IN 101 - Cours 07

21 octobre 2011

présenté par

Matthieu Finiasz

Pointeurs et adresses mémoires

Qu'est-ce qu'une adresse mémoire ?

- Pour le processeur, la mémoire est un grand tableau d'octets :
  → de 2^{32} sur une machine 32 bits ou 2^{64} sur une 64 bits.

- Tout le tableau n'est pas utilisable :
  - la mémoire a une taille limitée (capacité physique des barrettes)
  - une partie de la mémoire est utilisée par les autres processus.

- C'est le système d'exploitation qui arbitre et décide qui peut accéder à quelle partie de la mémoire :
  - il faut un appel système pour réserver de la mémoire
    → l'OS note à qui elle appartient,
  - si on essaye d'accéder à une partie interdite, l'OS bloque l'accès
    → erreur de segmentation.

Pointeurs et adresses mémoires

- En C, une adresse mémoire est en général appelée pointeur
  - c'est une adresse mémoire avec un type associé
    → le type des éléments qui se trouvent à cette adresse.

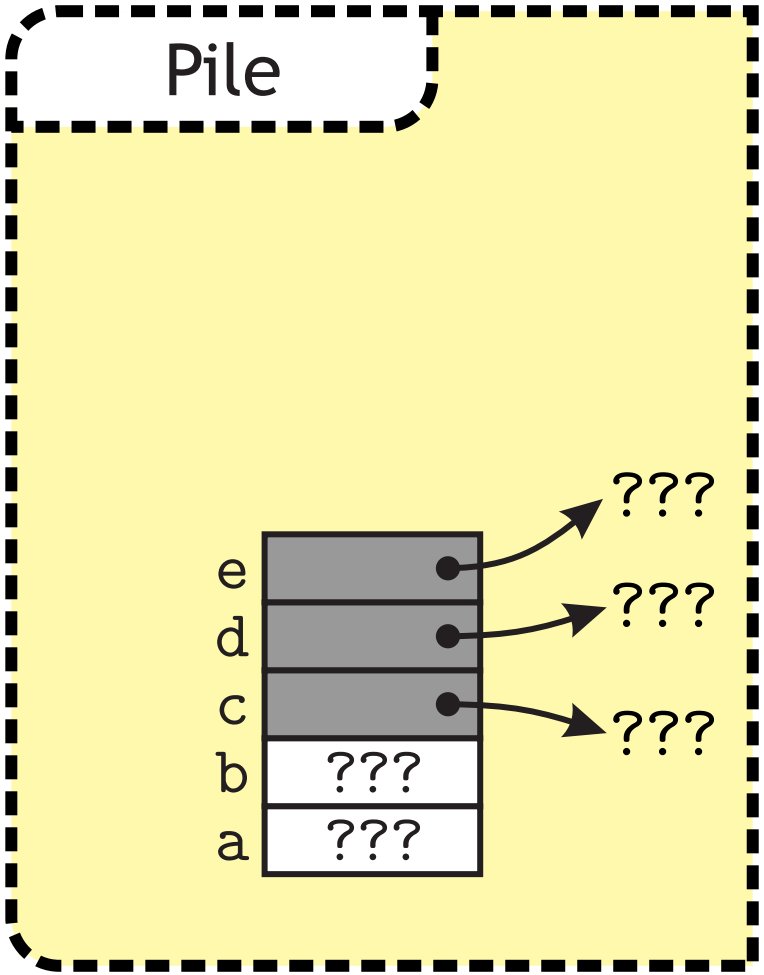
```
1 int* a;          // a est un pointeur vers un/des int
2 double* b;       // b est un pointeur vers un/des double
3 int** c;         // c est un pointeur vers un/des int*
```

- Chaque variable possède une adresse et on peut y accéder avec le préfixe &. On peut accéder au contenu d'une case avec le préfixe *.

```
1 int a;       // a est un int
2 int* b;      // b est un pointeur vers un int
3 b = &a;      // b contient l'adresse de a -> pointeur vers a
4 *b = 5;      // on stocke 5 dans *b -> dans a
```

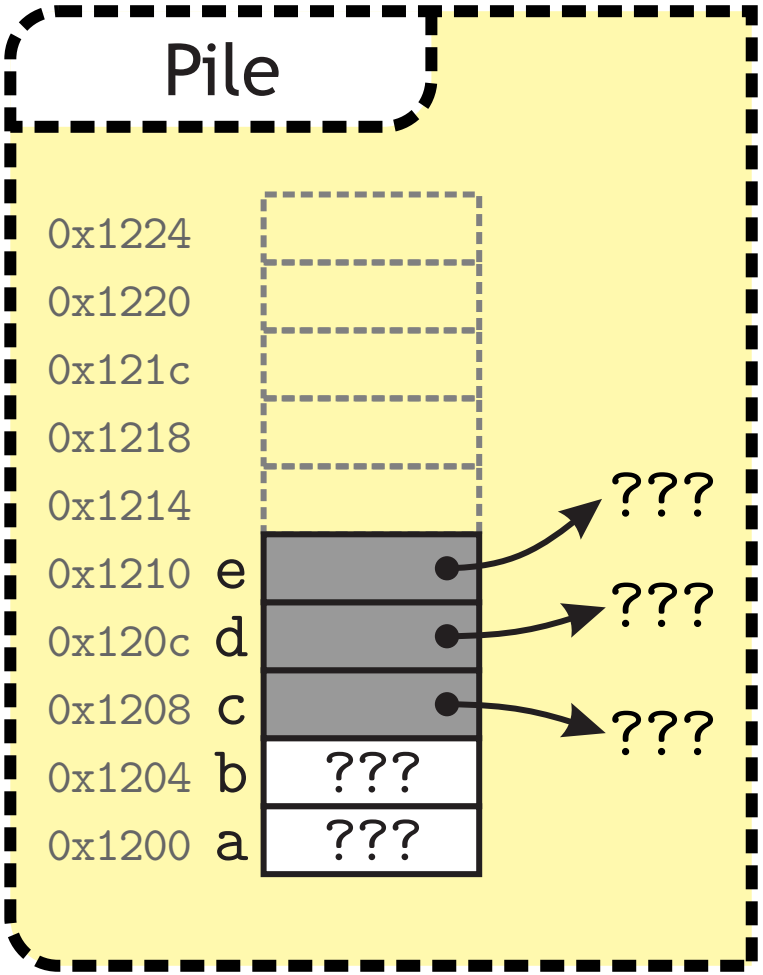
→ & et * ont des rôles symétriques : *(&a) est la même chose que a.

Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2  ▶ int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;    b = 5;
4    c = &b;   d = &a;
5    *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8    **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

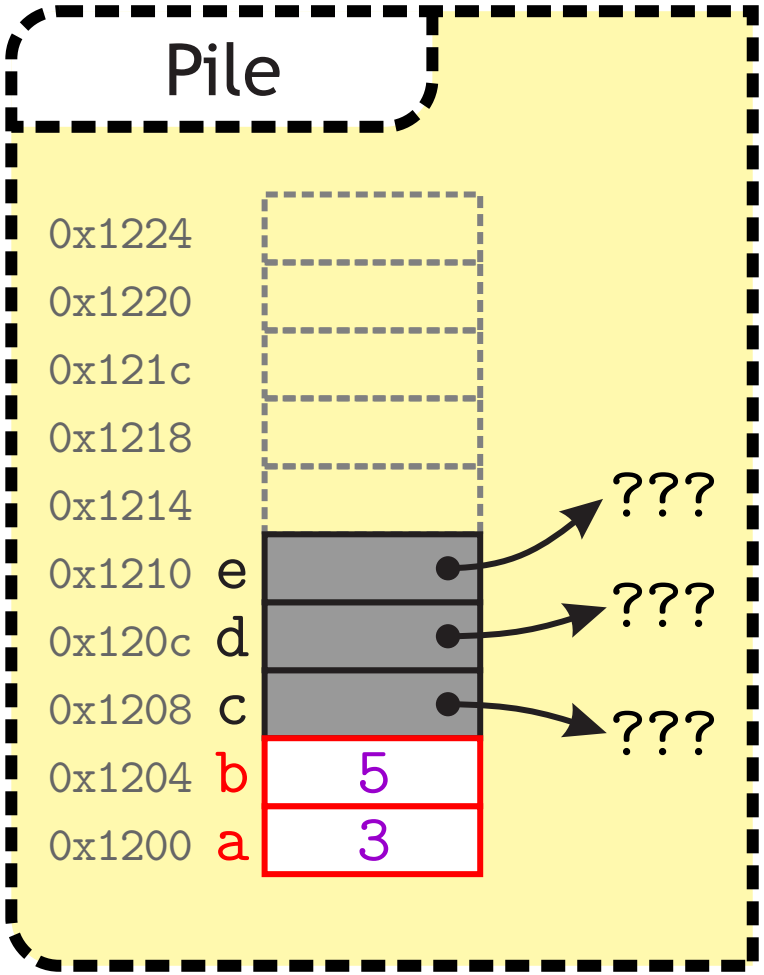
Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2  ▶ int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;    b = 5;
4    c = &b;   d = &a;
5    *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8    **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

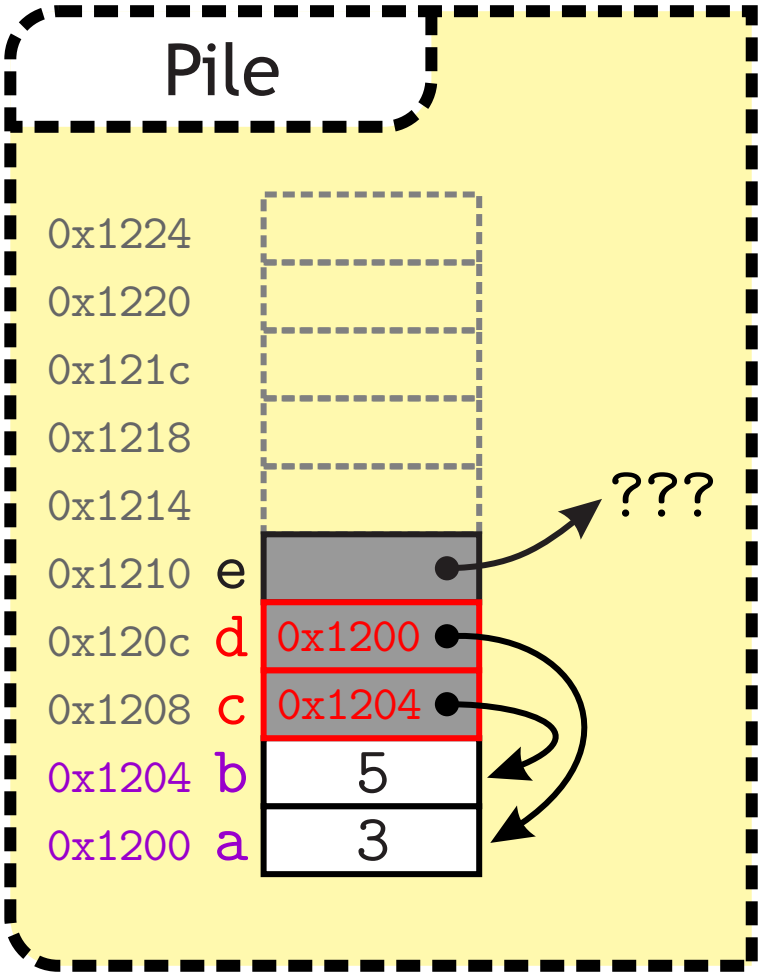
- Chaque case mémoire a une adresse : souvent représentée en hexadécimal.

Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2    int a, b, *c, *d, **e;
3  ▶ a = 3;    b = 5;
4    c = &b;   d = &a;
5    *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8    **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

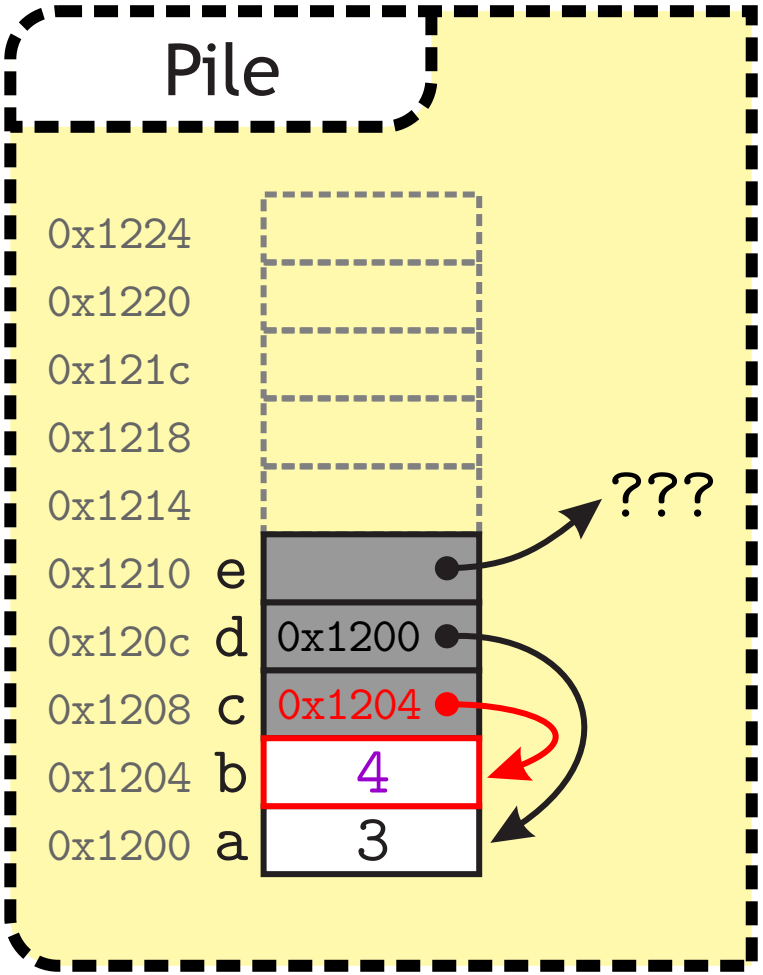
Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2    int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;    b = 5;
4  ▶ c = &b;   d = &a;
5    *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8    **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

- c et d contiennent les adresses de b et a
  - → ils pointent vers b et a.

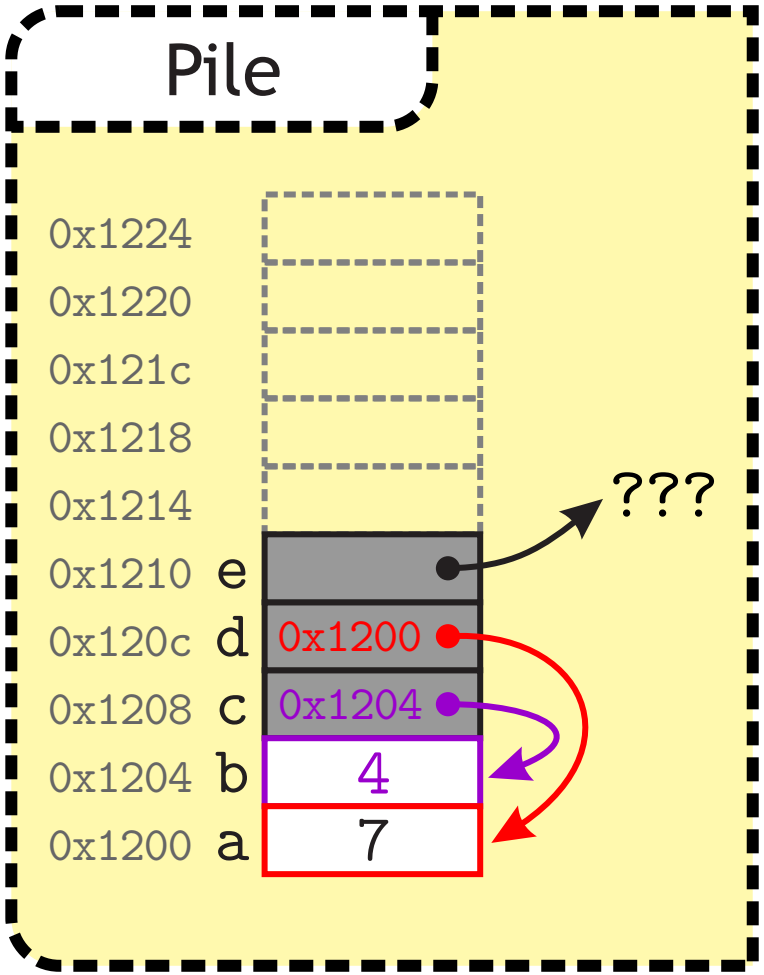
Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2    int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;    b = 5;
4    c = &b;   d = &a;
5  ▶ *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8    **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

- On suit le pointeur dans c et on stocke 4 dans la case mémoire correspondante ⟶ dans b.

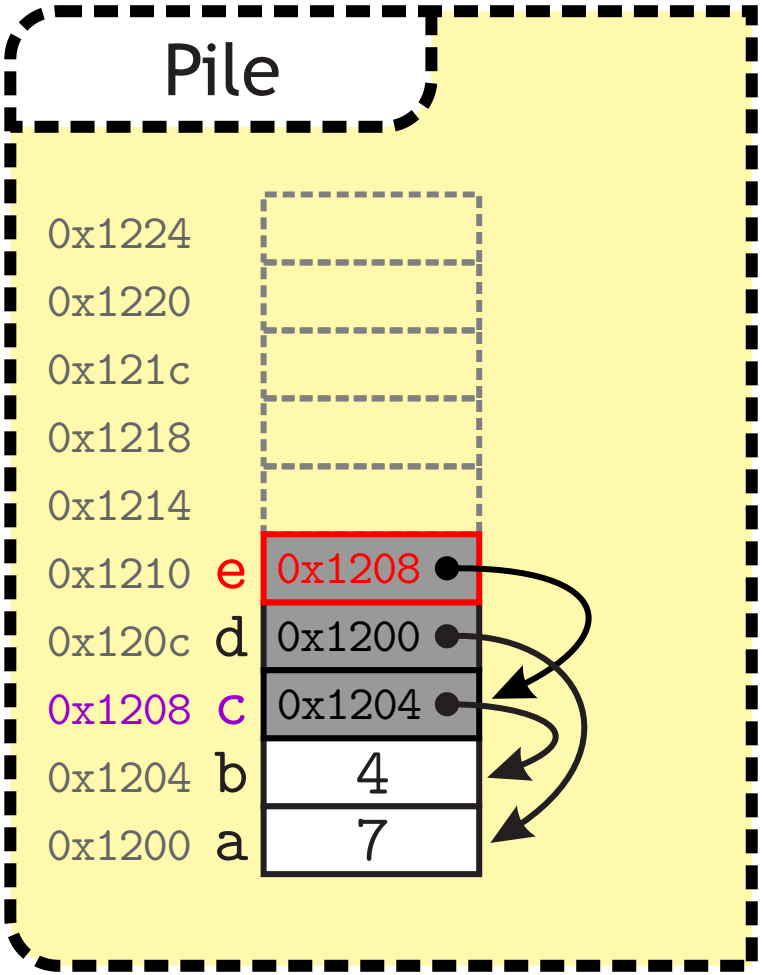
Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2    int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;    b = 5;
4    c = &b;   d = &a;
5    *c = 4;
6  ▶ *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8    **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

- À gauche du "=" il y a la case mémoire où ira le résultat
- À droite du "=" on évalue
  - → on suit le pointeur c et on regarde ce qui est dans la case.

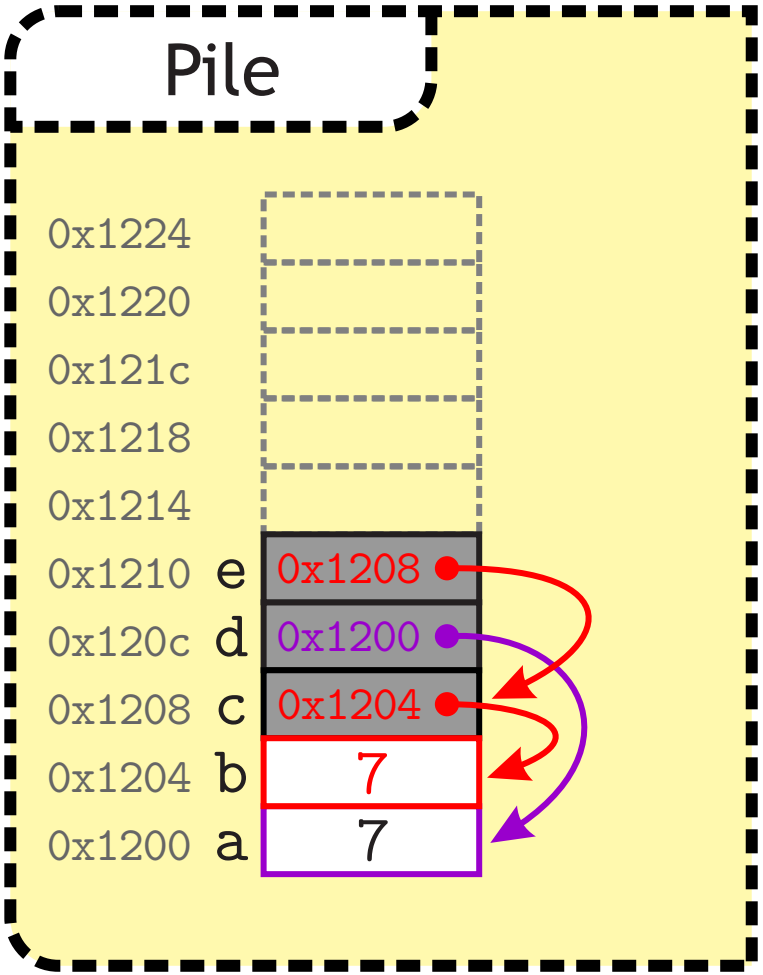
Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2    int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;   b = 5;
4    c = &b;  d = &a;
5    *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7  ▶ e = &c;
8    **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

- e pointe vers c.

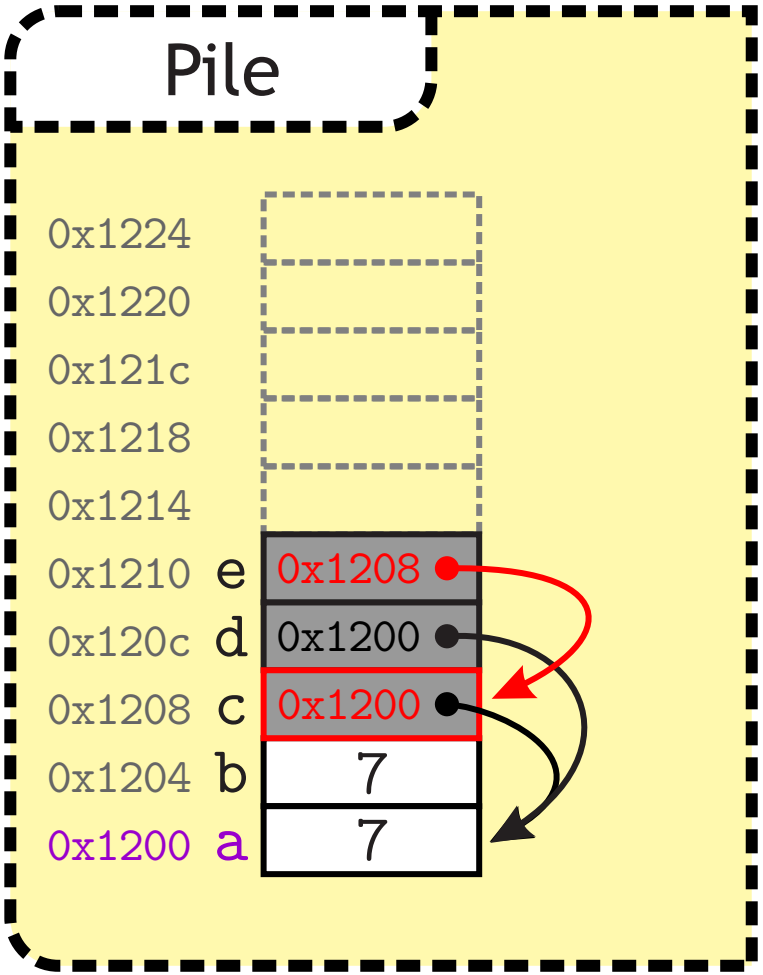
Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2    int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;    b = 5;
4    c = &b;   d = &a;
5    *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8  ▶ **e = *d;
9    *e = &a;
10 }
```

- Avec une double étoile, on suit deux pointeurs à la suite.

Exemple de manipulations de pointeurs




```
1  int main() {
2    int a, b, *c, *d, **e;
3    a = 3;    b = 5;
4    c = &b;   d = &a;
5    *c = 4;
6    *d = (*c) + 3;
7    e = &c;
8    **e = *d;
9  ▶ *e = &a;
10 }
```

- Deux pointeurs peuvent contenir la même adresse
  - on peut faire un test d'égalité dessus (`c == d`),
  - on peut aussi comparer les contenus (`(*c) == (*d)`).

Pointeurs et tableaux

Tableaux et allocation dynamique

- Un tableau (dynamique) en C est simplement un pointeur :
  - c'est l'adresse mémoire du premier élément du tableau,
    → `tab[0]` et `*tab` sont équivalents.

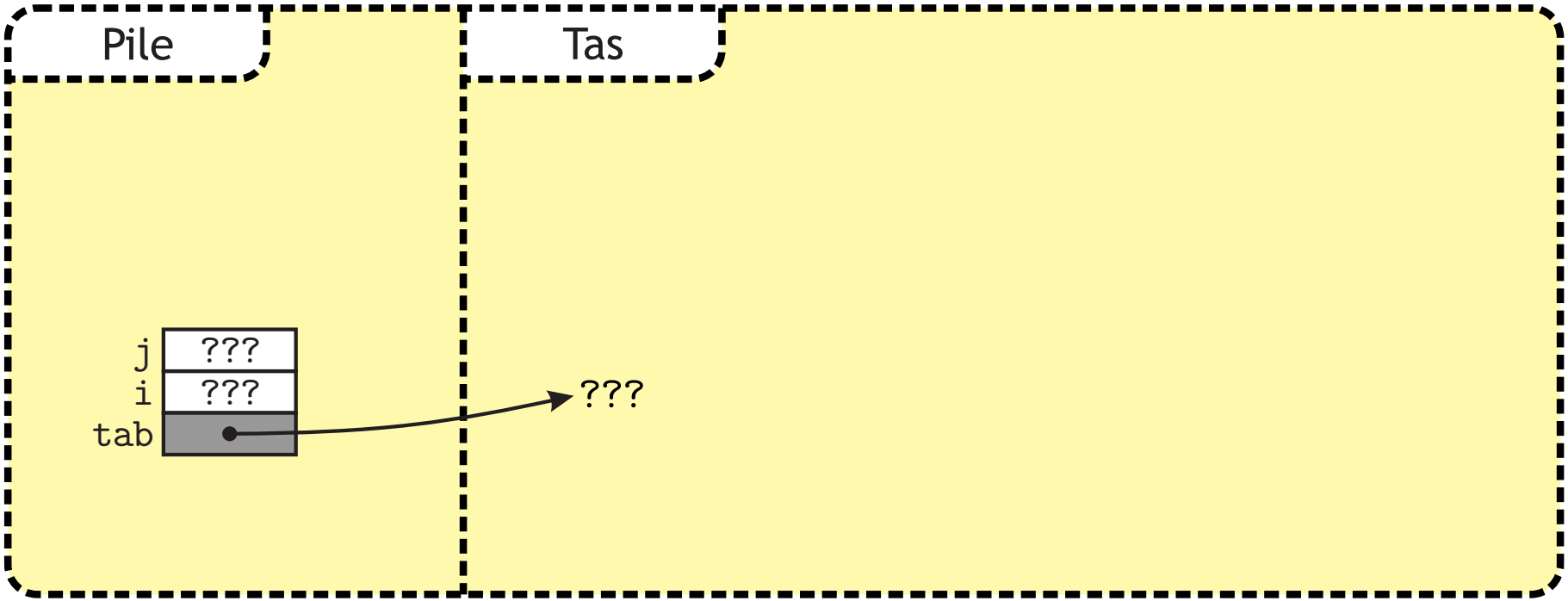
- On déclare un tableau comme on déclare un pointeur,
  - il faut ensuite allouer de la mémoire avec `malloc`,
  - `malloc` prend en argument le nombre d'octets à réserver
  - `sizeof` permet de connaître la taille (en octets) d'un type
    → la taille peut changer d'une architecture à une autre.

- Le type de retour de `malloc` est *`void*`*
  - c'est un pointeur sans type
    → on utilise un cast pour le convertir dans le bon type.

- *`void*`* n'a rien à voir avec le type de retour *`void`* d'une fonction...

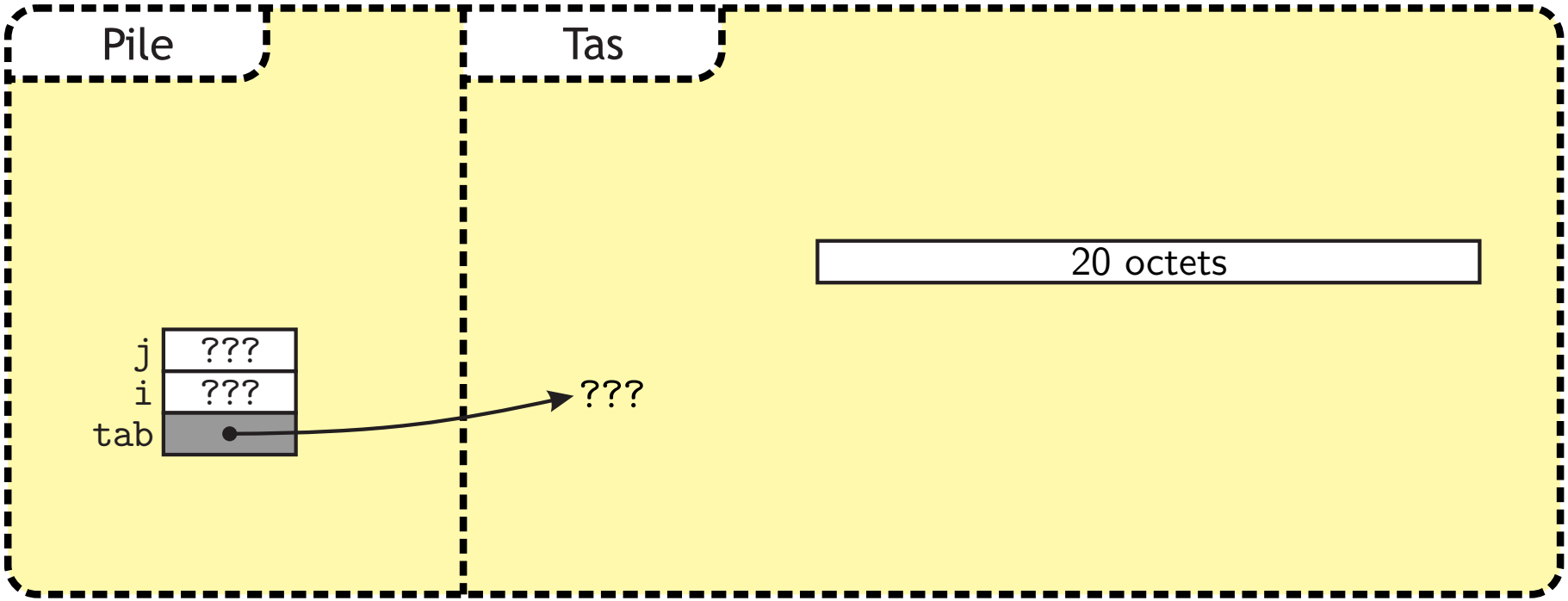
Tableaux et allocation dynamique

```
1 int main() {
2 ▶ int* tab,i,j;                                  // déclaration
3   tab = (int*) malloc(5*sizeof(int));  // allocation
4   tab[3] = 5;
5   printf("%d\n",tab[5]);
6 }
```



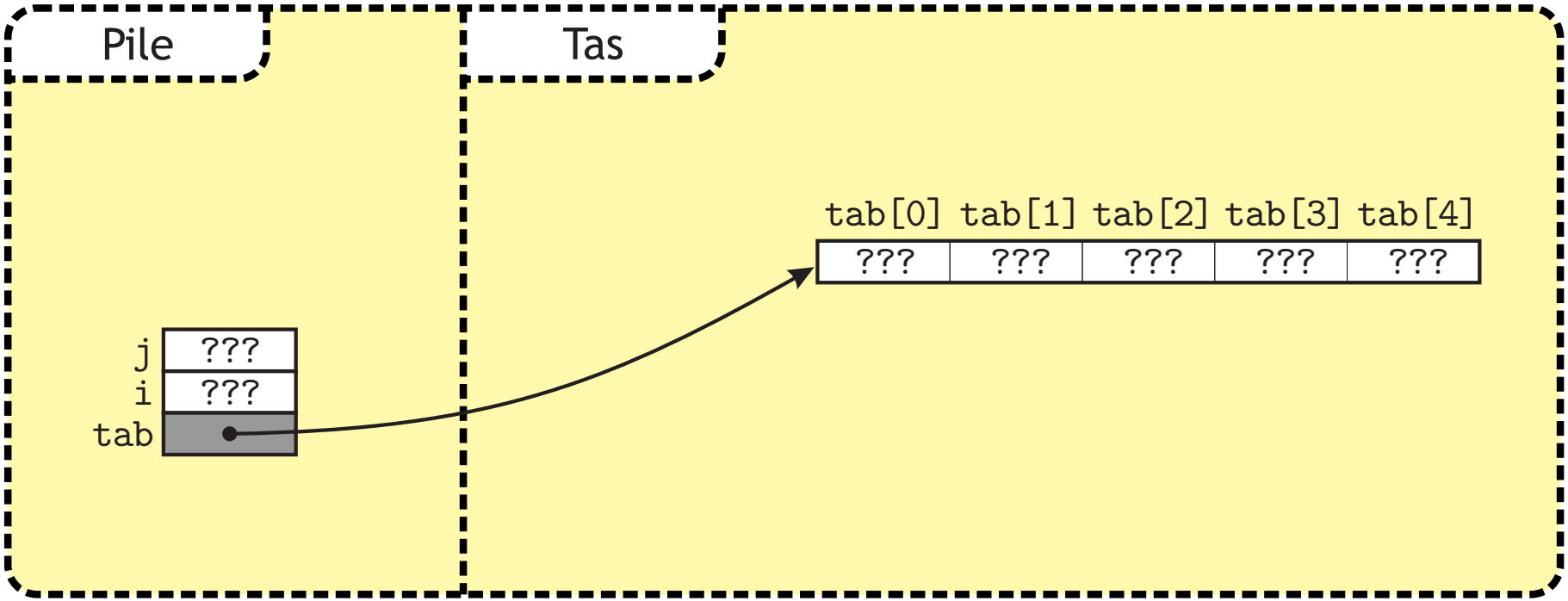
Tableaux et allocation dynamique

```
1 int main() {
2   int* tab,i,j;                          // déclaration
3 ▶ tab = (int*) malloc(5*sizeof(int));    // allocation
4   tab[3] = 5;
5   printf("%d\n",tab[5]);
6 }
```



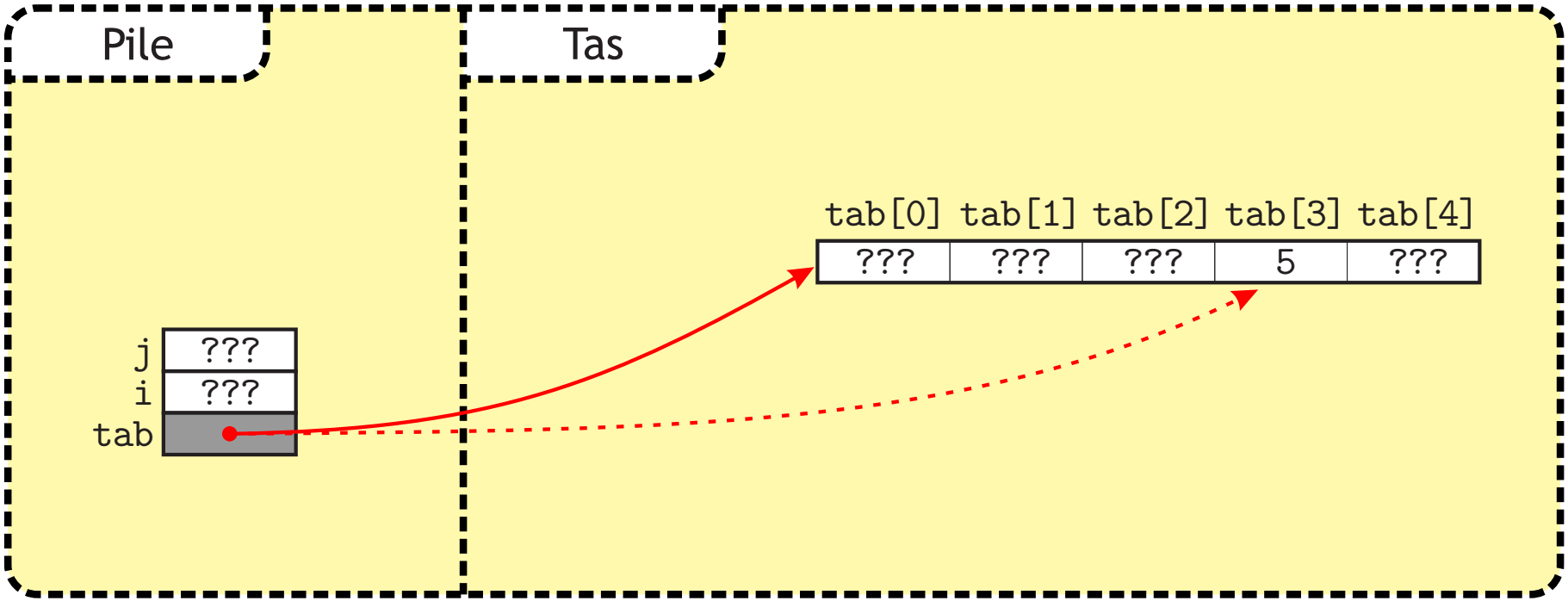
Tableaux et allocation dynamique

```
1 int main() {
2   int* tab,i,j;                          // déclaration
3 ▶ tab = (int*) malloc(5*sizeof(int));    // allocation
4   tab[3] = 5;
5   printf("%d\n",tab[5]);
6 }
```



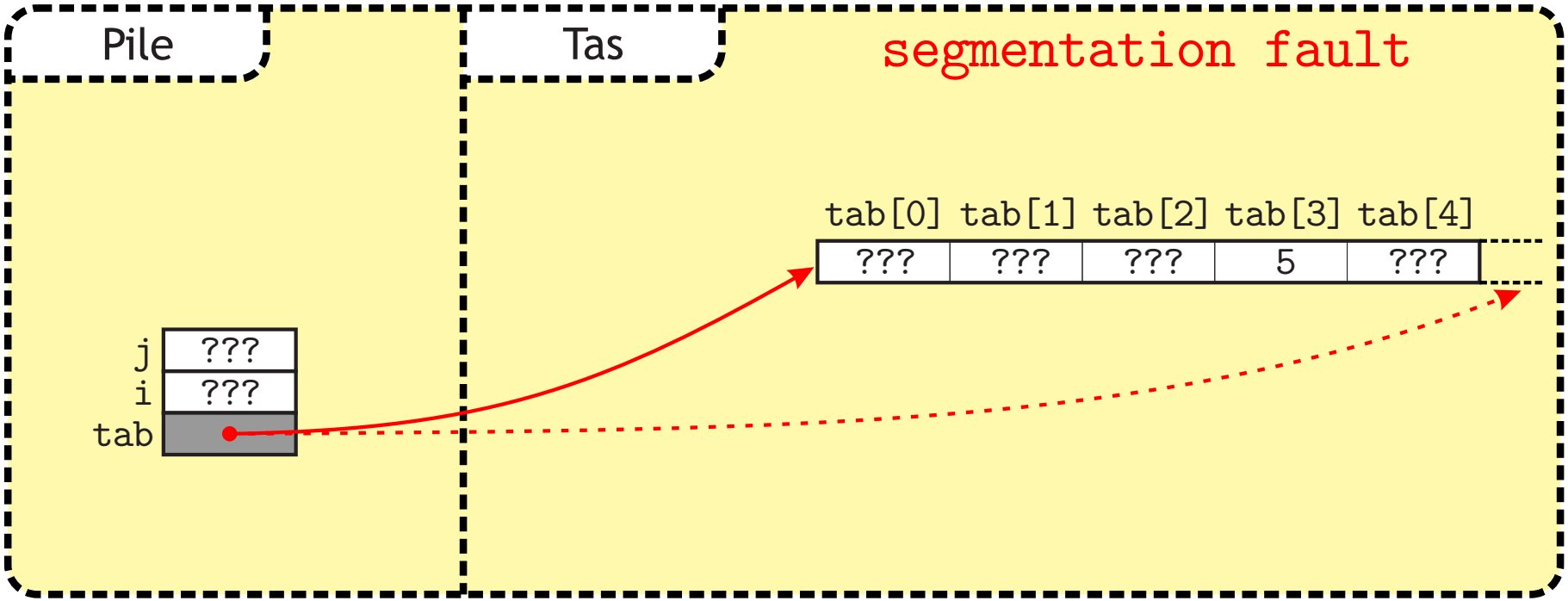
Tableaux et allocation dynamique

```
1 int main() {
2   int* tab,i,j;                          // déclaration
3   tab = (int*) malloc(5*sizeof(int));    // allocation
4 ▶ tab[3] = 5;
5   printf("%d\n",tab[5]);
6 }
```



Tableaux et allocation dynamique

```
1 int main() {
2   int* tab,i,j;                          // déclaration
3   tab = (int*) malloc(5*sizeof(int));    // allocation
4   tab[3] = 5;
5 ▶ printf("%d\n",tab[5]);
6 }
```



Différences entre tableaux dynamiques et statiques

- Les tableaux statiques et dynamiques s'utilisent de façon similaire, mais sont assez différents en pratique.
- Les tableaux statiques :
  - sont alloués directement dans la pile
    → automatiquement libérés en fin de fonction,
  - n'ont pas de "case" contenant un pointeur
    → avec `int d[4];` on ne peut pas affecter de valeur à `d`.
- Les tableaux dynamiques :
  - sont alloués dans le tas avec `malloc`,
  - persistent à la fin d'une fonction
    → on peut renvoyer leur adresse avec `return`,
  - doivent être libérés spécifiquement
    → la commande `free(tab);` libère le bloc mémoire à l'adresse contenue dans la variable `tab`.

Le pointeur NULL

- Le pointeur NULL est l'équivalent d'un 0 pour les pointeurs.
  - l'adresse mémoire 0 n'est jamais utilisée
  - un pointeur égal à NULL n'est donc pas une vraie adresse
    → permet de faire des tests (*cf.* listes chaînées),
  - suivre un pointeur NULL fait toujours une erreur de segmentation
    → pas forcément le cas pour un pointeur non initialisé.
- La fonction malloc peut ne pas réussir à allouer la mémoire (mémoire pleine, trop gros bloc...)
  - elle renvoie alors un pointeur NULL,
  - il faudrait toujours tester la valeur de retour de malloc.

```
1 int* tab = (int*) malloc(1000000*sizeof(int));
2 if (tab == NULL) {
3   printf("Out of memory...\n");
4   exit(1);
5 }
```

La fonction `free`

- À chaque `malloc` doit correspondre un `free` :
  - chaque bloc de mémoire alloué doit être libéré explicitement,
    - → il peut alors être réalloué (à un autre programme),
  - la mémoire est toujours libérée (par l'OS) à la fin d'un programme
    - → la mémoire n'est pas définitivement perdue !

- Attention en particulier aux allocations dans une boucle/fonction :
  - il faut libérer la mémoire dès qu'on n'en a plus besoin,
  - sinon, on peut avoir des fuites de mémoire :
    - → utilise plus de mémoire que nécessaire.
  - éviter aussi les blocs perdus,
    - → blocs alloués dont l'adresse n'est plus stockée nul part...

Autres fonctions pour manipuler des zones mémoires

- Il existe d'autres fonctions de `stdlib.h` pour manipuler la mémoire :
  - `void* calloc(int nb, int size);`
    → alloue un tableau de `nb` cases de taille `size` initialisées à 0.
  - `void* memcpy(void* dest, void* src, int size);`
    → recopie un bloc mémoire de taille `size` de `src` vers `dest`.
  - `void* realloc(void* src, int size);`
    → alloue un bloc mémoire de taille `size` et recopie le contenue de `src` dedans.

- Elles peuvent être pratiques, mais sont remplaçables par des `malloc`, `free` et une boucle `for`.

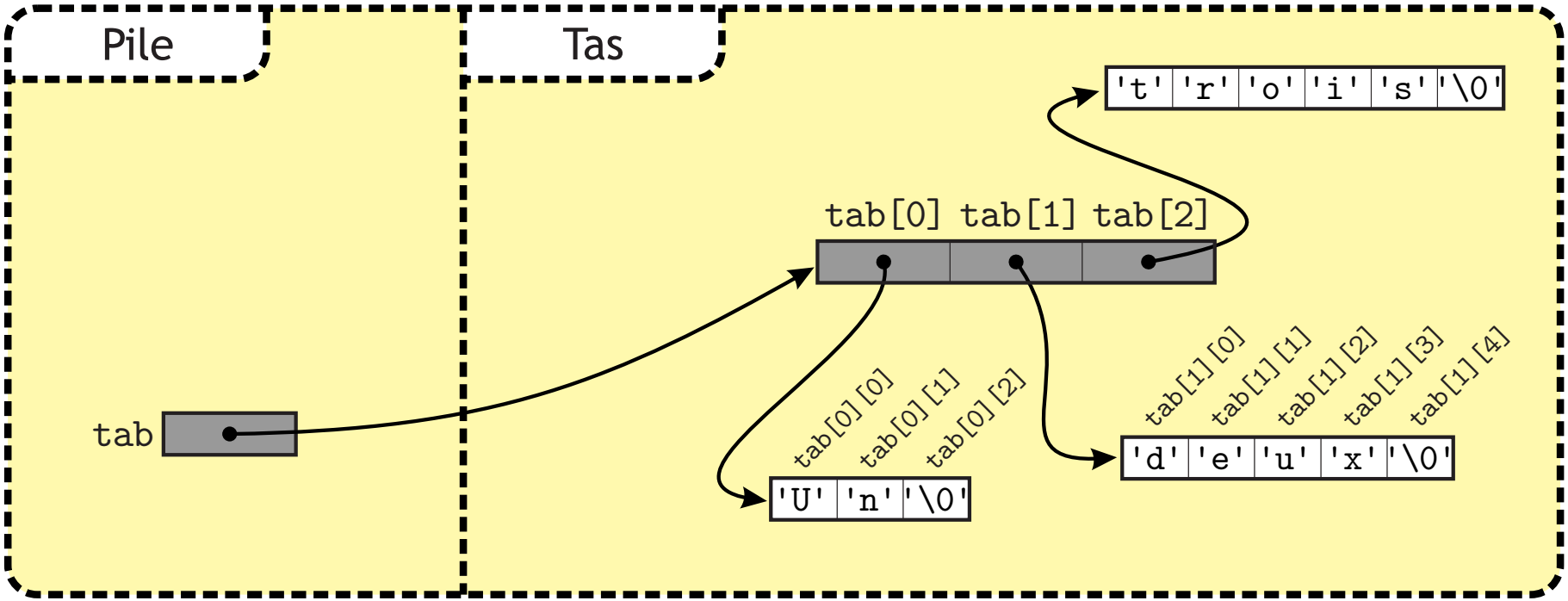
Tableaux à 2 dimensions

- Un tableau à 2 dimensions est un tableau de pointeurs :
  - le type `int** tab` peut aussi se lire `int* *tab`
  - il faut donc allouer le tableau de pointeurs, puis allouer chaque tableau d'entiers (ou autre).
  - il faut aussi libérer tous les tableaux...

```
1  int i;
2  int** tab = (int**) malloc(20*sizeof(int*));
3  for (i=0; i<20; i++) {
4    tab[i] = (int*) malloc(30*sizeof(int));
5  }
6  ...
7  for (i=0; i<20; i++) {
8    free(tab[i]);
9  }
10 free(tab);
```

Tableaux à 2 dimensions

- Un tableau à 2 dimensions n'est pas forcément rectangulaire :
  - c'est simplement un tableau de pointeurs
    → chaque pointeur pointe vers un tableau qui a une taille propre.
  - par exemple l'argument `char* argv[]` du `main`
    → les chaînes de caractères ont des longueurs différentes.

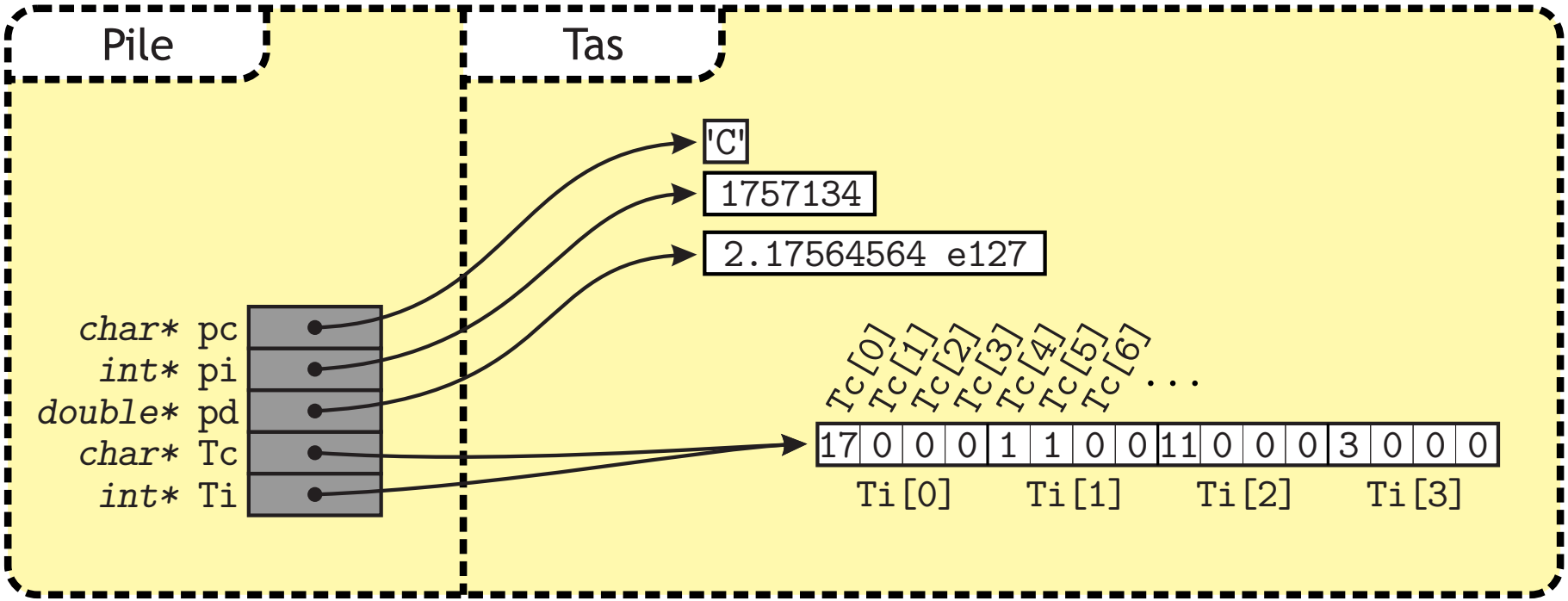


Pourquoi un pointeur doit il avoir un type ?

- Si un pointeur n'est que le numéro d'une case mémoire, pourquoi a-t-il un type associé ?
  - cela permet de savoir la taille de ce qu'il faut lire au bout du pointeur.
- Quand on lit la valeur de `*a` :
  - si a est un `char*`, on ne lit qu'un octet,
  - si a est un `int*`, on lit 4 octets,
  - si a est un `double*`, on lit 8 octets, et on les lit comme un `double`, pas un entier.
- De même pour un tableau, `tab[i]` n'est pas le i-ème octet, mais le i-ème élément :
  - il faut savoir de combien d'octets avancer ($i \times 4$, $i \times 8$...),
  - il faut savoir la taille de ce qu'on lit.

Pourquoi un pointeur doit il avoir un type ?

- Selon le type du pointeur, le programme ne va pas lire la même taille de bloc en le suivant.



Pointeurs et fonctions

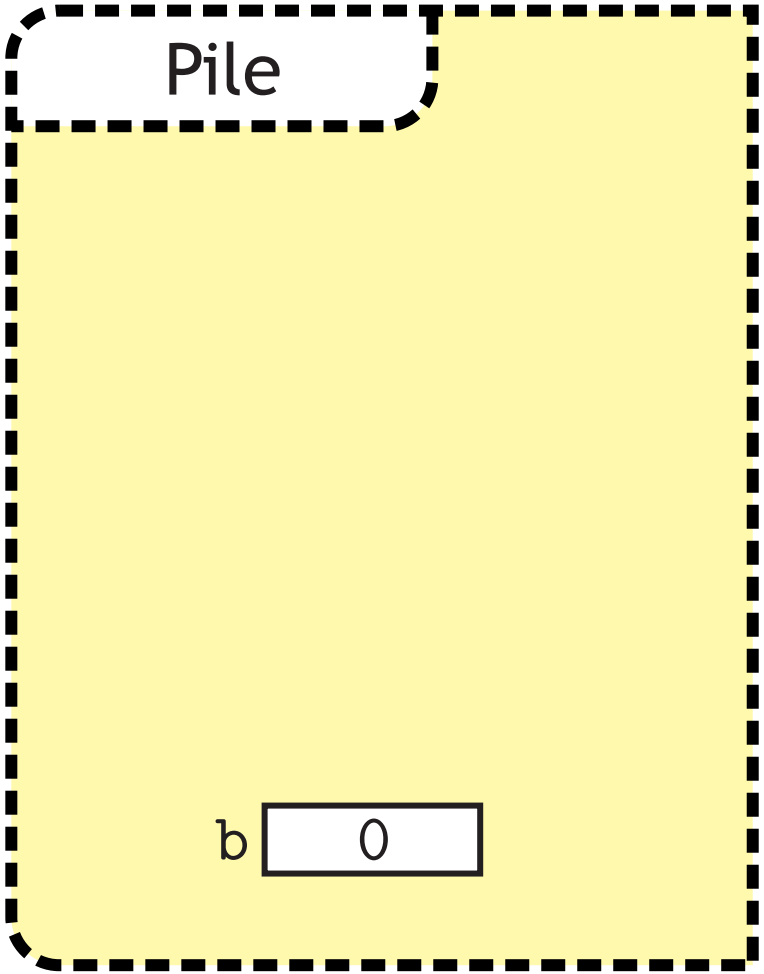
Passage par adresse

- Lors d'un appel de fonction les paramètres sont évalués et copiés
  - impossible de modifier une variable dans une fonction appelée,
  - sauf si au lieu de passer sa valeur on passe son adresse
    → c'est alors l'adresse qui est copiée,
  - la fonction peut alors écrire à l'adresse qu'on lui a passée.
- C'est ce que fait la fonction `scanf`.

```
1 void incr(int* a) {
2   (*a) = (*a) + 1;     // on écrit à l'adresse vers
3 }                      // laquelle pointe a
4
5 int main() {
6   int b = 0;
7   incr(&b);            // on passe l'adresse de b
8   printf("%d\n",b);    // cela affiche 1
9 }
```

Passage par adresse

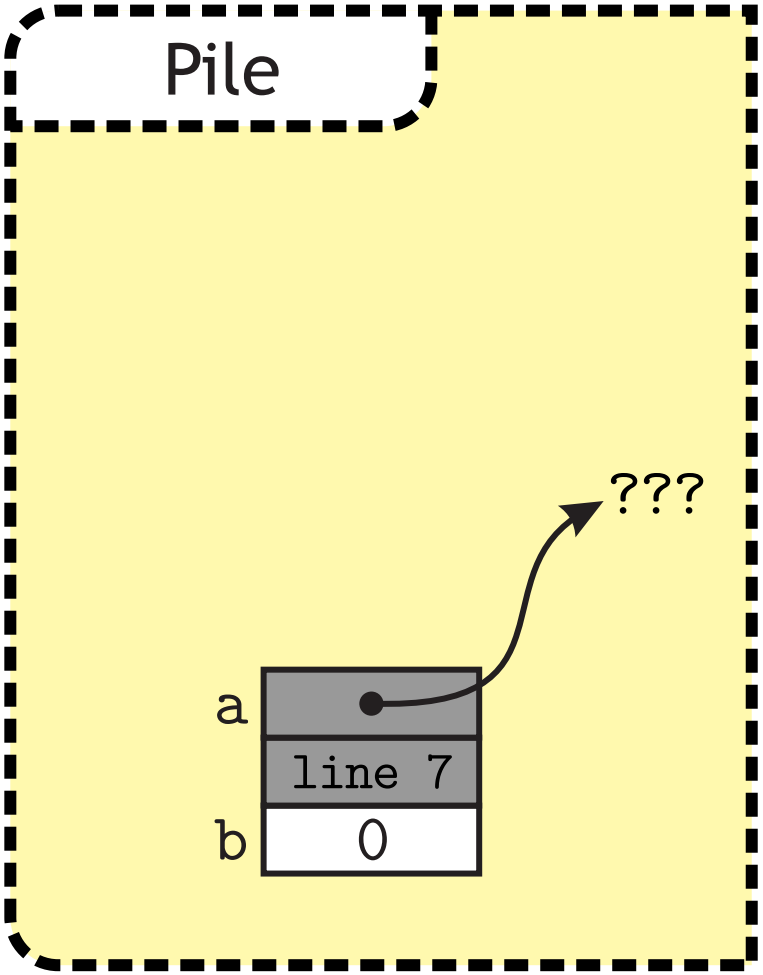
Ce qui se passe en mémoire




```
1 void incr(int* a) {
2   (*a) = (*a) + 1;
3 }
4
5 int main() {
6 ▶ int b = 0;
7   incr(&b);
8   printf("%d\n",b);
9 }
```

Passage par adresse

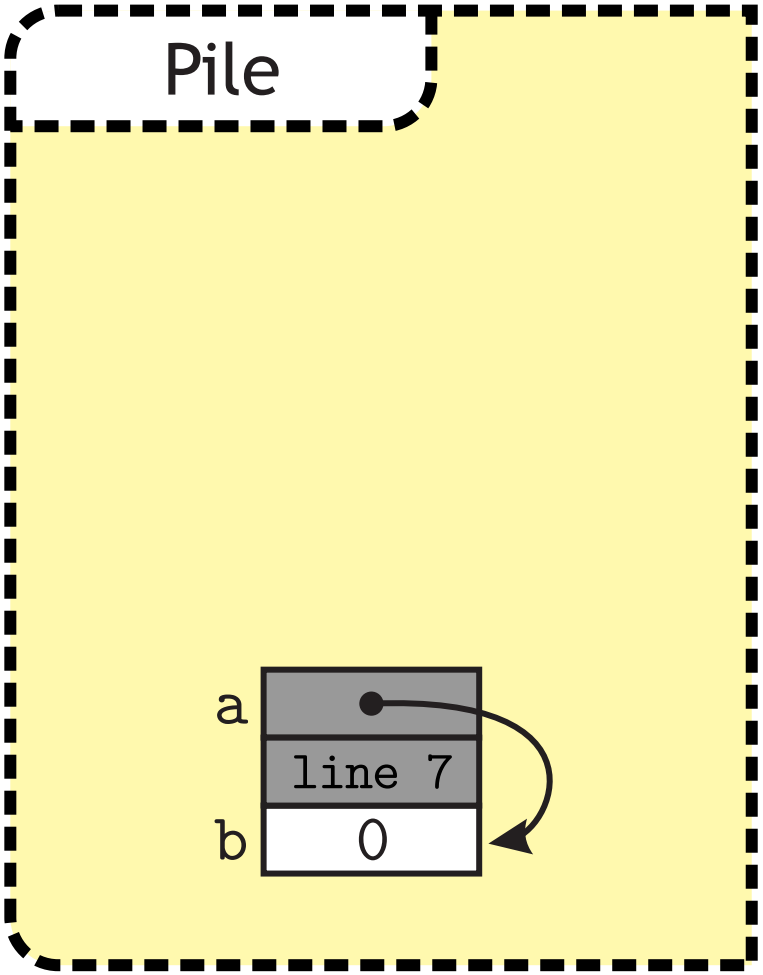
Ce qui se passe en mémoire




```
1 void incr(int* a) {
2   (*a) = (*a) + 1;
3 }
4
5 int main() {
6   int b = 0;
7 ▶ incr(&b);
8   printf("%d\n",b);
9 }
```

Passage par adresse

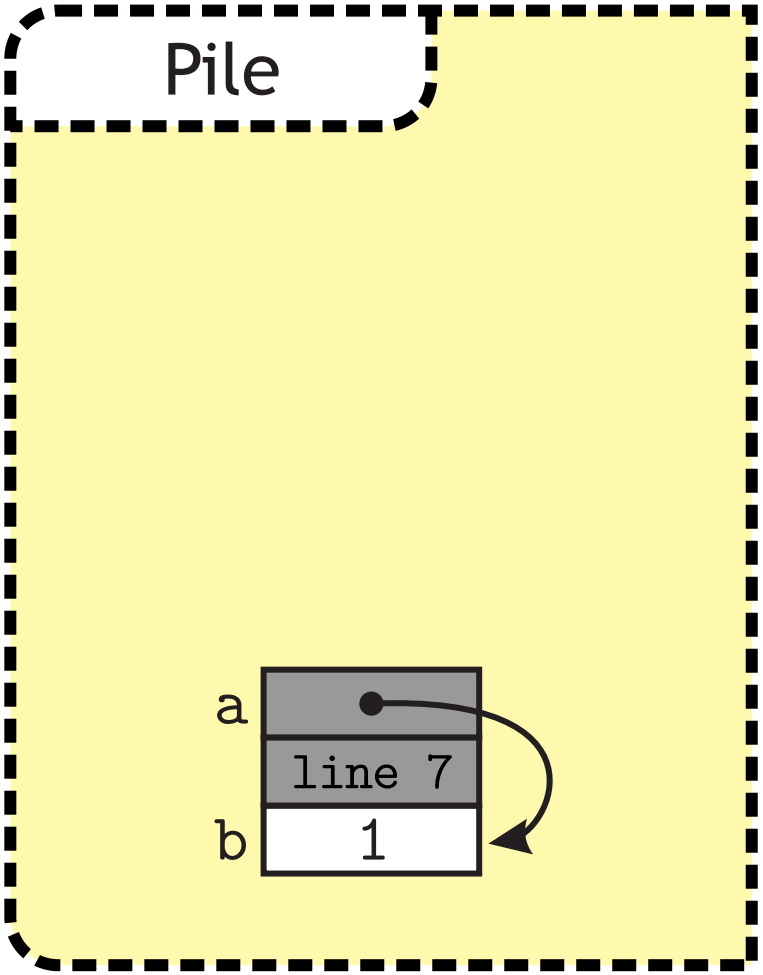
Ce qui se passe en mémoire




```
1 void incr(int* a) {
2   (*a) = (*a) + 1;
3 }
4
5 int main() {
6   int b = 0;
7 ▶ incr(&b);
8   printf("%d\n",b);
9 }
```

Passage par adresse

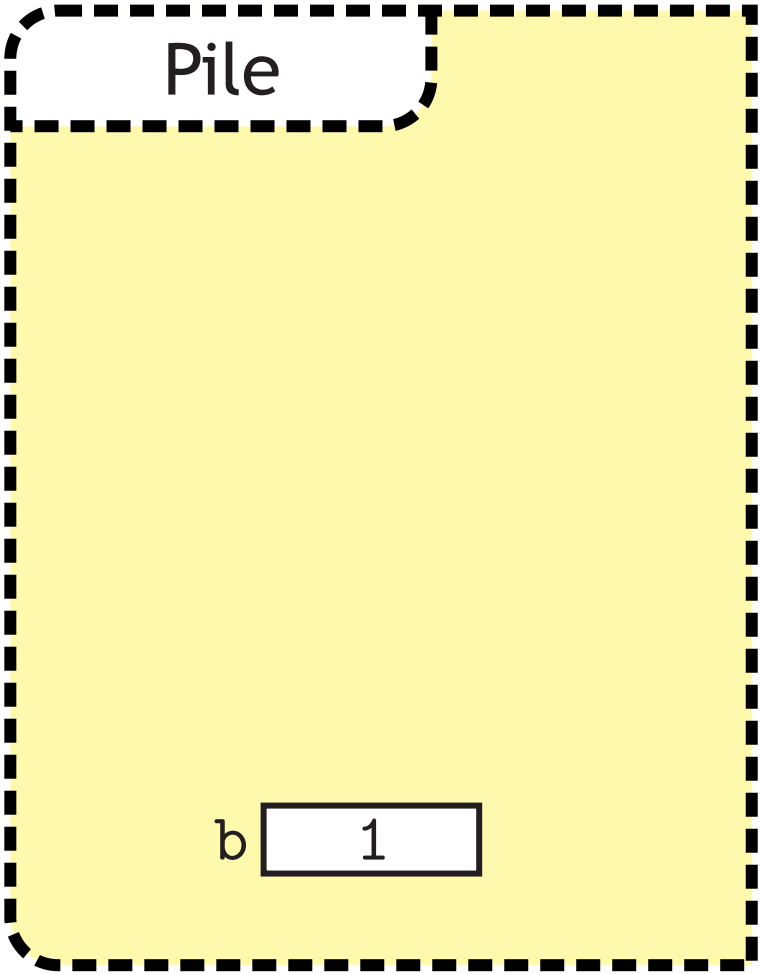
Ce qui se passe en mémoire




```
1 void incr(int* a) {
2 ▶ (*a) = (*a) + 1;
3 }
4
5 int main() {
6   int b = 0;
7   incr(&b);
8   printf("%d\n",b);
9 }
```

Passage par adresse

Ce qui se passe en mémoire




```
1 void incr(int* a) {
2   (*a) = (*a) + 1;
3 }
4
5 int main() {
6   int b = 0;
7   incr(&b);
8 ▶ printf("%d\n",b);
9 }
```

Fonction retournant un tableau

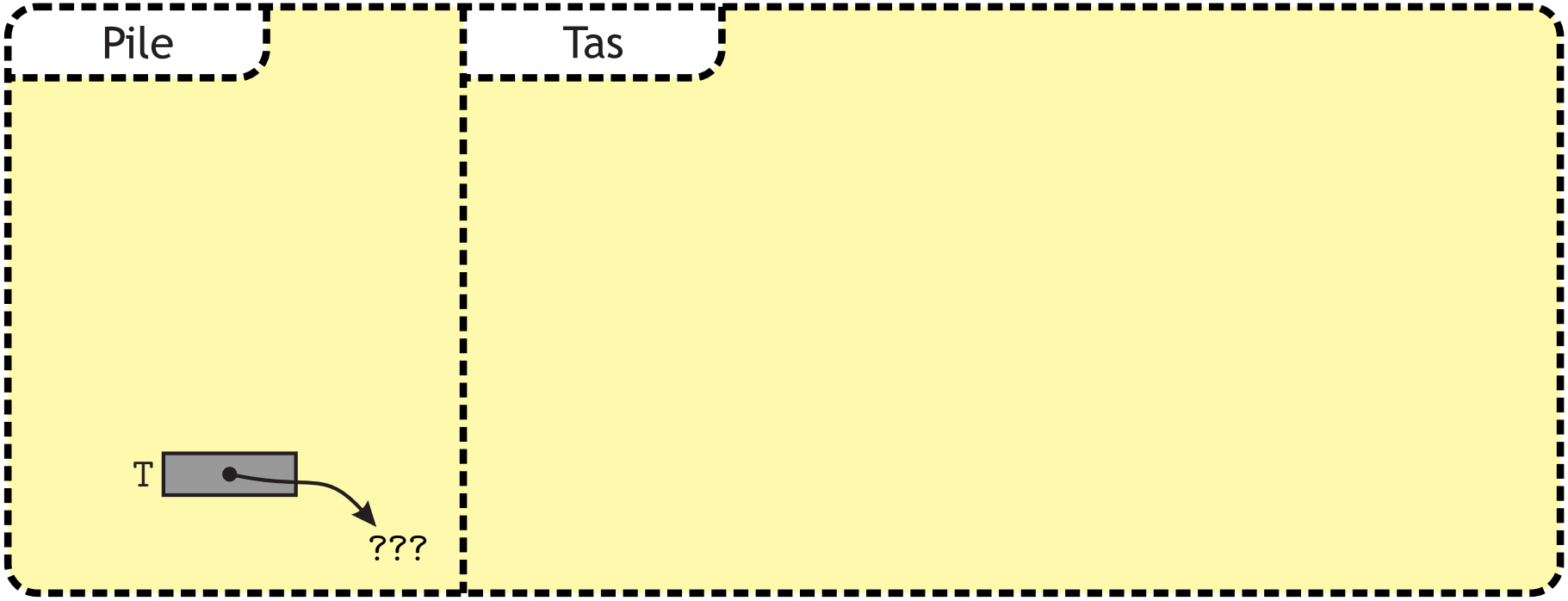
- Une fonction ne peut renvoyer qu'une seule valeur
  - mais elle peut renvoyer une adresse mémoire !
- Une fonction qui doit modifier le contenu d'un tableau utilisera du passage par adresse → c'est la façon naturelle avec un tableau.
- Une fonction qui doit allouer un tableau peut renvoyer son adresse :

```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3    int* tab = (int*) malloc(n*sizeof(int));
4    for (i=0; i<n; i++) {
5      tab[i] = i;
6    }
7    return tab;
8  }
9  int main() {
10   int* T = init(5);
11   printf("%d\n", T[3]);
12   free(T);
13 }
```

Fonction retournant un tableau

Ce qui se passe en mémoire

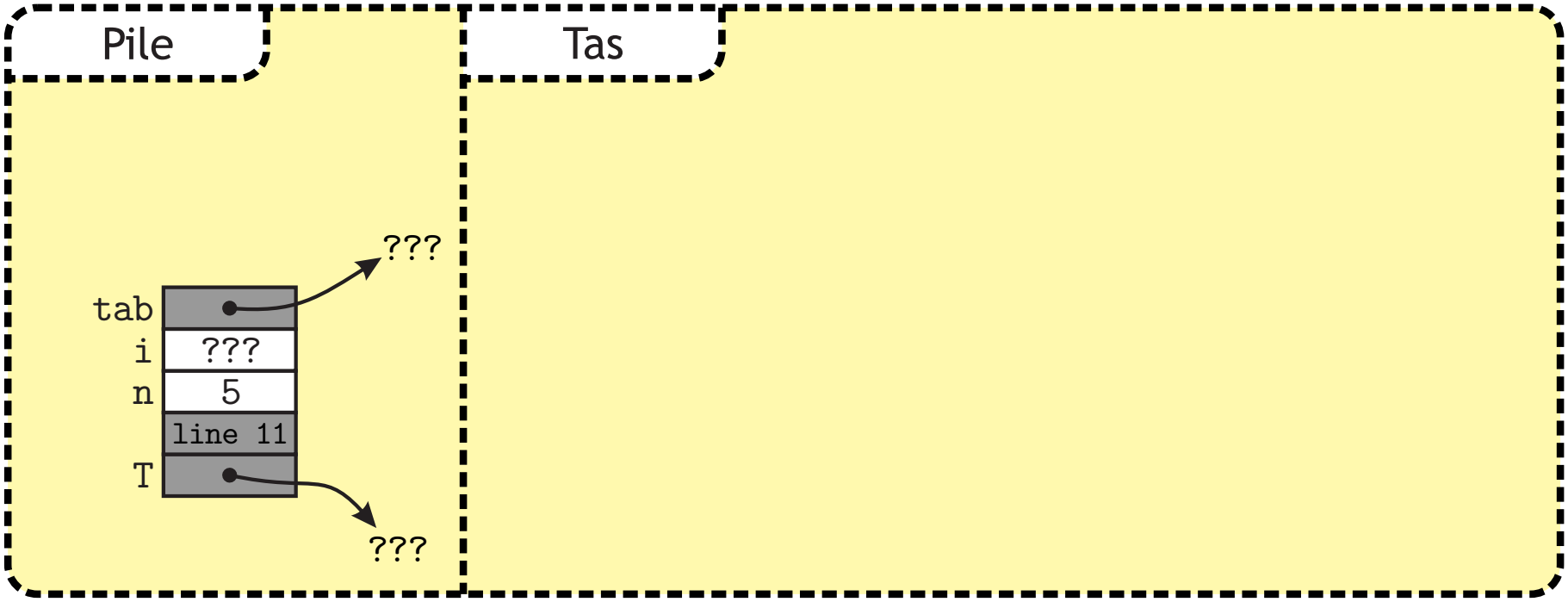
```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3    int* tab = (int*) malloc(
4                        n*sizeof(int));
5    for (i=0; i<n; i++) {
6      tab[i] = i;
7    }
8    return tab;
9  }
10 int main() {
11 ▶ int* T = init(5);
12   printf("%d\n", T[3]);
13   free(T);
14 }
```



Fonction retournant un tableau

Ce qui se passe en mémoire

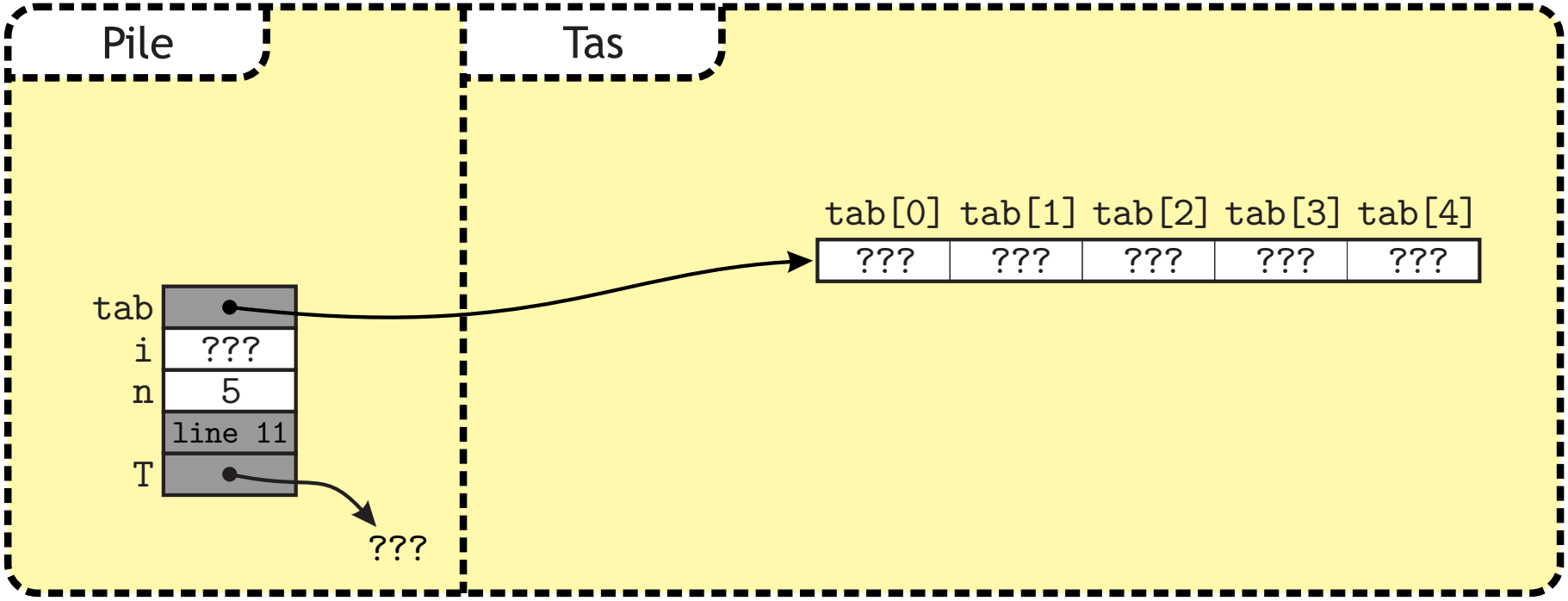
```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3    int* tab = (int*) malloc(
4                        n*sizeof(int));
5    for (i=0; i<n; i++) {
6      tab[i] = i;
7    }
8    return tab;
9  }
10 int main() {
11 ▶ int* T = init(5);
12   printf("%d\n", T[3]);
13   free(T);
14 }
```



Fonction retournant un tableau

Ce qui se passe en mémoire

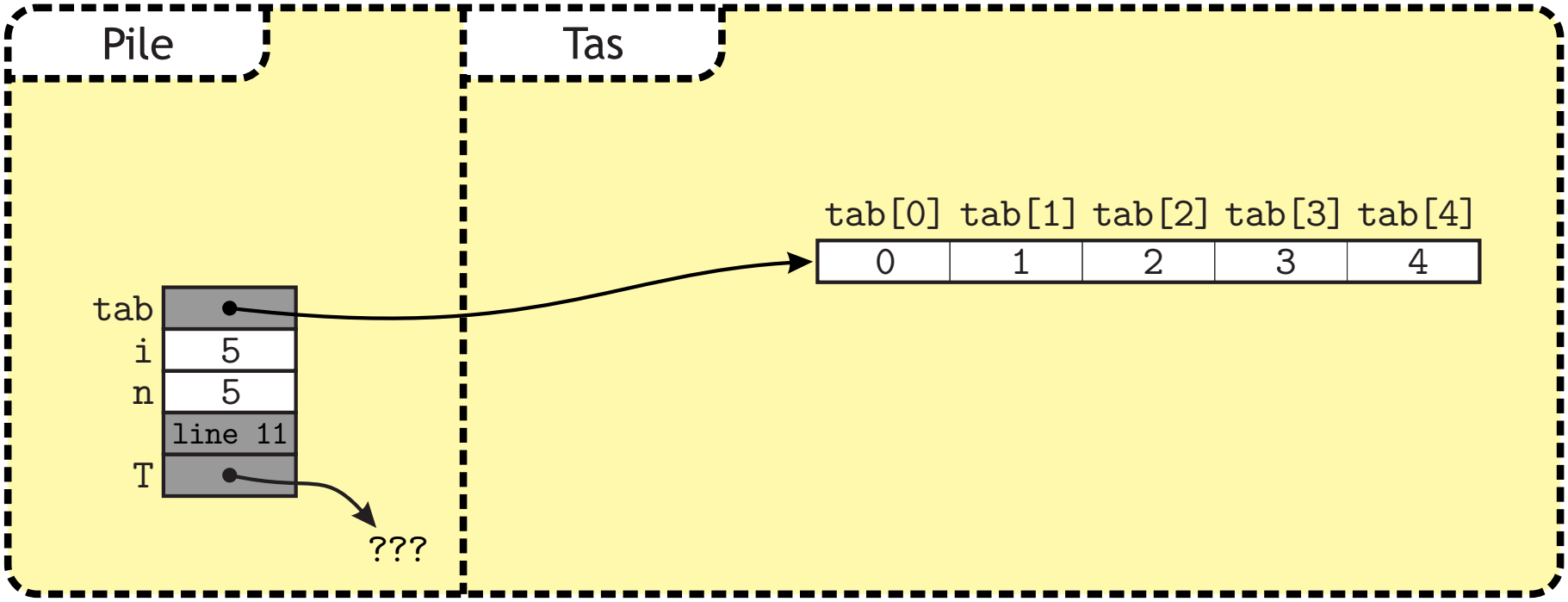
```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3  ▶ int* tab = (int*) malloc(
4                        n*sizeof(int));
5    for (i=0; i<n; i++) {
6      tab[i] = i;
7    }
8    return tab;
9  }
10 int main() {
11   int* T = init(5);
12   printf("%d\n", T[3]);
13   free(T);
14 }
```



Fonction retournant un tableau

Ce qui se passe en mémoire

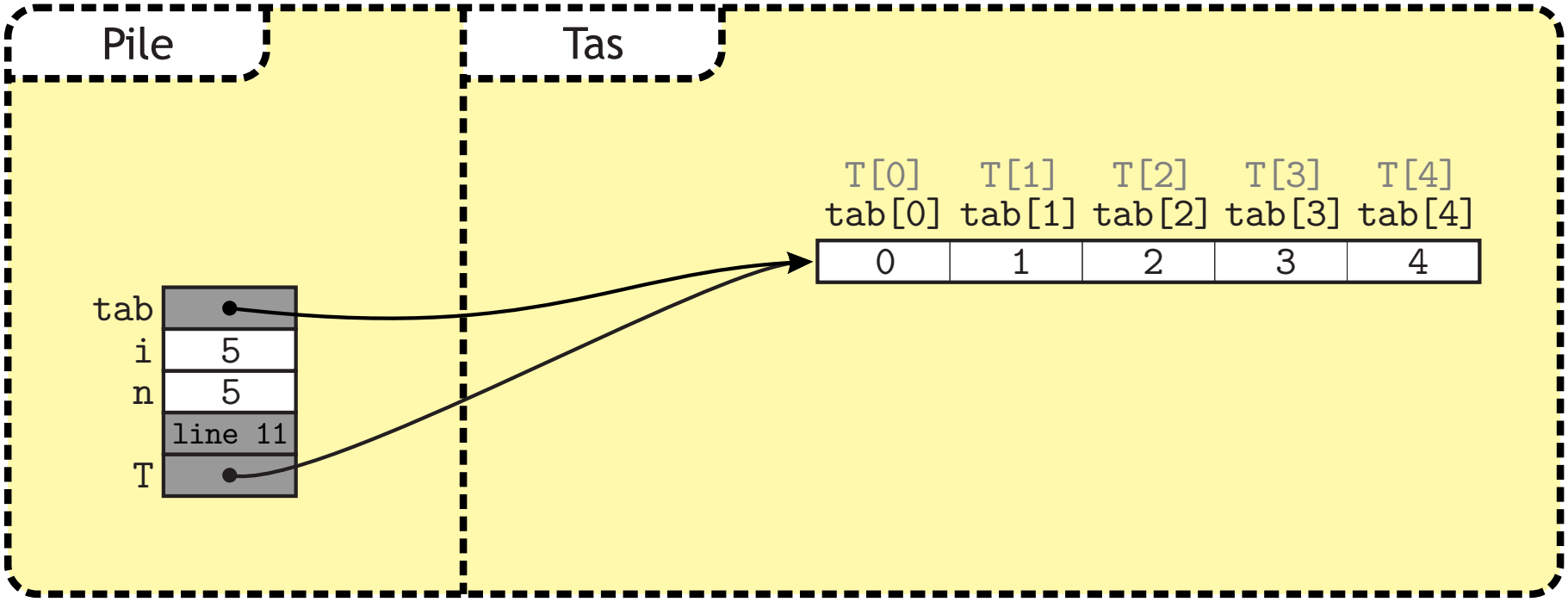
```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3    int* tab = (int*) malloc(
4                        n*sizeof(int));
5  ▶ for (i=0; i<n; i++) {
6      tab[i] = i;
7    }
8    return tab;
9  }
10 int main() {
11   int* T = init(5);
12   printf("%d\n", T[3]);
13   free(T);
14 }
```



Fonction retournant un tableau

Ce qui se passe en mémoire

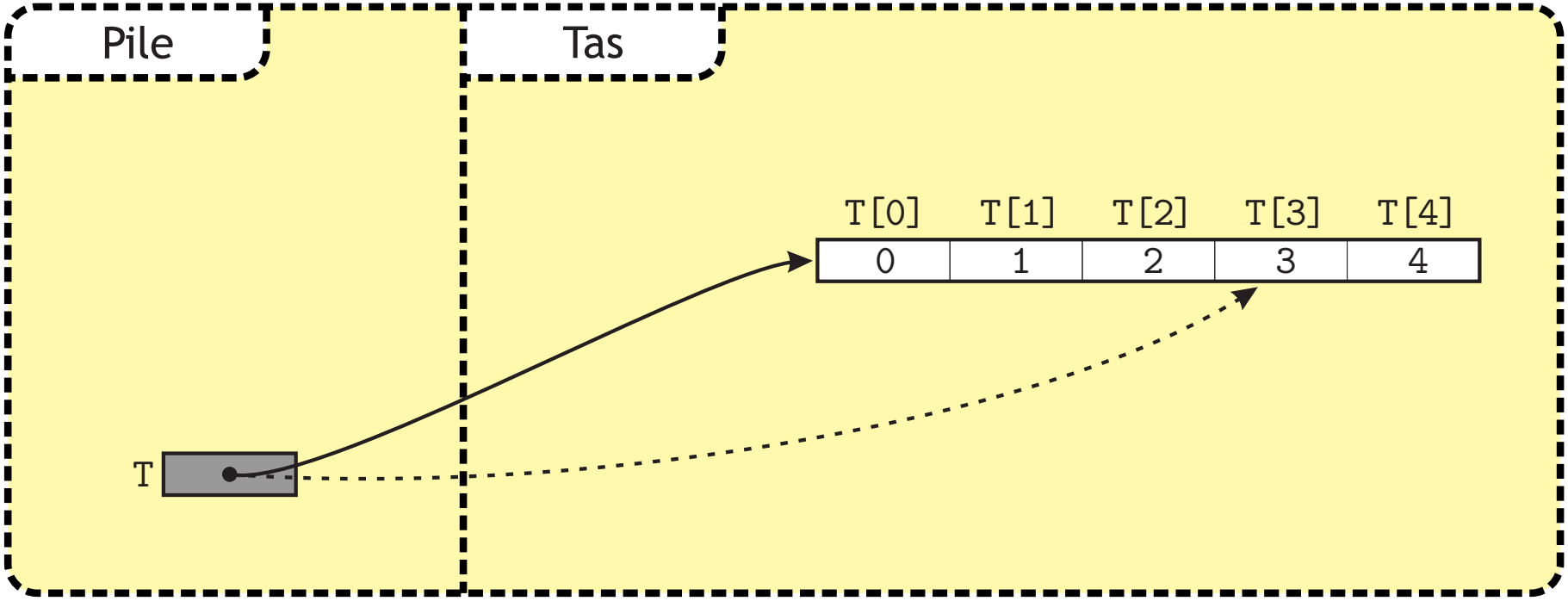
```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3    int* tab = (int*) malloc(
4                        n*sizeof(int));
5    for (i=0; i<n; i++) {
6      tab[i] = i;
7    }
8  ▶ return tab;
9  }
10 int main() {
11   int* T = init(5);
12   printf("%d\n", T[3]);
13   free(T);
14 }
```



Fonction retournant un tableau

Ce qui se passe en mémoire

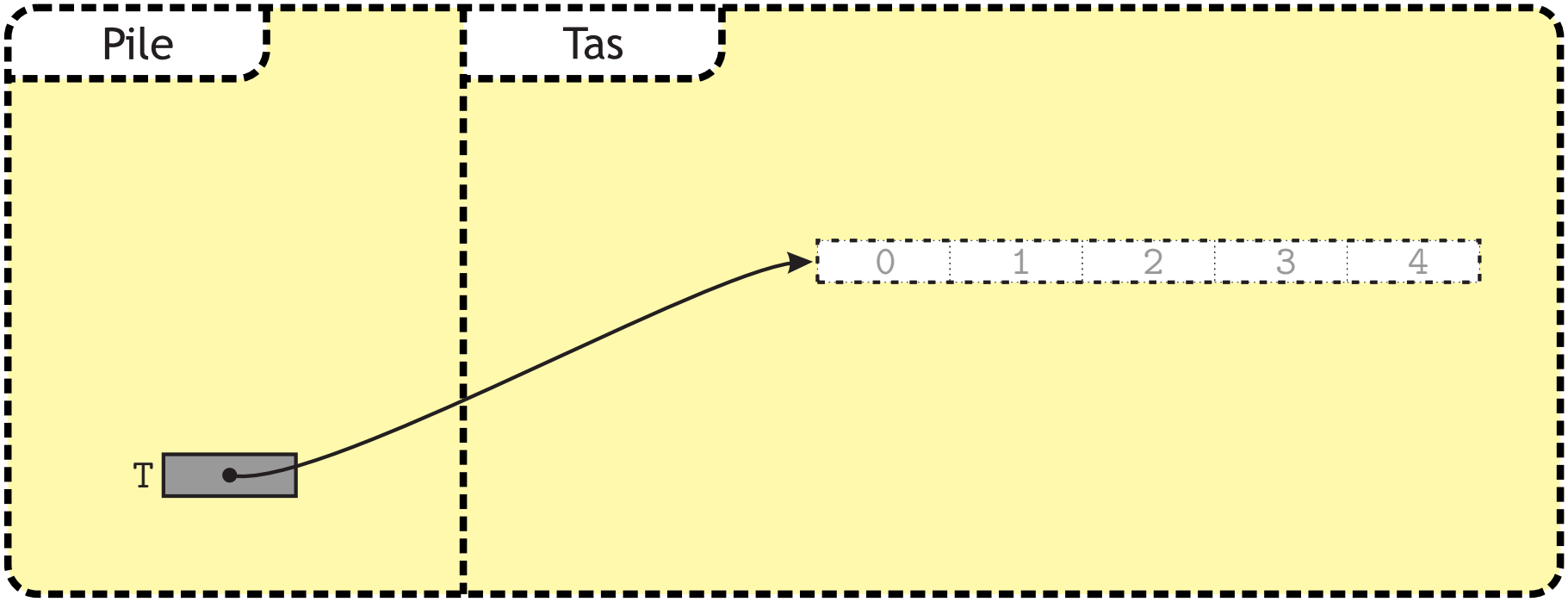
```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3    int* tab = (int*) malloc(
4                        n*sizeof(int));
5    for (i=0; i<n; i++) {
6      tab[i] = i;
7    }
8    return tab;
9  }
10 int main() {
11   int* T = init(5);
12 ▶ printf("%d\n", T[3]);
13   free(T);
14 }
```



Fonction retournant un tableau

Ce qui se passe en mémoire

```
1  int* init(int n) {
2    int i;
3    int* tab = (int*) malloc(
4                        n*sizeof(int));
5    for (i=0; i<n; i++) {
6      tab[i] = i;
7    }
8    return tab;
9  }
10 int main() {
11   int* T = init(5);
12   printf("%d\n", T[3]);
13 ▶ free(T);
14 }
```



Pointeurs de fonctions

- En C il est possible de passer une fonction en argument à une autre, ou de faire un tableau de fonctions
  - on utilise alors un pointeur de fonction.
- Le pointeur de fonction est un pointeur comme un autre, mais qui pointe vers une adresse mémoire où se trouve du code exécutable,
  - son type dépend de la signature de la fonction.

```
1 int add(int a, int b) { return a+b; }
2 int mul(int a, int b) { return a*b; }
3 int main() {
4   int (*func) (int, int) = &add;  // déclaration
5   printf("%d\n", func(3,5));       // affiche 8
6   func = &mul;
7   printf("%d\n", func(3,5));       // affiche 15
8   return 0;
9 }
```

Pointeurs de fonctions

Exemple de fonction passée en argument

```
1  int max(void* tab, int n, int elem_size, int (*comp) (void*, void*)) {
2    int i;
3    int max_pos = 0;
4    for (i=1; i<n; i++) {
5      if (comp(tab+(max_pos*elem_size), tab+(i*elem_size)) < 0) {
6        max_pos = i;
7      }
8    }
9    return max_pos;
10 }
11 int double_comp(double* a, double* b) {
12   if ((*a) > (*b)) { return 1; }
13   if ((*a) < (*b)) { return -1; }
14   return 0;
15 }
16 int main() {
17   double tab[5] = {1.5, 3.2, 7.9, 12.3, -5.2};
18   printf("%d\n", max(tab, 5, sizeof(double),
19                                    (int (*) (void*,void*)) &double_comp));
20   return 0;
21 }
```

Ce qu'il faut retenir de ce cours

- Les pointeurs ne sont rien d'autres que des adresses mémoires
  - ce n'est pas compliqué à manipuler, mais il faut bien garder en tête ce qu'il se passe dans la mémoire,
  - l'étoile * a plusieurs significations en C,
    - → pensez à mettre des parenthèses pour éviter les ambiguïtés.

- Les pointeurs ont de très nombreuses utilisations :
  - tableaux et tableaux de dimension supérieure,
  - passage d'arguments de fonctions par adresse
    - → permet de modifier un argument de la fonction
  - allocation de zones mémoires
    - → vous faites ce que vous voulez dans une zone allouée.

⚠ Pensez à toujours initialiser vos pointeurs à `NULL` et à utiliser des `free` pour libérer la mémoire.