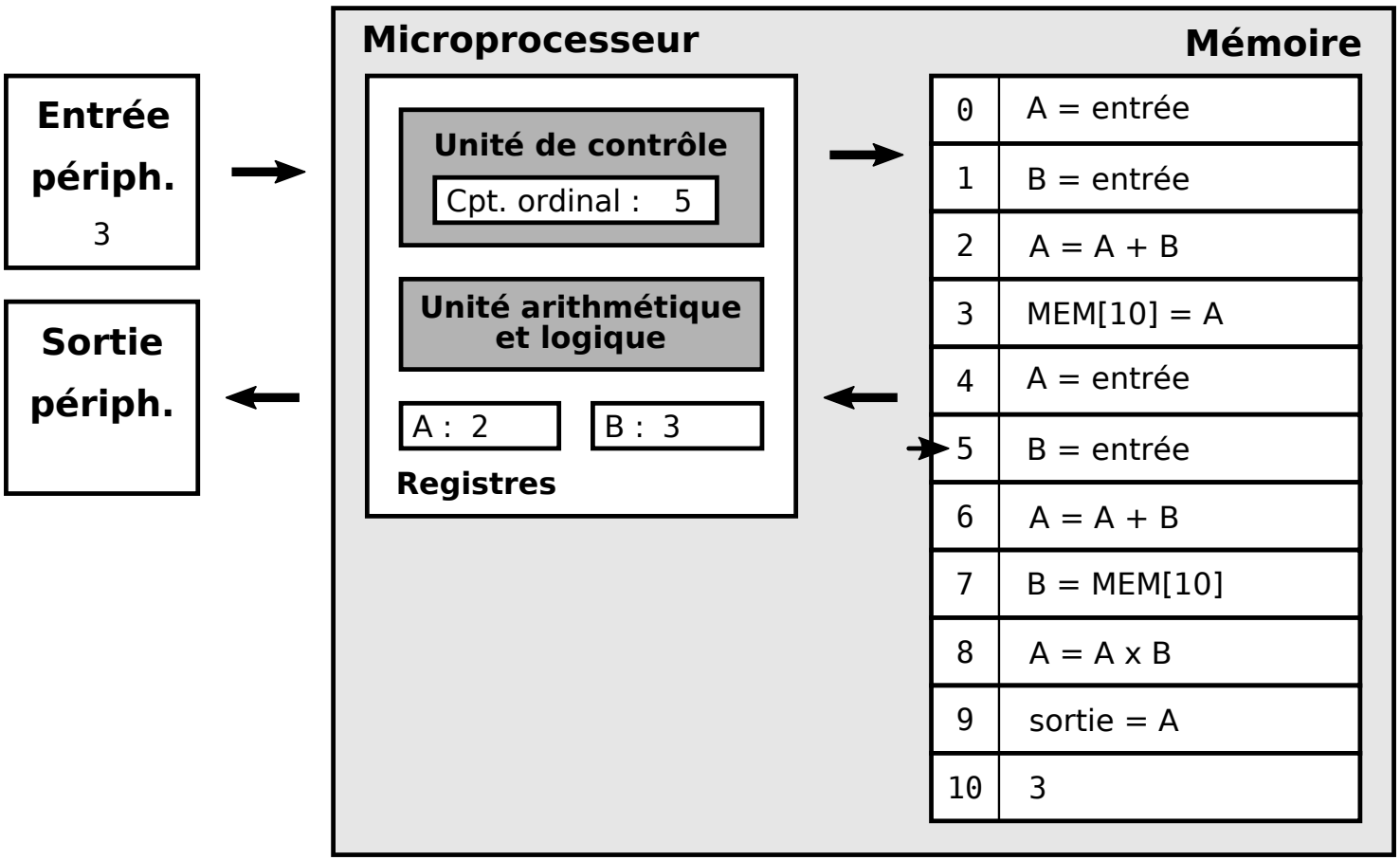
Exécution du programme



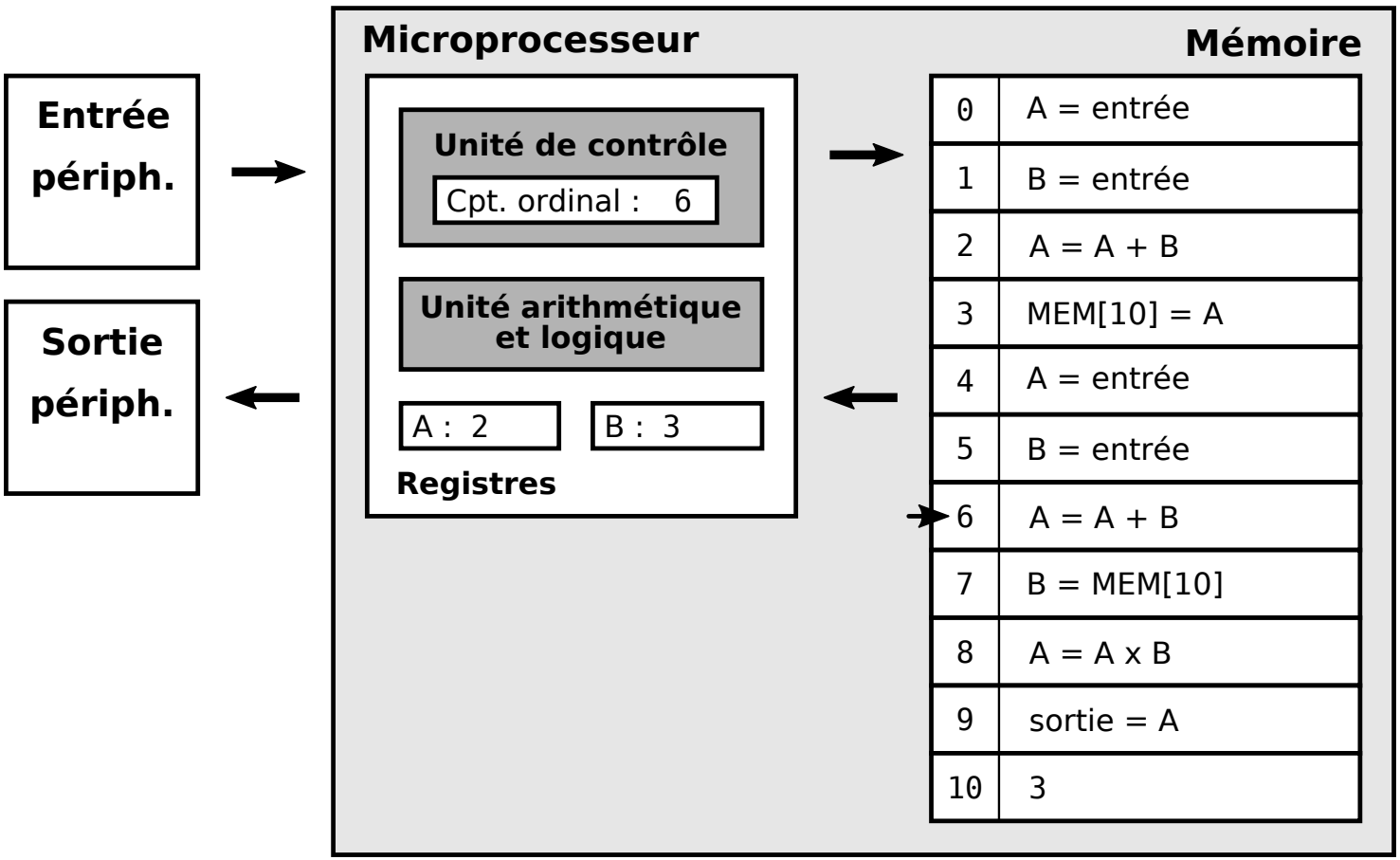
Exécution du programme



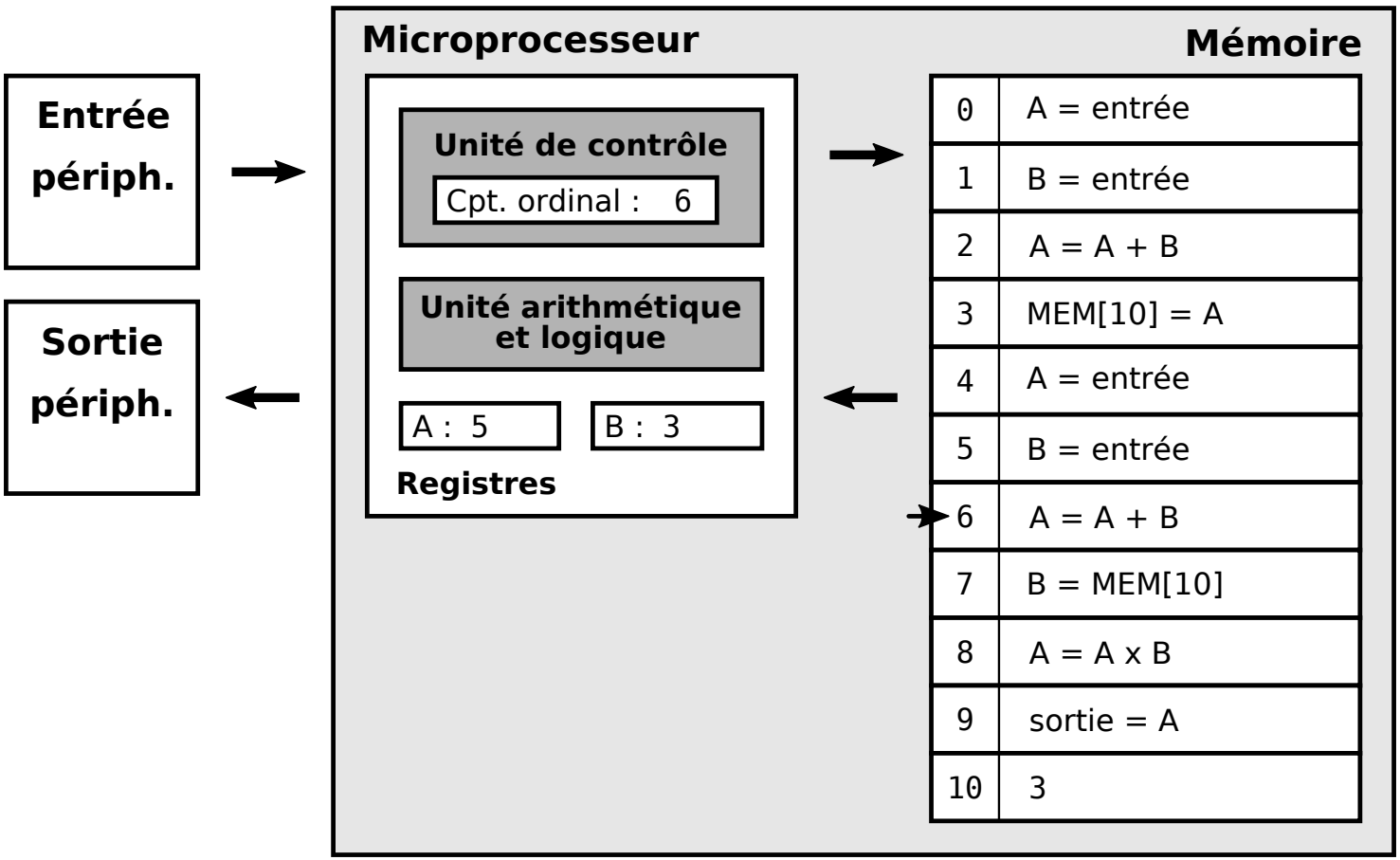
Exécution du programme



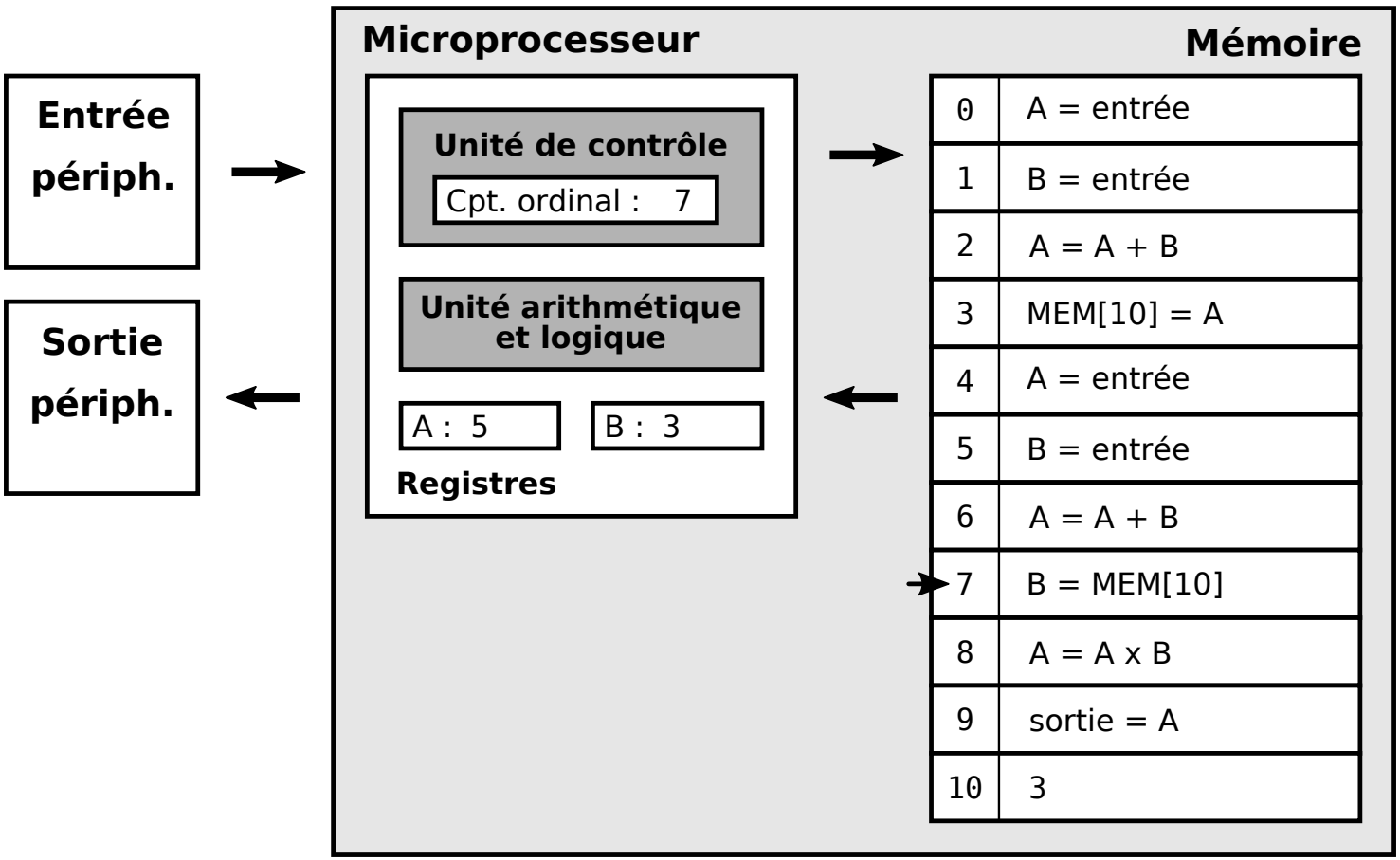
Exécution du programme



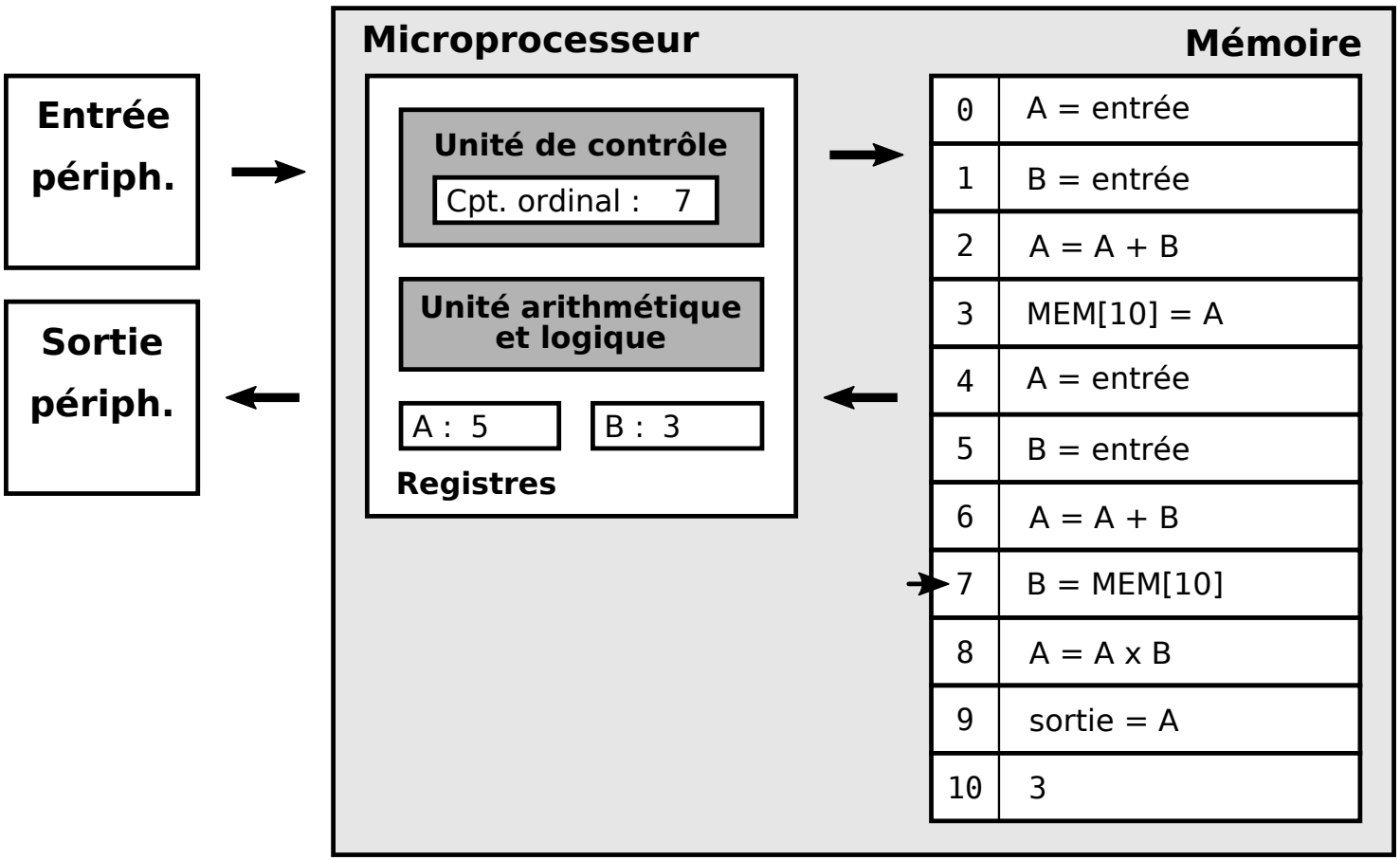
Exécution du programme



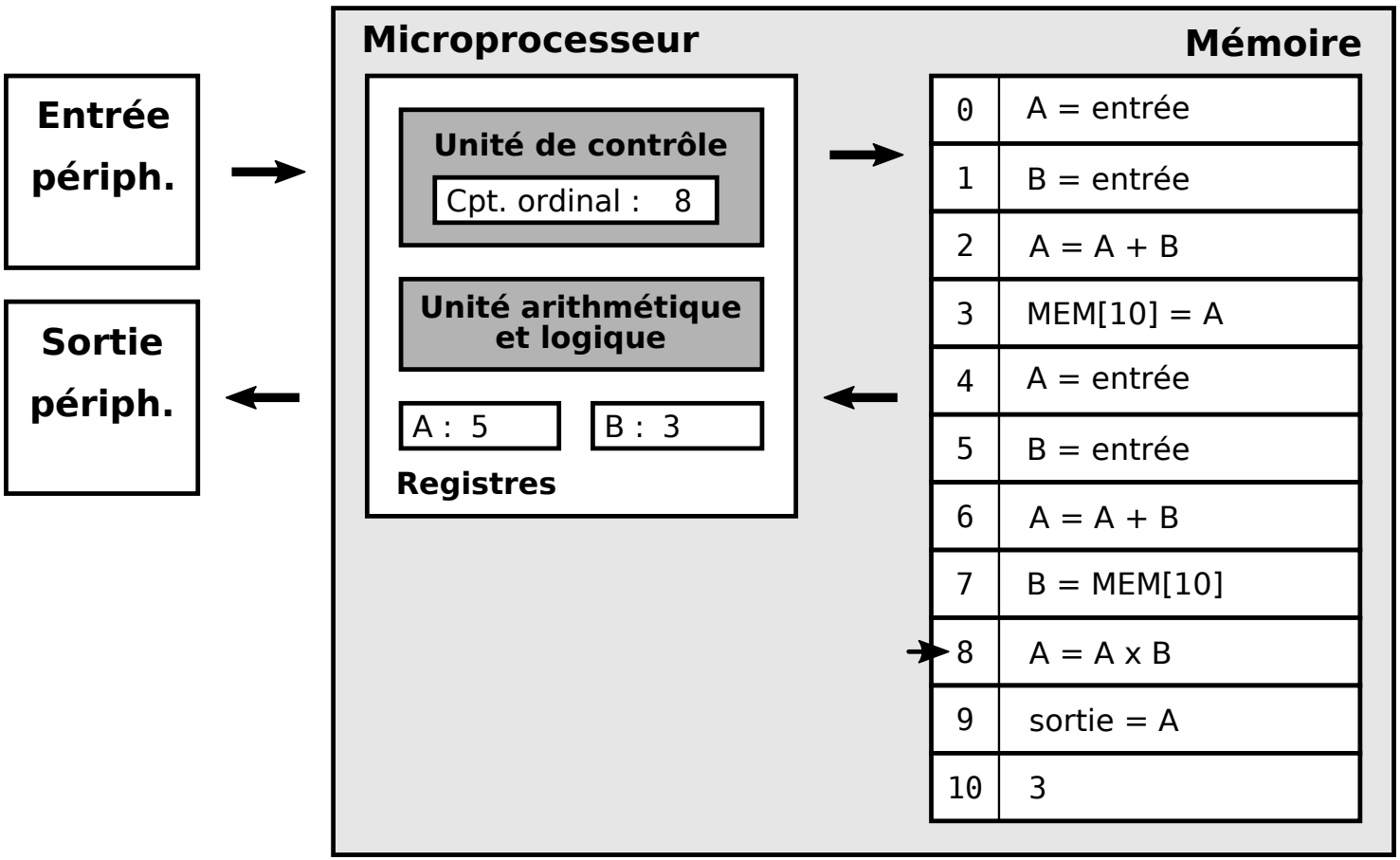
Exécution du programme



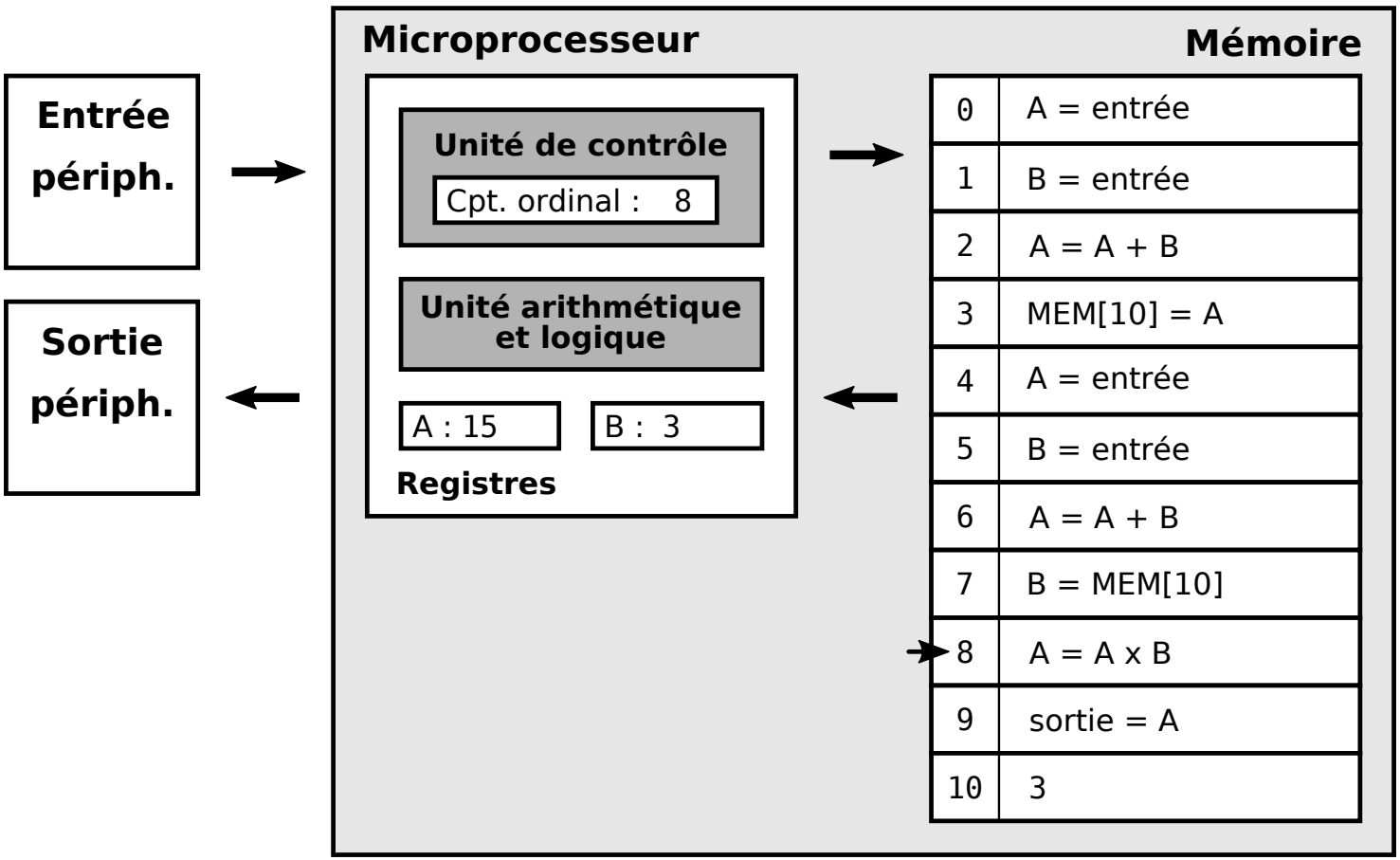
Exécution du programme



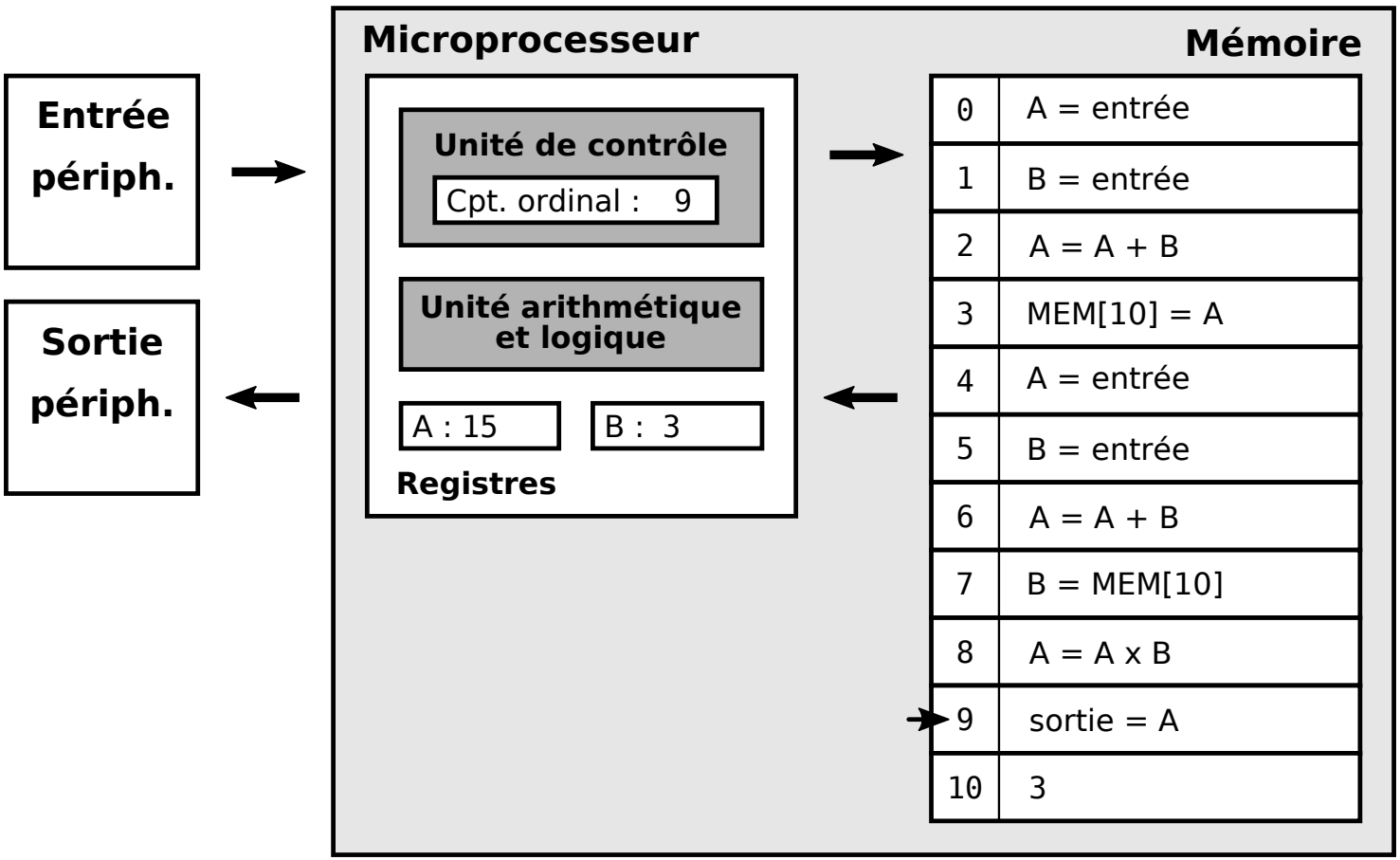
Exécution du programme



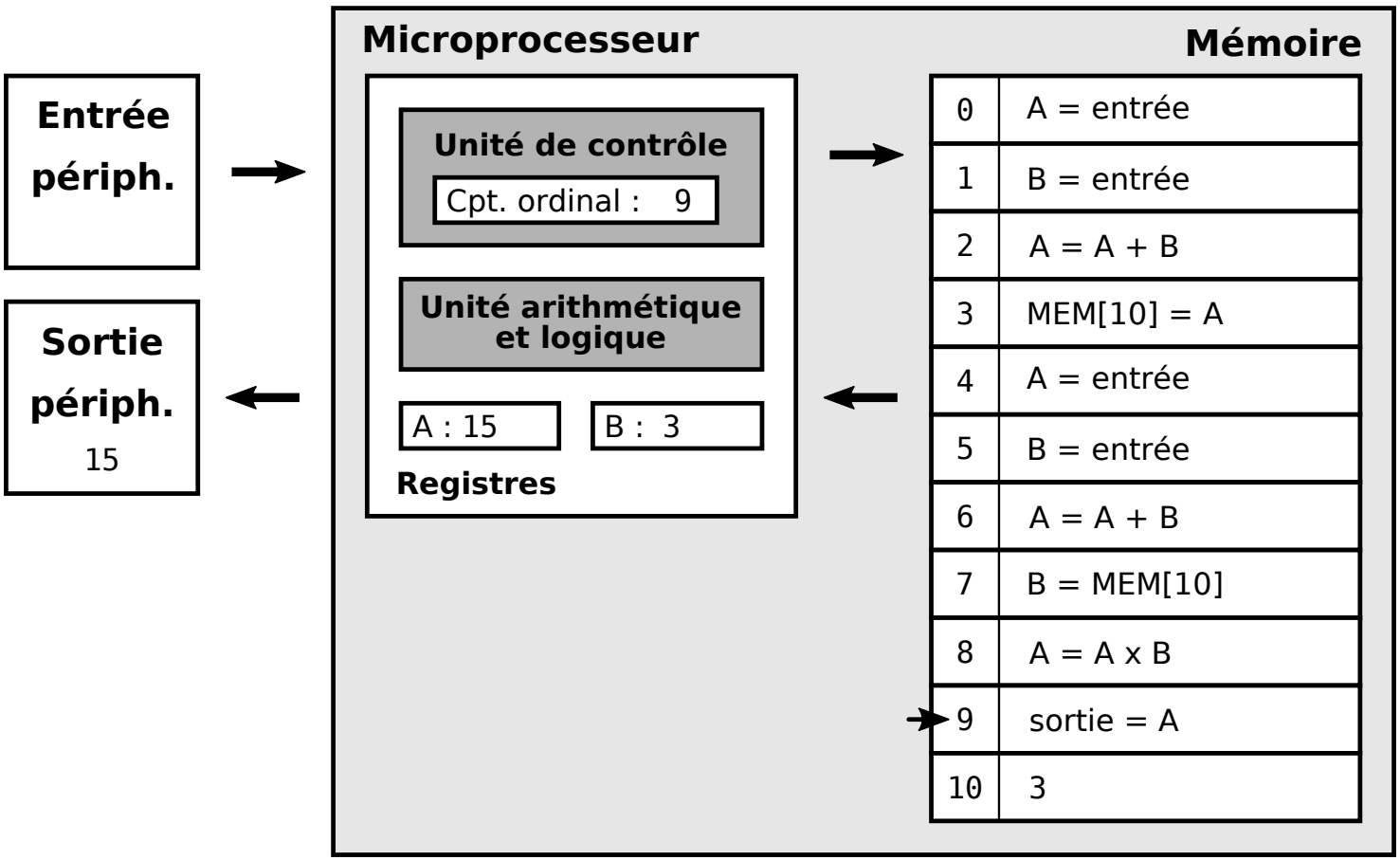
Exécution du programme



Exécution du programme



Exécution du programme



UAL : drapeaux et comparaisons

Généralement un registre spécial du processeur, mis à jour par l'UAL lors de la dernière opération

Drapeaux arithmétiques

- Z : résultat nul
- C (carry) : retenue
- O (overflow) : l'espace des nombre signés à été dépassé
- P : parité
- S : signe

Comparaison

Supportée par certain processeurs : A CMP B
Mise à jour des drapeaux de l'UAL en exécutant une soustraction dont le résultat ne sera pas stocké.
→ Utile pour les structures de contrôle d'un programme.

Instructions de contrôle du flot d'exécution

Permet la mise en œuvre de tests et de boucles quand utilisées en complément avec l'UAL.

```
if (expr.) {statements} else {statements}
while (expr.) {statements}
for (statetements; expr; statements) {statements}
```

Sauts

- Saut inconditionnel : Compteur ordinal = @
  Conséquence : la prochaine instruction est exécutée à @
- Saut conditionnel : Compteur ordinal = @ $\Leftrightarrow$ condition | condition $\in \{Z = 1, Z = 0, C = 0, \text{etc.}\}$
  Conséquence : la prochaine instruction est exécutée à @ si la condition est vérifiée, sinon on incrémente le compteur ordinal

Exemple de test *(if)*

Soit le programme C suivant

```
if (6 - entrée() == 0) {
  sortie(0);
} else {
  sortie(1);
}
```

Peut être traduit en suite d'instructions génériques suivantes :

```
#   Programme                          Commentaires
0   A = 6                              if (6 - entrée() == 0)
1   B = entrée
2   A = A - B                          ou A CMP B
3   cpt. ordinal = 6 ssi Z = 0
4   sortie = 0                         sortie(0)
5   cpt. ordinal = 7                   else
6   sortie = 1                         sortie(1)
7   [..]
```

Exemple de boucle *for*

Soit le programme C suivant

```
for (int i = 0; i < 10; i++) {
  sortie(i);
}
```

Peut être traduit en suite d'instructions génériques suivantes :

```
#   Programme                       Commentaires
0   A = 0                           int i = 0
1   B = 10
2   A CMP B                         i < 10 ?
3   cpt. ordinal = 7 ssi Z = 1      {
4   sortie = A                      sortie(i)
5   A = A + 1                       i++
6   cpt. ordinal = 2                }
7   [..]
```

Support des procédures 1/5

Question : pourquoi est-ce qu'on ne peut pas utiliser deux simple sauts ?

```
#    Programme                    Commentaires
0    A = 0                        main() {}
1    cpt. ordinal = 10              f()
2    cpt. ordinal = 20              f2()
3    [..]
10   A = A + 1                    f() {}
11   cpt. ordinal = 2
12   [..]
20   A = A + 2                    f2() {}
21   cpt.ordinal = 3
```

Support des procédures 2/5

Question : pourquoi est-ce qu'on ne peut pas utiliser deux simple sauts ?

Réponse : plusieurs appels de la même procédure

```
#    Programme                    Commentaires
0    A = 0                        main() {}
1    cpt. ordinal = 10              f()
2    cpt. ordinal = 10              f()
3    [..]
10   A = A + 1                    f() {}
11   cpt. ordinal = 2
12   [..]
20   A = A + 2                    f2() {}
21   cpt.ordinal = 3
```

Support des procédures 2/5

Question : pourquoi est-ce qu'on ne peut pas utiliser deux simple sauts ?

Réponse : plusieurs appels de la même procédure

```
#    Programme                    Commentaires
0    A = 0                        main() {}
1    cpt. ordinal = 10              f()
2    cpt. ordinal = 10              f()
3    [..]
10   A = A + 1                    f() {}
11   cpt. ordinal = 2
12   [..]
20   A = A + 2                    f2() {}
21   cpt.ordinal = 3
```

Solution possible : nouveau registre C ; instruction d'appel de procédure : appel $x|x \in \mathcal{N} \Leftrightarrow cpt.ordinal = x \wedge C =$ cpt. ordinal $+ 1$; saut indirect (cf. opérandes et mode d'adressage).

Support des procédures 3/5

Avec utilisation du registre de contexte C, de l'instruction appel et du saut indirect.

```
#    Programme                Commentaires
0    A = 0                    main() {}
1    appel 10                   f() et C = 2
2    appel 10                   f() et C = 3
3    [..]
10   A = A + 1                f() {}
11   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
12   [..]
20   A = A + 2                f2() {}
21   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
```

Support des procédures 4/5

Question : appel d'une procédure dans une procédure ?

```
#    Programme                Commentaires
0    A = 0                    main() {}
1    appel 10                   f() et C = 2
2    appel 10                   f() et C = 3
3    [..]
10   A = A + 1                f() {}
11   appel 20                   f2() et C = 12
12   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
13   [..]
20   A = A + 2                f2() {}
21   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
```

Support des procédures 4/5

Question : appel d'une procédure dans une procédure ?
Réponse : seulement un niveau de profondeur d'appel (C est écrasé)

```
#    Programme                Commentaires
0    A = 0                    main() {}
1    appel 10                   f() et C = 2
2    appel 10                   f() et C = 3
3    [..]
10   A = A + 1                f() {}
11   appel 20                   f2() et C = 12
12   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
13   [..]
20   A = A + 2                f2() {}
21   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
```

Support des procédures 4/5

Question : appel d'une procédure dans une procédure ?
Réponse : seulement un niveau de profondeur d'appel (C est écrasé)

```
#    Programme                Commentaires
0    A = 0                    main() {}
1    appel 10                   f() et C = 2
2    appel 10                   f() et C = 3
3    [..]
10   A = A + 1                f() {}
11   appel 20                   f2() et C = 12
12   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
13   [..]
20   A = A + 2                f2() {}
21   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
```

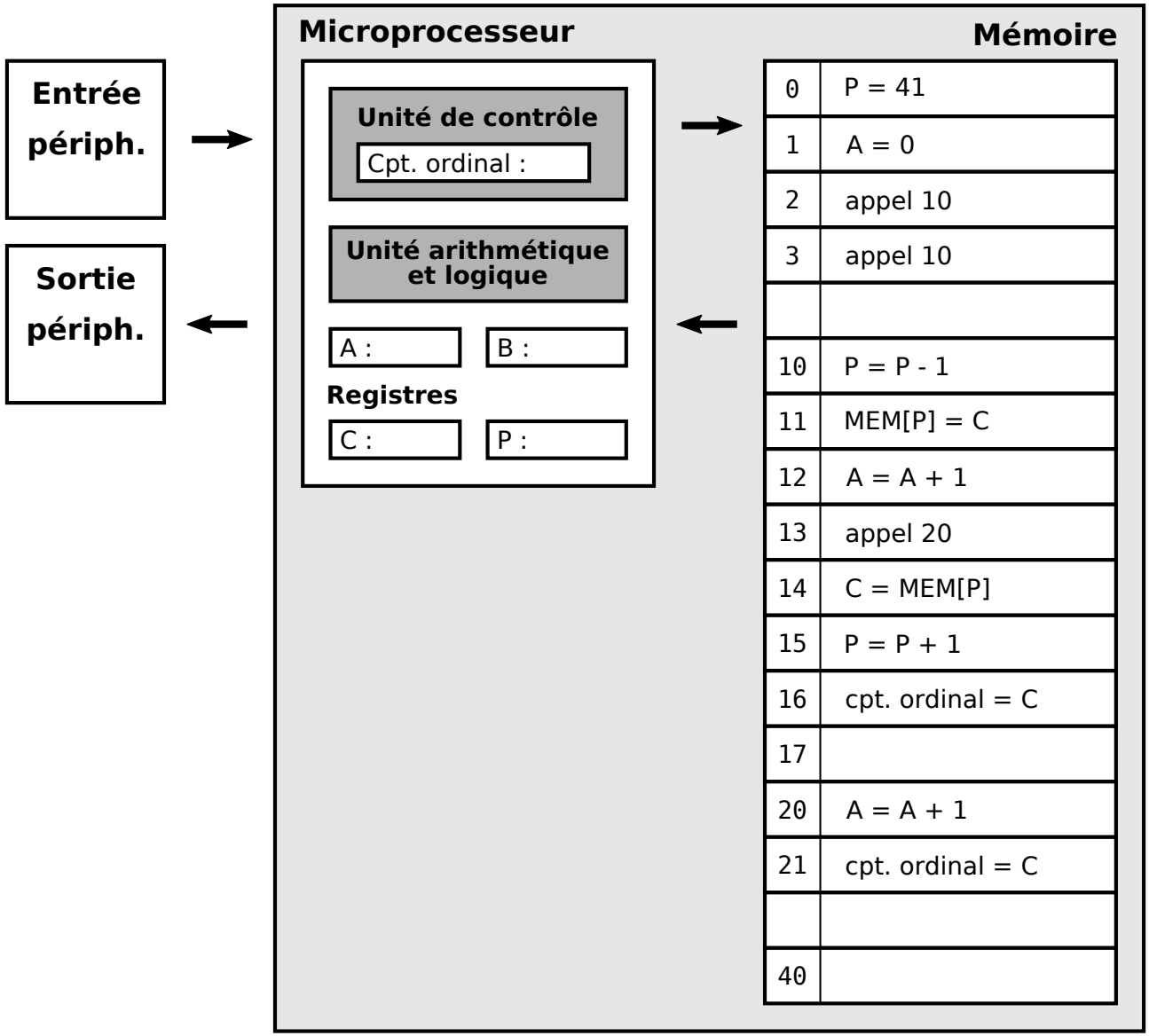
Solution possible : sauvegarder le registre C en mémoire dans une pile ; lecture mémoire indirecte ; registre de pile

Support des procédures 5/5

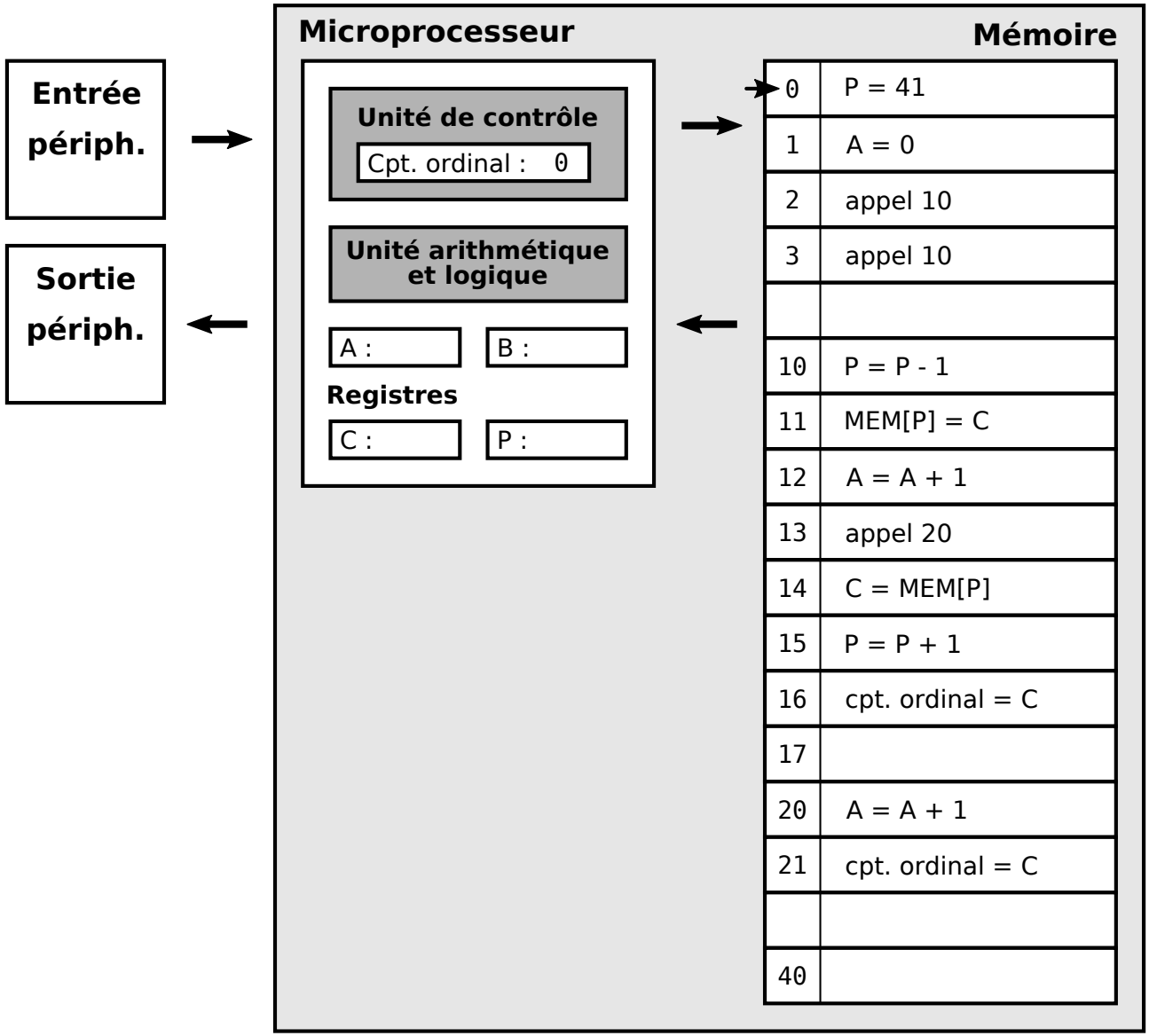
Solution : appel récursif avec pile et accès mémoire indirect

```
#    Programme                Commentaires
0    P = 41                   Initialisation pile
1    A = 0                    main() {}
2    appel 10                   f() et C = 2
3    appel 10                   f() et C = 3
4    [..]
10   P = P - 1                f() {} sauvegarde du contexte
11   MEM[P] = C
12   A = A + 1
13   appel 20                   f2() et C = 14
14   C = MEM[P]                 restauration du contexte
15   P = P + 1
16   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
17   [..]
20   A = A + 2                f2() {}
21   cpt. ordinal = C           cpt. ordinal = @retour
```

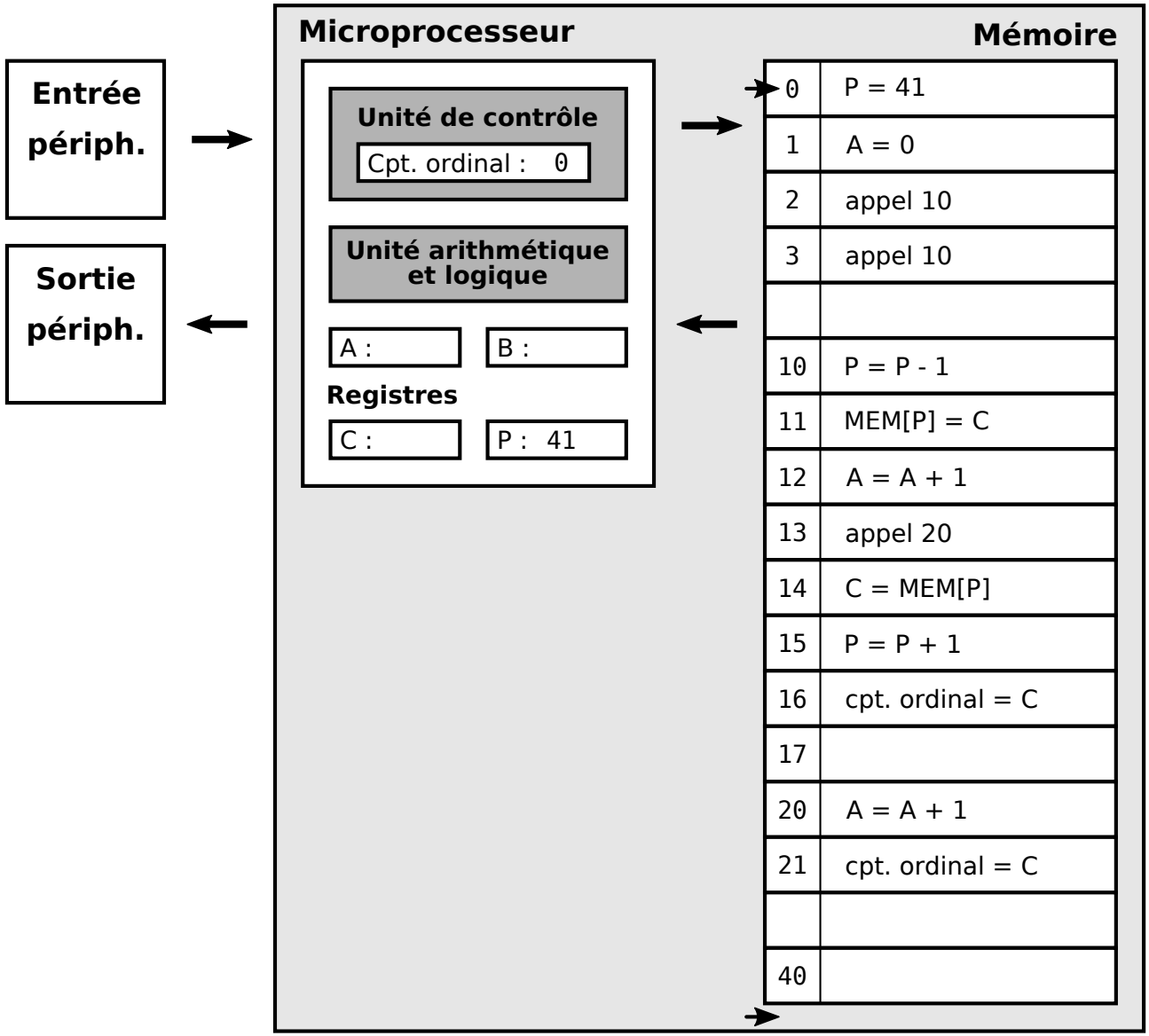
Support des procédures : exécution



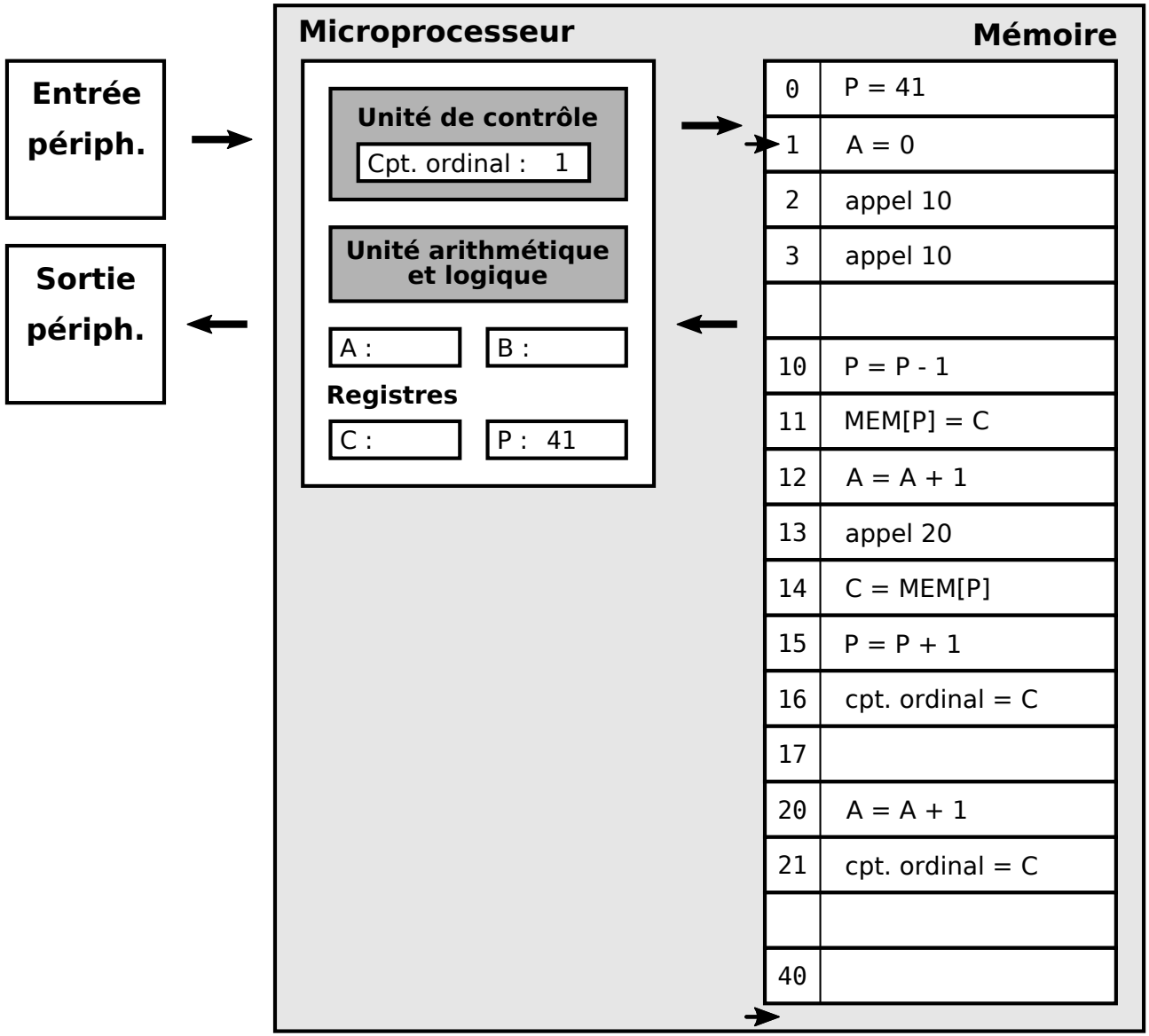
Support des procédures : exécution



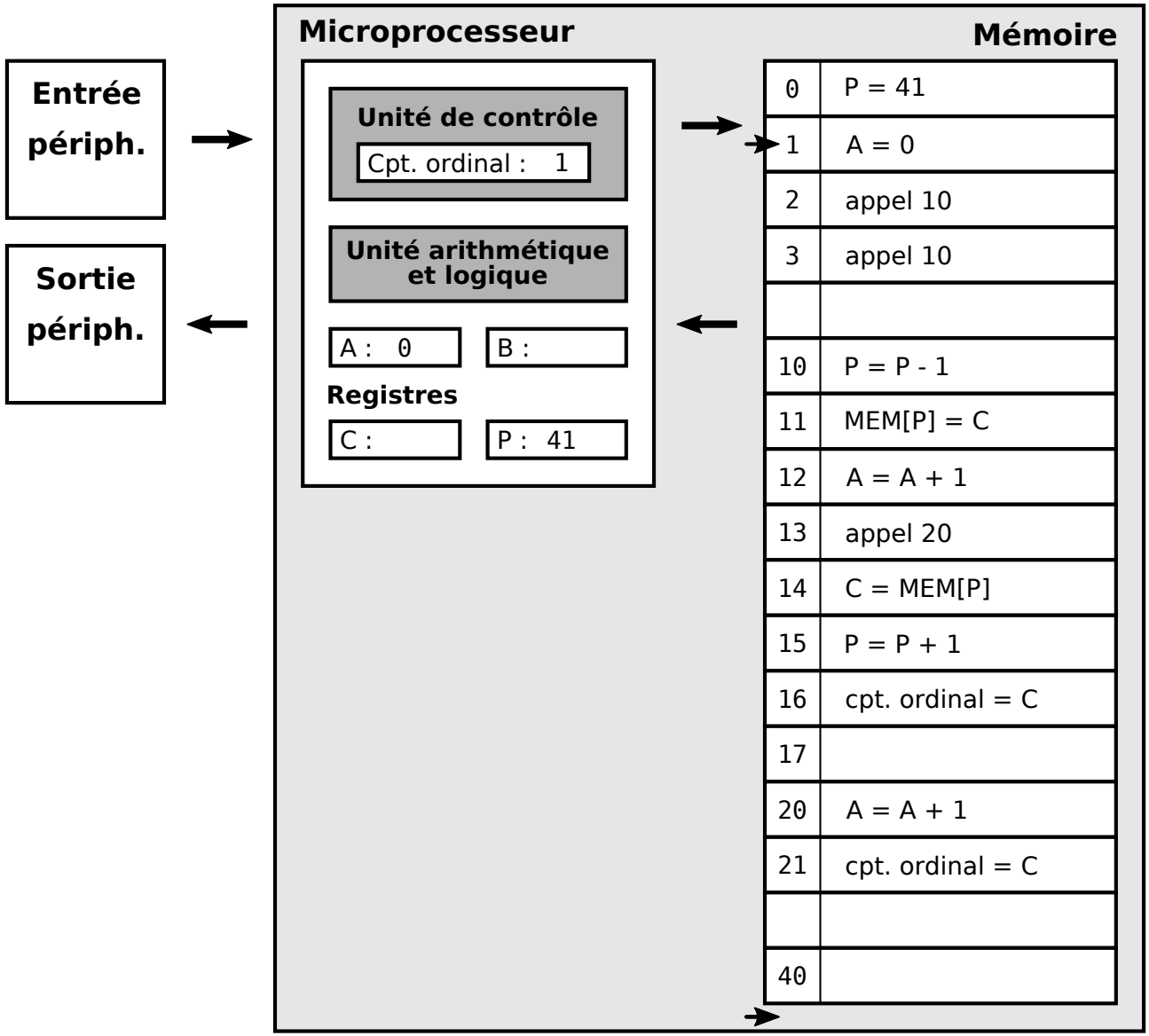
Support des procédures : exécution



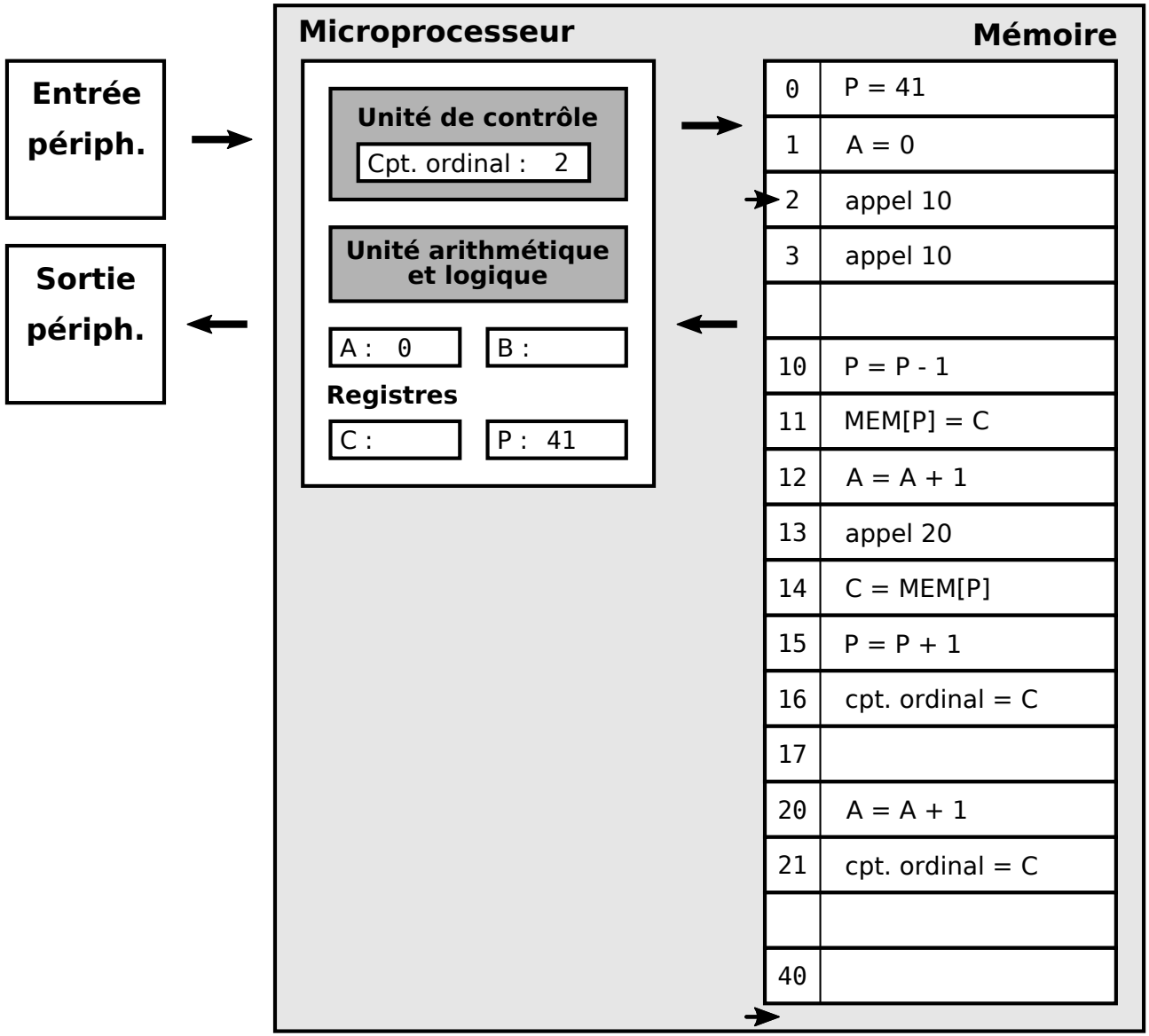
Support des procédures : exécution



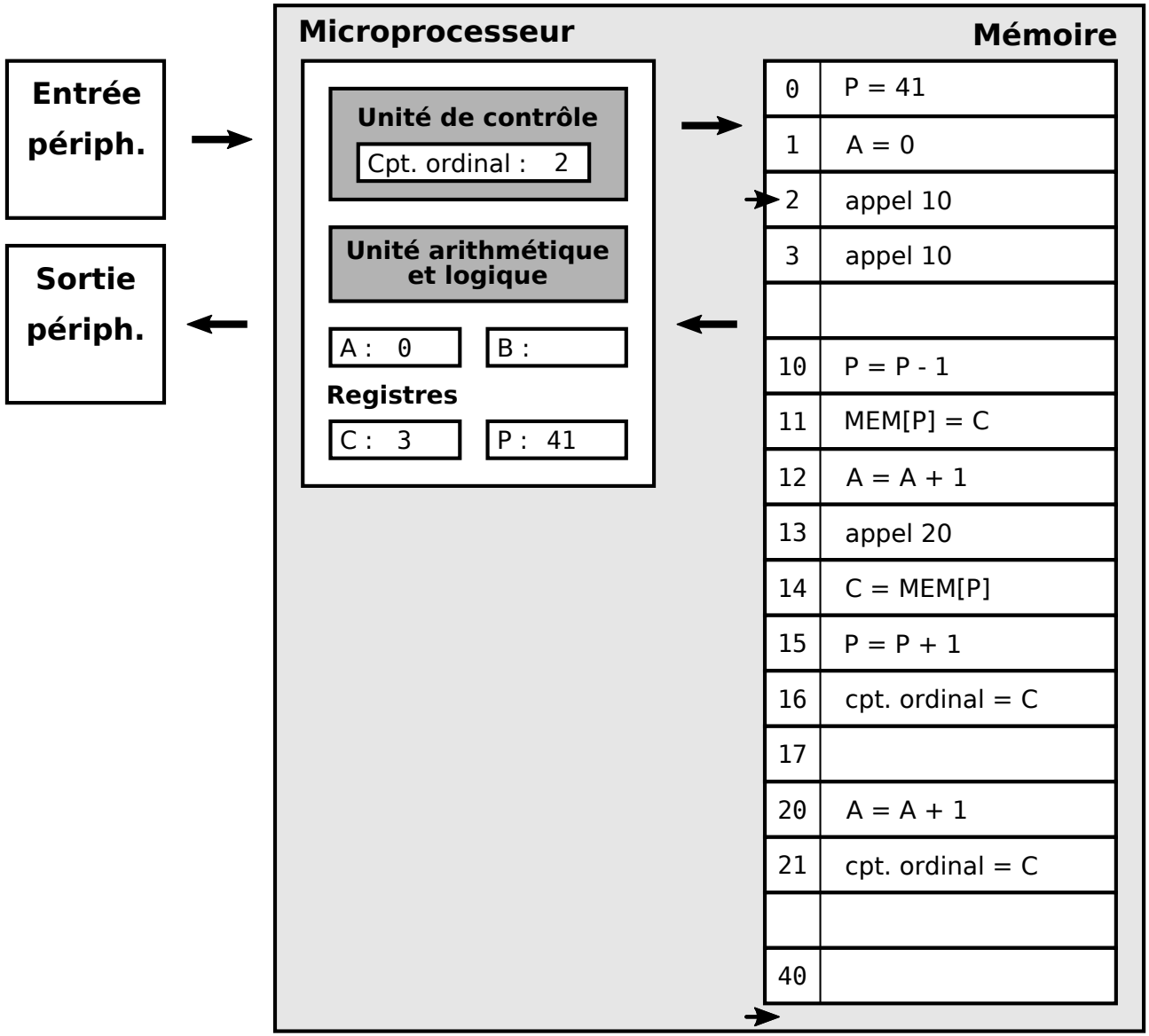
Support des procédures : exécution



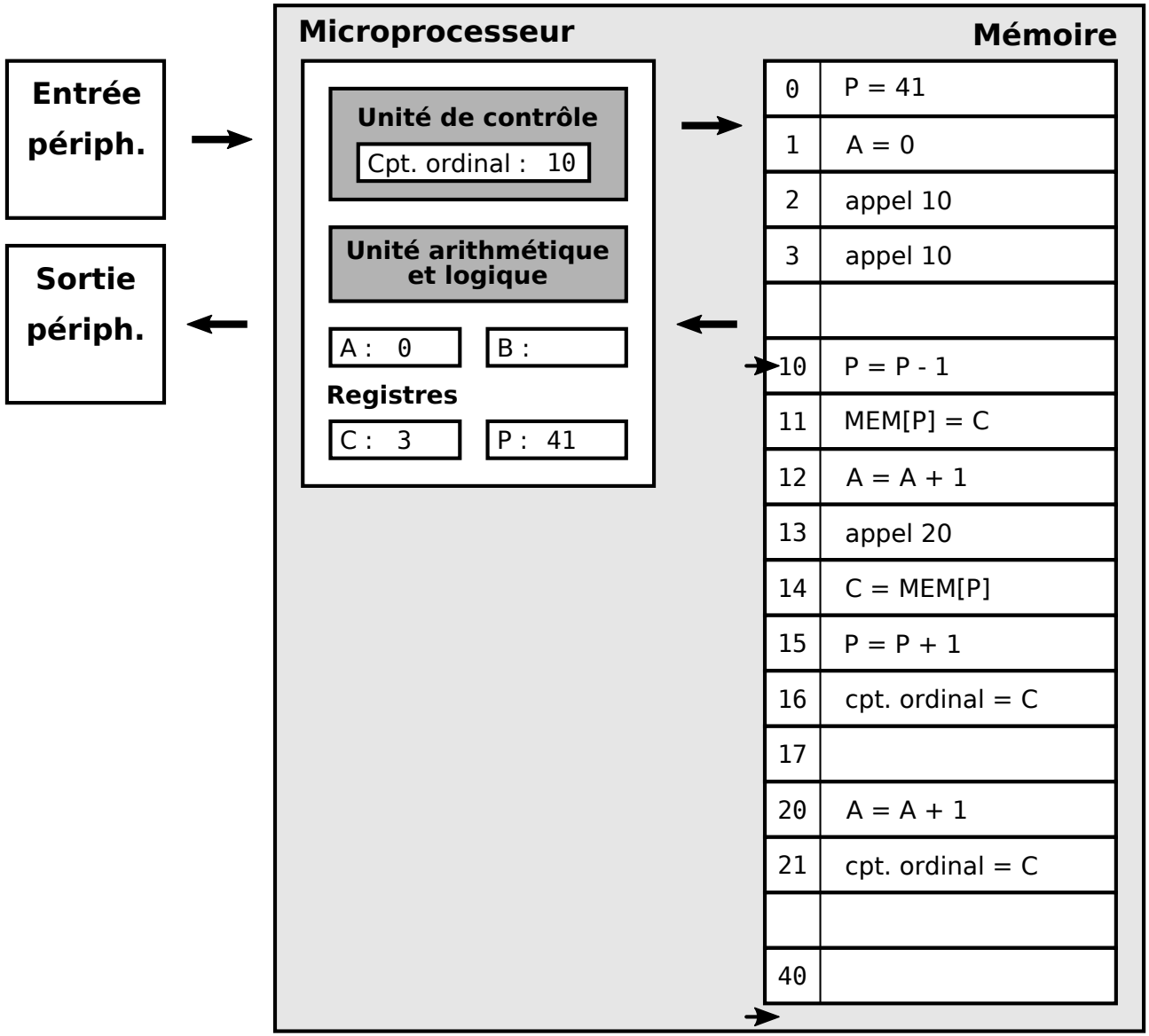
Support des procédures : exécution



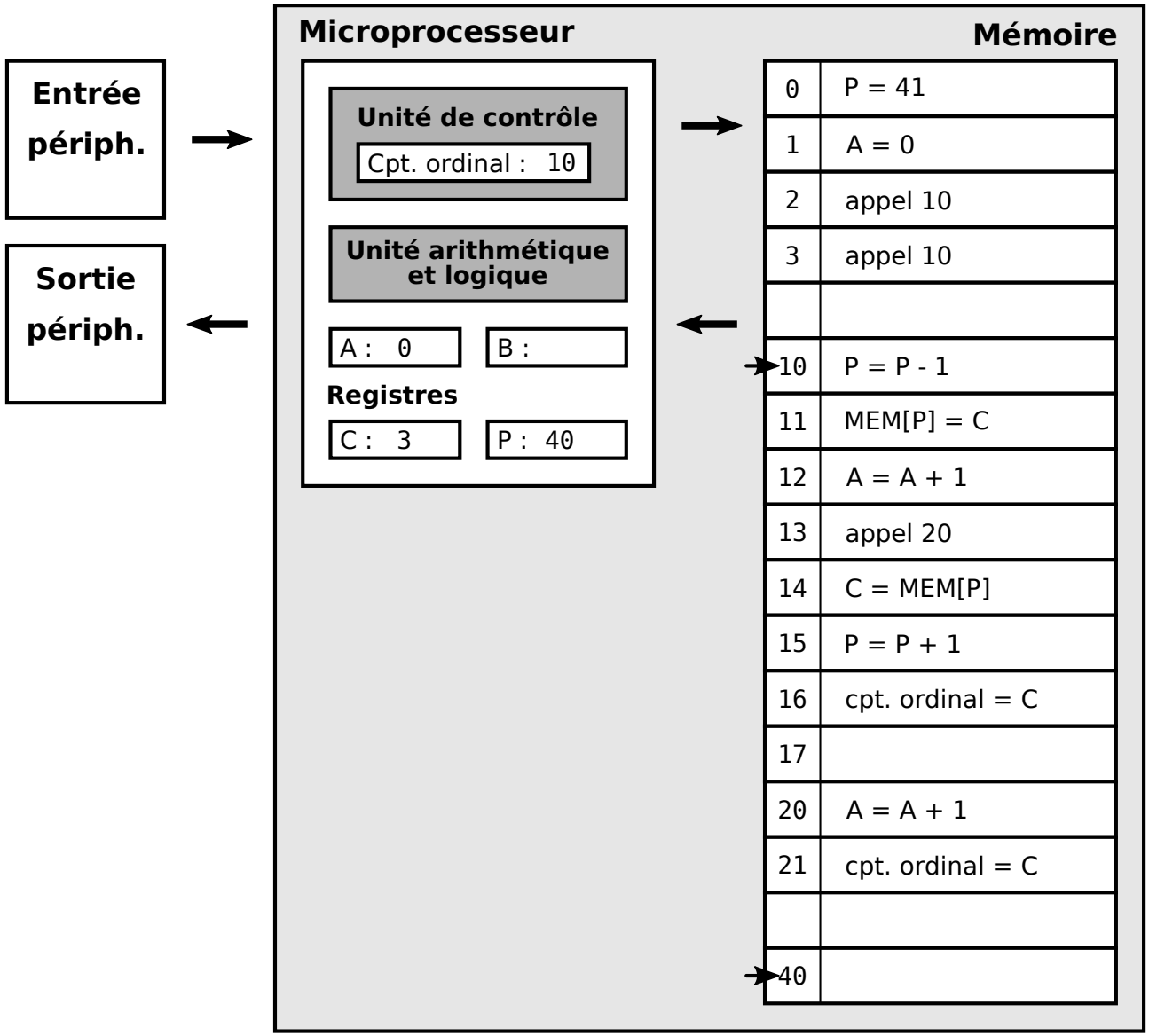
Support des procédures : exécution



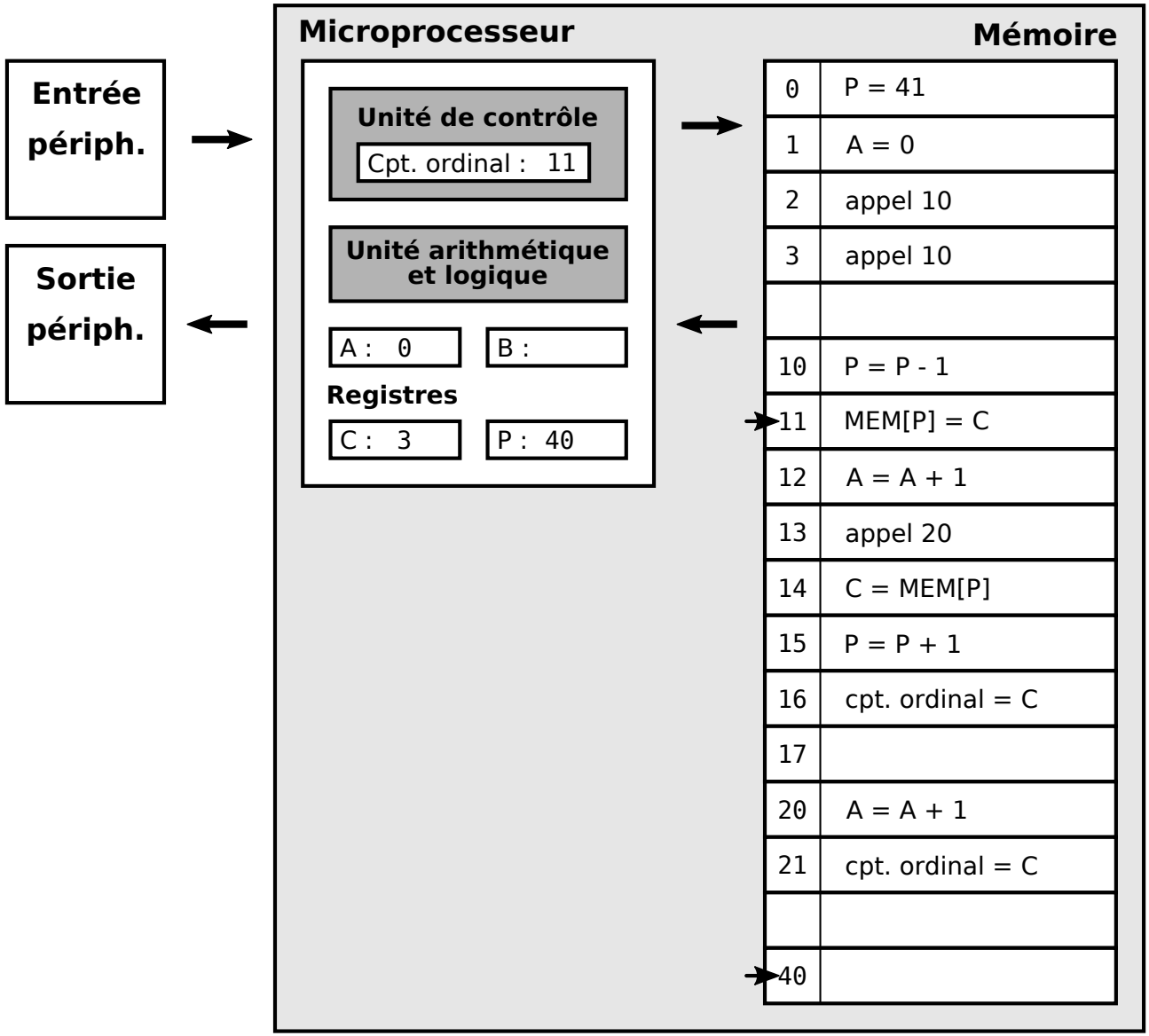
Support des procédures : exécution



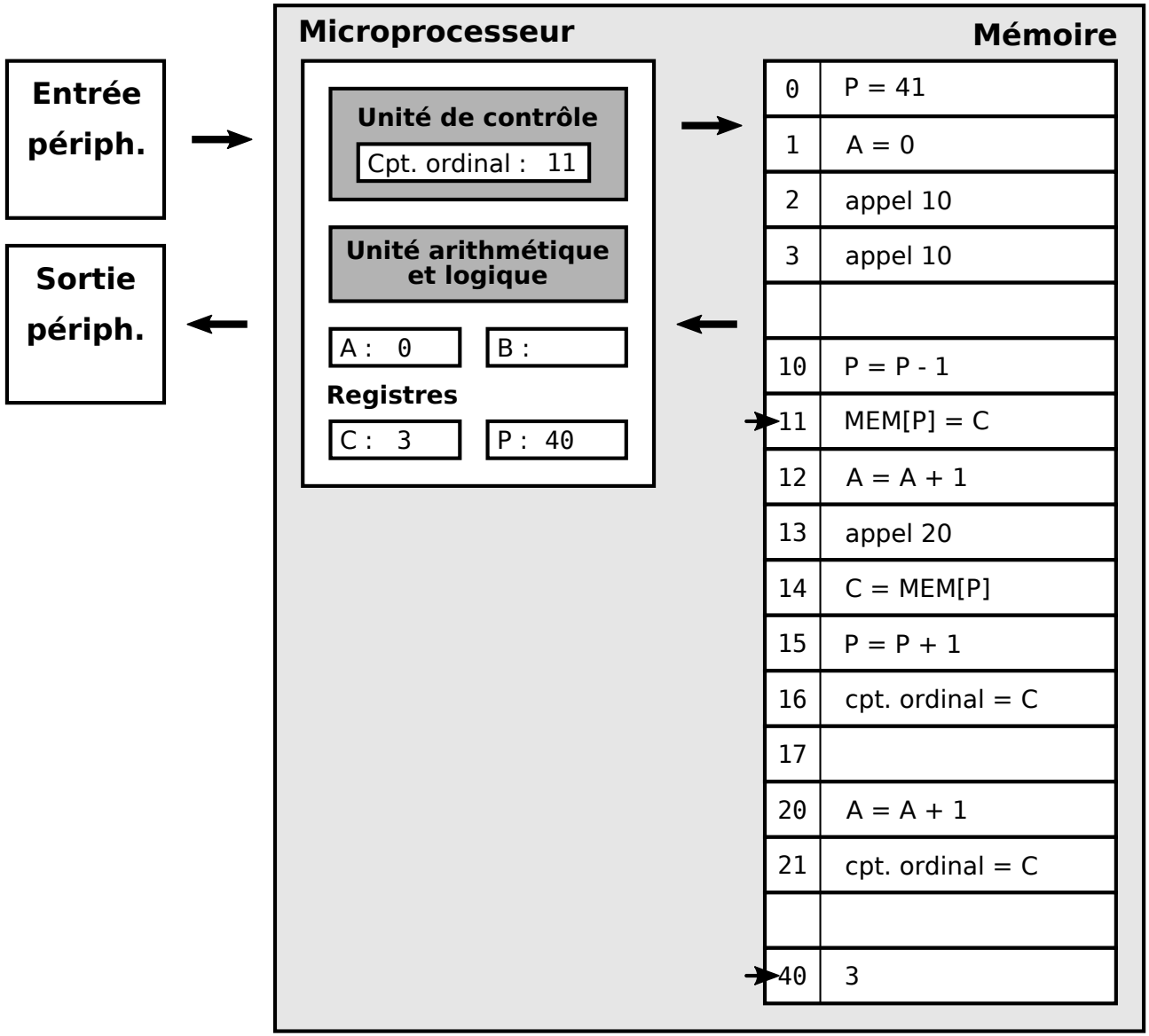
Support des procédures : exécution



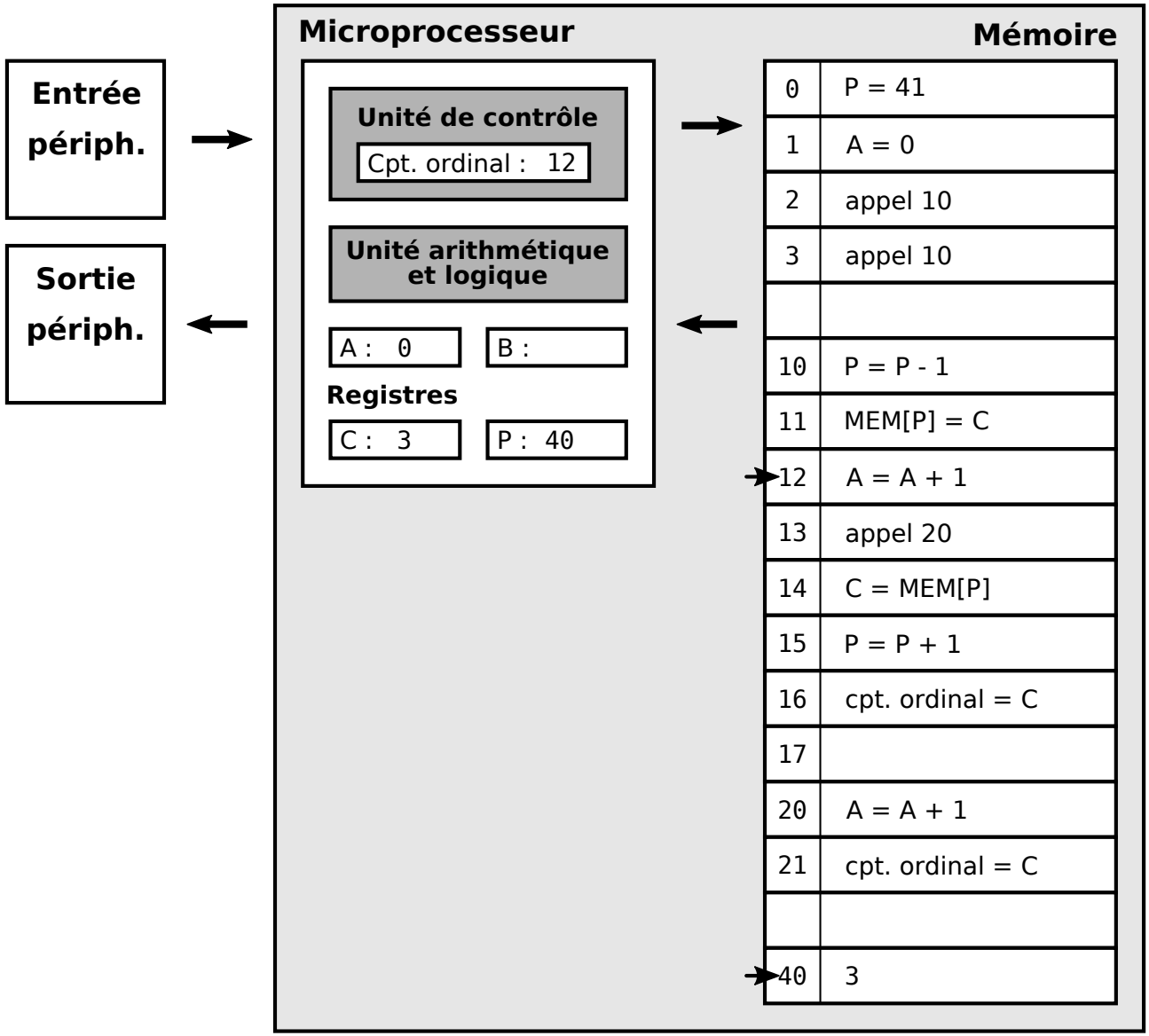
Support des procédures : exécution



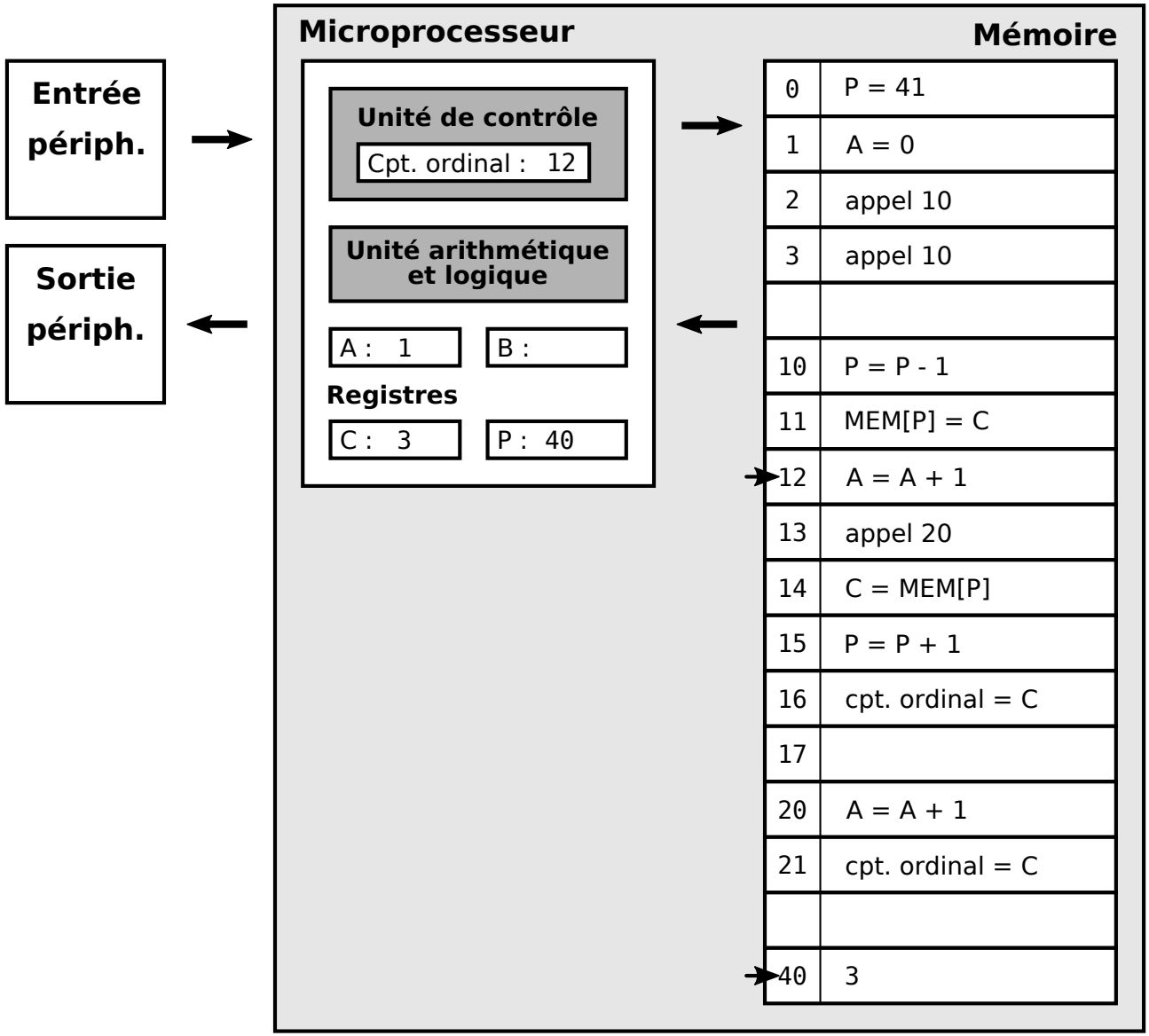
Support des procédures : exécution



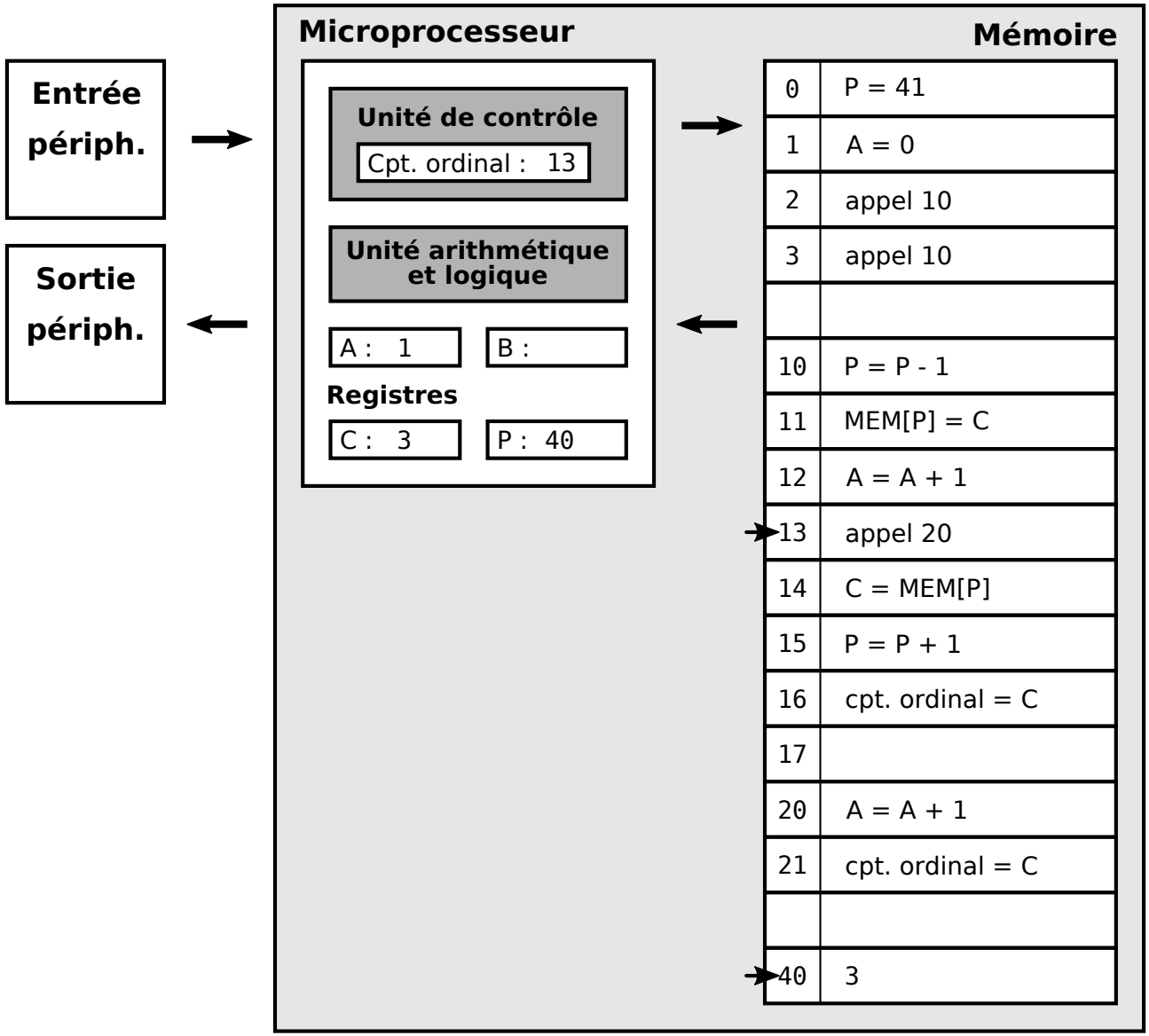
Support des procédures : exécution



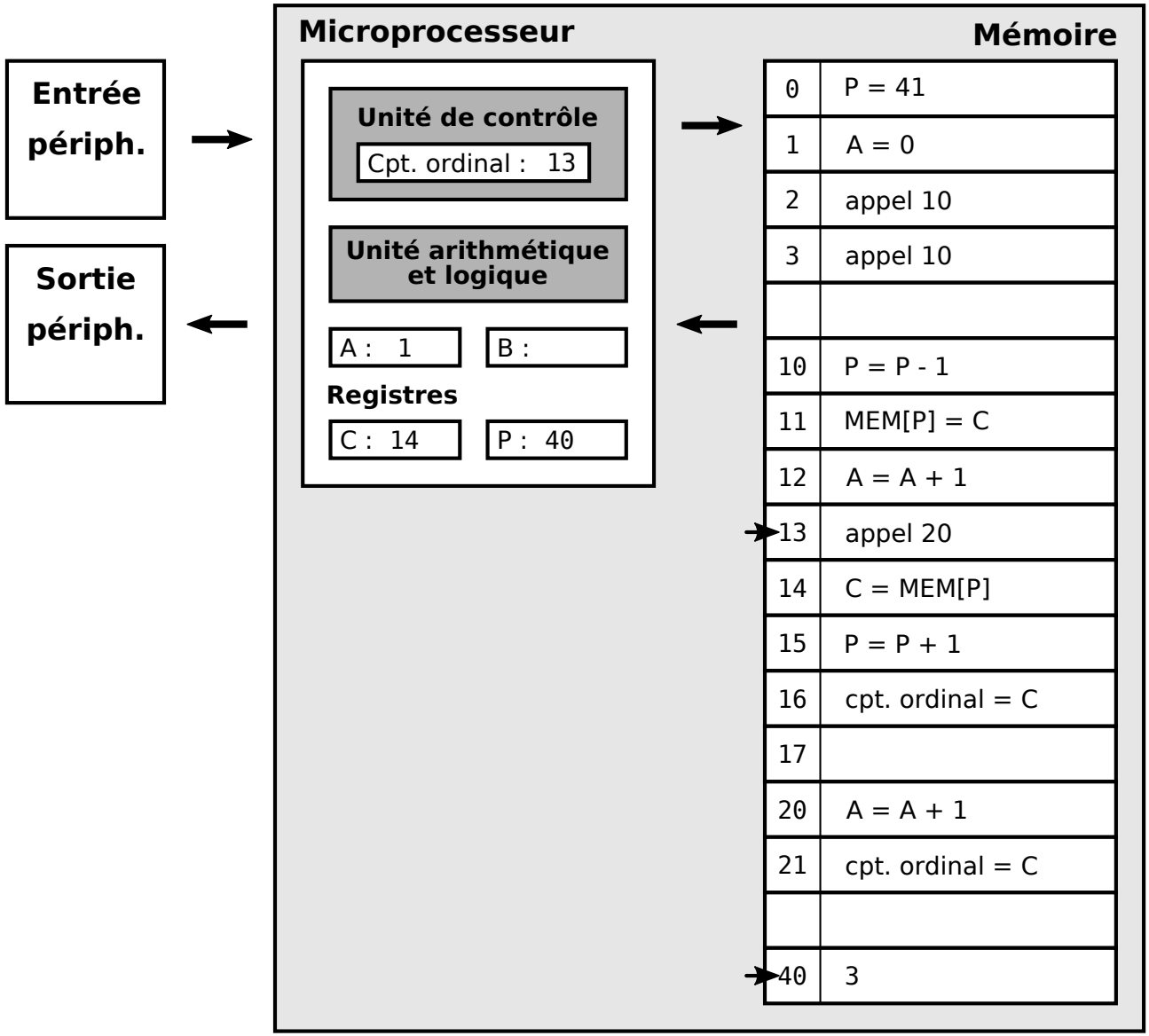
Support des procédures : exécution



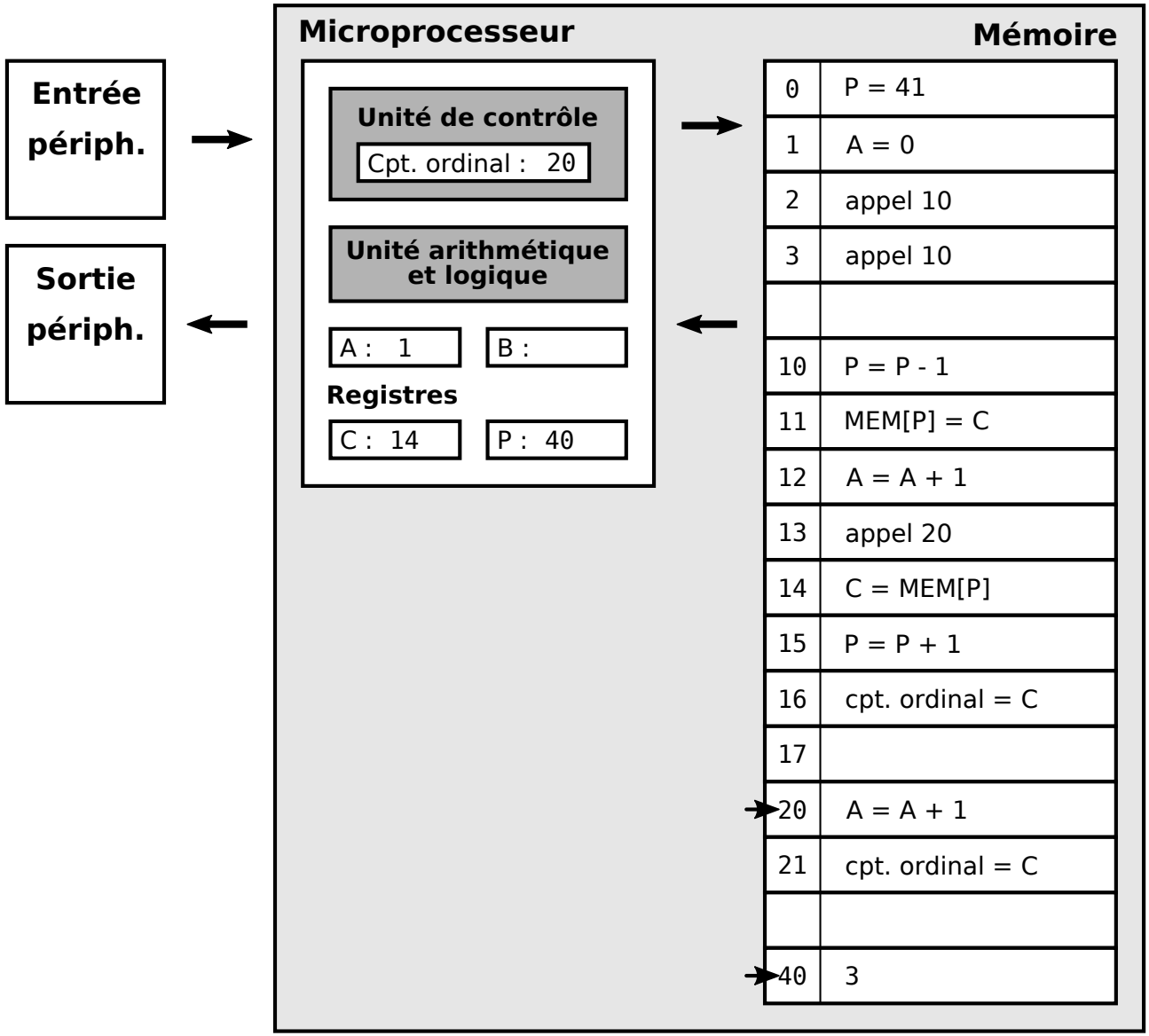
Support des procédures : exécution



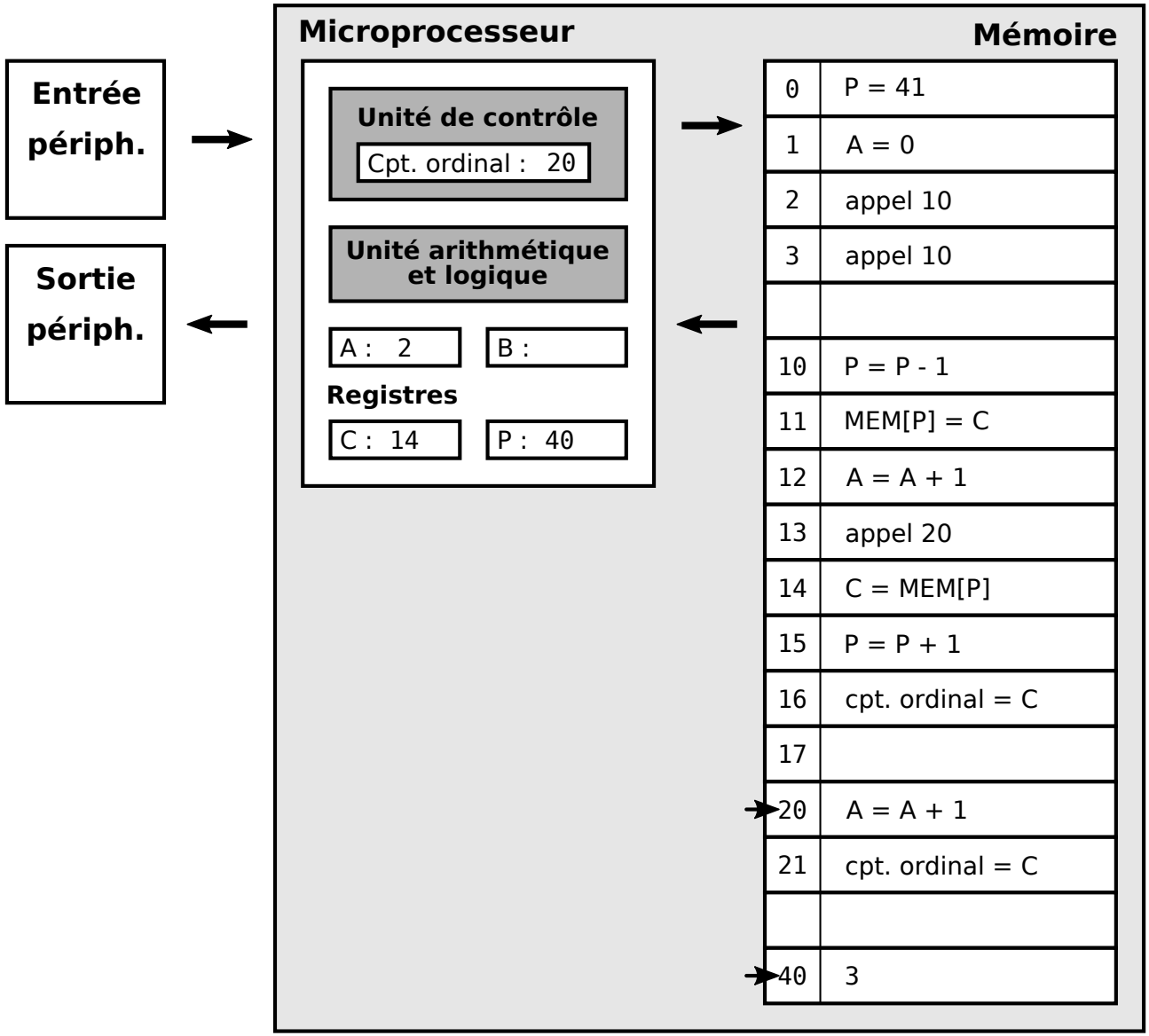
Support des procédures : exécution



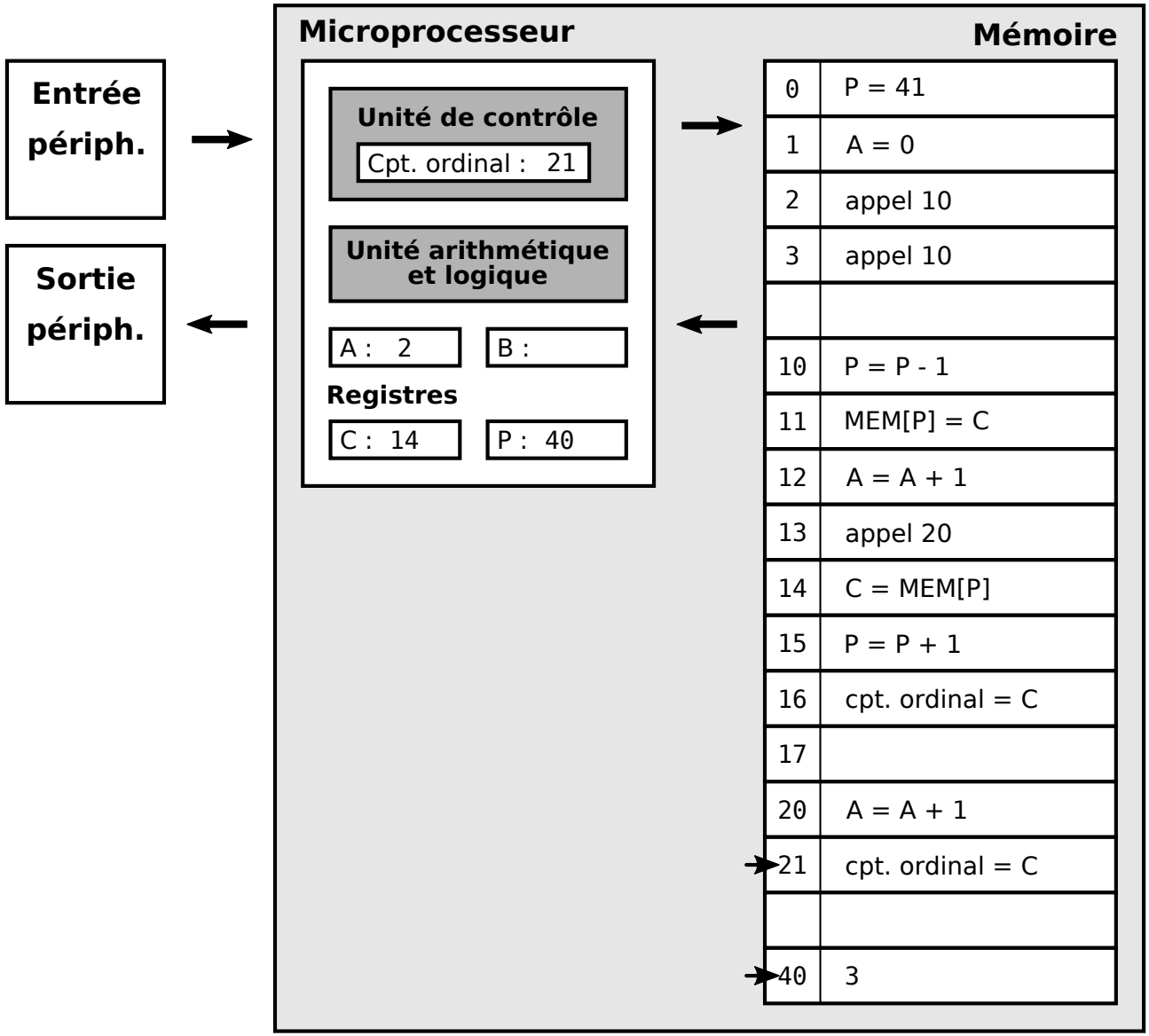
Support des procédures : exécution



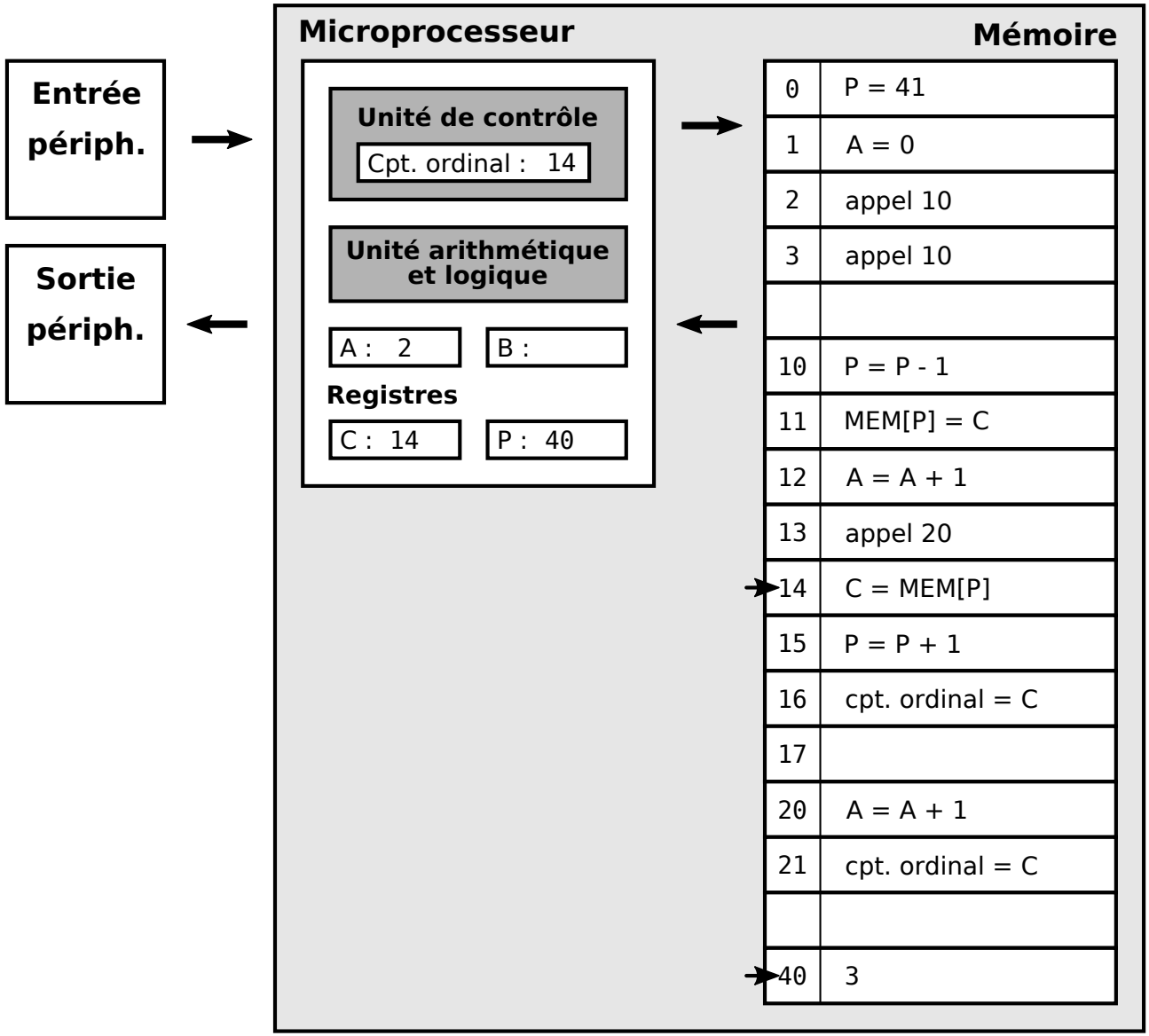
Support des procédures : exécution



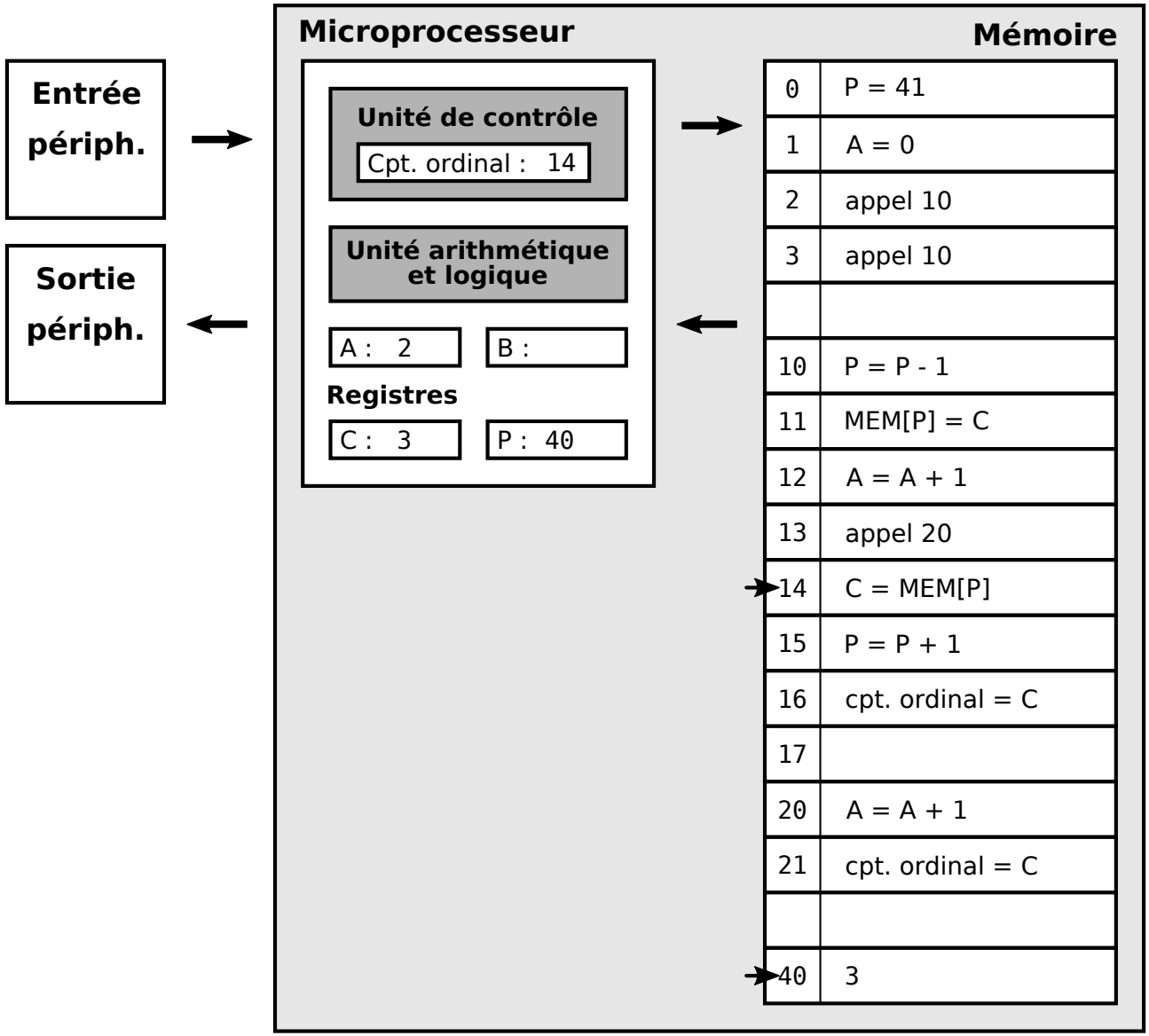
Support des procédures : exécution



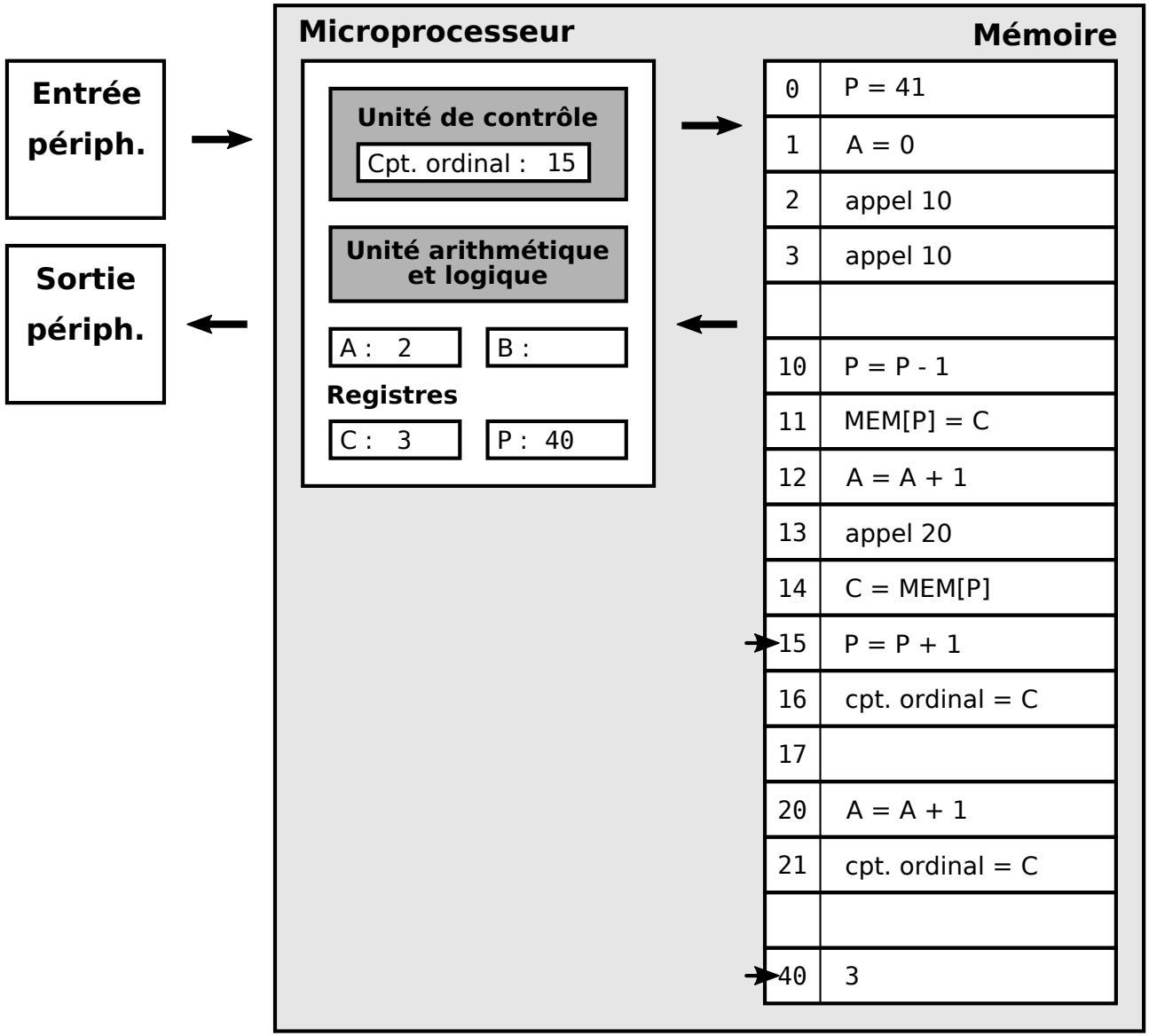
Support des procédures : exécution



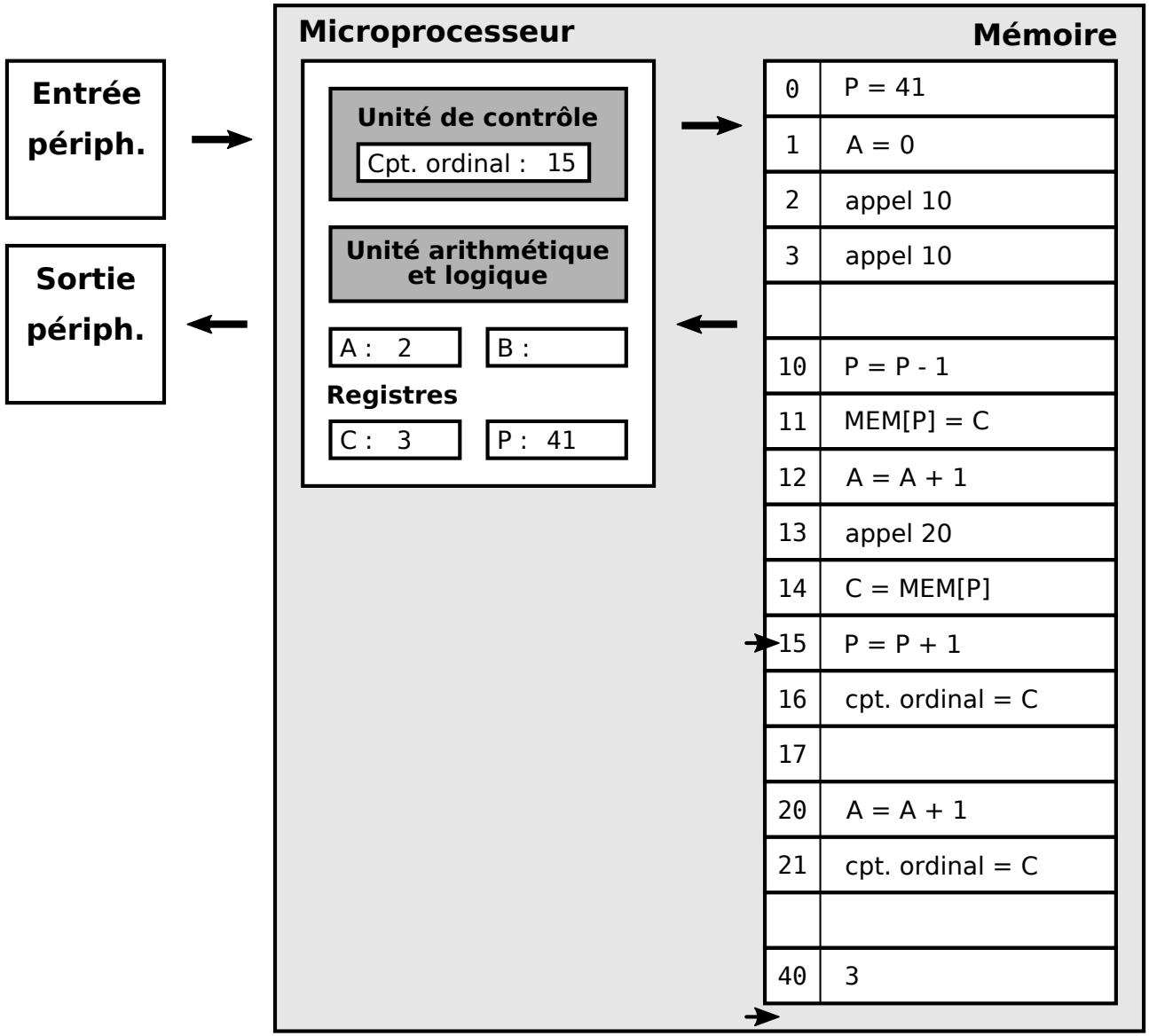
Support des procédures : exécution



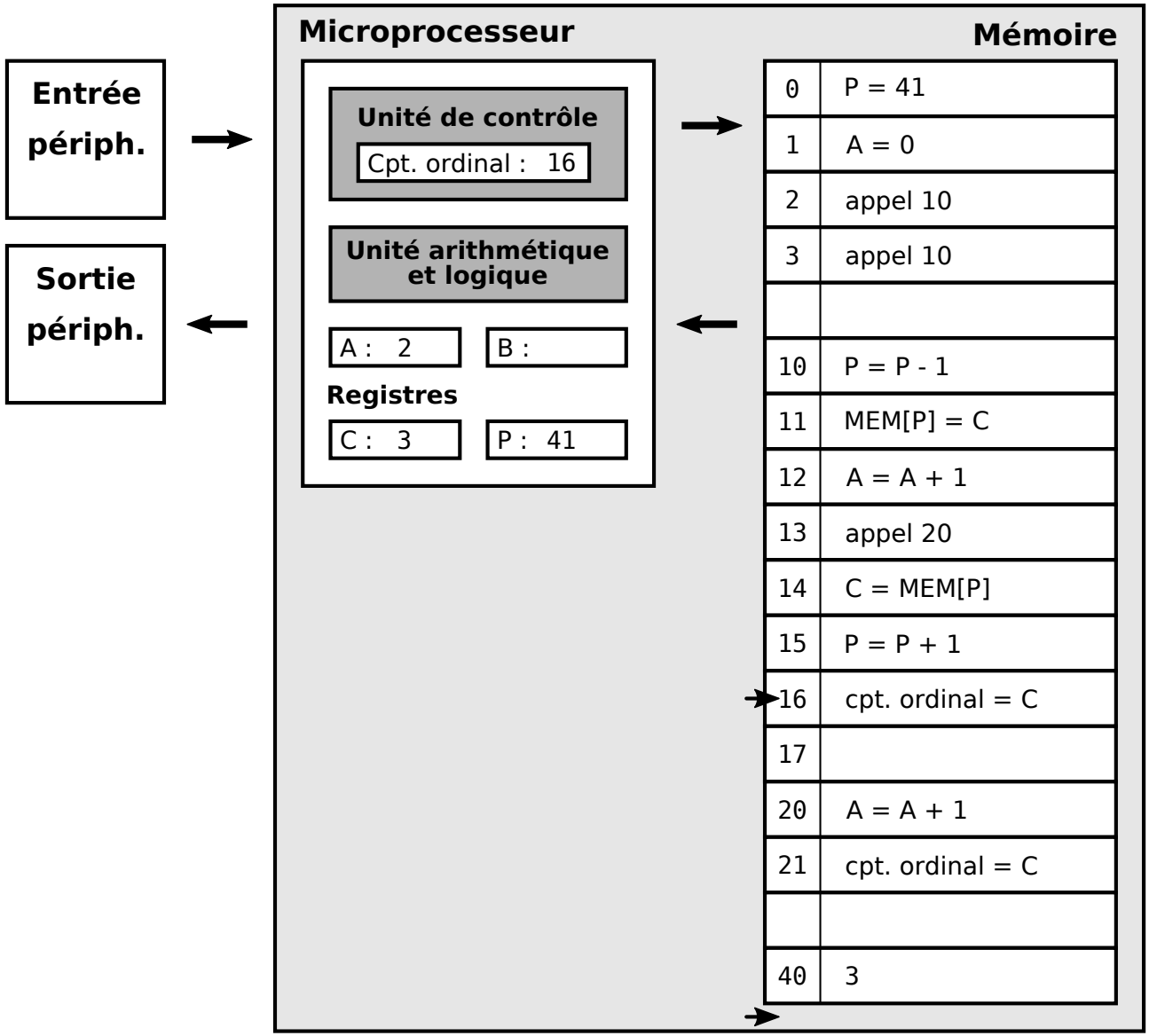
Support des procédures : exécution



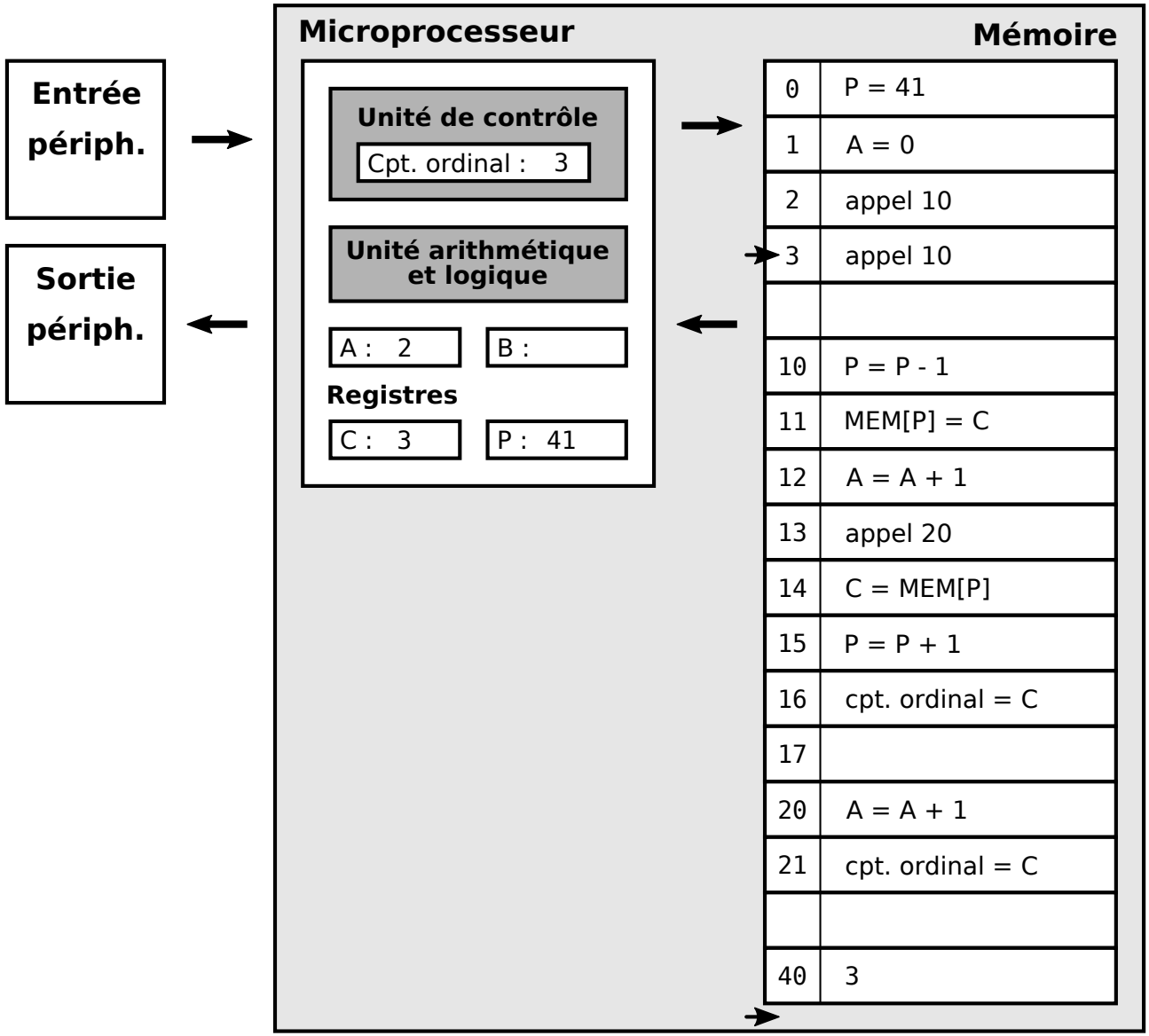
Support des procédures : exécution



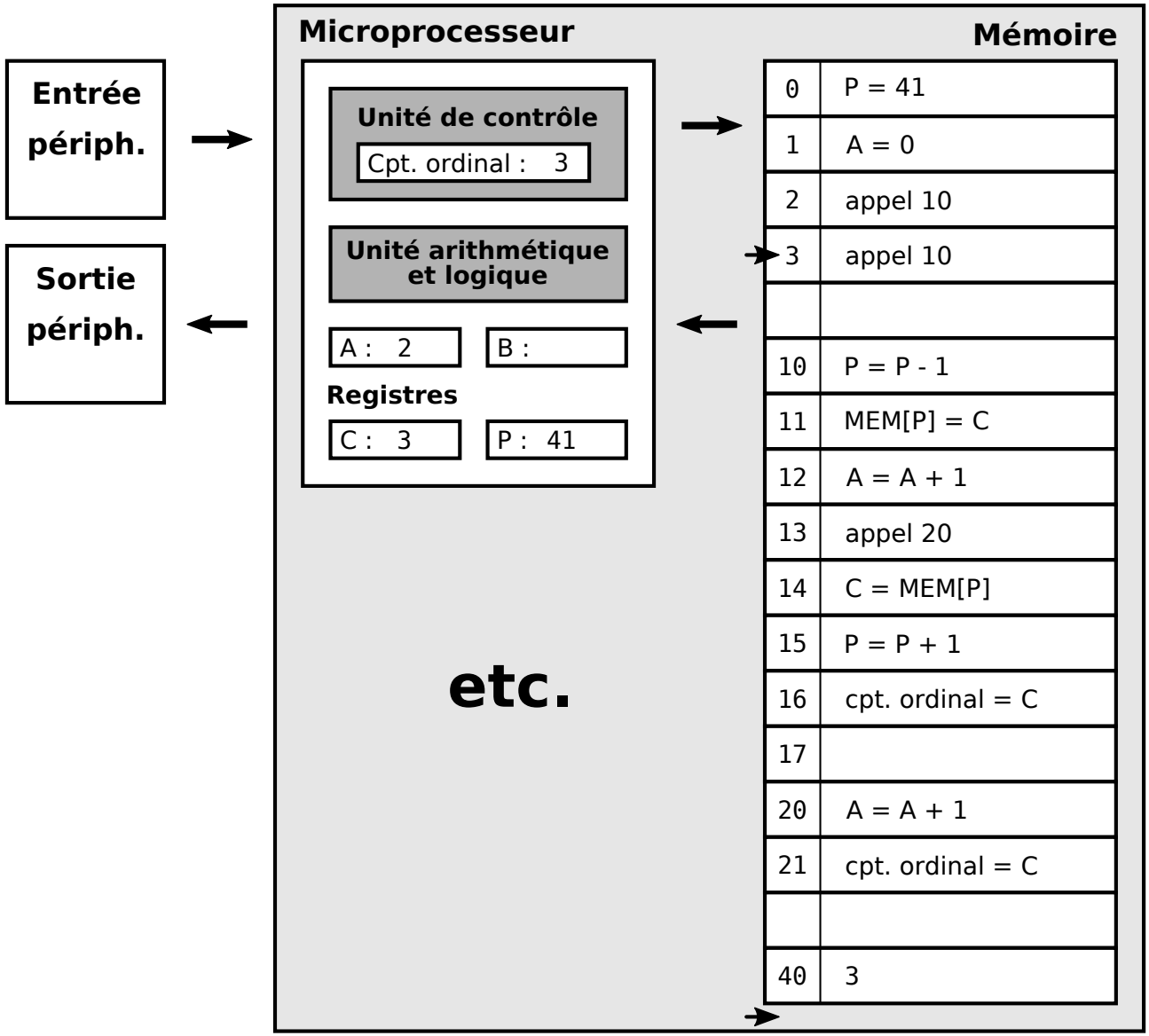
Support des procédures : exécution



Support des procédures : exécution



Support des procédures : exécution



Structure d'une instruction 1/2

Les programmes sont stockés en mémoire. Quelle est la structure d'une instruction ?

Champs usuels

Code op.	Operandes

- Un code d'opération $\simeq$ l'opération à exécuter
  Peut spécifier la taille des opérandes
  Exemple : addition, appel, cpt. ord =, etc.
- Des opérandes $\simeq$ les paramètres de l'instruction Exemple : adresse absolue, registre, etc.

Taille d'une instruction

- Jeu d'instruction à taille fixe
  Exemple : ARM, MIPS
- Jeu d'instruction à taille variable
  Exemple : Intel x86

Structure d'une instruction 2/2

Sémantique et structure d'une opérande

- Généralement interprétés en fonction du code opération
- Identifiant de registre
  Exemple : `0` = A, `1` = B, etc.
- Valeur immédiate
  Exemple : A = 4
- Adresse
  Exemple : appel 20

Classification des processeurs

- *Reduced Instruction Set Computer* (RISC) : ARM Thumb, MIPS
  Peu d'instructions, faible emprunte silicium.
- *Complex Instruction Set Computer* (CISC) : Intel X86, ARMv8
  Instructions complexes simplifiantes. Énorme emprunte silicium.

Jeu d'instruction d'un processeur généraliste 1/2

Dumb16 : processeur `16-bit` généraliste MIPS, jeu d'instruction de taille fixe : `32-bit` [REF]. UAL sans drapeaux.

Op. Code	Mnémonique	Description
0x1	add	r1 = r2 + r3
0x2	sub	r1 = r2 − r3
0x3	shl	r1 = r2 << r3
0x4	shr	r1 = r2 >> r3
0x5	or	r1 = r2 or r3
0x6	and	r1 = r2 and r3
0x7	equ	r1 = r2 == r3
0x8	lte	r1 = r2 ≤ r3
0x9	gte	r1 = r2 ≥ r3
0xd0	afc	r1 = valeur immédiate
0xd1	cop	r1 = r2
0xe1	lod	r1 = MEM[adresse]
0xe2	str	MEM[adresse] = r1
0xe3	lop	r1 = MEM[r2]
0xe4	stp	MEM[r1] = r2
0xf1	jmp	cpt. ordinal = adresse
0xf2	jmz	cpt. ordinal = adresse ssi r0 == 0
0xf1	jmp	cpt. ordinal = MEM[adresse]

Jeu d'instruction d'un processeur généraliste 2/2

Structure des instructions :

0 7	8 15	16 23	24 31
Ignoré		Opé. 1	Code op.
Ignoré	Opé. 2	Opé. 1	Code op.
Opé. 3	Opé. 2	Opé. 1	Code op.
Valeur immédiate		Opé. 1	Code op.
adresse		Opé. 1	Code op.

Exemple : instruction `add` :
`r1` = `r2` + `r3`

Jeu d'instruction d'un processeur généraliste 2/2

Structure des instructions :

0 7	8 15	16 23	24 31
Ignoré		Opé. 1	Code op.
Ignoré	Opé. 2	Opé. 1	Code op.
Opé. 3	Opé. 2	Opé. 1	Code op.
Valeur immédiate		Opé. 1	Code op.
adresse		Opé. 1	Code op.

Exemple : instruction `add` :
`r1` = `r2` + `r3`

0 7	8 15	16 23	24 31
ope. 2	**ope. 1**	**ope. 0**	**code op.**
0x3	**0x02**	**0x01**	**0x01**
r3	r2	r1	add

Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 1/3

FAC : processeur `64-bit` spécialisé dans le *pattern matching*, jeu d'instruction de taille variable [REF]. UAL sans drapeaux.

Op. Code	Mnémonique	Description
0x1	mask	Jump if mask not verified
0x2	equ	Jump if not equal
0x3	inf	Jump if not lower
0x4	add	Add two registers
0x5	xor	Xor two registers
0x6	hamm	Hamming distance
0xc	int	Interruption
0xd	mload	Memory load
0xe	load	Immediate load
0xf	jmp	Jump

Instruction `mask`

`mask`	`r_val`	`r_m0`	`r_m1`	`r_adr`

Saute à l'adresse stockée dans le registre `r_adr` ssi les masques des registres `r_m0` et `r_m1` ne s'appliquent pas à `r_val`

Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 2/3

Format des instructions

0		7	8	15	16	23	24	31	32	39
Code Op.										
Taille oper.	Sous op.	Op.	Opér. 1							
Taille oper.	Sous op.	Op.	Opér. 1		Opér. 2					
Taille oper.	Sous op.	Op.	Opér. 1		Opér. 2		Opér. 3			
Taille oper.	Sous op.	Op.	Opér. 1		Opér. 2		Opér. 3		Opér. 4	
`0x0`	Sous op.	Op.	Valeur							
`0x1`	Sous op.	Op.	Valeur							
`0x2`	Sous op.	Op.	Valeur							
`0x3`	Sous op.	Op.	Valeur							

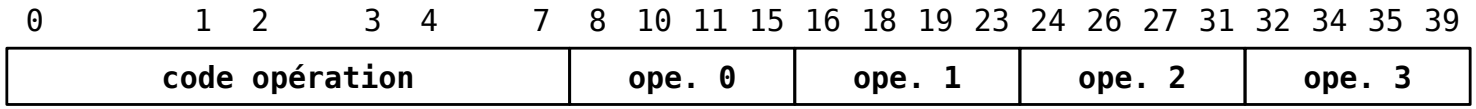
Format des opérandes d'une instruction

0	7
Opérande	

0	2	3	7
Sélecteur		Registre	

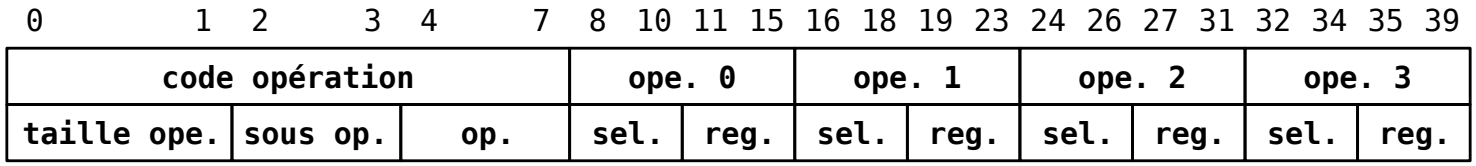
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



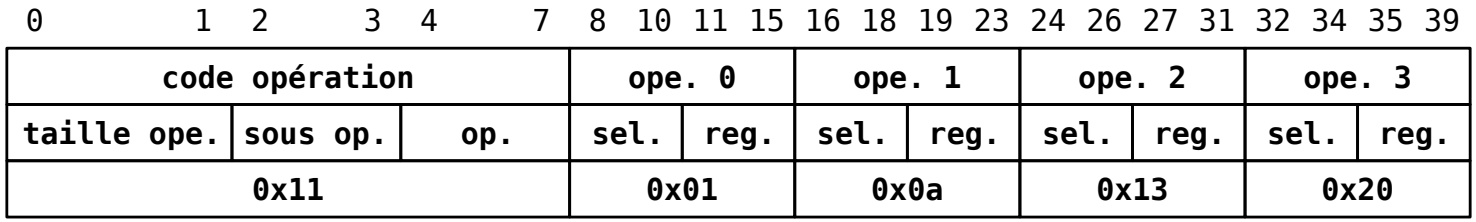
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



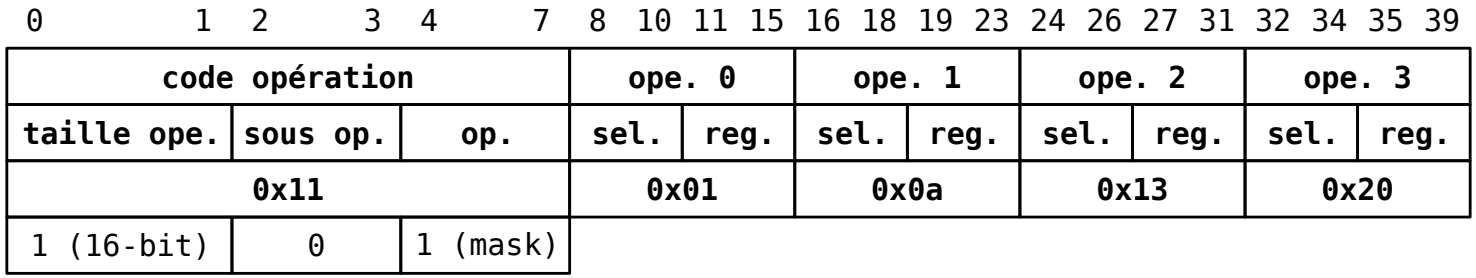
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



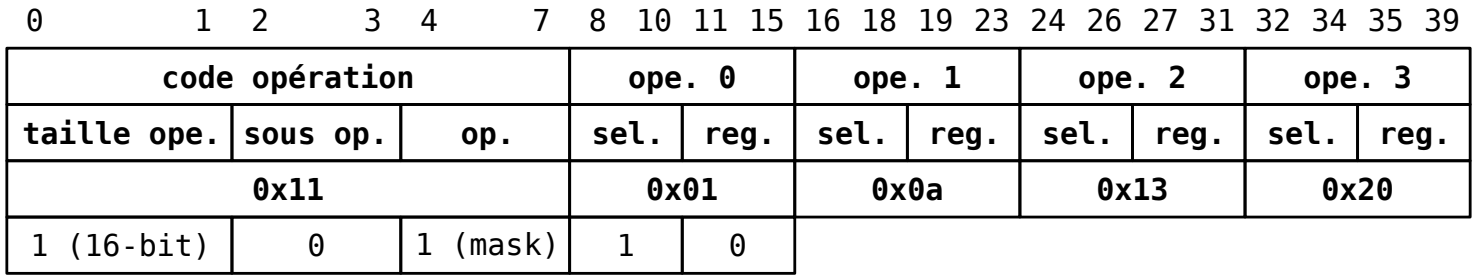
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



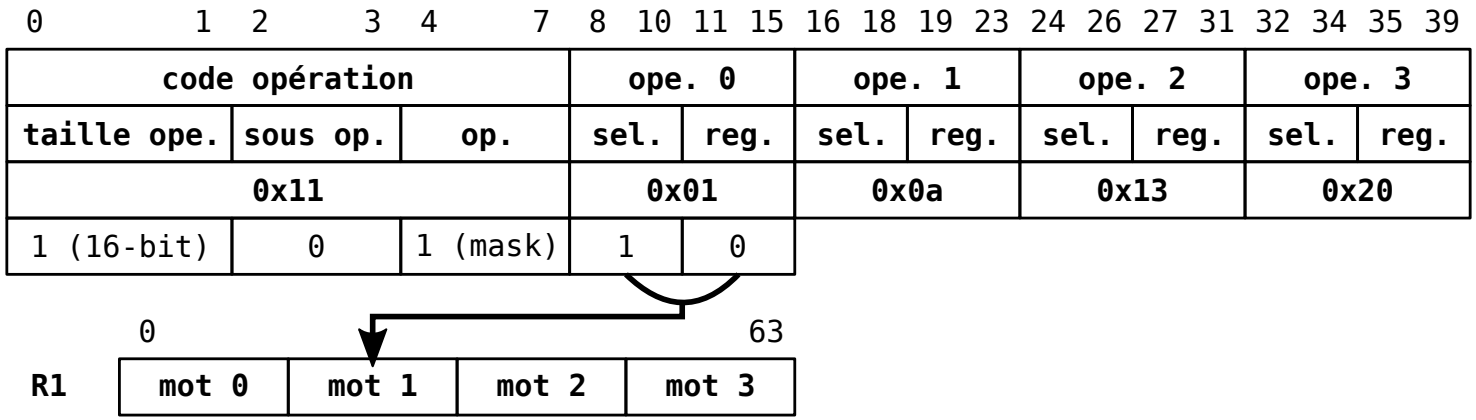
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



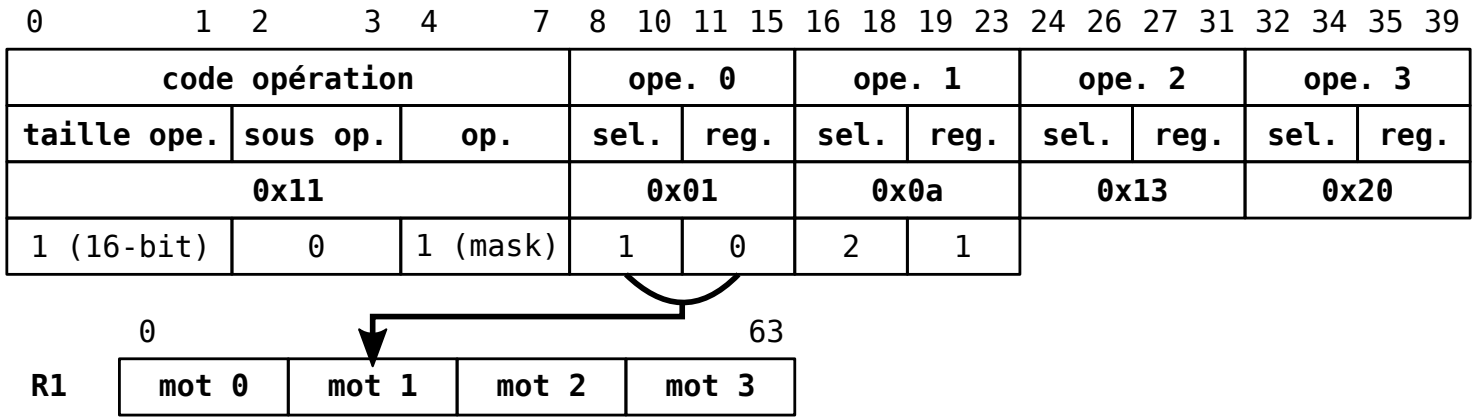
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



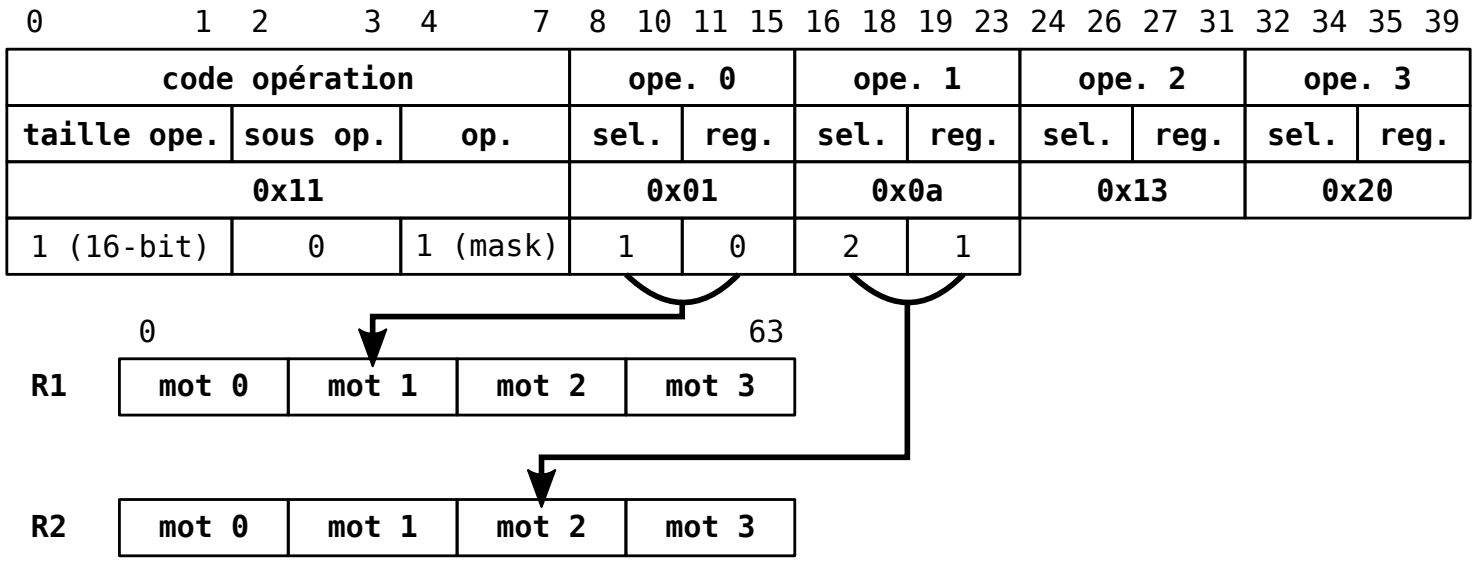
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



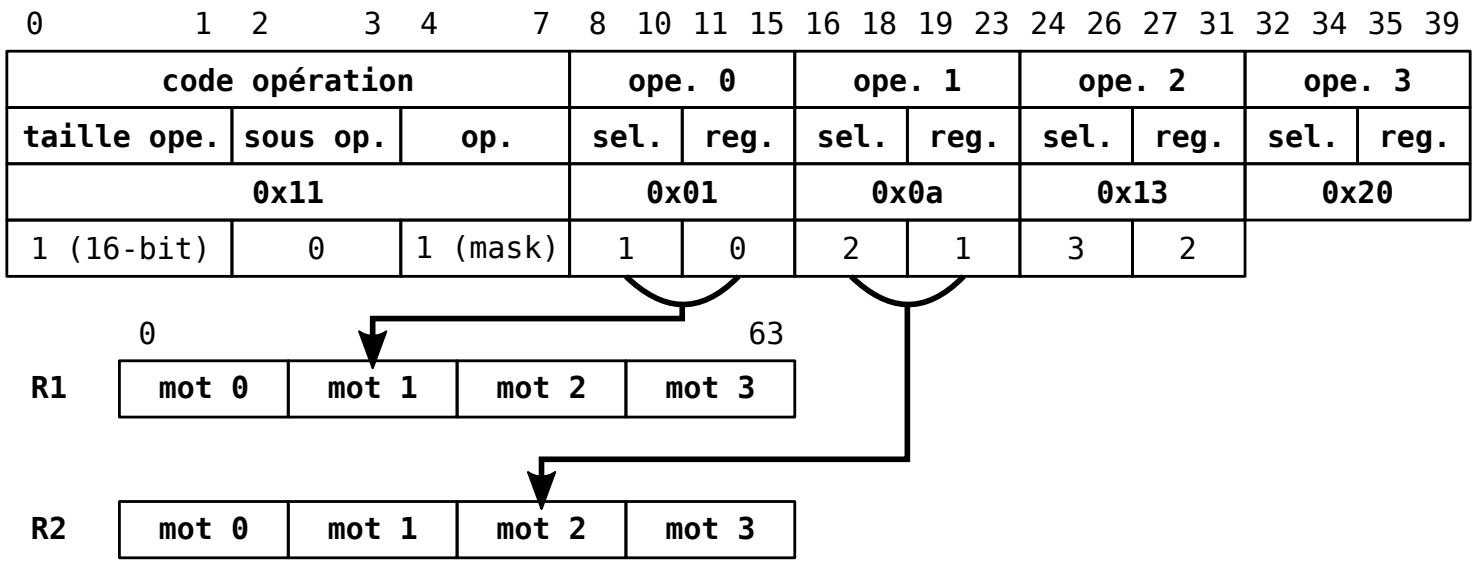
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



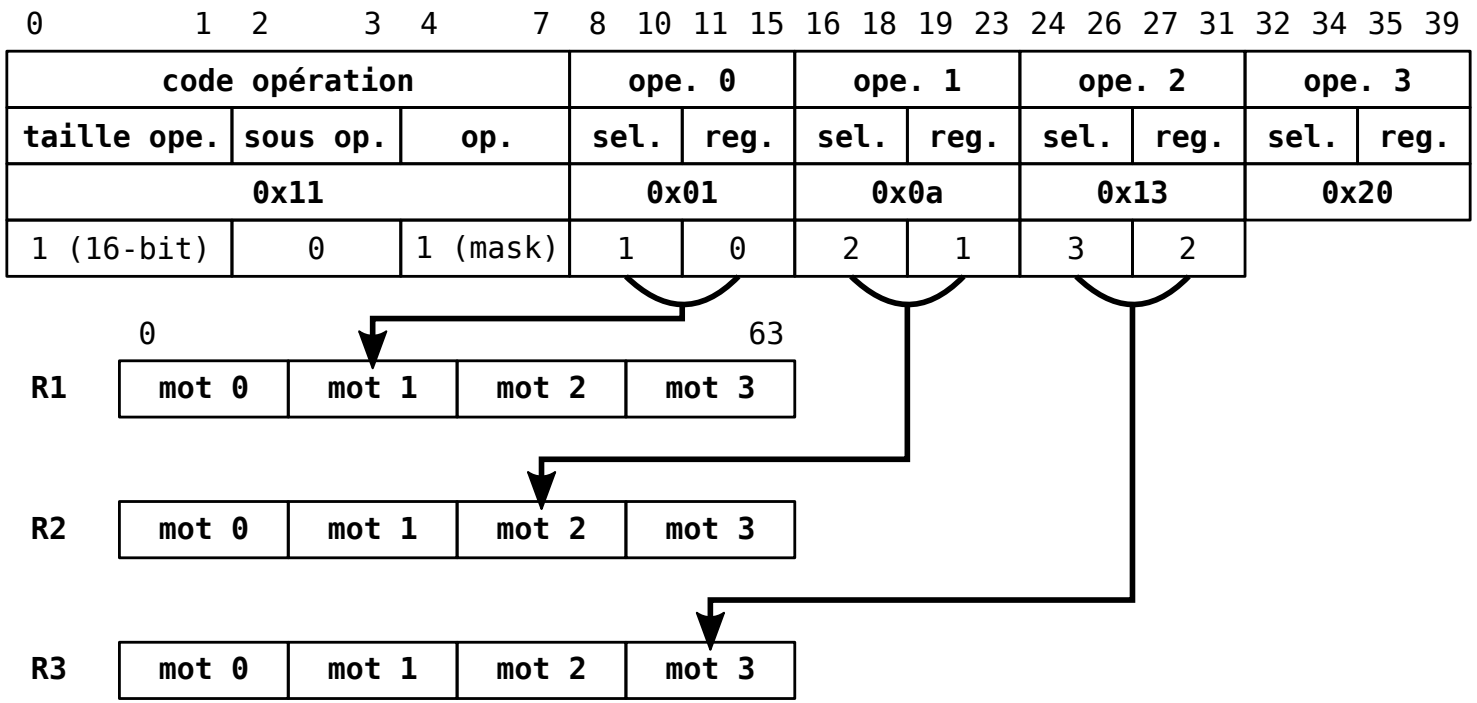
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



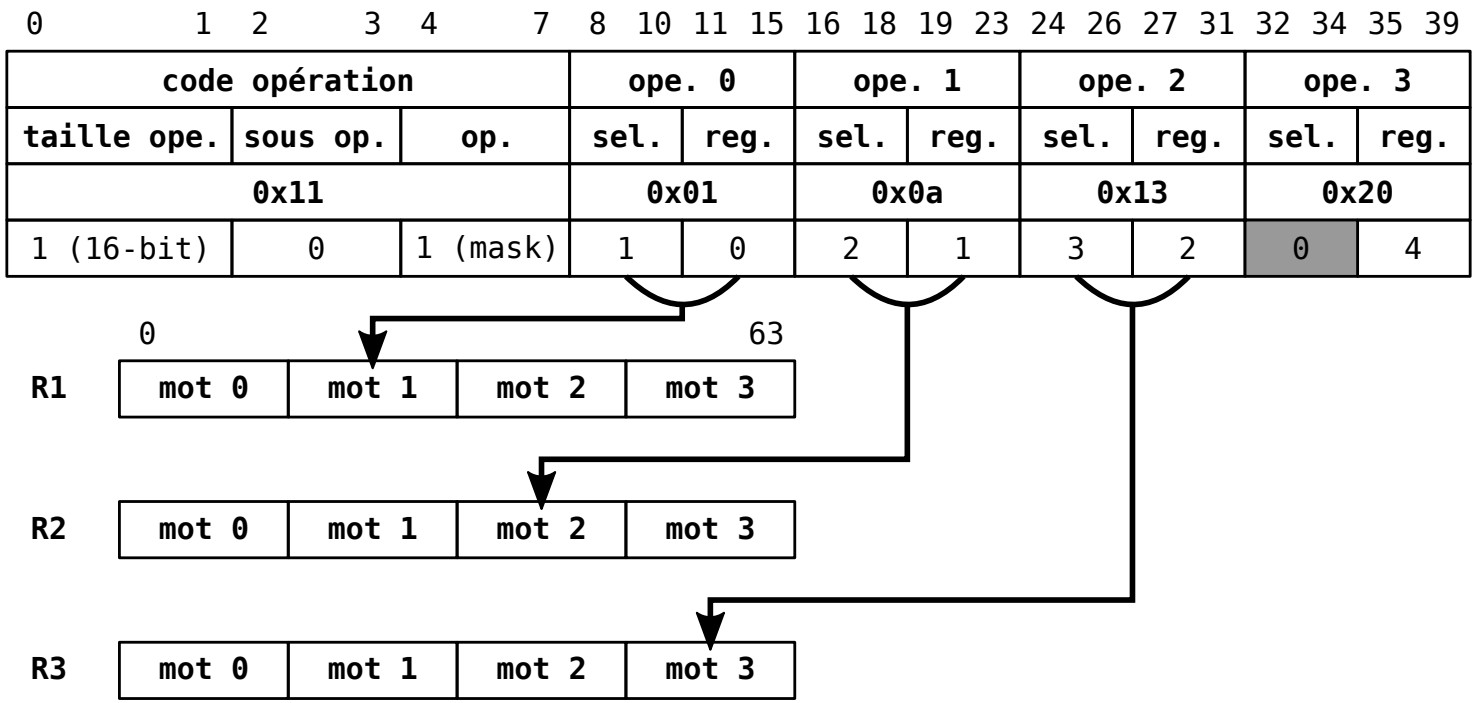
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



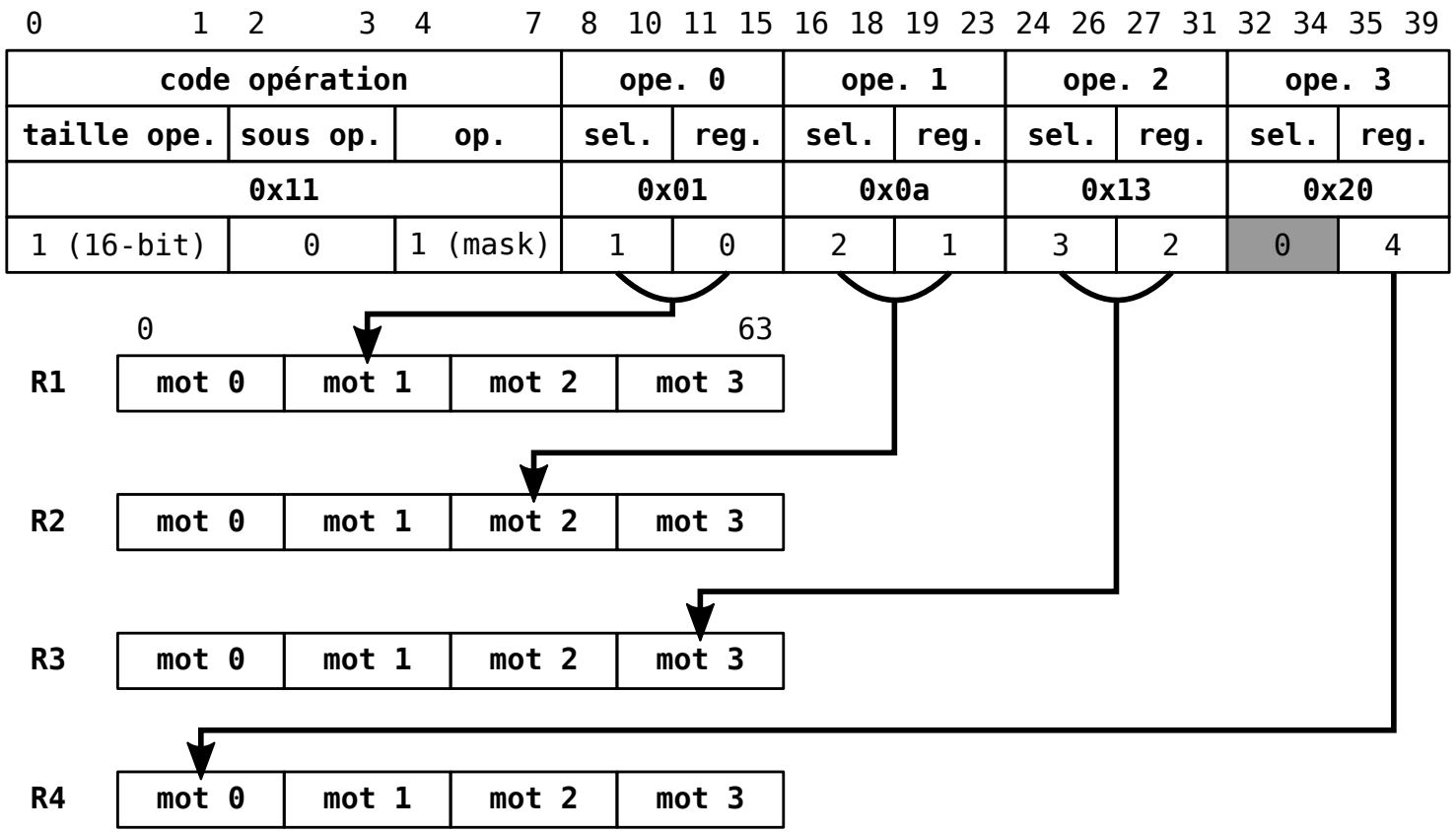
Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



Jeux d'instruction d'un processeur spécialisé 3/3

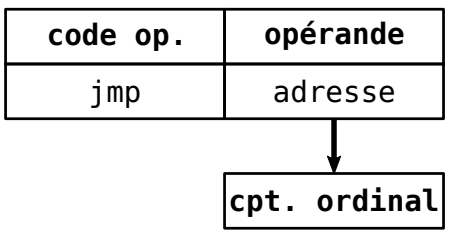
Exemple : instruction mask avec des opérandes de 16-bit : sauter à `r4[15:0]` si `r1[47:32]` (0 autorisés) et `r2[63:48]` (1 autorisés) ne s'appliquent pas sur la valeur `r0[31:16]`.



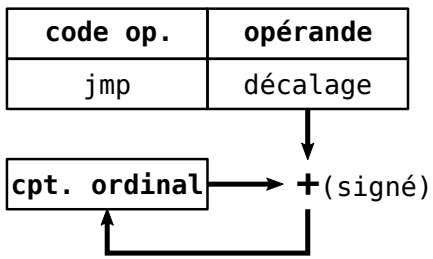
Modes d'adressage des branchements

Branchement ⇔ saut ⇔ mise à jour du compteur ordinal avec une **adresse** contrôlée par le programme.

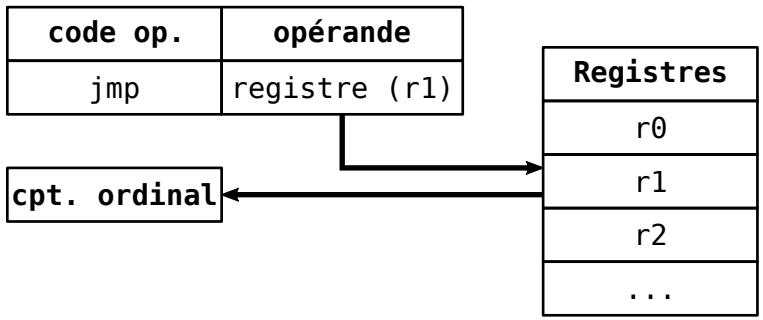
Modes d'adressage



Adressage absolu



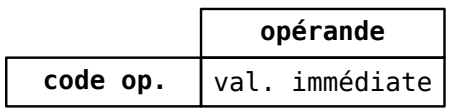
Adressage relatif



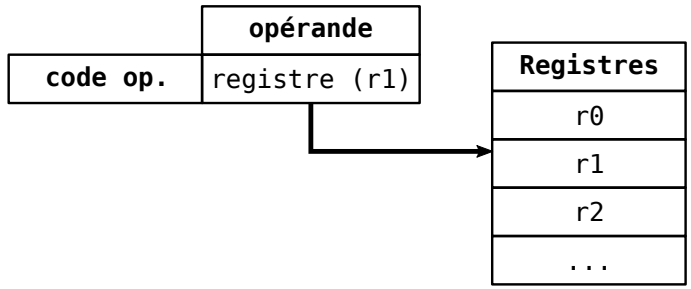
Adressage indirect

Modes d'adressage des données

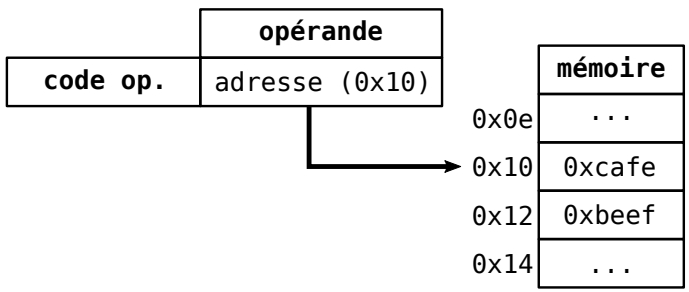
Comment est-ce que les données sont adressées par le processeur ?
Quelques modes typiques :



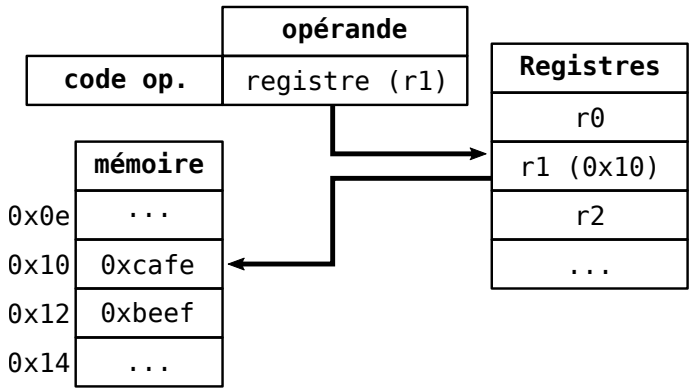
Adressage immédiat



Adressage registre

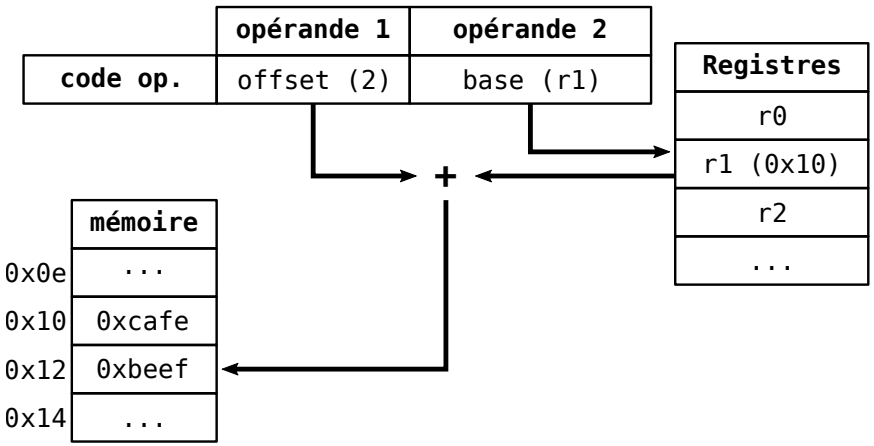


Adressage absolu

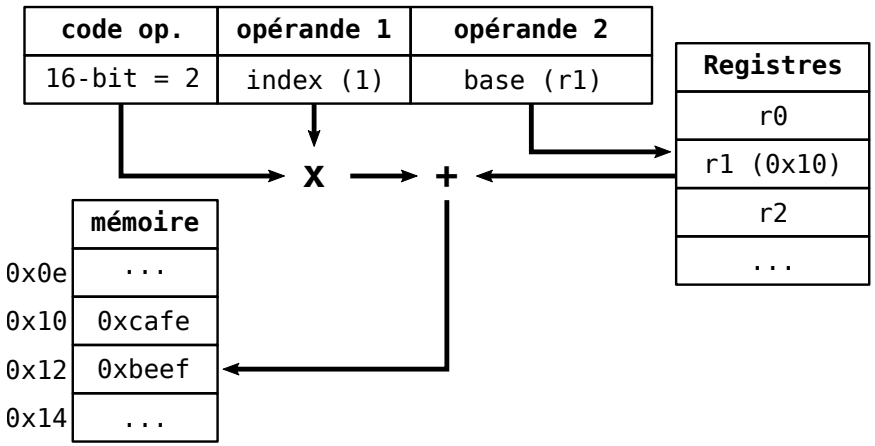


Adressage indirect registre

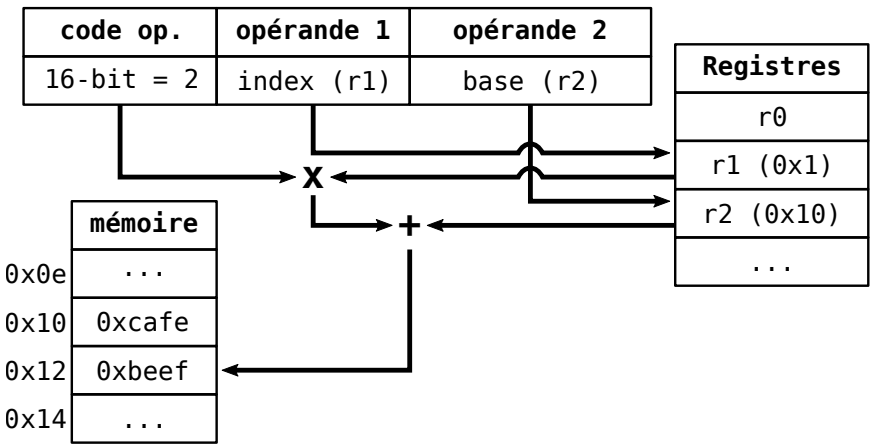
Modes d'adressage des données



Adressage base + décalage



Adressage base + index absolu



Adressage base + index

Plan du cours

Généralités et culture générale

Architecture du processeur

- Processeur à jeu d'instructions étendu (CISC)
- Dépend du mode d'exécution
- Microcodé : correction de bugs (et vulnérabilités)
- 3 niveau de caches (dernier niveau partagé)
- Interconnexion PCI Express

Stratégie de rétrocompatibilité

- Support de modes historiques (8086)
  - Démarrage en mode historique
  - Configuration pas à pas des modes modernes
- *Real mode* (16-bit) ; *protected mode* (32-bit) ; *IA32e mode* (64-bit)

$\Rightarrow$ processeur très complexe, difficile d'obtenir des propriétés de sécurité

Architecture

Registres

- Pointeur d'instruction : `ip`
- Généraux : `a`, `b`, `c`, `d`, `r[8-15]` (IA32e, 64-bit)
- Tête de pile : `sp` ; base de pile : `bp`
- Index, copie mémoire : `si`, `di`
- Drapeaux d'état `[er]flags` : `c`, `z`, `o`, . . .

Architecture

- Unité aritmétique et logique (ALU) de 64-bit (8 à 64)
- Unités mémoire
  - octet (`b`) : 8-bit, `[abcd][lh]` (`l` poid faible et `h` poid fort)
  - mot (`w`) : 16-bit, `[abcd]x`, `sp`, `bp`, `di`, . . .
  - double mot (`l`) : 32-bit, `e[abcd]x`, `esp`, `ebp`, `edi`, . . .
  - quadruple mot (`q`) : 64-bit, `r[abcd]x`, `rsp`, `rbp`, `rdi`, . . .

Jeu d'instructions 1/4

Mémoire / registres

- `mov <src> <dst>` : accès direct à la mémoire, affectations
- `push <src>`, `pull <dst>` : gestion de la pile
- `movs` : copie directe mémoire (≈ `memcpy`, `@si++` vers `@di++`)
  `rep movsb`, execute `c` fois `movsb`

Arithmétique (mise à jour des drapeaux d'état)

- `and`, `or`, `xor` : opérateurs bit à bit
- `test <a> <b>` : `<a> and <b>` bit à bit
- `cmp <a> <b>` : `<a> - <b>`
- `add`, `mul`, `sub`, `div` : arithmétique, `<dst> = <src> op <dst>`
- `shl`, `shr` : décalage à gauche / droite, `<dst> = <dst> op <dec>`

Instructions système

- `syscall` : appel système

Jeu d'instructions 2/4

Adressage des accès mémoire

Adressage implicite

Exemple : `push`, `pop`, `movs`

- `push <src>` : mem[`--sp`] = `<src>`
- `pop <dst>` : `<dst>` = mem[`sp++`]

Adressage explicites

- adressage absolu
- adressage relatif
- adressage base + décalage
- PAS d'adressage base + index absolu
- adressage base + index

Jeu d'instructions 3/4

Instruction principale

- Sauts inconditionnels : `jmp`
- Saut conditionnels :
  `je` adresse si `[er]flags.z` = 1
  `jne` adresse si `[er]flags.z` = 0 ;

Adressage mémoire simple des branchements

- Relatif
- Branchement indirect
- Absolu (`ljmp`)

Branchements mémoire complexes (CISC)

`ip` = accès mémoire

- Adressage absolu
- Adressage indirect registre

Jeu d'instructions 4/4

Fonctions

Appel de fonction

- Instruction : `cal <adresse>`

1. Empile adresse de retour = `ip` + taille instruction
2. Saut inconditionnel à l'adresse de la fonction : ip = adresse fonction

Retour de fonction

- Instruction : `ret`

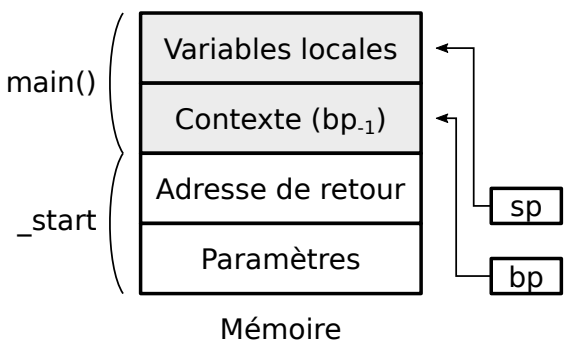
1. Saut inconditionnel à l'adresse de retour : `ip` = mem[`sp`]
2. Depile l'adresse de retour : `sp` = `sp` + taille adresse

Support des contextes de fonction 1/2

Stack frame

- Délimitation de l'espace mémoire d'une fonction
- De la base de pile : `bp`, à la tête de pile : `sp`

$\Rightarrow$ Adressage simplifié des variables locales : `bp` constant

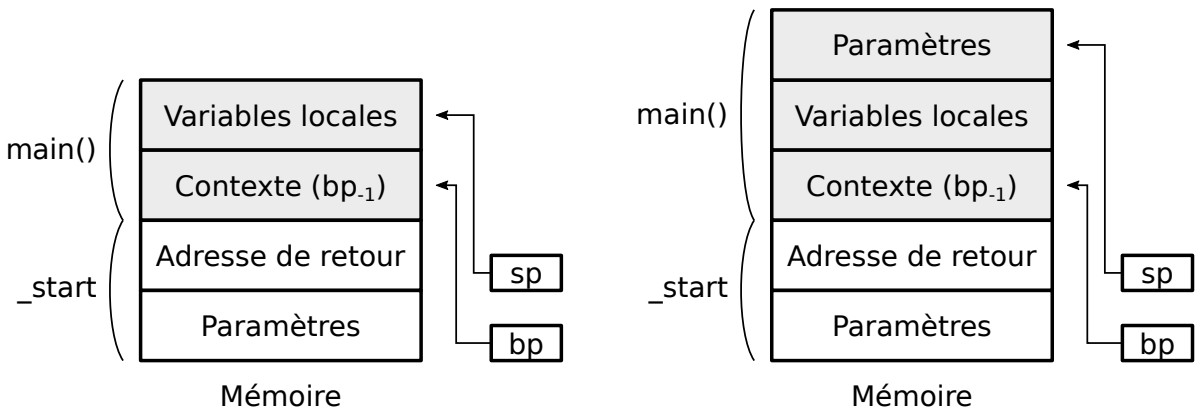


Support des contextes de fonction 1/2

Stack frame

- Délimitation de l'espace mémoire d'une fonction
- De la base de pile : `bp`, à la tête de pile : `sp`

⇒ Adressage simplifié des variables locales : `bp` constant

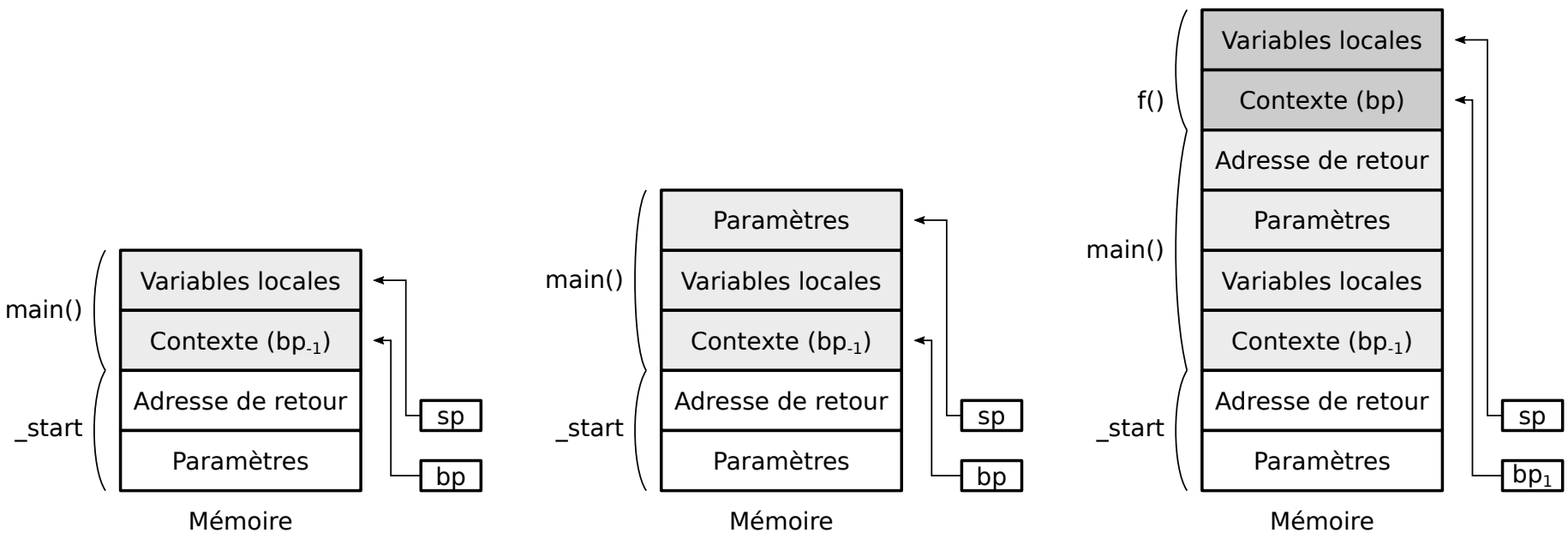


Support des contextes de fonction 1/2

Stack frame

- Délimitation de l'espace mémoire d'une fonction
- De la base de pile : `bp`, à la tête de pile : `sp`

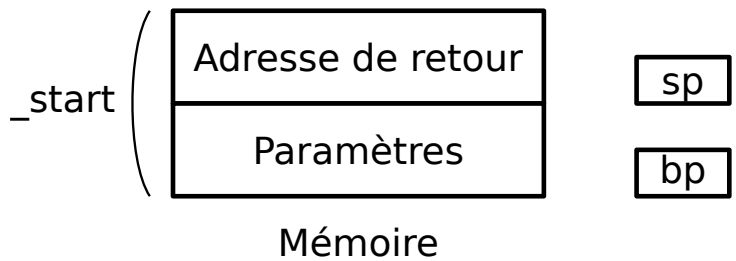
⇒ Adressage simplifié des variables locales : `bp` constant



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

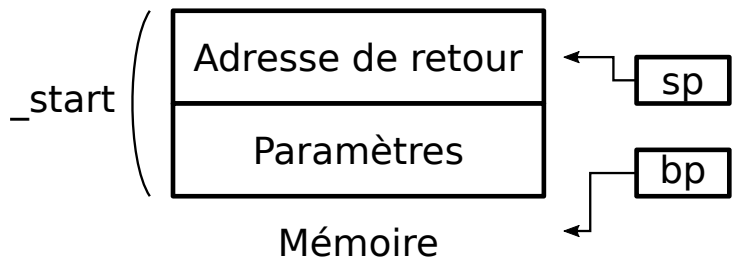
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

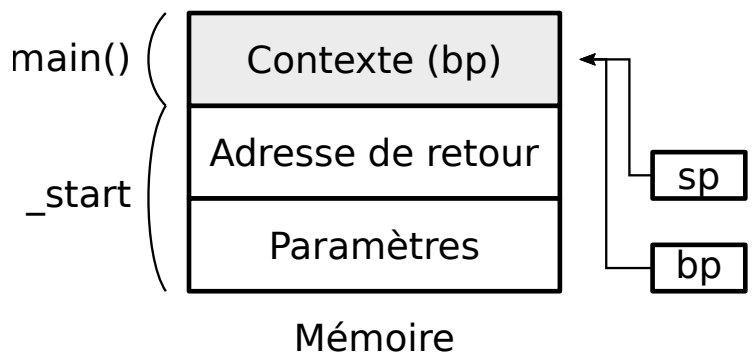
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

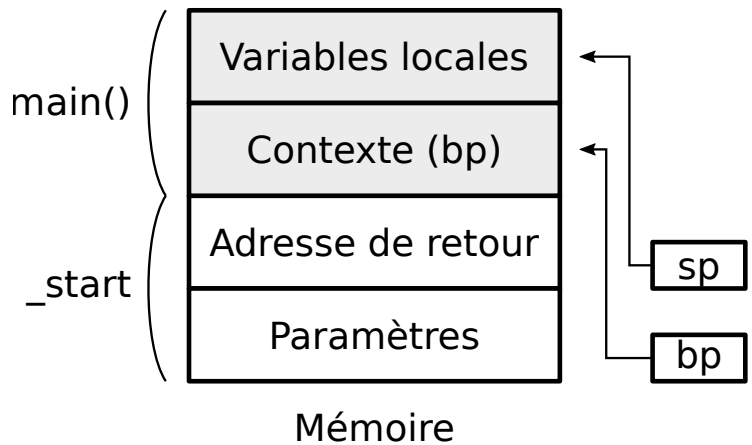
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

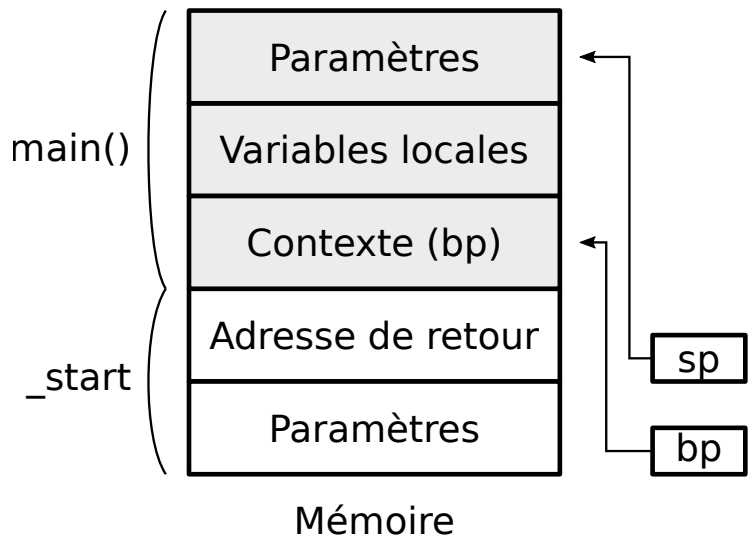
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

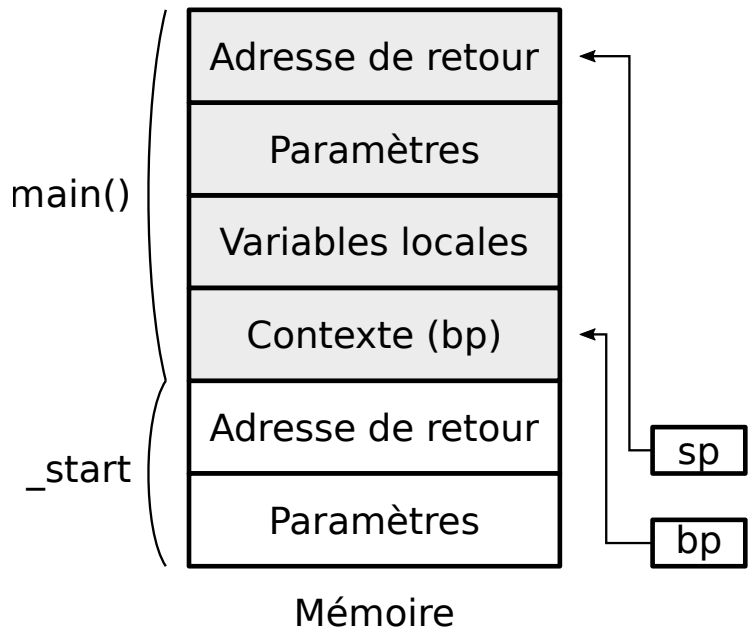
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

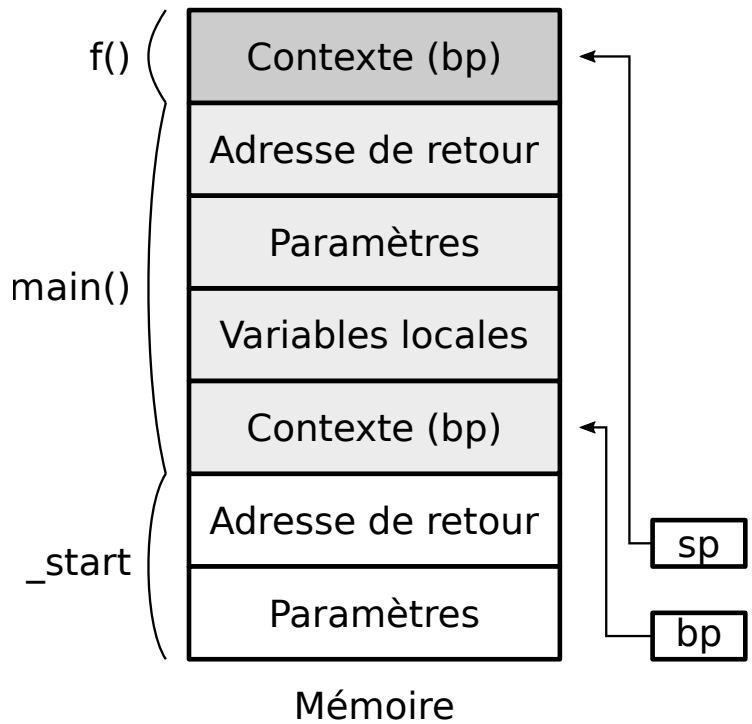
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

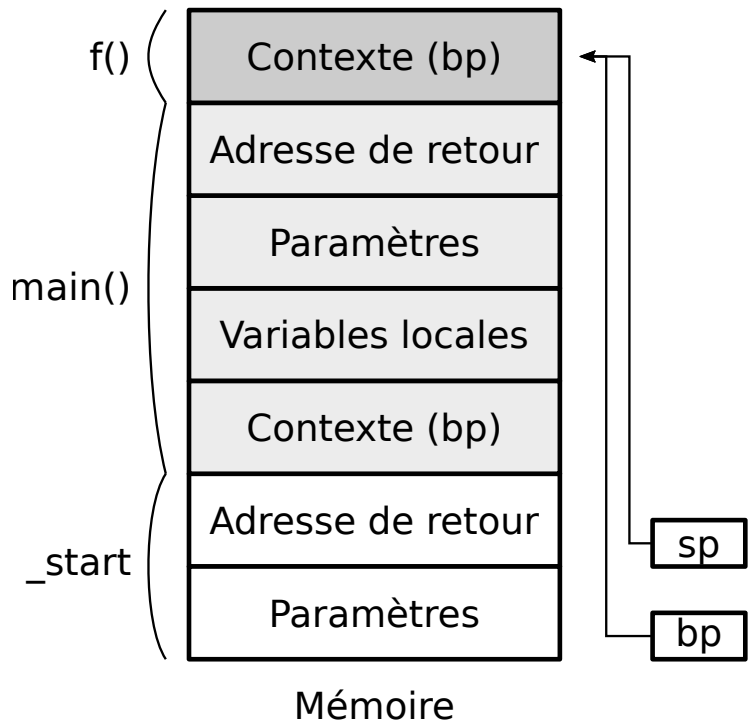
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

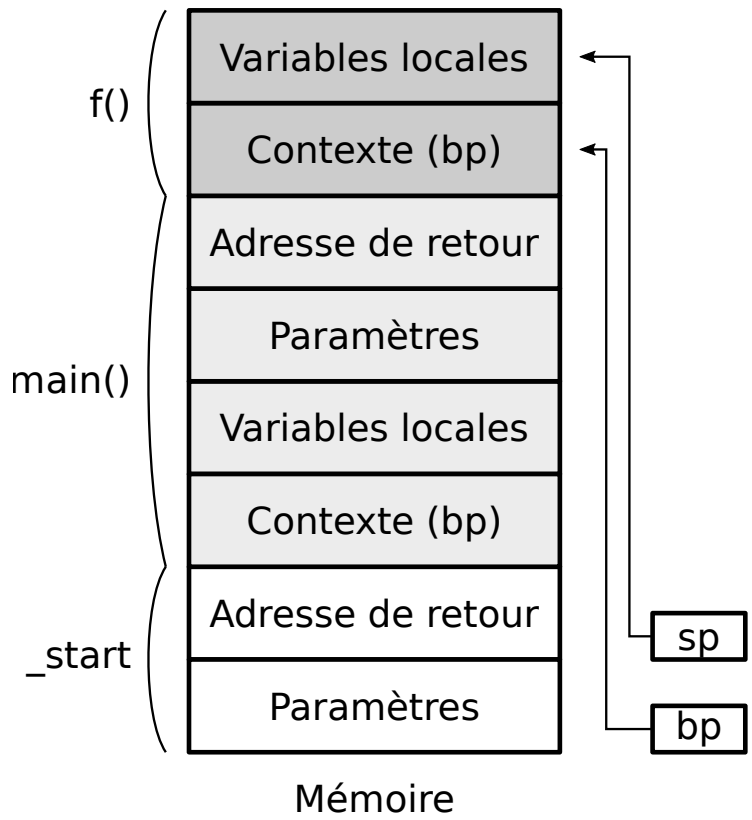
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

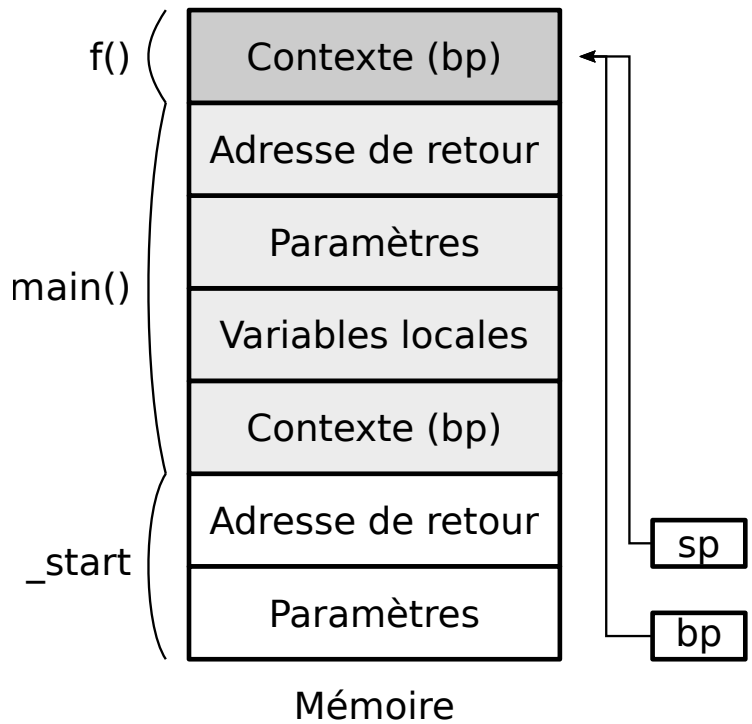
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

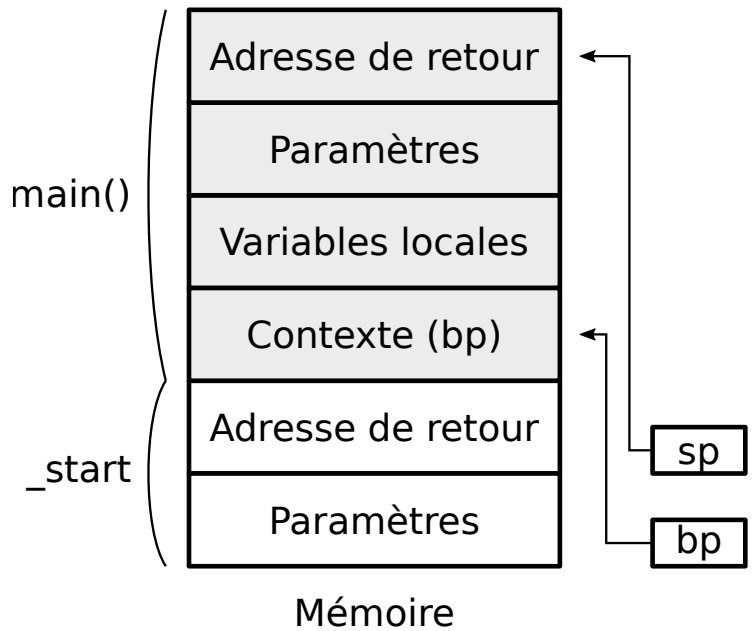
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

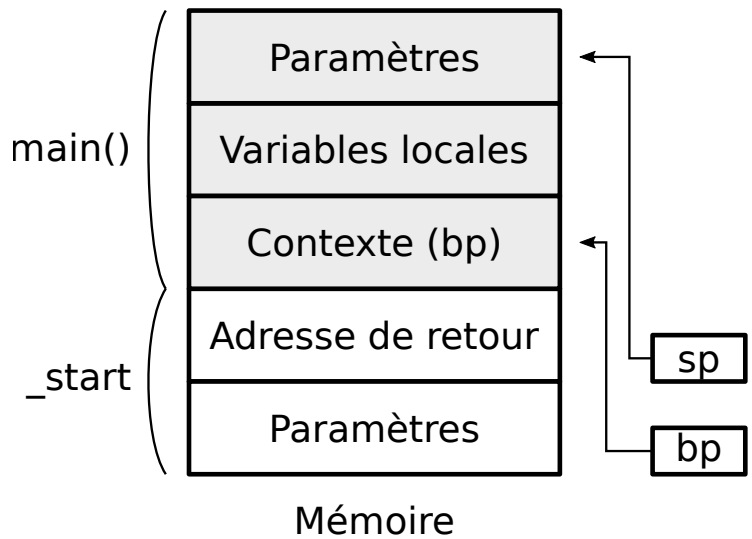
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

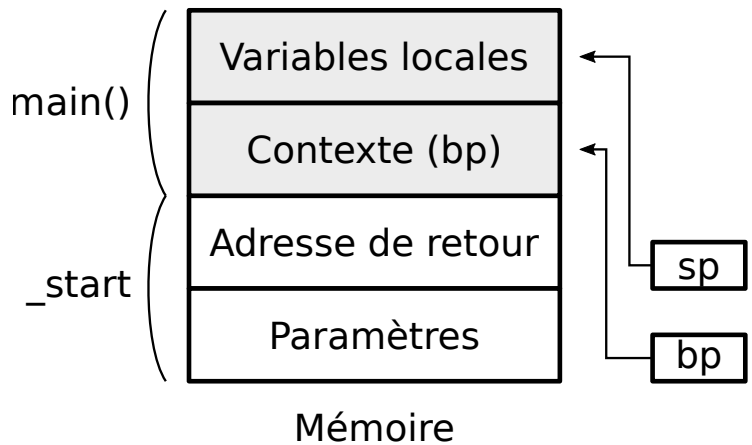
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

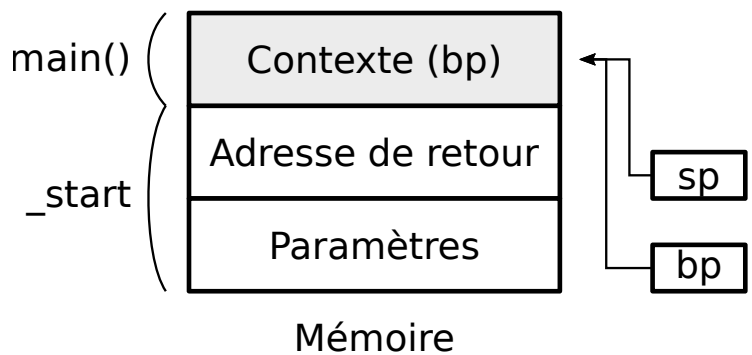
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

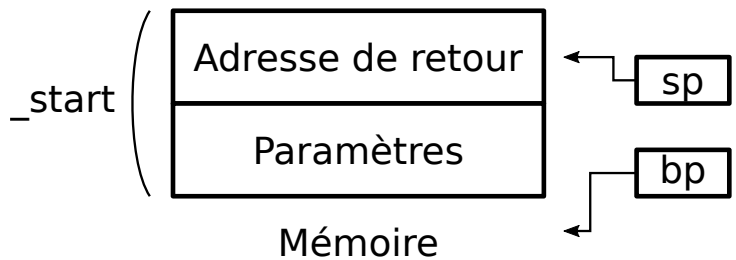
- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Support des contextes de fonction 2/2

Gestion du contexte par une fonction

- En début de fonction
  1. Sauvegarde de la base de pile
     `push bp`
  2. Base de pile = tête de pile
     `bp = sp` (`mov`)
  3. Allocation des variable locales
     `sp = sp - <taille>` (`sub`)
- En fin de fonction
  1. Liberation des variable locales
     `sp = sp + <taille>` (`add`)
  2. Resturation du contexte :
     `sp` = `bp` et `pop bp`
     Instruction `leave`



Isolation sur x86

Apportée par le 80286 (pas de sécurité système sur le 8086)

Niveaux de privilèges

- Apportés par la *protected mode*.
  Configuration : `cs[1:0]`
- Appelés anneaux (*rings*) : 0 (mode noyau) à 3 (mode utilisateur)
- **Concept basique** : certaines instructions ne sont exécutables qu'en *ring* 0

Virtualisation de la mémoire

- Mise en place par le noyau
- Gestion des accès mémoire (RWX)
- **Concept basique** : traduction d'adresses virtuelles en adresses physiques

Plan du cours

Les langages d'assemblage 1/2

Présentation

- Proche du matériel
- Une instruction par ligne
- Souvent un langages rationnel (théorie des langages)

Avantages

- Représentation textuelle des programmes

⇒ Lisible par l'humain

- Abstraction de l'encodage des instructions et des opérandes
- Test de cohérence des opérandes avec une instruction
- Supporte généralement une famille de processeur

⇒ meilleure portabilité des programmes

- Adressage des instructions, des données (symboles)
- Accessibilité des instructions (système, optimisation, etc.)

Les langages d'assemblage 2/2

Incovénients

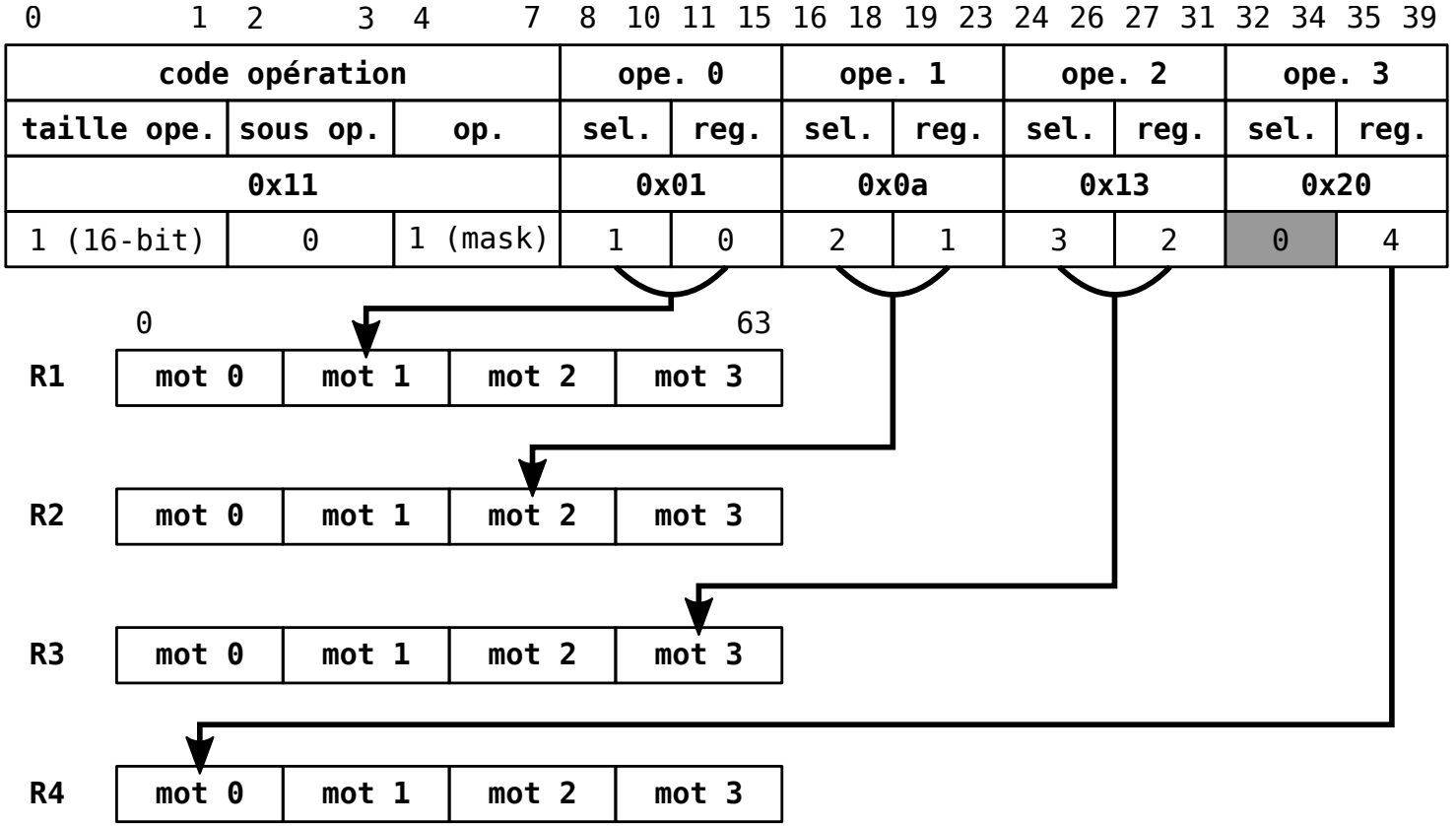
- Pas de prototypes de fonctions (API)
- Pas de gestion de l'interface de programmation binaire (ABI)
- Pas de structures de données
- Portabilité limitée du code
- Pas de support des expressions arithmétiques

Structure classique d'un programme assembleur

```
code:
  ins1
  ins2 op1 op2 op3
  saut code_3

code_2:
  ins3 op1

code_3:
  ins4 donnees op1
  saut code

donnees:
  0xcafebeef
  0xbeeeeeef
```

Symboles définis : `code`, `code_2`, `code_3`, `donnees`

Assembleur d'un processeur spécialisé 1/2




```
maskw r0_1, r1_2, r2_3, r4_0
maskw r0_1, r1_2, r2_3, r4
```

Détection des erreurs :

```
maskw r0_1, r1_2, r2_7, r4_0
[ERROR]sources/mpu_lib/mpu_lib.c:211: Selector out of bounds
```

Assembleur d'un processeur spécialisé 2/2

L'opérande de destination ou le saut sont les plus a droite.

```
  loadd r31, $0x10 // max
  loadb r30, $0x1 // Increment
  loadb r29, $0x0 // cpt
  loadb r20, $0x0 // End of execution
  loadw r2, $for
  loadw r3, $for_end
for:
  // for (i = 0; i < 0x10; i++)
  infd r29, r31, r3
  addd r29, r30, r29
  jmpw r2
for_end:
  // for end
  intq r29
  intq r20
```

Plan du cours

Assembleur GNU

- Assembleur du projet GCC (`as`)
- Supporte une multitude d'architectures
  Intel x86, ARMv8, RISCV, etc.
- Logiciel libre avec grand communauté
- Utilisé dans le code source de linux et de GNU

```
  .global _start                  # Export du symbole
  .text                           # Section de code de l'exécutable

_start:                           # Définition du point d'entrée
  # write(1, message, 13)
  mov     $1, %rax                # Write est l'appel 1
  mov     $1, %rdi                # STDOUTFILENO est 1
  mov     $message, %rsi          # On affecte l'adresse de la chaîne
  mov     $13, %rdx               # Le nombre de caractères à écrire
  syscall                         # Appel systeme !

  jmp exit                        # Fin du programme

message:
  .ascii  "Hello, world\n"
```

Syntaxe générale

Étiquette : symbole associé à une adresse

`<symbole>:`

Exemple :

`_start:`

Directive assembleur : intéraction avec l'assembleur

```
.<directive> <param1> <param2> ...
```

Exemple :

```
.global _start
```

Instruction

L'operande de destination est à droite

```
<instruction> <op1>, ... (<dst>)
```

Exemple :

```
add %rax, %rbx # rbx = rbx - rax
```

Syntaxe des opérandes

Registres

Préfixés avec un %

%<reg>

Exemple :

```
add %al, %ah # ah = al + ah
```

Valeur immédiate

Préfixée avec un dollar

$<nombre>

$<etiquette>

$'<char>'

Exemple :

```
movw $0xcafe, %ax # ax = 0xcafe
```

Taille des opérandes

Nom de registre

Le nom du registre détermine la taille sous Intel x86

`%al, %ah` → `8-bit`

`%ax` → `16-bit`

`%eax` → `32-bit`

`%rax` → `64-bit`

Suffixe d'instruction

Permet de traiter des cas où l'on ne peut pas déterminer la taille

`movb` → `8-bit`

`movw` → `16-bit`

`movd` → `32-bit`

`movq` → `64-bit`

Exemple :

```
pushd $0x0
```

Adressage des branchements 1/2

Adressage relatif

```
jmp _start      # ip = ip + décalage
```

décalage = `ip - _start`, calculé à la compilation

```
jmp 0x1234      # ip = ip + 0x1234
```

Branchement indirect

```
jmp *%rax       # ip = %rax
```

Branchement avec accès mémoire absolu

```
jmp *0x1234     # ip = MEM[0x1234]
jmp *pointeur   # ip = MEM[pointeur]
```

Branchement avec accès mémoire indirect

```
jmp *(%rax)     # ip = MEM[rax]
```

Adressage des branchements 2/2

DEMO TIME : `lst/hello-world`

Adressage des données 1/2

Adressage absolu

```
mov pointeur, %rax          # rax = MEM[pointeur]
```

Adressage indirect registre

```
mov (%rax), %rax            # rax = MEM[rax]
```

Adressage base + décalage

```
movw 1(%rax), %ax           # rax = MEM[rax]
```

Adressage base + index

```
mov $2, %rbx
mov (%rax, %rbx, 2), %ax    # rax = MEM[rax + rbx × 2]
```

Adressage base + index + décalage

```
mov $2, %rbx
mov 2(%rax, %rbx, 2), %ax # rax = MEM[rax + 2 + rbx × 2]
```

Adressage des données 2/2

DEMO TIME : `lst/hello-world`

Interface de programmation ou API

Application Programming Interface

- Concept générique d'interface
- Niveau sémantiques $\neq$
- *Restful API HTTP*
- Prototypes C, classes C++, etc.

```
int execve(const char *pathname, char *const argv[],
    char *const envp[]);
```

Type d'une fonction
Visible et manipulée par le développeur

VS Interface de programmation binaire ou ABI

Application Binary Interface

- Mise en œuvre concrète d'interfaces, proche de la machine
- Allocation des arguments et des valeurs de retour
- `32-bit` : GCC `cdecl`
  Arguments adressés de droite à gauche dans la pile
  Valeur de retour dans la pile
  Pile nettoyée par l'appelant
- `64-bit` : System V ABI ; Microsoft x64 calling convention
  Utilisation de registres dans un ordre donné
  puis de la pile en mode `cdecl` quand plus de place

Mise en œuvre par le compilateur

Exemple : System V ABI, x86 64-bit

Contrat d'interface appelant / appelé

- Les fonction sont appelées par `cal` et retournent à l'aide de `ret`
- La pile est alignée sur 16 octets avant d'appeler une fonction
- Les registres `rbx`, `rsp`, `rbp`, `r12`, `r13`, `r14`, et `r15` doivent être conservés par la fonction
- La pile descend. Les paramètres placés sur la pile peuvent être modifiés par la fonction appelée

Arg #	Emplacement
Retour	`rax` si `128-bit [127:64]` dans `rdx`
1	`rdi`
2	`rsi`
3	`rdx`
4	`rcx`
5	`r8`
6	`r9`
> 6	Placés dans la pile en sens inverse

Exemple : System V ABI, x86 64-bit

Fonctionnement de l'ABI exemple.

```
int test (          |  int main() {
    int a1,         |    test(
    int a2,         |        1,
    int a3,         |        2,
    int a4,         |        3,
    int a5,         |        4,
    int a6,         |        5,
    int a7,         |        6,
    int a8,         |        7,
    int a9,         |        8,
    int a10,        |        9,
    int a11,        |        10,
    int a12,        |        11,
    int a13,        |        12,
    int a14) {      |        13,
  return 0;         |        14);
}                   |    return 0;
                    |  }
```

```
$ gcc -O0 -o test test.c -g
```

Exemple : System V ABI, x86 64-bit

```
0x555555555119 <test>      push   %rbp
0x55555555511a <test+1>    mov    %rsp,%rbp
0x55555555511d <test+4>    mov    %edi,-0x4(%rbp)
0x555555555120 <test+7>    mov    %esi,-0x8(%rbp)
0x555555555123 <test+10>   mov    %edx,-0xc(%rbp)
0x555555555126 <test+13>   mov    %ecx,-0x10(%rbp)
0x555555555129 <test+16>   mov    %r8d,-0x14(%rbp)
0x55555555512d <test+20>   mov    %r9d,-0x18(%rbp)
0x555555555131 <test+24>   mov    $0x0,%eax
0x555555555136 <test+29>   pop    %rbp
0x555555555137 <test+30>   retq

0x555555555138 <main>      push   %rbp
0x555555555139 <main+1>    mov    %rsp,%rbp
0x55555555513c <main+4>    pushq  $0xe
0x55555555513e <main+6>    pushq  $0xd
0x555555555140 <main+8>    pushq  $0xc
0x555555555142 <main+10>   pushq  $0xb
0x555555555144 <main+12>   pushq  $0xa
0x555555555146 <main+14>   pushq  $0x9
0x555555555148 <main+16>   pushq  $0x8
0x55555555514a <main+18>   pushq  $0x7
0x55555555514c <main+20>   mov    $0x6,%r9d
0x555555555152 <main+26>   mov    $0x5,%r8d
0x555555555158 <main+32>   mov    $0x4,%ecx
0x55555555515d <main+37>   mov    $0x3,%edx
0x555555555162 <main+42>   mov    $0x2,%esi
0x555555555167 <main+47>   mov    $0x1,%edi
0x55555555516c <main+52>   callq  0x555555555119 <test>
0x555555555171 <main+57>   add    $0x40,%rsp
0x555555555175 <main+61>   mov    $0x0,%eax
0x55555555517a <main+66>   leaveq
0x55555555517b <main+67>   ret
```

Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 1/2

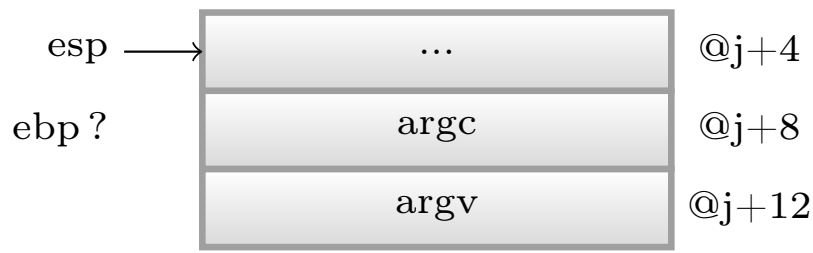
Exemple de programme C (`x86 32-bit`) (Éric Alata)

```
void f(int a, char* str) {
  char ch[8];
  int var;
}
void main(int argc, char** argv) {
  f(4, argv[1]);
}
```

Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

```
f :        08048cb0  push  %ebp
           08048cb1  mov   %esp,%ebp
           08048cb3  sub   $0x10,%esp
           08048cb6  leave
           08048cb7  ret
main : →   08048cb8  push  %ebp
           08048cb9  mov   %esp,%ebp
           08048cbb  sub   $0x8,%esp
           08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
           08048cc1  add   $0x4,%eax
           08048cc4  mov   (%eax),%eax
           08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
           08048cca  movl  $0x4,(%esp)
           08048cd1  call  8048cb0
           08048cd6  leave
           08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

```
f :      08048cb0  push  %ebp
         08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
         08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
      →  08048cb9  mov   %esp,%ebp
         08048cbb  sub   $0x8,%esp
         08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
         08048cc1  add   $0x4,%eax
         08048cc4  mov   (%eax),%eax
         08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
         08048cca  movl  $0x4,(%esp)
         08048cd1  call  8048cb0
         08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```

Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

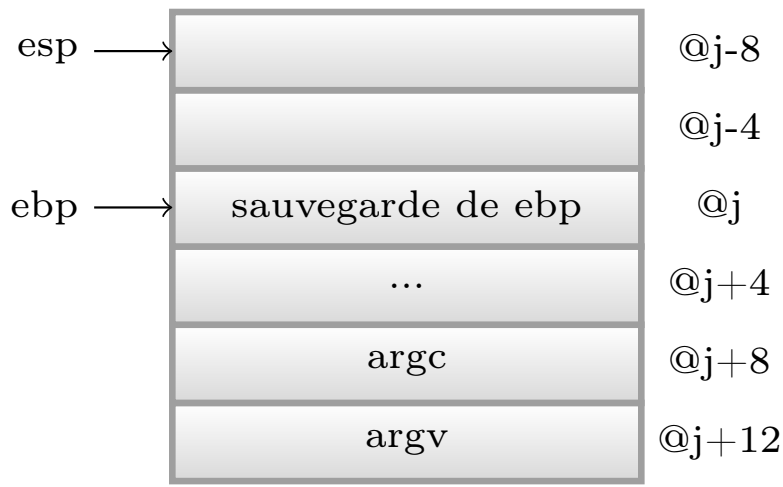
Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

```
f :      08048cb0  push  %ebp
         08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
         08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
         08048cb9  mov   %esp,%ebp
      →  08048cbb  sub   $0x8,%esp
         08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
         08048cc1  add   $0x4,%eax
         08048cc4  mov   (%eax),%eax
         08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
         08048cca  movl  $0x4,(%esp)
         08048cd1  call  8048cb0
         08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```

Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

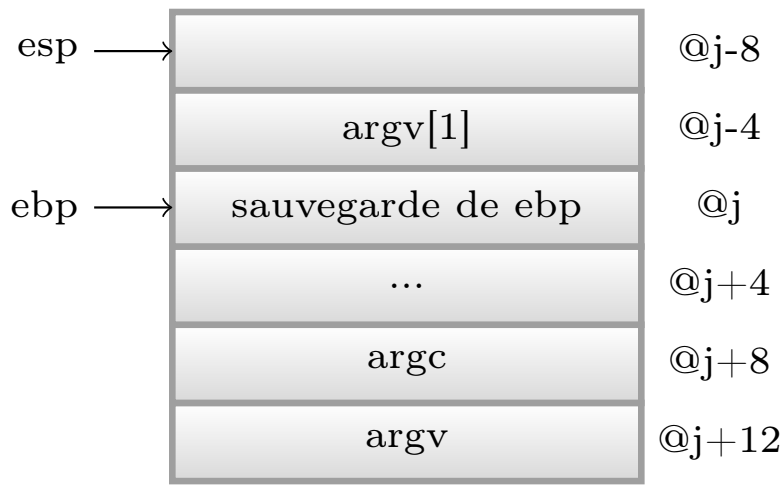
```
f :      08048cb0  push  %ebp
         08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
         08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
         08048cb9  mov   %esp,%ebp
         08048cbb  sub   $0x8,%esp
      →  08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
      →  08048cc1  add   $0x4,%eax
      →  08048cc4  mov   (%eax),%eax
      →  08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
         08048cca  movl  $0x4,(%esp)
         08048cd1  call  8048cb0
         08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

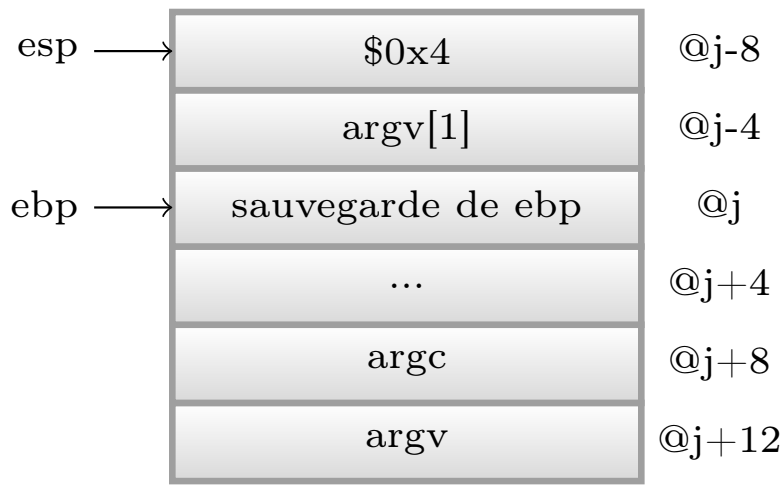
```
f :      08048cb0  push  %ebp
         08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
         08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
         08048cb9  mov   %esp,%ebp
         08048cbb  sub   $0x8,%esp
         08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
         08048cc1  add   $0x4,%eax
         08048cc4  mov   (%eax),%eax
         08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
      →  08048cca  movl  $0x4,(%esp)
         08048cd1  call  8048cb0
         08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

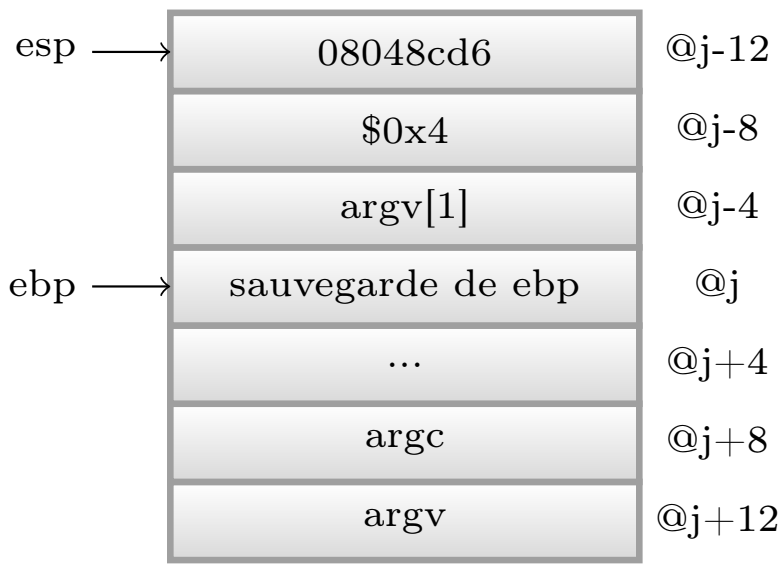
```
f :      08048cb0  push  %ebp
         08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
         08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
         08048cb9  mov   %esp,%ebp
         08048cbb  sub   $0x8,%esp
         08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
         08048cc1  add   $0x4,%eax
         08048cc4  mov   (%eax),%eax
         08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
         08048cca  movl  $0x4,(%esp)
      →  08048cd1  call  8048cb0
         08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

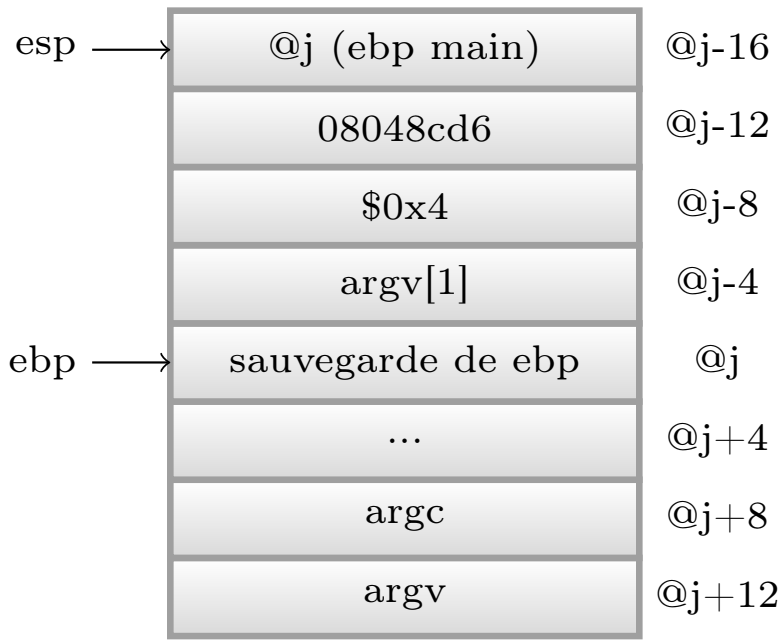
```
f :     → 08048cb0  push  %ebp
          08048cb1  mov   %esp,%ebp
          08048cb3  sub   $0x10,%esp
          08048cb6  leave
          08048cb7  ret
main :    08048cb8  push  %ebp
          08048cb9  mov   %esp,%ebp
          08048cbb  sub   $0x8,%esp
          08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
          08048cc1  add   $0x4,%eax
          08048cc4  mov   (%eax),%eax
          08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
          08048cca  movl  $0x4,(%esp)
          08048cd1  call  8048cb0
          08048cd6  leave
          08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

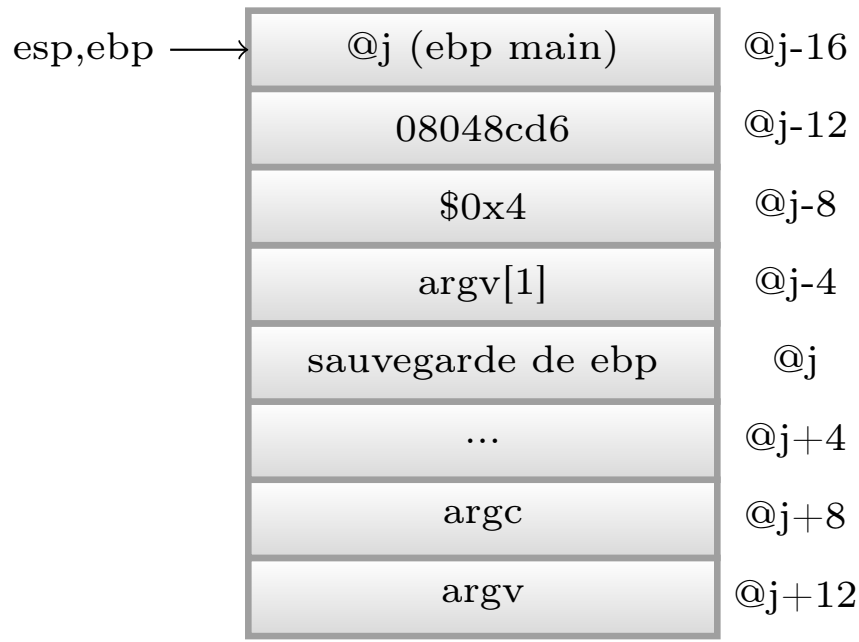
```
f :      08048cb0  push  %ebp
      →  08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
         08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
         08048cb9  mov   %esp,%ebp
         08048cbb  sub   $0x8,%esp
         08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
         08048cc1  add   $0x4,%eax
         08048cc4  mov   (%eax),%eax
         08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
         08048cca  movl  $0x4,(%esp)
         08048cd1  call  8048cb0
         08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

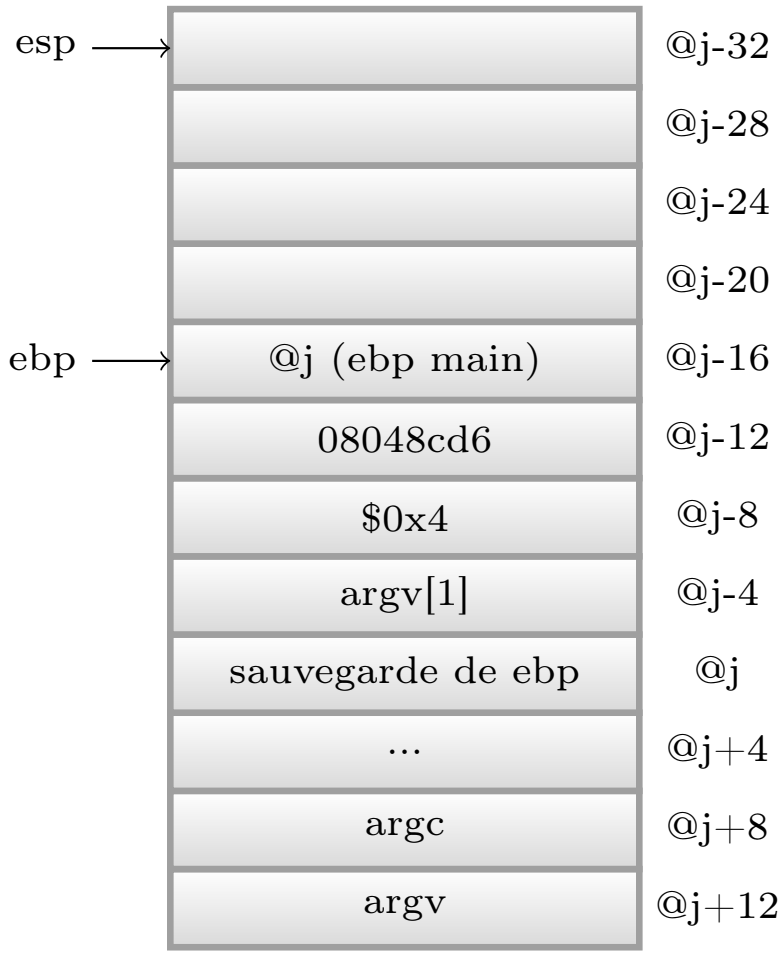
```
f :     08048cb0  push  %ebp
        08048cb1  mov   %esp,%ebp
   →    08048cb3  sub   $0x10,%esp
        08048cb6  leave
        08048cb7  ret
main :  08048cb8  push  %ebp
        08048cb9  mov   %esp,%ebp
        08048cbb  sub   $0x8,%esp
        08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
        08048cc1  add   $0x4,%eax
        08048cc4  mov   (%eax),%eax
        08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
        08048cca  movl  $0x4,(%esp)
        08048cd1  call  8048cb0
        08048cd6  leave
        08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

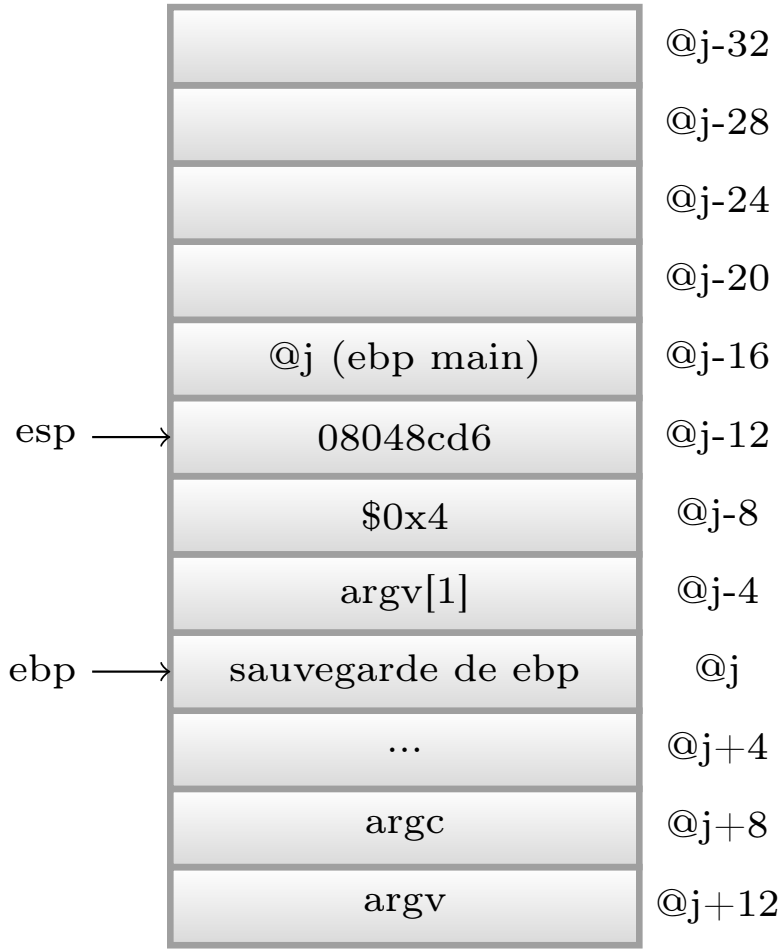
```
f :      08048cb0  push  %ebp
         08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
      →  08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
         08048cb9  mov   %esp,%ebp
         08048cbb  sub   $0x8,%esp
         08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
         08048cc1  add   $0x4,%eax
         08048cc4  mov   (%eax),%eax
         08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
         08048cca  movl  $0x4,(%esp)
         08048cd1  call  8048cb0
         08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

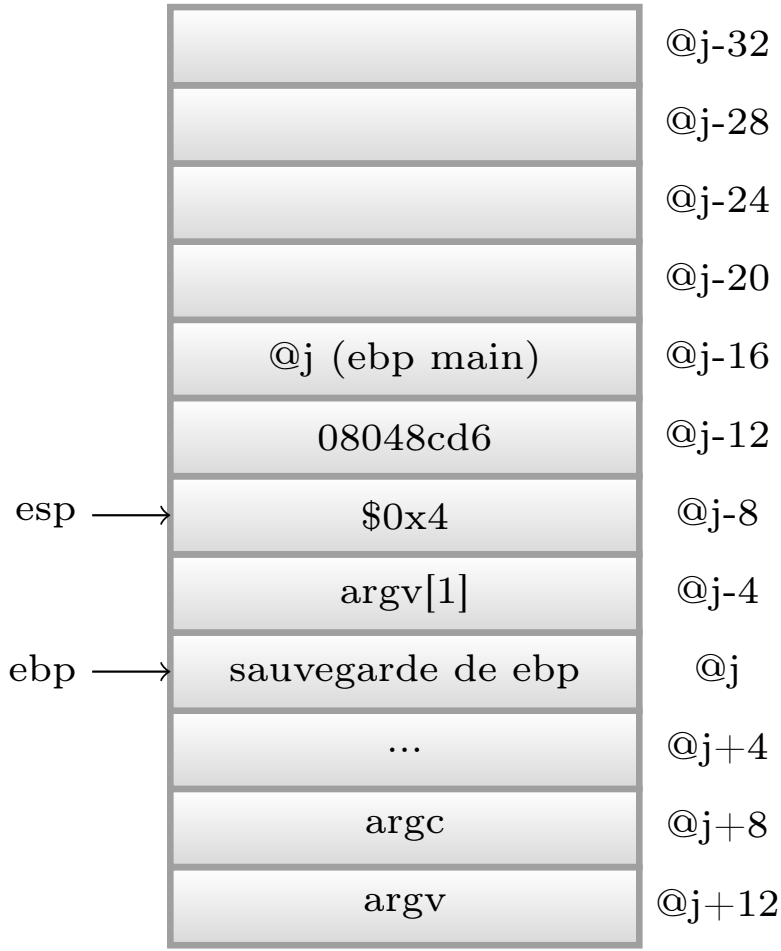
```
f :       08048cb0  push  %ebp
          08048cb1  mov   %esp,%ebp
          08048cb3  sub   $0x10,%esp
          08048cb6  leave
      →   08048cb7  ret
main :    08048cb8  push  %ebp
          08048cb9  mov   %esp,%ebp
          08048cbb  sub   $0x8,%esp
          08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
          08048cc1  add   $0x4,%eax
          08048cc4  mov   (%eax),%eax
          08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
          08048cca  movl  $0x4,(%esp)
          08048cd1  call  8048cb0
          08048cd6  leave
          08048cd7  ret
```



Exemple : appel de fonction C, ABI `cdecl` 2/2

Décompilation du binaire : `objdump -d program` 2

```
f :      08048cb0  push  %ebp
         08048cb1  mov   %esp,%ebp
         08048cb3  sub   $0x10,%esp
         08048cb6  leave
         08048cb7  ret
main :   08048cb8  push  %ebp
         08048cb9  mov   %esp,%ebp
         08048cbb  sub   $0x8,%esp
         08048cbe  mov   Oxc(%ebp),%eax
         08048cc1  add   $0x4,%eax
         08048cc4  mov   (%eax),%eax
         08048cc6  mov   %eax,Ox4(%esp)
         08048cca  movl  $0x4,(%esp)
         08048cd1  call  8048cb0
    →    08048cd6  leave
         08048cd7  ret
```



Plan du cours

Assembleur en ligne GNU

GNU inline Assembly (GAS)

```
char src[10] = "coucou !!", dst[10];
asm volatile ("rep movsb" : :
    "D"(&dst[0]), "S"(&src[0]), "c"(sizeof(dst)));
puts("%s\n", dst);
```

Présentations

- Permet l'intégration de code assembleur dans du code C
- Primitive GNU `asm`. `__asm__` si compilateur non GNU.
- Deux modes spécifiques : *Basic Asm* ; *Extended Asm*

Documentation officielle en ligne du projet GNU

`https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Using-Assembly-Language-with-C.html`

Basic Asm

Syntaxe (grammaire)

```
asm <qualifiers> ( <instructions> )
```

`instrutions`

Instructions assembleur GNU classiques séparées par des sauts à la ligne ou par des `';'`.

`qualifiers`

- `volatile` : implicite, évite l'optimisation
- `inline` : indique de considérer un taille minimum d'instructions générées

Problématiques d'adressage pour GCC : quelle est l'adresse de l'instruction suivant un bloc `asm` en sachant qu'il n'est pas encore traduit en assembleur par GCC...
Solution : on prévoit la taille maximale : ins. × max. taille × nb.

Basic Asm : exemple

Omagah what does that do ?

```
asm volatile (
  "mov $60, %rax \n\t"
  "mov $0, %rdi \n\t"
  "syscall \n\t"
)
```

Basic Asm : exemple

Omagah what does that do ?

```
asm volatile (
  "mov $60, %rax \n\t"
  "mov $0, %rdi \n\t"
  "syscall \n\t"
)
```

Un appel système, lequel ? ?

`arch/x86/entry/entry_64.S`

`arch/x86/syscalls/syscall_64.tbl`

Basic Asm : exemple

Omagah what does that do ?

```
asm volatile (
  "mov $60, %rax \n\t"
  "mov $0, %rdi \n\t"
  "syscall \n\t"
)
```

Un appel système, lequel ? ?

`arch/x86/entry/entry_64.S`

`arch/x86/syscalls/syscall_64.tbl`

Solution : `exit(0);`

Assembleur en ligne et chaînes constantes en C

Pourquoi met-on des retours à la ligne ?

```
asm volatile (
  "mov $60, %rax \n\t"
  "mov $0, %rdi \n\t"
  "syscall \n\t"
)
```

Assembleur en ligne et chaînes constantes en C

Pourquoi met-on des retours à la ligne ?

```
asm volatile (
  "mov $60, %rax \n\t"
  "mov $0, %rdi \n\t"
  "syscall \n\t"
)
```

En c `"a" "b" "c"` → "abc"
Et notre programme ?

Assembleur en ligne et chaînes constantes en C

Pourquoi met-on des retours à la ligne ?

```
asm volatile (
  "mov $60, %rax \n\t"
  "mov $0, %rdi \n\t"
  "syscall \n\t"
)
```

En c `"a" "b" "c"` → "abc"
Et notre programme ?

Solution : `"mov $60, %rax \r\nmov $0, %rdi \r\nsyscall \r\n"`
Sans les *new line* et les retours charriot `as` → une seul ligne d'assembleur → erreur de syntaxe

"utiliser mes variables C dans mon code assembleur ? ? ?"

```
int ma-super-variable-d-interface = 0xcafecafe;
asm volatile ( "pushd <ma-super-variable-d-interface>" ); ??
```

"utiliser mes variables C dans mon code assembleur ? ? ?"

```
int ma-super-variable-d-interface = 0xcafecafe;
asm volatile ( "pushd <ma-super-variable-d-interface>" ); ??
```

→ Extended Asm !

Extended Asm

Sémantique

- Lecture / écriture de variables du programme C
- Sauts à des labels C
- Met en œuvre des templates de code assembleur
  → transformation de l'assembleur écrit pendant la compilation

Ce cours n'aborde pas la syntaxe `goto`

Syntaxe (grammaire)

```
asm <qualifiers> ( <template>
    : <sorties>
    [ : <entrees>
    [ : <clobbers> ] ])
```

`qualifiers`

- `volatile` : désactiver les optimisations

template

Syntaxe générale (grammaire)

Chaîne de caractères constante, template assembleur à modifier :

- Du texte fixe : `%` doit être échappé `%%` (registres)
- Des opérandes remplacées par le moteur. Commence par `%` : `%0`

Sémantique des templates

Interprétée au niveau du compilateur, assemblée par GNU `as`

1. Substitution des symboles listés dans la template par l'équivalent assembleur des expressions C d'entrée et de sortie. `%0` réfère à la première des entrées ou des sorties, `%1` la deuxième, etc.
2. La chaîne de caractères résultante est ensuite compilée par `as` dans un second temps

Attention : GCC ne compile pas la tamplate générée. Il ne connait pas sa sémantique

entrees

Syntaxe générale

Zéro ou plusieurs éléments indiquant des variables C qui seront lues

```
entrees := <entree>, <entrees> | <entree>
entree  := [ [<nom>] ] <contrainte> (<expression>)
```

symbole

Symbole utilisé dans la template comme nom pour une entrée

contrainte

Chaîne de caractère constante indiquant comment traduire la variable C en assembleur. Indique d'utiliser un registre (`"r"`), indique de passer la référence mémoire (`"m"`), utiliser le registre `a` (`"a"`), etc. Une liste est possible (`"mr"`), la meilleure est choisie par GCC.

expression

Une variable C, son adresse, etc.

entrees

Exemple : utilisation (inutile) des entrées

```
int main() {
  int toto = 4;
  int titi = 5;
  asm volatile (
      "mov %[toto], %%r8 \n\t"
      "mov %1, %%r9 \n\t" :: [toto] "a" (toto), "m" (titi));
}
```

```
$ gcc -S lst/entrees.c -o /dev/stdout | grep "#APP" -A 9 -B5
```

clobbers

Sémantique

Liste de registres, non déclarés en entrée ou en sortie, modifiés par la template `"rax", "rbx", "rcx"`

Exemple :

```
asm volatile (
  "mov %0, %rax \n\t"
  "inc %rax \n\t"
  : : "r"(entree));
```

sorties

Syntaxe générale (grammaire)

Identique aux entrées : `sorties := entrees`
Syntaxe de `symbole` et `expression` idendiques.

contrainte

Identique au entrées. En outre le sens peut être spécifié avant les contraintes : `"+<caractères-de-contrainte>"` $\leftrightarrow$ entrée / sortie ; `"=<caractères-de-contrainte>"` $\leftrightarrow$ sortie.
Exemple : `"+rm"` ou `"=b"`

sorties

Exemple : utilisation (utile) des sorties

```
#include <stdio.h>

int main() {
  long int timestamp;
  asm volatile (
      "rdtsc \n\t"
      "mov %%edx, %0 \n\t"
      "shll $0x20, %0 \n\t"
      "mov %%eax, %0 \n\t"
      : "=m"(timestamp) : : "eax", "edx");
  printf("Timestamp(0x%016lx)\n", timestamp);
}
```

```
$ gcc -S lst/sorties.c -o /dev/stdout | less
```

Caractères de contraintes d'entrées / sorties

Générales

- `"r"` : tout registre général
- `"i"` : entier immédiat
- `"g"` : "la fête", registres généraux, réf. mémorie, entier immédiat

`https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Simple-Constraints.html#Simple-Constraints`

Intel x86

- `"a"` ; `"b"` ; `"c"` ; `"d"` : `rax` ; `rbx` ; `rcx` ; `rdx`
- `"S"` ; `"D"` : `rsi` ; `rdi`

`https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Machine-Constraints.html#Machine-Constraints`

Modificateurs d'opérandes x86

Syntaxe

À placer entre le `%` et le numéro ou nom d'opérande **Exemple** :
`asm volatile ("mov %q0, 0" : : "r" (0))` ← `q`

Quelques modificateurs

- `"q"` : écrit le registre sous forme `64-bit` (`rax`)
- `"h"` : registre des huit bits de poid fort d'un mot (`ah`)

`https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Extended-Asm.html#x86Operandmodifiers`

Scripts d'édition des liens

`https://ftp.gnu.org/old-gnu/Manuals/ld-2.9.1/html_chapter/ld_3.html`

2 exemples ?

Hyperviseur mode BIOS / UEFI. *Firmware* Milkimyst