Langage C

ENSTA - TC 1ère année

François Pessaux

U2IS

2016-2017

francois.pessaux@ensta-paristech.fr

Organisation mémoire et pointeurs

Organisation de la mémoire

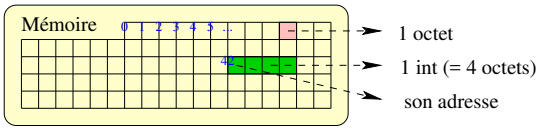
- Pour le processeur : mémoire = grand tableau fini d'octets :
  - de taille 2^{32} sur machine 32 bits,
  - de taille 2^{64} sur machine 64 bits.
- Tout le *« tableau »* n'est pas utilisable :
  - Une partie de la mémoire est utilisée par les autres processus.
  - Certaines zones sont réservées au système.
  - Certaines zones peuvent être restreintes en accès (lecture/écriture/exécution).
  - Certaines zones peuvent être *« non connectées »* (pas de mémoire physique présente).

Écologie et politesse en mémoire

- Ressource en quantité finie ⇒ gestion de ressource :
  - En demander au besoin : allocation.
  - La restituer : libération (*« désallocation »*).
- Arbitrage et autorisation d'accès gérés par le système d'exploitation (*« OS »*).
- Allocation et libération via des appels systèmes.
- Accès à une zone non attribuée au processus → *« segmentation fault »*.
- ⇒ Toujours avoir demandé la mémoire que l'on veut utiliser.

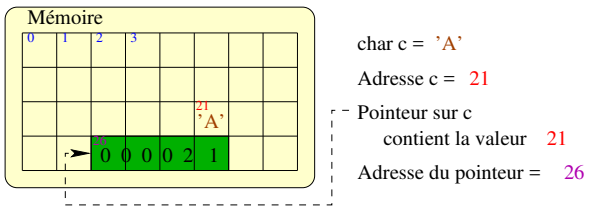
Adresse mémoire

- Les informations, octets, `int`'s, chaînes sont stockées en mémoire.
- ⇒ Sont logées à un *« certain endroit »* de la mémoire : adresse.
- Adresse ≈ index de l'info dans le grand *« tableau »* de la mémoire.



Adresses et pointeurs (1)

- Une adresse est une information comme une autre.
- ⇒ Besoin de la mémoriser, manipuler et d'accéder à son contenu.
- Une valeur *« adresse »* est un pointeur.
- Une variable contenant une adresse est de type pointeur.



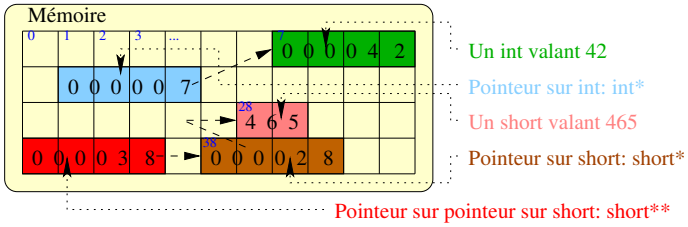
- À une adresse se trouve une donnée d'un certain type.
  ▶ ⇒ Un pointeur est une adresse avec un type associé : le type des données stockées à cette adresse.

Adresses et pointeurs (2)

- Un pointeur désigne un point dans la mémoire :
  - emplacement d'une donnée,
  - ou emplacement du début d'une zone contiguë de données.

- Déclaration de pointeurs en C :

```
int *a ;        // a est un pointeur vers un/des int.
short *b ;      // b est un pointeur vers un/des short (int).
short **c ;     // c est un pointeur vers un/des short*.
```



Adresses et pointeurs (3)

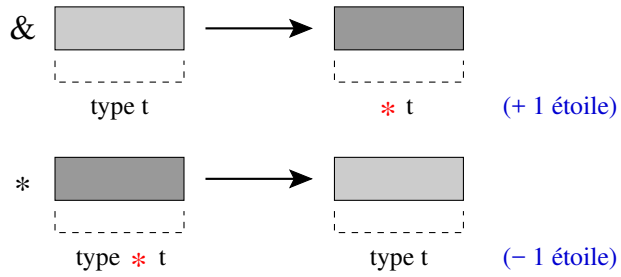
- Chaque variable possède une adresse.
- Obtenir l'adresse d'une variable : opérateur préfixe &.
- Accéder au contenu d'une adresse : opérateur préfixe*.

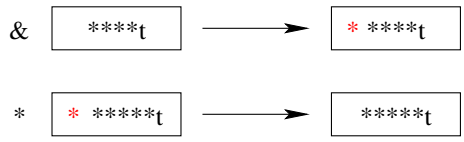
```
int a ;         // a est un int.
int *b ;        // b est un pointeur vers un int.
b = &a ;        // b contient l'adresse de a -> Pointeur vers a.
*b = 5 ;        // On stocke 5 dans *b. -> Dans a.
a = 1 + *b ;    // On stocke dans a 1 + la valeur contenue à
                // l'adresse b. -> a = a + 1.
```

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

ATTENTION : avoir un pointeur sous la main **ne** signifie **pas** avoir le droit de manipuler la mémoire à l'adresse contenue par ce pointeur !

Adresses et pointeurs (4)





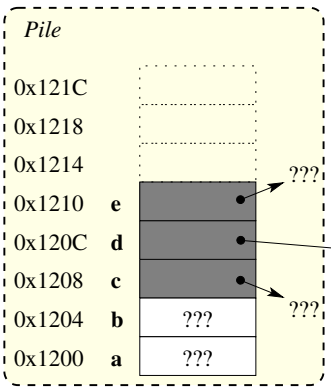
Pourquoi un pointeur doit avoir un type (1)

- Une adresse est juste un entier positif.
- En mémoire on stocke des infos d'un certain type :
  - ⇒ donc d'une certaine forme.
- L'accès à une info dépend de la forme de cette info.
  - ⇒ L'accès à une info par un pointeur dépend de la forme de l'info contenue à cette adresse.
- ⇒ Un pointeur doit spécifier l'adresse de *« quoi »* il est.
- Les pointeurs sont donc types
  - `char*` : pointeur sur `char`.
  - `int**` : pointeur sur `int*`.

Pourquoi un pointeur doit avoir un type (2)

- Quand on lit la valeur de `*v` :
  - 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.
- Les tableaux sont désignés par l'adresse de leur 1ère case.
  - `t[i]` n'est pas le $i^{\text{ème}}$ octet, mais le $i^{\text{ème}}$ élément.
  - ⇒ Il faut savoir de combien d'octets avancer ($i \times 4$, $i \times 8 \ldots$)
  - ⇒ Nécessaire de connaître la taille d'un élément → donc son type.
- Rappel (cours 4) : accès au champ d'un pointeur de type `struct` :
  - `struct foo_t { int ch ; };`
  - `struct foo_t my_foo ;`
  - Accès au champ `ch` par notation pointée : `my_foo.ch`
  - `struct foo_t *my_pfoo ;`
  - Accès au champ `ch` par notation fléchée : `my_pfoo->ch`
  - Équivalence : `my_pfoo->ch` = `(*my_pfoo).ch`

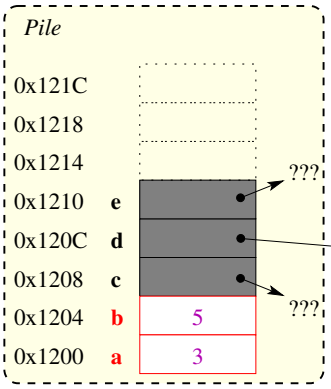
Exemple de manipulations de pointeurs (1)




```
int main ()
{
▶ int a, b, *c, *d, **e ;
  a = 3 ;   b = 5 ;
  c = &b ;  d = &a ;
  *c = 4 ;
  *d = (*c) + 3 ;
  e = &c ;
  **e = *d ;
  *e = &a ;
  ...
}
```

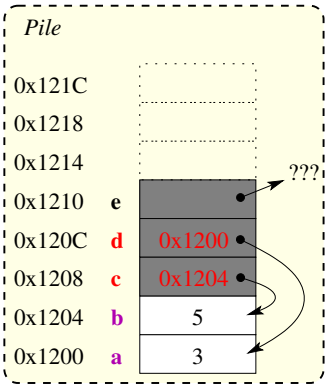
- Chaque case mémoire a une adresse.
- Par habitude et simplicité, adresses écrites en hexadécimal.

Exemple de manipulations de pointeurs (2)




```
int main ()
{
  int a, b, *c, *d, **e ;
► a = 3 ;  b = 5 ;
  c = &b ;  d = &a ;
  *c = 4 ;
  *d = (*c) + 3 ;
  e = &c ;
  **e = *d ;
  *e = &a ;
  ...
}
```

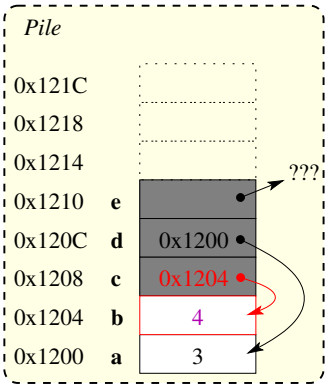

Exemple de manipulations de pointeurs (3)




```
int main ()
{
  int a, b, *c, *d, **e ;
  a = 3 ;   b = 5 ;
► c = &b ; d = &a ;
  *c = 4 ;
  *d = (*c) + 3 ;
  e = &c ;
  **e = *d ;
  *e = &a ;
  ...
}
```

- c et d contiennent les adresses de b et a.
  - Ils « pointent » vers b et a.

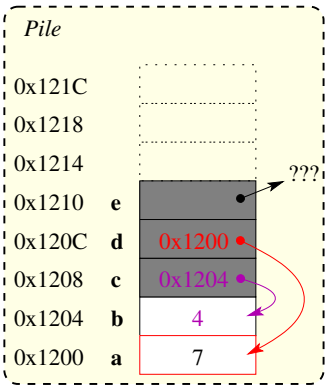
Exemple de manipulations de pointeurs (4)




```
int main ()
{
  int a, b, *c, *d, **e ;
  a = 3 ;   b = 5 ;
  c = &b ;  d = &a ;
► *c = 4 ;
  *d = (*c) + 3 ;
  e = &c ;
  **e = *d ;
  *e = &a ;
  ...
}
```

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

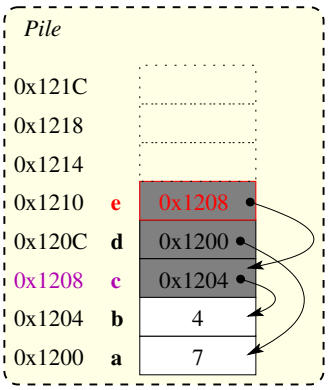
Exemple de manipulations de pointeurs (5)




```
int main ()
{
   int a, b, *c, *d, **e ;
   a = 3 ;    b = 5 ;
   c = &b ;   d = &a ;
   *c = 4 ;
►  *d = (*c) + 3 ;
   e = &c ;
   **e = *d ;
   *e = &a ;
   ...
}
```

- À gauche du "=" : case mémoire où ira le résultat.
- À droite du "=" : on évalue, i.e. on suit le pointeur c et on regarde ce qui est dans la case.

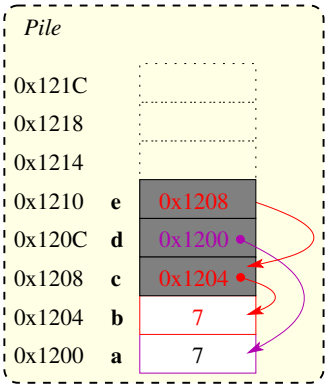
Exemple de manipulations de pointeurs (6)




```
int main ()
{
   int a, b, *c, *d, **e ;
   a = 3 ;    b = 5 ;
   c = &b ;   d = &a ;
   *c = 4 ;
   *d = (*c) + 3 ;
►  e = &c ;
   **e = *d ;
   *e = &a ;
   ...
}
```

- e pointe vers c.

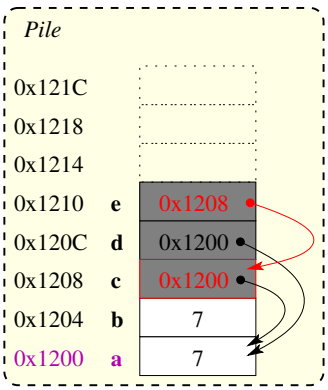
Exemple de manipulations de pointeurs (7)




```
int main ()
{
   int a, b, *c, *d, **e ;
   a = 3 ;    b = 5 ;
   c = &b ;   d = &a ;
   *c = 4 ;
   *d = (*c) + 3 ;
   e = &c ;
►  **e = *d ;
   *e = &a ;
   ...
}
```

- Double étoile : on suit deux pointeurs à la suite
- I.e. pointeur sur un pointeur.
- I.e. variable qui contient (l'adresse d'une variable qui contient (l'adresse d'une variable)).

Exemple de manipulations de pointeurs (8)




```
int main ()
{
  int a, b, *c, *d, **e ;
  a = 3 ;   b = 5 ;
  c = &b ;  d = &a ;
  *c = 4 ;
  *d = (*c) + 3 ;
  e = &c ;
  **e = *d ;
▶ *e = &a ;
  ...
}
```

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

Allocation et libération de mémoire

Statique versus dynamique (1)

- Allocation statique : effectuée à la compilation.
- Ex : variables entières déclarées, tableaux de taille fixe :
  - `int v = 42 ;`
  - `char s[10] ;`
  - Dans la pile (variable locale) ou dans le tas/section-data (variable globale).
- Allocation statique locale : automatiquement libérée en fin de fonction.
  - ▶ Comment faire si on veut « *faire durer* » la donnée plus longtemps ?

Statique versus dynamique (2)

- Parfois, mémoire nécessaire connue seulement lors de l'exécution :
  - Lecture du contenu d'un fichier : taille des fichiers variable.
  - Résolution d'un système d'équations : nombre d'inconnues à la demande de l'utilisateur.
- Changer le programme manuellement ⇒ recompiler ?
- ⇒ Inefficace, non-maintenable, inacceptable.
- On demande de la mémoire selon les besoins à l'exécution.
  - Zone allouée retournée désignée par son adresse de début.

Allocation dynamique

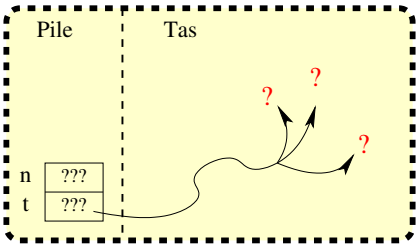
- Allocation de n'importe quoi : entier, entiers (tableau), `struct`, etc.
- Tableau dynamique C ≡ type pointeur dont la valeur est l'adresse de début du tableau.
  - `t[0]` ≡ `*t`.
  - `&(t[0])` ≡ `t`.
- On déclare un tableau comme un pointeur.
  - Le pointeur est alors non initialisé (pointe *« n'importe où »*).
  - On alloue de la mémoire (fonction `malloc`) ⇝ une adresse ...
  - ... et on enregistre cette adresse dans le pointeur.

Allocation dynamique : `malloc`

- `malloc` : `int` → `void*`
- Argument : nombre d'octets demandés.
- Résultat : adresse du début de la zone octroyée.
- `void*` : pointeur sans type
  - Implicitement compatible avec autres types de pointeurs.
  - ⇒ On ne le *« cast »* pas !
- Si mémoire non disponible : résultat = pointeur `NULL`.
- ⇒ Toujours tester la réussite de l'allocation !
  - `if (ptr == NULL)` *gérer l'erreur*
  - Sinon écriture dans une zone non allouée et *« segmentation fault »* à la clef.

Pas à pas (1)

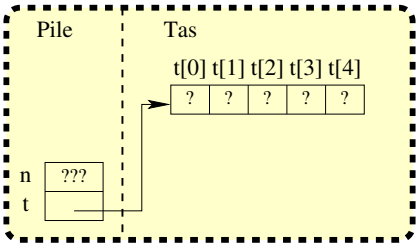
```
#include <stdio.h>  // printf
#include <stdlib.h> // malloc, free
int main ()
{
  float *t ;
► int n ;
  t = malloc (5 * sizeof (float)) ;
  if (t == NULL) exit (-1) ;
  t[2] = 3.14159 ;
  printf ("%f\n", t[2]) ;
  free (t) ;
  return (0) ;
}
```



- Variables locales `t` et `n` allouées sur la pile...
- ...mais pas initialisées.
- ⇒ Pointeur `t` désigne une adresse quelconque...
  - ...et vraisemblablement invalide.

Pas à pas (2)

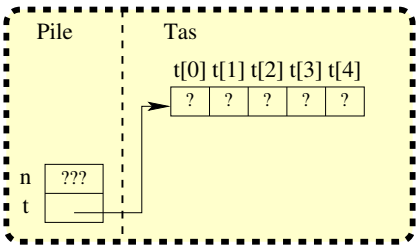
```
#include <stdio.h>  // printf
#include <stdlib.h> // malloc, free
int main ()
{
  float *t ;
  int n ;
► t = malloc (5 * sizeof (float)) ;
  if (t == NULL) exit (-1) ;
  t[2] = 3.14159 ;
  printf ("%f\n", t[2]) ;
  free (t) ;
  return (0) ;
}
```



- `sizeof` : construction du compilateur, → taille d'une donnée en octets.
  - N'est pas une fonction.
  - Taille élémentaire : dépend de plein de choses (architecture, modèle de compilation, etc.).
- Appel à la fonction d'allocation de mémoire `malloc`.
- Assignation du résultat au pointeur `t`.
- ⇒ `t` désormais initialisé...
- ...Mais à quoi ?

Pas à pas (3)

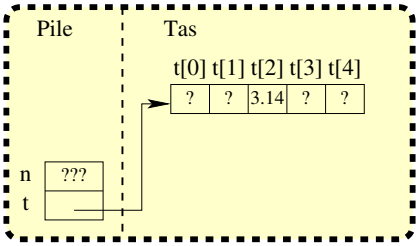
```
#include <stdio.h>  // printf
#include <stdlib.h> // malloc, free
int main ()
{
  float *t ;
  int n ;
  t = malloc (5 * sizeof (float)) ;
► if (t == NULL) exit (-1) ;
  t[2] = 3.14159 ;
  printf ("%f\n", t[2]) ;
  free (t) ;
  return (0) ;
}
```



- Si pas de mémoire octroyée, pointeur retourné alors `NULL`.
- Alors pas possible de continuer (ou gérer l'erreur *« comme il se doit »*).
- `NULL` désigne une adresse interdite en lecture/écriture
  - ⇒ *« Segmentation Fault »*.

Pas à pas (4)

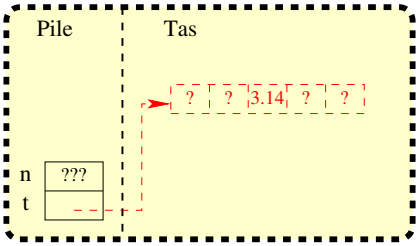
```
#include <stdio.h>  // printf
#include <stdlib.h> // malloc, free
int main ()
{
  float *t ;
  int n ;
  t = malloc (5 * sizeof (float)) ;
  if (t == NULL) exit (-1) ;
►t[2] = 3.14159 ;
  printf ("%f\n", t[2]) ;
  free (t) ;
  return (0) ;
}
```



- Écriture dans une partie de la mémoire allouée.
- Autorisé puisque la mémoire « *nous* » appartient.

Pas à pas (5)

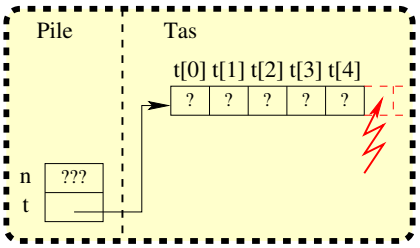
```
#include <stdio.h>  // printf
#include <stdlib.h> // malloc, free
int main ()
{
  float *t ;
  int n ;
  t = malloc (5 * sizeof (float)) ;
  if (t == NULL) exit (-1) ;
  t[2] = 3.14159 ;
  printf ("%f\n", t[2]) ;
►free (t) ;
  return (0) ;
}
```



- Rendre la mémoire plus utilsée au système → éviter la pénurie.
- N'efface pas la mémoire.
- N'efface pas le pointeur.
- Révoque simplement l'autorisation d'accès.
- ⇒ On a encore les moyens « *techniques* » d'y accéder...
- ...mais « *Segmentation Fault* » guette.

Pas à pas ($5\frac{1}{2}$)

```
#include <stdio.h>  // printf
#include <stdlib.h> // malloc, free
int main ()
{
  float *t ;
  int n ;
  t = malloc (5 * sizeof (float)) ;
  if (t == NULL) exit (-1) ;
►t[5] = 3.14159 ;
  printf ("%f\n", t[2]) ;
  free (t) ;
  return (0) ;
}
```



- Tentative d'accès à la case 5 ($6^{\text{ème}}$ « *case* »)...
- Accès en dehors de la zone allouée.
- Peut « *appartenir* » à un autre (système, processus ...)
- ⇒ « *Segmentation Fault* » à la clef !
- Mais ...c'est pas forcément immédiat ! ☹
  - ► Bugs difficiles à trouver et rendre reproductibles.

Libération de mémoire

- Fonction `free` : `void*` → `void`
  - Argument : adresse de début de la zone à libérer.
  - Résultat : néant.
- À chaque `malloc` doit correspondre 1 et 1 seul `free`.
- ⇒ La libération de mémoire est explicite.
- Taille de la zone connue par le système : pas besoin de la spécifier.
- Libérer au plus tôt : inutile de consommer de la mémoire inutilement.
  ▶ → Pourra être ré-attribuée à quelqu'un d'autre.
- Ne pas libérer *« trop »* tôt.
  ▶ Tant qu'une zone mémoire accessible y fait référence, la zone allouée ne doit pas être libérée.

Allocation dynamique et erreurs courantes

- Ne pas initialiser un pointeur (i.e. ne pas allouer via `malloc`).
- Accéder en dehors d'une zone allouée (débordement).
- Faire `free` dans une boucle (désallocations multiples de la zone).
- Faire `free` avec une adresse non allouée dynamiquement.
- Faire `free` avec une adresse qui n'est pas le début de la zone.
- *« Perdre »* l'adresse d'une zone allouée :

```
int *p = malloc (...) ;
...   // On ne mémorise pas la valeur de p ailleurs.
return (..) ;
```

  - → Impossible de désallouer.
  - ⇒ Fuites mémoire et dégradation de performances avec le temps.