Programmation impérative / procédurale

- Style de programmation offert par la plupart des langages de programmation (machine, assembleur, FORTRAN, Algol, SIMULA, C/C++, Pascal, Ada, Java, Lisp, Scheme, ML, ...)
- Basé sur le modèle d'une **machine**; le programme indique la **séquence d'opérations** que la machine doit effectuer pour faire le calcul
- Déf: un **point de contrôle** c'est un emplacement du programme entre deux opérations

```
begin  ! programme SIMULA ;
   integer x, y;
(1) x := inint;
(2) y := inint;
(3) x := x+y*y;
(4) outint (x, 0);
(5) end;
```

- Note: dépendant du point de vue certains énoncés du programme peuvent donner lieu à plus d'un point de contrôle si ils font plus qu'une opération (p.e. `x:=inint;`)

Exécution d'un programme

- Déf: l'**état** de l'exécution d'un programme (si on suppose une seule entrée et sortie et pas d'appel de procédure) =
  1. **point de contrôle** où se trouve l'exécution
  2. **contenu** de toutes les variables et structures de données
  3. partie de l'**entrée** qui reste à lire et **sortie** produite jusqu'à date

```
begin  ! programme SIMULA ;
   integer x, y;
(1) x := inint;
(2) y := inint;
(3) x := x+y*y;
(4) outint (x, 0);
(5) end;
```

EXÉCUTION

pt.	variables	entrée	sortie
1	x=? y=?	1 2	
2	x=1 y=?	2	
3	x=1 y=2		
4	x=5 y=2		
5	x=5 y=2		5

- L'état change après l'exécution de chaque opération (revenir à un état précédent => boucle infinie)
- L'**ordre des opérations** est important

```
y := inint; ! ce programme n'est pas équivalent ;
x := inint;
x := x+y*y;
outint (x, 0);
```


Énoncés de contrôle

- Normalement, après l'exécution d'un énoncé, le point d'exécution se trouve juste avant le prochain énoncé (i.e. exécution **séquentielle**)
- Pour obtenir un ordre d'exécution autre que séquentiel, il faut utiliser des **énoncés de contrôle**
- Exemple:

```
(1) if x < 0 then
       (2) x := 0
    else
       (3) x := x*2;
(4)
```

L'ordre d'exécution sera 1-2-4 ou 1-3-4 dépendant de la valeur de la variable `x`

Énoncé de contrôle "goto"

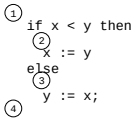
- Énoncé de contrôle le plus primitif; correspond directement avec les instructions de branchement en langage machine; offert par FORTRAN, SIMULA, C, Pascal, ...
- Change le point de contrôle de façon arbitraire
- Destination du `goto` indiqué à l'aide d'une **étiquette**

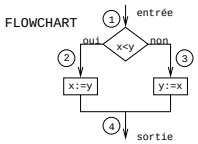
```
       x := 1;  ! programme SIMULA ;
       goto fin;
debut: x := x*2;
fin:   if x<10 then goto debut;
       outint (x, 0);
```

- Problème: difficile de comprendre un programme à base de `goto` car la séquence d'opérations obtenue n'est pas évidente
- L'utilisation abusive de `goto` mène à des programmes incompréhensibles (i.e. programmes **spaghetti**)

Programmation structurée

- Afin d'éviter le spaghetti les langages modernes prônent la **programmation structurée**
  - idée: la structure syntaxique d'un programme doit aider à comprendre ce que fait le programme (en particulier au niveau du séquencement des opérations)
- Déf: le **flux de contrôle** c'est la progression du point d'exécution pendant l'exécution (la séquence de points de contrôle atteints)
- Déf: un programme est **structuré** si le flux de contrôle est directement lié à sa structure syntaxique
  - chaque énoncé (simple ou composé) a **un seul** point de contrôle d'entrée et **un seul** point de contrôle de sortie





Énoncé "bloc"

- Exécution séquentielle d'un groupe d'énoncés
- Exemple en Pascal: `begin x:=x+1; y:=y+1 end`
- Exemple en C: `{ int t; t=x; x=y; y=t; }`
- Certains langages (p.e. C et SIMULA) permettent d'introduire des variables **locales** au bloc (en général au début seulement, C++ et Java sont des exceptions notables: `{ x++; int y=x/2; z=y*y; }`)
- Le point-virgule est un **séparateur** d'énoncés dans certains langages (p.e. Pascal et SIMULA) et un **terminateur** d'énoncés dans d'autres (p.e. C, C++ et Java)
  - En Pascal ce bloc a 3 énoncés:

```
begin x:=x+1; y:=y+1; end   (* 3ème = énoncé vide *)
```

  - En Pascal ceci est illégal:

```
if x < y then
  x := y;
else        (* erreur: else inattendu *)
  y := x;
```

  - ";" comme terminateur est plus intuitif

Énoncé conditionnel (1)

- La plupart des langages offrent deux formes:
  - `if` <*expr*> `then` <*énoncé*>
  - `if` <*expr*> `then` <*énoncé*> `else` <*énoncé*>
- En Modula-2, le `IF` est terminé par un `END`, ce qui n'est pas très esthétique pour les cascades de `IF`s:

```
(* sans ELSIF *)

IF c1 THEN
  e1
ELSE
  IF c2 THEN
    e2
  ELSE
    IF c3 THEN
      e3
    ELSE
      e4
    END
  END
END
```

```
(* avec ELSIF *)

IF c1 THEN
  e1
ELSIF c2 THEN
  e2
ELSIF c3 THEN
  e3
ELSE
  e4
END
```

- Syntaxe Modula-2 (EBNF):
  `IF` <*expr*> `THEN` <*séq_énoncés*>
  { `ELSIF` <*expr*> `THEN` <*séq_énoncés*> }
  [`ELSE` <*séq_énoncés*>]
  `END`

Énoncé conditionnel (2)

- Certains langages (p.e. SIMULA, C, C++ et Java) offrent également des expressions conditionnelles:
  - SIMULA: `if` <*expr1*> `then` <*expr2*> `else` <*expr3*>
  - C/C++/Java: <*expr1*> `?` <*expr2*> `:` <*expr3*>
- Exemple, calcul de la valeur absolue de `x`:

```
x := if x<0 then -x else x;  ! SIMULA ;

x = (x<0) ? -x : x;          /* C */
```

- En C, toute expression est aussi un énoncé (en particulier C traite <*var*>=<*expr*> comme une expression)
- Cela permet d'utiliser les opérateurs "&&", "||" et "," pour faire des traitements conditionnels:

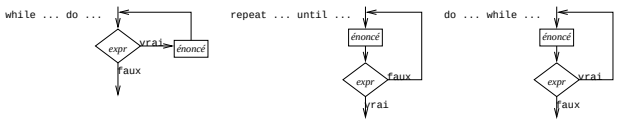
```
rappel:      X && Y  -->  0 si X==0 sinon Y!=0
             X || Y  -->  1 si X!=0 sinon Y!=0
             X , Y   -->  Y  (après avoir évalué X)

x<0 && (x=-x);         /* x = abs (x); */

x==5 || (x=y=0, z=1);  /* if (x!=5) { x=0; y=0; z=1; } */
```

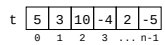
Énoncés `while` et `repeat`

- Nombre d'itérations **pas connu à l'avance**
- Pascal: `while` <*expr*> `do` <*énoncé*>
  - <*expr*> évaluée **avant** chaque itération et après dernière itération
  - ≥ 0 itérations
- Pascal: `repeat` <*séq_énoncés*> `until` <*expr*>
  - <*expr*> évaluée **après** chaque itération
  - ≥ 1 itérations
  - équivalent:
    <*séq_énoncés*>;
    `while not` <*expr*> `do begin` <*séq_énoncés*> `end;`
  - variante C: `do` <*énoncé*> `while ( `<*expr*>` );`



Énoncé `break` de C

- `break;` => quitter immédiatement la boucle courante
- Exemple: imprimer la première valeur négative dans un tableau `t` d'entiers de longueur `n`



1.
```
i = 0;
while (i < n && t[i] >= 0) i++;
if (i < n) printf ("%d", t[i]);
/* pas facile de se convaincre que ça marche */
```

2.
```
for (i=0; i<n; i++)
  if (t[i] < 0)
    { printf ("%d", t[i]); break; }
/* plus lisible car isole le cas exceptionnel */
```

3.
```
t[n] = -1;  /* placer une sentinelle */
i = 0;
while (t[i] >= 0) i++;
if (i < n) printf ("%d", t[i]);
/* lisible et rapide */
```


Énoncé `exit` de Ada

- Le `break` de C ne s'appliquent qu'à **la boucle englobante la plus proche**

```
while (...)              /* boucle 1 */
  {
    while (...)          /* boucle 2 */
      {
        ... break; ...   /* sort de la boucle 2 */
      }
  }
```

- Ada permet de nommer les boucles et offre une variante de `break`:
  `exit` [<*nom_de_boucle*>] [`when` <*expr*>] `;`

```
boucle1:
  while x<10 loop                -- boucle 1
    ...
    boucle2:
      while x<5 loop             -- boucle 2
        ...
        if x<0 then exit end if; -- sort de la boucle 2
        exit when x<0;           -- sort de la boucle 2
        exit boucle1;            -- sort de la boucle 1
        exit boucle1 when x<0;   -- sort de la boucle 1
        ...
      end loop;
    ...
  end loop;
```


Énoncé `continue` de C

- `continue;` => passer immédiatement à la prochaine itération
- Exemple: copier l'entrée à la sortie en enlevant les lignes vides
  - sous UNIX, fin de ligne = caractère `'\n'`
  - idée: ne pas copier `'\n'` précédé d'un `'\n'` ou au début

```
int main (void)
{
  int c, fdl;
  fdl = TRUE;
  while ((c = getchar ()) != EOF)
    {
      if (c == '\n')
        {
          if (fdl) continue;
          fdl = TRUE;
        }
      else
        fdl = FALSE;
      putchar (c);
    }
  return 0;
}
```

Énoncé `return` de C et Ada

- `return;` => quitter immédiatement la procédure courante
- `return` <*expr*>`;` => quitter immédiatement la fonction courante
  - En Pascal, SIMULA et Modula-2 il faut terminer l'exécution du corps (après avoir affecté le résultat au nom de la fonction dans le cas d'une fonction)
- Exemple: obtenir la position dans un tableau ou se trouve un élément particulier

```
int position (int element)
{
  int i = 0;
  while (i < n)
    {
      if (t[i] == element) return i;
      i++;
    }
  return -1; /* indiquer échec */
}
```


Énoncé `loop` de Ada et Modula-3

- `loop` <*séq_énoncés*> `end loop;`
- Donne une boucle infinie, sauf si sortie prématurée (par exemple avec `exit`)
- Exemples:

```
-- Ada

loop
  exit when x > 10;
  x := x*2;
end loop;


loop
  x := x*2;
  exit when x > 10;
end loop;


loop
  x := read (f);
  x := x*x;
  exit when x > 10;
  write (x);
end loop;
```

```
(* en Pascal sans goto *)

while x <= 10 do
  x := x*2


repeat
  x := x*2
until x > 10


x := read (f);
x := x*x;
while x <= 10 do
  begin
    write (x);
    x := read (f);
    x := x*x
  end
(* duplication de code
   pas élégant *)
```


Énoncés de boucle défini (1)

- Nombre d'itérations **connu à l'avance**
- Pascal:
  `for` <*var*> `:=` <*expr1*> (`to` | `downto`) <*expr2*> `do` <*énoncé*>
  => les bornes doivent être de type entier ou énuméré
- Exemple: `for i := x+1 to x*x do writeln (i)`
- Une implantation possible de `for`:

```
(* cas ``to'' *)
LIMITE := <expr2>;
<var> := <expr1>;
while <var> <= LIMITE do
  begin
    <enoncé>;
    <var> := <var>+1
  end
```

```
(* cas ``downto'' *)
LIMITE := <expr2>;
<var> := <expr1>;
while <var> >= LIMITE do
  begin
    <enoncé>;
    <var> := <var>-1
  end
```


Énoncés de boucle défini (2)

- Pour permettre plus de liberté à l'implanteur du compilateur, en Pascal:
  - il est **interdit de modifier** <*var*> tant que la boucle n'est pas finie
  - la valeur de <*var*> est **indéfinie** à la sortie de la boucle
- Cela admet cette implantation qui est plus performante sur plusieurs machines:

```
(* cas ``to'' *)
LIMITE := <expr2>;      (* LIMITE et TEMP stockées dans *)
TEMP := <expr1>;        (* des registres (accès rapide) *)
while TEMP <= LIMITE do
  begin
    <var> := TEMP;
    <enoncé>;           (* modification de <var> ici ne *)
    TEMP := TEMP+1      (* changerais pas le nombre *)
  end                   (* d'itérations *)
```

- Note: à la fin du `for`:
  - Implantation 1: <*var*> = <*expr2*>+1 (si >=1 itérations) et <*expr1*> (si 0 itération)
  - Implantation 2: <*var*> = <*expr2*> (si >=1 itérations) et valeur avant le `for` (si 0 itération)

Énoncés de boucle défini (3)

- SIMULA:

  `for` <*var*> `:=` <*item*> { `,` <*item*> } `do` <*énoncé*>

  <*item*> ::= <*exp*> | <*exp1*> `step` <*exp2*> `until` <*exp3*>

- Exemple: `for i := 2, 3, 5 step 5 until 30 do f (i)`

- C: `for` ([<*exp1*>]; [<*exp2*>]; [<*exp3*>]) `do` <*énoncé*>

- Le `for` de C est approximativement équivalent à:

```
{ <exp1>; while (<exp2>) { <enoncé>; <exp3>; } }

/* <exp2> est remplacé par TRUE si absent */
/* en C++ <exp1> peut déclarer une variable locale */
```

  sauf qu'un `continue` saute à <*exp3*>

- Exemples:

```
for (i=1; i<5; i++) printf ("%d", i);     /* 1 2 3 4 */
for (i=1; i<9; i=i*2) printf ("%d", i);   /* 1 2 4 8 */
for (p=list; p!=NULL; p=p->next) ...;
for (int i=1; i<5; i++) printf ("%d", i); /* 1 2 3 4 */

for (;;)
  { if ((c = getchar ()) == EOF) break;
    putchar (c);
  }
```


Énoncés de boucle défini (4)

- Variations sémantiques:
  - **exécution du corps au moins une fois?** (FORTRAN=oui, en général=non)
  - **évaluation unique des bornes?** (Pascal=oui, C=non, SIMULA=oui sauf pour <*exp3*> après le `until`)
  - **progression de la variable de contrôle?** (Pascal=pas de +1 ou -1, C=pas variable, SIMULA=pas quelconque mais constant pour la durée de la boucle)
  - **type de la variable de contrôle?** (Pascal=entier, C=quelconque, SIMULA=entier ou flottant)
  - **déclaration locale de la variable de contrôle?** (Pascal=non, C=non; SIMULA=non, Ada=oui, Modula-3=oui, C++=possible)
  - **variable de contrôle modifiable pendant la boucle?** (Pascal=non, C=oui, SIMULA=oui)
  - **variable de contrôle définie après la boucle?** (Pascal=non, C=oui, SIMULA=oui)

Énoncé de sélection par cas (1)

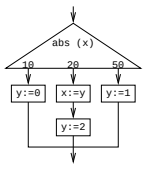
- Sélection d'un énoncé parmis plusieurs

- Pascal:

```
case <expr> of
  <constante> { , <constante> } : <énoncé1> ;
  <constante> { , <constante> } : <énoncé2> ;
  ...
end
```

- Exemple

```
case abs (x) of
  10: y := 0;
  50: y := 1;
  20: begin x := y; y :=2; end;
end
```



- En général
  - constantes entières ou énumérées seulement
  - constantes dans n'importe quel ordre
  - ≥ 1 constantes par énoncé
  - constantes distinctes

Énoncé de sélection par cas (2)

- Variations sémantiques:
  - **action lorsque cas pas précisé?** (Pascal=erreur, C=rien, Modula-2=erreur)
  - **action de défaut permise?** (Pascal=pas standard, C=oui, Modula-2=oui)
  - **intervalle de cas permis (p.e. 10..20)?** (Pascal=non, C=non, Modula-2=oui)

Énoncé de sélection par cas (3)

- C offre: `switch ( <expr> ) <énoncé>`
  => *<énoncé>* peut contenir comme sous-énoncés:
  `case` *<constante>* `:` *<énoncé>*
  `default:` *<énoncé>*
  `break;`

- ```
  switch (x)
    {
      case 10: y = 1; break; /* le break sort du switch */
      case 20:
      case 30: y = 2; break;
      default: y = 3;
    }
  ```

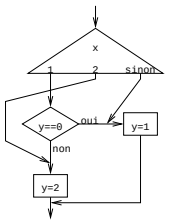
- La syntaxe de C est une source de bugs:

```
switch (x)
  {
    case 1: y = 1; break;
    defaut: y = 2;        /* ne sera jamais exécuté */
  }
```


Énoncé de sélection par cas (4)

- L'énoncé `switch` n'est pas structuré

```
switch (x)
  case 1:
    if (y==0)
      default: y = 1;
    else
      case 2: y = 2;
```



- Cela est parfois utile:

```
void copier (char *src, char *dst, int n)
{
  while (n > 0) { *dst++ = *src++; n--; }
}

void copier (char *src, char *dst, int n)
{
  switch (n & 3)
    {
      case 0: while (n > 0) { *dst++ = *src++;
      case 3:                 *dst++ = *src++;
      case 2:                 *dst++ = *src++;
      case 1:                 *dst++ = *src++;
                              n -= 4;
                            }
    }
}
```


Types de données et leur représentation

- Il faut distinguer **objet** et **représentation**
  - **Objet** = donnée du point de vue de l'application
  - **Représentation** = organisation des valeurs composant l'objet (i.e. encodage de l'objet)
- Exemple: objet = date du 3 février
  - Représentation 1: entier 34
  - Représentation 2: entiers 3 et 2
  - Représentation 3: chaîne "03/02"
- Déf: **Type** = ensemble d'objets possiblement infini
- Exemple:
  1. Type booléen = { VRAI, FAUX }
  2. Type entier = { 0, 1, -1, 2, -2, ... }

Types de données (1)

- Classifiés en 2 groupes
- **Types simples** (normalement prédéfinis), p.e. entier, caractère, booléen, point flottant
- **Types composés** (normalement définis explicitement), formés à l'aide d'autres types (éléments de même type=**homogène**, sinon **hétérogène**)
- **Tableau** = groupe ordonné d'objets accessibles par leur position
  - Index connu à l'exécution
  - En général homogène, mais hétérogène en Lisp et les langages OO
  - 2 bornes (Pascal, Ada) / longueur + borne inférieure fixée à 0 (C, Lisp) ou 1 (FORTRAN)
  - **Bornes fixées?** à la compilation (**tableau statique**: C) ou à l'exécution (**tableau dynamique**: Pascal, Lisp)
```

Types de données (2)

- **Enregistrement** = groupe ordonné d'objets accessibles par leur nom
  - Nom connu à la compilation
  - En général hétérogène
- **Ensemble** = groupe non-ordonné d'objets sans duplication, accessibles par élément
  - En général homogène avec un type discret de petite taille, mais hétérogène en Lisp
  - Exemple: ensemble de booléens = { {}, {VRAI}, {FAUX}, {VRAI,FAUX} }
  - opérations: union, intersection, différence, "élément de", inclus, égal

Représentation des entiers (1)

- Unités de mesure = bit, octet, mot (taille naturelle pour l'UCT, 32/64 bits = 4/8 octets)
- **Type entier**
  - Entier = sous-ensemble de **Z** (sauf Lisp où: entier = **Z** = { 0, 1, -1, 2, -2, ... })
  - Entier = entiers signés représentables par un mot: complément à 2, i.e. `-2^31..2^31-1`, ou complément à 1, i.e. `-2^31+1..-0,0..2^31-1` (Cray et CDC)
  - C permet de choisir la taille des entiers et signé ou pas:

    `[ signed | unsigned ] ( int | short | long | char )`

    * Note 1: `char` est un type entier qui occupe une "unité" d'espace (normalement 1 octet) Exemple: `unsigned char x;` 0<=x<=255
    * Note 2: `char` ⊆ `short` ⊆ `int` ⊆ `long`
    * Note 3: `#include <limits.h>` pour avoir les limites de chaque type: `INT_MIN/INT_MAX`

Représentation des entiers (2)

- Une autre variation dans la représentation des entiers est l'ordre des octets en mémoire
- Les deux ordres principaux sont "**big-endian**" (MIPS, SPARC, M68000) et "**little-endian**" (Intel, DEC Alpha)
- Exemple, l'entier 16 bits 258 = 1*256 + 2

- Cela cause principalement des problèmes lors de la communication de données binaires entre ordinateurs de type différent (par exemple sur l'internet)
  - Il faut convertir dans une représentation "standard", envoyer la donnée, et convertir à l'autre bout (si nécessaire)

Représentation des entiers (3)

- **Type sous-intervalle**
  - Intervalle du type entier
  - Pascal: <const1>..<const2> = { <const1>,<const1>+1,...,<const2> }
  - Nombre bits = plafond(log2(C2-C1+1))
  - Exemple: `1..2` -> 1 bit, `5..7` -> 2 bits
  - Souvent les compilateurs arrondissent vers l'octet le plus proche pour un accès rapide
  - Utilisé en Pascal pour définir les bornes des tableaux:

```
var T1 : array [10..20] of integer;
    T2 : array [char] of integer;
```

Représentation des types énumérés

- **Type énuméré**
  - Chaque objet élément du type a un nom symbolique
  - Exemple en Pascal:

```
var j : (lundi,mardi,mercredi,jeudi,vendredi,
         samedi,dimanche);

begin
  j := mercredi;
  if j = lundi then ...;
  j := succ(j); (* j=jeudi *)
  j := pred(j)  (* j=mercredi *)
end
```

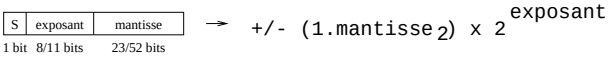
  - Représenté comme type sous-intervalle
  - Exemple en C:

```
enum {lundi,mardi,mercredi,jeudi,vendredi,
      samedi,dimanche} j;
```

  - Le type booléen de Pascal est un type énuméré: `boolean = (false,true)`

Représentation des types réels

- **Type réel**
  - Réel = sous-ensemble de **R** (en fait sous-ensemble de **Q**, les rationnels)
  - Réel = nombres rationnels représentables avec un encodage point-flottant (le plus répandu = IEEE-754)



  - Précision "simple" (32 bits) <= `3.4x10^38` (6 chiffres significatifs)
  - Précision "double" (64 bits) <= `1.8x10^308` (15 chiffres significatifs)
  - En C: `float` ⊆ `double`

Représentation des tableaux (1)

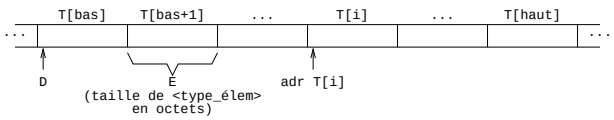
- **Type tableau**
  - Pascal:
    `var T : array [`<*type_index*>`] of `<*type_élem*>`;`
    => <*type_index*> doit être sous-intervalle ou énuméré
  - C: <*type_élem*> `T[`<*constante*>`];`
  - Exemple

```
Pascal:
  var T : array [boolean] of real;              T[false] := 1.5;
  var T : array [(rouge,vert,bleu)] of boolean; T[vert] := true;
  var T : array [10..12] of integer;            T[11] := 123;
  var T : array [0..4] of array [0..9] of real; T[2][3] / T[2,3]
  var T : array [0..4,0..9] of real;            T[2][3] / T[2,3]

C:
  int T[2];         T[0] = 123;
  float T[5][10];   T[2][3] = 1.5;  T[2,3] = 1.5;
  float T[5,10];    T[2][3] = 1.5;  T[2,3] = 1.5;
```


Représentation des tableaux (2)

- Représentation de
  `var T : array [ bas .. haut ] of integer;`



- Taille de `T` = (`haut - bas` + 1)*E
- Adr de `T[i]` = D + (`i-bas`)*E = `i`*E + K
  où K = D − `bas`*E
- Quand indexation rapide?
  1. Utilisation d'un tableau statique, car K est calculable à la compilation
  2. Utilisation d'une taille d'élément E = puissance de 2, car décalage plus rapide que multiplication

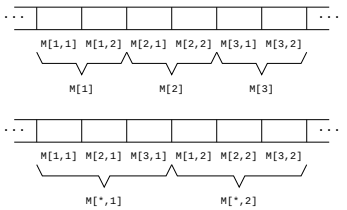
Représentation des tableaux (3)

- Tableau multidimentionnel:

```
var M : array [1..3] of array [1..2] of integer;
```

définition d'une rangée de la matrice

$$\begin{bmatrix} M[1,1] & M[1,2] \\ M[2,1] & M[2,2] \\ M[3,1] & M[3,2] \end{bmatrix}$$



''row-major''

''column-major'' (FORTRAN)

- Taille de `M` = `(h1-b1+1)*(h2-b2+1)*E`
- Adr de `M[i,j]` (en représentation "row-major")
  = `D + (i-b1)*(h2-b2+1)*E + (j-b2)*E`
  = `i*(h2-b2+1)*E + j*E + (D-b1*(h2-b2+1)*E-b2*E)`
  = `i*K1 + j*E + K2`
- Donc `array[1..3,1..2]` est plus rapide à indexer que `array[1..2,1..3]`

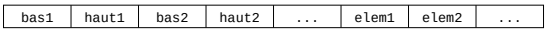
Représentation des tableaux (4)

- SIMULA offre les tableaux dynamiques

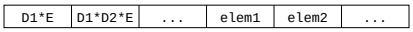
```
procedure p(n); integer n;
  begin
    integer array t(1:n);
    ...
  end;

p(10);  p(20);
```

- Le calcul d'adresse doit être **dynamique** (donc il faut stocker les bornes en plus des éléments)
- Représentation 1: permet de vérifier les indices à l'exécution



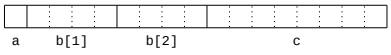
- Représentation 2: plus rapide mais pas de vérification et suppose borne du bas = 0 (Di = `haut_i+1`)



Représentation des enregistrements (1)

- Disposition contiguë des champs en mémoire

```
record
  a : char;                     (* adr relative = 0 *)
  b : array [1..2] of integer;  (* adr relative = 1 *)
  c : real;                     (* adr relative = 9 *)
end
```



- Les contraintes de la machine peuvent affecter la position (p.e. `integer` (`real`) à des adresses qui sont des multiples de 4 (8))

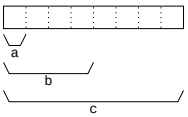
- C permet un contrôle fin (au niveau des bits) sur la disposition des champs

```
struct
  { unsigned int a : 3; /* 0..7 */
    unsigned int b : 1; /* 0..1 */
    unsigned int c : 4; /* 0..15 */
  }
```

Représentation des enregistrements (2)

- Déf: **type union** = union de plusieurs types
- En C la syntaxe est similaire aux structures

```
union
  { char a;    /* adr relative = 0 */
    int b;     /* adr relative = 0 */
    double c;  /* adr relative = 0 */
  }
```



- Taille = taille du plus grand champs
- Seulement un des champs est actif à un instant donné et c'est impossible de savoir lequel uniquement en examinant l'objet

```
struct                  for (i=0; i<10; i++)
 { int sorte; /*0..2*/   switch (T[i].sorte)
   union                  {
    { char a;               case 0: printf("%c",T[i].val.a); break;
      int b;                case 1: printf("%d",T[i].val.b); break;
      double c;             case 2: printf("%f",T[i].val.c); break;
    } val;                 }
 } T[10];
```

Représentation des ensembles

- Pascal: `set of` <*type*>
  => <*type*> doit être sous-intervalle ou énuméré

- Représenté par un mot machine avec 1 bit par élément possible (1=élement de l'ensemble, 0=pas élement de l'ensemble)

- Exemple

```
var s1, s2, s3 : set of 1..5;

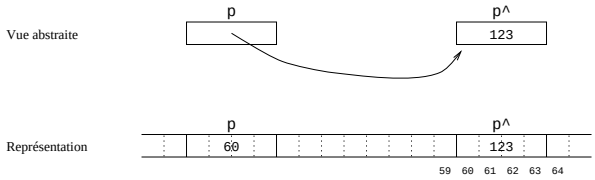
s1 := [1,4,5];   (* 0000000000011001 = 25 *)
s2 := [2,4];     (* 0000000000001010 = 10 *)
s3 := s1 + s2;   (* 0000000000011011 = 27 *)
s3 := s1 * s2;   (* 0000000000001000 = 8  *)
s3 := s1 - s2;   (* 0000000000010001 = 17 *)
if 2 in s1 then ...;
```


Représentation des pointeurs (1)

- Déf: **pointeur** = objet qui permet un accès **indirect** à un autre objet

- Pascal: ^<*type*>

```
var p : ^integer;
```



- La taille du pointeur est indépendante de la taille de l'objet pointé (typiquement 1 mot machine)

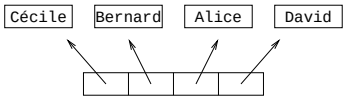
- En général, un pointeur est représenté par l'adresse en mémoire de l'objet pointé

- Cas spécial: pointeur nul (`nil` en Pascal) => 0 ou autre adresse invalide

Représentation des pointeurs (2)

- Applications
  - Structures de données dont la taille varie à l'exécution (chaînes, listes, arbres, graphes)
  - Manipulation rapide d'objets (la copie d'un pointeur est plus rapide que la copie de l'objet pointé)

    Exemple: trier des enregistrements



- Opérations principales sur les pointeurs
  - Allocation d'un objet dans le tas (trouve espace inutilisé + marque comme utilisé)
  - Récupération de l'espace alloué à un objet (marque inutilisé)
  - Indirection (accès à l'objet pointé)

Représentation des pointeurs (3)

```
  Pascal                C                          SIMULA

DECLARATION DE TYPE ET VARIABLE

  type R =              struct R                   class R;
    record               {                          begin
     x, y : integer;      int x, y;                  integer x, y;
    end;                 };                         end;

  var p, q : ^char;     char *p, *q;
      a, b : ^R;        struct R *a, *b;           ref(R) a, b;

INDIRECTION

  p^ := 'X';            *p = 'X';
  a^.x := 20;           (*a).x = 20; a->x = 20;    a.x := 20;

AFFECTATION DE POINTEUR

  q := p;               q = p;
  b := a;               b = a;                     b :- a;
  b := nil;             b = NULL;                  b :- none;

AFFECTATION DE L'OBJET POINTE

  b^ := a^;             *b = *a;                   b := a;

EGALITE

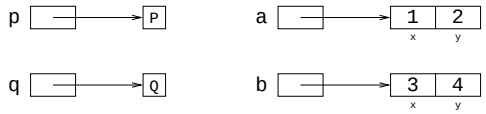
  if a=b then ...       if (a==b) then ...         if a==b then ...

ALLOCATION

  new(a);               a = (struct R*) malloc(    a :- new R;
                              sizeof(struct R));

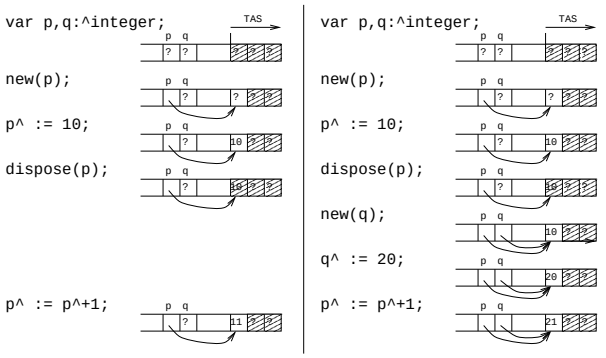
RECUPERATION

  dispose(a);           free(a);                   **AUTOMATIQUE**
```



Représentation des pointeurs (4)

- Il y a des dangers importants lorsque la récupération de la mémoire est sous la responsabilité du programmeur (**récupération manuelle**)
- Le programmeur risque de récupérer l'espace **trop tôt** ce qui engendre des **pointeurs fous** (pointeur vers un espace réservé pour un autre usage)



Représentation des pointeurs (5)

- Le programmeur risque de récupérer l'espace **trop tard** (ou même jamais) ce qui engendre des **fuites de mémoire**

```
new(p);  (* allocation de l'objet 1 *)
p^ := 10;
new(q);  (* allocation de l'objet 2 *)
p := q;  (* fuite de mémoire: l'objet 1 n'est plus
            accessible et ne peut plus être récupéré *)
```

- Déf: **objet mort** = objet qui ne sera jamais plus utilisé par le programme
- Une fois qu'un objet n'est plus atteignable il est mort pour toujours
- Déf: **fuite de mémoire** = création d'objets morts
- Bug insidieu car le programme peut marcher longtemps sans problèmes mais tranquillement la performance se dégrade et cause éventuellement un arrêt total (p.e. Microsoft Word)

Représentation des pointeurs (6)

- Lisp, SIMULA et Java possèdent des "**ramasses-miettes**" (**garbage collectors**) qui détecte la création d'objets morts et récupère automatiquement l'espace associé
- Deux techniques répandues:
  1. Associer un **compteur de référence** à chaque objet = nombre de pointeurs vers l'objet (initialisé à 1, incrémenté à chaque copie de pointeur, et décrémenté à chaque fois qu'un pointeur disparait, p.e. écrasé par un autre pointeur). Récupérer espace lorsque compteur = 0. Ne fonctionne pas dans le cas des structures cycliques.
  2. À partir des variables globales et la pile, **traverser tous les objets atteignables** en passant par des pointeurs et marquer ces objets. À la fin, les objets non-marqués sont récupérés.
- La récupération manuelle est une source de bugs majeurs (30%-40% du temps de débogage) dans les programmes complèxes car il est difficile de savoir quel module est responsable de récupérer l'espace

Représentation des pointeurs (7)

- C possède plusieurs routines de gestion mémoire (disponibles dans `"stdlib.h"`)

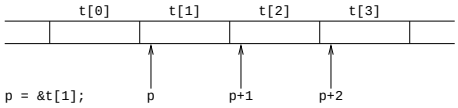
```
void *malloc (int taille_bloc);
void *calloc (int nb_elem, int taille_elem);
void *realloc (void *ptr, int nouvelle_taille);
void free (void *ptr);
```

- `malloc` alloue un bloc, `calloc` alloue un tableau et `realloc` change la taille d'un objet alloué dans le tas (ce qui demande parfois d'allouer un nouveau bloc et de copier l'objet)
- Le pointeur retourné est de type `void*` (pointeur universel) et il faut le convertir vers le bon type de pointeur avec un "cast"
- `NULL` est retourné si la mémoire est épuisée
- C++ possède 2 opérateurs de gestion mémoire de plus haut niveau que C

```
int *p;
char *s;
p = new int;     // p = (int*)malloc(sizeof(int));
s = new char[5]; // s = (char*)calloc(5,sizeof(char));
delete p;        // free(p);
delete [] s;     // free(s);
```

Représentation des pointeurs (8)

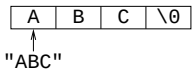
- Le langage C permet une forme d'**arithmétique sur les pointeurs** (opérateurs + et -)
- `&<var>` => pointeur vers <*var*>
- `p+n` (où `n` est de type entier et `p` est de type `T*`) => pointeur vers `n`ième objet de type `T` après objet pointé par `p`



- `p2-p1` (où `p1` et `p2` sont de type `T*`) => nombre d'objets de type `T` de `*p1` à `*p2`
- `t` (où `t` est un tableau) => pointeur vers premier élément du tableau
- C définit: `x[y]` = `*(x+y)` = `*(y+x)`
  Donc (!): `1[t]` = `t[1]` et `1[t][t]` = `t[t[1]]`
- Les opérateurs ++ et -- sont utilisables sur les pointeurs pour avancer ou reculer d'un élément

Représentation des pointeurs (9)

- Le traitement de chaînes de caractères en C est basé sur les pointeurs




```
char t[4];
char *p, *q;

p = "ABC";

putchar (p[2]);       /* imprime C */
putchar ("XYZ"[2]);   /* imprime Z */

q = t;                /* copier dans t */
while (*p != '\0')
  *q++ = *p++;
*q = '\0';

if (t == "ABC") ...; /* toujours faux! */

/* utiliser strcmp(t,"ABC") de <string.h> */
```


Typage et sûreté (1)

- La notion de type est utile pour définir la notion d'**erreur**
- Exemples
  1. `int *p; ... abs(p) ...` est incorrect car (en C) l'argument de `abs` doit être de type entier
  2. `int t[10]; ... t[1.5] ...` est incorrect car l'index doit être de type entier
  3. `int t[10]; ... t[i] ...` est incorrect si `i` est négatif (ou plus grand que 9)
  4. `int n; ... 100/n ...` est incorrect si `n` est égal à 0
- Déf: Une **erreur de type** survient lorsqu'une fonction (ou opérateur) est appelée avec un argument qui n'est pas du type attendu

Typage et sûreté (2)

- Les **vérifications de type** permettent de garantir qu'aucune opération incorrecte ne sera exécutée
- Il est avantageux d'effectuer les vérifications de type **à la compilation** (**typage statique**) car cela évite de ralentir l'exécution du programme
- Cela rend le programme plus **sûr**, c'est-à-dire qu'il y a peu ou aucune possibilité d'erreur de type à l'exécution
- Les vérifications de type peuvent également se faire à l'exécution (**typage dynamique**)
  - C'est requis dans certains cas (exemples 3 et 4)
  - C'est dangereux si la partie du programme contenant l'erreur est exécutée rarement car il sera difficile d'éliminer l'erreur pendant la phase de développement (il est bon d'avoir des **tests de couverture** qui exécutent au moins une fois chaque partie du programme)