

Introduction à la Programmation

Benoit Donnet
Année Académique 2021 - 2022



Agenda

- Introduction
- Chapitre 1: Bloc, Variable, Instruction Simple
- Chapitre 2: Structures de Contrôle
- Chapitre 3: Méthodologie de Développement
- Chapitre 4: Introduction à la Complexité
- Chapitre 5: Structures de Données
- **Chapitre 6: Modularité du Code**
- Chapitre 7: Pointeurs
- Chapitre 8: Allocation Dynamique

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - Compilation Séparée
 - Programmation par Contrat
 - Variable Statique
 - Variable Globale
 - Macro

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - Compilation Séparée
 - Programmation par Contrat
 - Variable Statique
 - Variable Globale
 - Macro

Principe

- Un programme typique comporte plusieurs dizaines de milliers de lignes de code
 - impossible de tout mettre dans `int main() {}`
 - ✓ illisible
 - ✓ trop de variables
- Comment faire pour gérer son code de manière optimale?

Principe (2)

- Un programme peut être découpé en **modules**
 - morceau de code qui est écrit indépendamment du programme principal et peut être *invoqué* (ou *appelé*) à partir de plusieurs endroits du programme
- Un module peut
 - retourner un résultat
 - ✓ **fonction**
 - ✓ exemples
 - `fopen()`
 - `fscanf()`
 - ne pas retourner de résultat
 - ✓ **procédure**
 - ✓ exemple
 - `printf()`

Principe (3)

- Avantages d'une découpe en modules?
 - *approche systémique*
 - ✓ chaque module se concentre sur un sous-problème particulier, indépendamment du reste du programme
 - *lisibilité*
 - ✓ il est plus facile de lire/comprendre un module d'une dizaine de lignes qu'un programme unique de 10.000 lignes
 - *réutilisabilité*
 - ✓ un même module peut être réutilisé plusieurs fois dans un programme
 - ✓ un même module peut être réutilisé plusieurs fois dans des programmes différents
 - notion de **bibliothèque**
 - cfr. Compilation Séparée
 - cfr. INFO0030

Principe (4)

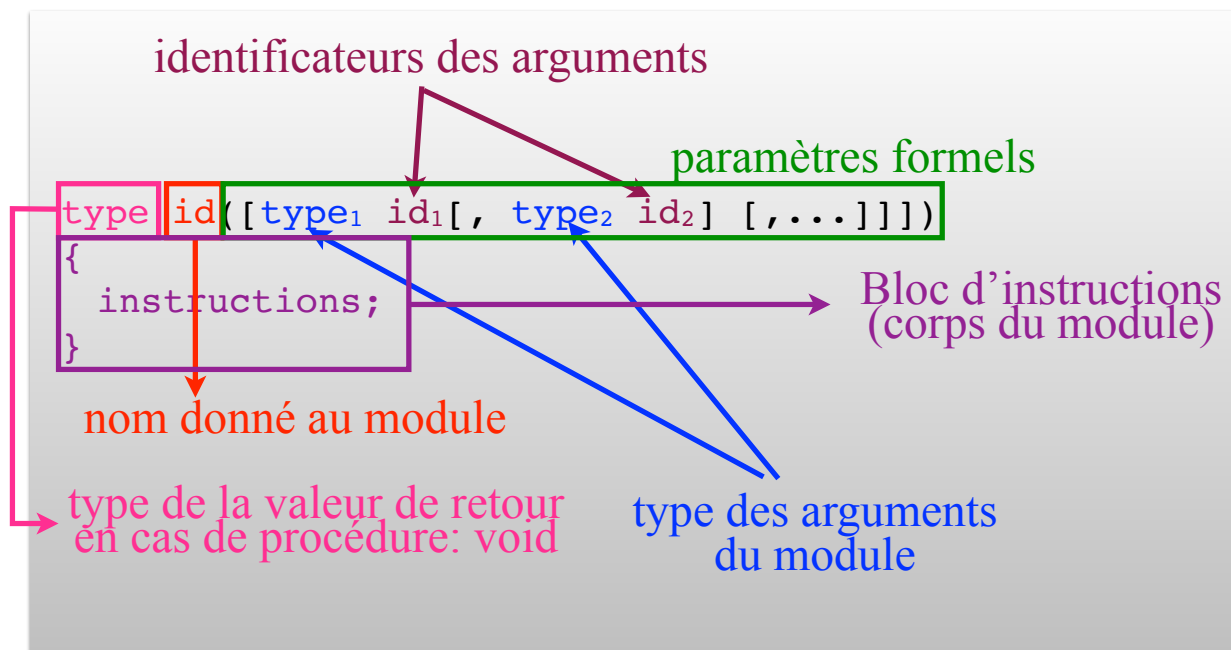
- Fonctionnement?
 - le code invoque un module
 - ✓ celui qui invoque est appelé **code appelant**
 - pendant l'exécution du module, l'exécution du code appelant est suspendue
 - ✓ c'est le module qui a la main
 - le code appelant reprend son exécution lorsque le module invoqué est terminé
- Un module peut disposer d'**arguments**
 - données en entrée utilisées par le module
 - ✓ **paramètres formels**
 - ✓ ils n'ont d'existence que dans le module où ils sont définis
 - ces données sont passées au module lors de l'invocation
 - ✓ **paramètres effectifs**
 - cfr. Chap. 7 pour le détail sur le *passage de paramètres*

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - ✓ Déclaration
 - ✓ Portée des Variables
 - ✓ Invocation
 - ✓ Application
 - Compilation Séparée
 - Programmation par Contrat
 - Variable Statique
 - Variable Globale
 - Macro

Déclaration

- Une fonction/procédure est déclarée comme suit:



Déclaration (2)

- **Prototype** d'une fonction/procédure
 - type de retour
 - identificateur
 - liste des paramètres formels
- On parle aussi de **signature**
- A l'intérieur du bloc d'instructions, on procède "comme d'habitude"
 - déclaration de variables
 - ✓ **variables locales**
 - ✓ cfr. Portée des Variables
 - instructions

Déclaration (3)

- Exemple 1
 - procédure qui affiche à l'écran le contenu d'un tableau d'entiers
 - cfr. Chap. 5 pour la construction du code

rien à retourner

identificateur

paramètres formels

```
void afficher_tableau(int tab[], int n){
```

```
    int i;    variable locale
```

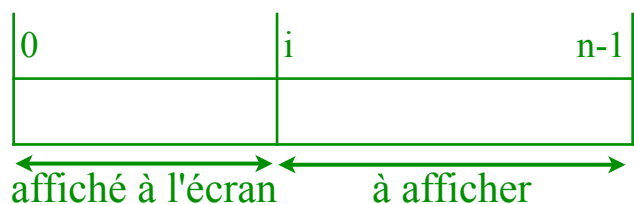
```
    printf("[ ");    //Inv: tab:
```

```
    for(i=0; i<n; i++)
```

```
        printf("%d ", tab[i]);
```

```
    printf("]\n");
```

```
}//fin affiche_tableau()
```



Déclaration (4)

- Exemple 2
 - fonction qui retourne x^7

retourne une valeur

de type `int`

identificateur

```
int puissance7(int x){ paramètre formel
```

```
    int resultat;
```

```
    resultat = x*x*x*x*x*x*x;
```

```
    return resultat; renvoi du résultat au code appelant
} //fin puissance7()
```

Déclaration (5)

- Dans le corps d'un module, l'instruction
 - **return** [expression];
 - termine immédiatement l'exécution du module
- Si fonction
 - l'instruction **return** est obligatoire et est suivie d'une expression dont le type correspond au type de retour de la fonction
 - l'expression est évaluée et la valeur évaluée est retournée au code appelant
- Si procédure
 - l'instruction **return** est facultative
 - si présente, elle ne peut pas avoir d'expression

Déclaration (6)

- Où placer la définition d'un module?
- En C, il est interdit de définir un module dans le corps d'un autre module
 - un programme se compose donc d'une suite de définition de modules
 - les modules sont définis entre les dérivées de compilation et `main()`

Déclaration (7)

- La définition `int main() { ... }` est celle de la fonction “main”
 - point d'entrée d'un programme C
 - c'est la fonction qui est invoquée dès le début de l'exécution du programme
- Pourquoi retourne-t-elle une valeur entière?
 - code de diagnostic renvoyé en fin d'exécution
 - le code “0” correspond à une exécution sans erreur
 - dorénavant, nous allons terminer les “main” par l'instruction **return 0;**

Déclaration (8)

- Exemple

```
#include <stdio.h>
```

```
void afficher_tableau(int tab[], int n){
```

```
    int i;
```

```
    printf("[ ");    //Inv: tab:
```

```
    for(i=0; i<n; i++)
```

```
        printf("%d ", tab[i]);
```

```
    printf("]\n");
```

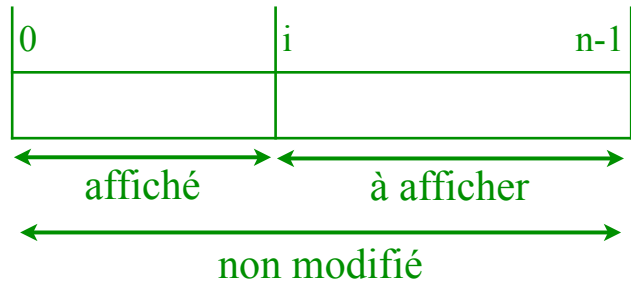
```
}//fin affiche_tableau()
```

```
int main(){
```

```
    //code du main
```

```
    return 0;
```

```
}//fin main()
```



Portée des Variables

- Quid des variables déclarées (et utilisées) dans le corps d'un module?
 - elles n'ont aucune existence en dehors du module
- La **portée d'une variable** détermine le bloc d'instructions dans lequel la variable est utilisable
 - par défaut, la portée est toujours limitée au bloc dans lequel on définit la variable
 - on peut déclarer une variable dans n'importe quel bloc
- Les paramètres formels d'un module peuvent être vus comme des variables
 - dont la portée est limitée au corps du module
 - les valeurs sont initialisées à l'aide des paramètres fournis lors de l'appel du module

Invocation

- Comment invoquer le module déclaré?
- Si un module *m* a été correctement déclaré, alors il peut être invoqué comme suit

```
m(expr1, expr2, ...);    paramètres effectifs  
identificateur du module
```

- Les paramètres effectifs sont des expressions dont le type correspond à celui des paramètres formels de *m*
- Lors de l'invocation, on ne doit pas indiquer
 - le type de retour (`void` ou autre)
 - le type des paramètres

Invocation (2)

- Si *m* est une fonction
 - *m* est une valeur à droite
 - ✓ peut se trouver à droite d'une affectation
 - *m* est vu comme une expression
 - ✓ dont l'évaluation est égale à la valeur retournée par *m* à la fin de son exécution
 - exemple
 - ✓ utilisation de `fopen()`
 - ✓ utilisation de `fscanf()`
- Si *m* est une procédure
 - *m* ne peut pas se trouver à droite d'une affectation
 - *m* est vu comme une expression n'ayant pas de valeur
 - exemple
 - ✓ utilisation de `printf()`

Invocation (3)

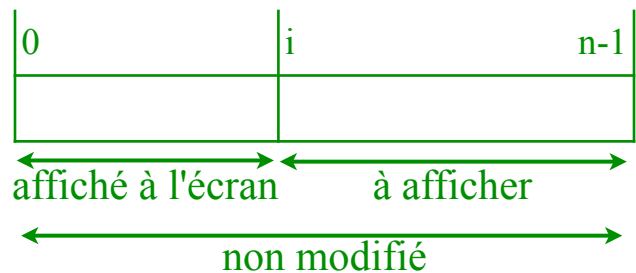
- Exemple

```
#include <stdio.h>
```

```
int puissance7(int x){  
    int resultat = x*x*x*x*x*x*x;  
  
    return resultat;  
} //fin puissance7()
```

```
void afficher_tableau(int tab[], int n){  
    int i;
```

```
    printf("[ ");          //Inv: tab:  
    for(i=0; i<n; i++)  
        printf("%d ", tab[i]);  
    printf("]\n");  
} //fin affiche_tableau()
```

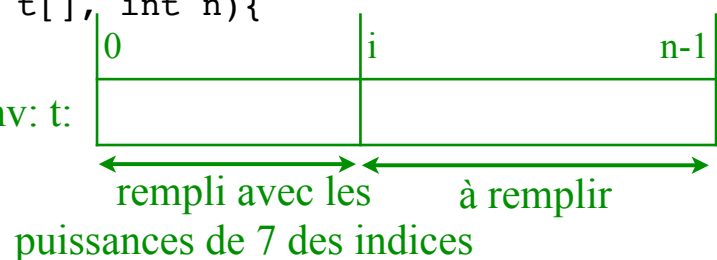


Invocation (4)

```
#include <stdio.h>
```

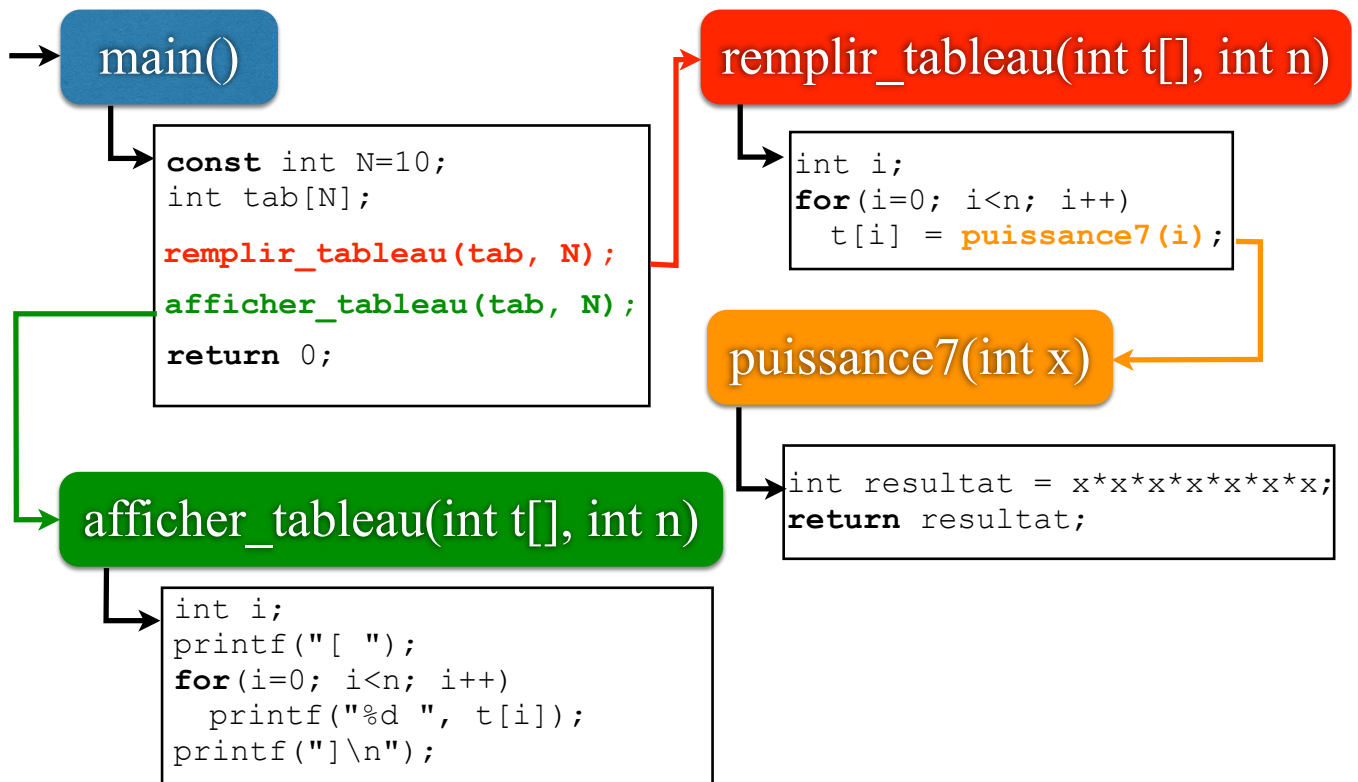
```
void remplir_tableau(int t[], int n){  
    int i;
```

```
    for(i=0; i<n; i++) //Inv: t:  
        t[i] = puissance7(i);  
} //fin remplir_tableau()
```



```
int main(){  
    const int N = 10;  
    int tab[N];  
  
    remplir_tableau(tab, N);  
    afficher_tableau(tab, N);  
  
    return 0;  
} //fin programme
```

Invocation (5)



Application

- Application:
 - approximation de $\sin(x)$ par un développement en série de Taylor

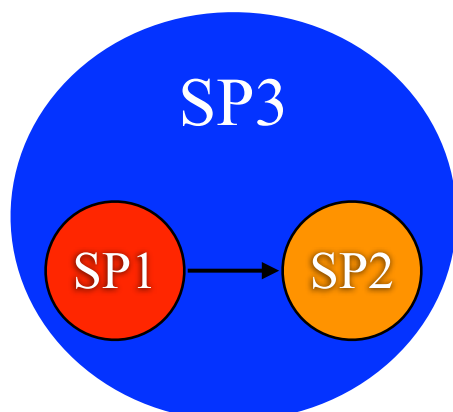
$$\sin(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(2i+1)!} x^{2i+1}$$

Application (2)

- Définition du problème
 - Input
 - ✓ `x`
 - valeur pour laquelle on cherche à approximer le sinus
 - ✓ `precision`
 - nombre de termes dans la somme
 - Output
 - ✓ approximation de $\sin(x)$
 - Objets Utilisés
 - ✓ `x` est un angle, exprimé en radians et $\in [0; 2\pi]$
 - `double x;`
 - ✓ `precision` est une valeur entière ≥ 0
 - `unsigned int precision;`

Application (3)

- Analyse du problème
 - **SP1**: calcul de la factorielle
 - **SP2**: calcul de a^b
 - **SP3**: développement en série de Taylor
- Enchaînement des SPs
 - $(\text{SP1} \rightarrow \text{SP2}) \subset \text{SP3}$



$$\sum_{n=0}^{precision-1} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1}$$

Application (4)

- Sous-Problème 1: calcul de factorielle
 - définition du SP
 - ✓ Input
 - n , le nombre pour lequel il faut calculer la factorielle
 - ✓ Output
 - $n!$
 - ✓ Objet Utilisé
 - `int n`

```
int factorielle(int n){
    int fact = 1, i;

    //Inv: fact = (i-1)!  $\wedge$   $1 \leq i \leq n+1$ 
    for(i=1; i<=n; i++)
        fact *= i;

    return fact;
} //fin factorielle()
```

Application (5)

- Sous-Problème 2: calcul de a^b
 - définition du SP
 - ✓ Input
 - a , la base
 - b , l'exposant
 - ✓ Output
 - a^b
 - ✓ Objets Utilisés
 - `double a`
 - `int b`

```
double puissance(double a, int b){
    double exp = 1.0;
    int i;

    //Inv:  $\text{exp} = a^{i-1} \wedge 1 \leq i \leq b+1$ 
    for(i=1; i<=b; i++)
        exp *= a;

    return exp;
} //fin puissance()
```

Application (6)

- Sous-Problème 3: développement série de Taylor
 - construction de l'Invariant

$$\sum_{i=0}^{precision-1} \frac{(-1)^i}{(2i+1)!} x^{2i+1} =$$

$$\frac{(-1)^0}{(1)!} x^1 + \dots + \frac{(-1)^{n-1}}{(2(n-1)+1)!} x^{2(n-1)+1} + \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1} + \dots + \frac{(-1)^{p-1}}{(2(p-1)+1)!} x^{2(p-1)+1}$$

sin contient l'approximation du sinus avec n termes

encore à sommer

- Fonction de Terminaison
 - precision - n

Légende:

- Règle 1
- Règle 2
- Règle 3
- Règle 4
- Règle 5
- Règle 6

Application (7)

- Sous-Problème 3: développement série de Taylor

```
double sinus_taylor(double x, unsigned int precision){
    double sin = 0;
    int n;

    for(n=0; n<precision; n++){
        double num = puissance(-1, n);
        int den = factorielle(2*n+1);
        double tmp = puissance(x, 2*n+1);

        sin += (num/den) * tmp;
    } //fin for - n
    return sin;
} //fin sinus_taylor()
```

$$//Inv: sin = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-1)^i}{(2i+1)!} x^{2i+1}, 0 \leq n \leq precision$$

Application (7)

- Programme

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

//déclaration des fonctions (cfr. slides 27 → 29)

int main(){
    double sinus = sinus_taylor(0.9, 8);

    printf("sinus(0.9): %f %f\n", sinus, sin(0.9));

    return 0;
} //fin programme
```

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - Compilation Séparée
 - ✓ Principe
 - ✓ Application
 - Programmation par Contrat
 - Variable Statique
 - Variable Globale
 - Macro

Principe

- Pour pouvoir invoquer un module, il est nécessaire que celui-ci soit connu
- Le compilateur peut prendre connaissance du module
 - *implicitement* en le déclarant entièrement
 - ✓ cfr. Slide 10 du Chapitre 6
 - *explicitement* en fournissant uniquement une déclaration du prototype
- Format d'une déclaration explicite

```
type id ([type1 id1[, type2 id2] [,...]]);  
  
type id (void);
```

Principe (2)

- La surcharge de module est interdite en C
 - deux modules doivent avoir des identificateurs différents
- L'ensemble des prototypes est regroupé au sein d'un fichier particulier
 - **header**
 - `source.h`
- Un tel fichier peut être incorporé à un fichier source classique grâce à une directive de pré-traitement
 - *dérive de compilation* ou *preprocessing directive*
 - 2 formes
 - ✓ **#include** <source.h> ⇒ header standard
 - ✓ **#include** "source.h" ⇒ header fourni par le programmeur

Principe (3)

- Un des avantages des headers est de pouvoir définir des modules qui pourront être réutilisées par la suite
 - dans le programme
 - dans d'autres programmes
- Exemple
 - `stdio.h`
 - ✓ contient les prototypes des modules permettant de gérer les entrées/sorties (standard input and output), dont `printf()` et `scanf()`
 - ✓ `#include <stdio.h>` permet au compilateur de connaître les modalités d'invocation de ces modules
- On peut définir autant de headers qu'on veut

Principe (4)

- Si le header ne contient que les prototypes, il faut pouvoir associer, à ces prototypes, le corps des modules
- A tout header est associé un autre fichier qui, lui, contient le corps des modules
 - fichier d'implémentation (**module**)
 - `source.c`
- Le header et le module ont (généralement) le même nom
 - le fichier d'implémentation inclut le header associé
 - et tous les headers nécessaires

Application

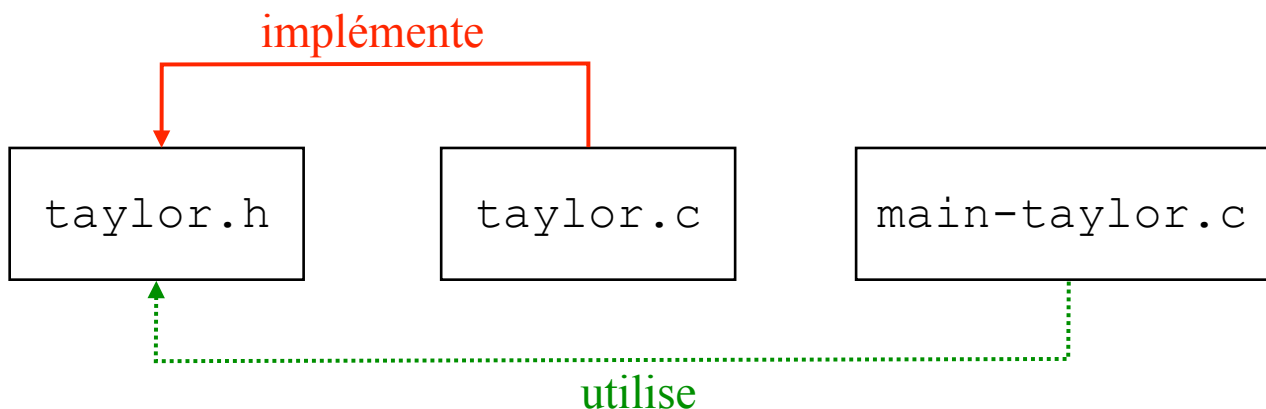
- Application:
 - approximation de $\sin(x)$ et $\cos(x)$ par un développement en série de Taylor

$$\sin(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1}$$

$$\cos(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n}$$

Application (2)

- Architecture du code



Application (3)

- Header
 - `taylor.h`

```
// Calcule la factorielle de n (n!)
int factorielle(int n);

// Calcule a^b
double puissance(double a, int b);

//Calcule sin(x), via une approximation en série de Taylor
double sinus_taylor(double x, unsigned int precision);

//Calcule cos(x), via une approximation en série de Taylor
double cosinus_taylor(double x, unsigned int precision);
```

Application (4)

- Module
 - `taylor.c`

```
#include "taylor.h"

int factorielle(int n){
    int fact = 1, i;

    //Inv: fact = (i-1)! ^ 1 ≤ i ≤ n+1
    for(i=1; i<=n; i++)
        fact *= i;

    return fact;
} //fin factorielle()
```

Application (5)

- Module (cont.)
 - `taylor.c`

```
double puissance(double a, int b){
    double exp = 1.0;
    int i;

    //Inv:  $\text{exp} = a^{i-1} \wedge 1 \leq i \leq b+1$ 
    for(i=1; i<=b; i++)
        exp *= a;

    return exp;
} //fin puissance()
```

Application (6)

- Module (cont.)
 - `taylor.c`

```
double sinus_taylor(double x, unsigned int precision){
    double sin = 0;
    int n;

    for(n=0; n<precision; n++){
        double num = puissance(-1, n);
        int den = factorielle(2*n+1);
        double tmp = puissance(x, 2*n+1);

        sin += (num/den) * tmp;
    } //fin for - n
    //Inv:  $\sin = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-1)^i}{(2i+1)!} x^{2i+1}, 0 \leq n \leq \text{precision}$ 
    return sin;
} //fin sinus_taylor()
```

Application (7)

- Module (cont)
 - taylor.c

```
double cosinus_taylor(double x, unsigned int precision){
    double cos = 0;
    int n;

    for(n=0; n<precision; n++){
        double num = puissance(-1, n);
        int den = factorielle(2*n);
        double tmp = puissance(x, 2*n);

        cos += (num/den) * tmp;
    }//fin for - n
    //Inv:  $\cos = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-1)^i}{(2i)!} x^{2i}, 0 \leq n \leq \text{precision}$ 
    return cos;
} //fin cosinus_taylor()
```

Application (8)

- Programme principal
 - main-taylor.c

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "taylor.h"

int main(){
    double sinus = sinus_taylor(0.9, 8);
    double cosinus = cosinus_taylor(0.9, 8);

    printf("sinus(0.9): %f %f\n", sinus, sin(0.9));
    printf("cosinus(0.9): %f %f\n", cosinus, cos(0.9));

    return 0;
} //fin programme
```

Application (9)

- Comment compiler?
 - Tentative 1

```
$> gcc -o main main-taylor.c
```

```
Undefined symbols for architecture x86_64:
```

```
  "_sinus_taylor", referenced from:
```

```
    _main in ccM8LfpM.o
```

```
  "_cosinus_taylor", referenced from:
```

```
    _main in ccM8LfpM.o
```

```
ld: symbol(s) not found for architecture x86_64
```

```
collect2: ld returned 1 exit status
```

Application (10)

- Comment compiler?
 - Tentative 2

```
$> gcc -o main main-taylor.c taylor.c
```

```
$>
```

```
$> gcc -o main *.c
```

```
$>
```

Exercices

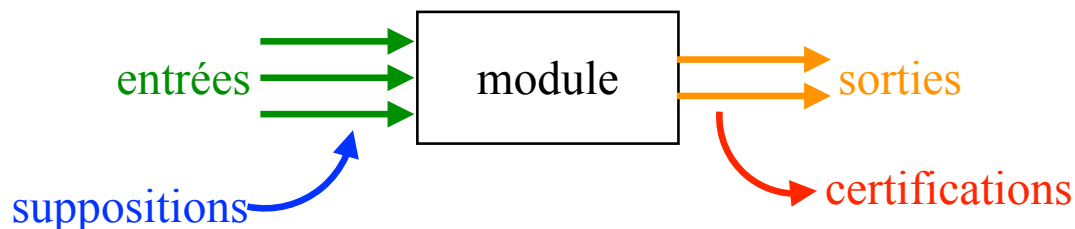
- Ecrire
 - une fonction f1 qui se contente d'afficher "bonjour"
 - une fonction f2 qui affiche "bonjour" un nombre de fois égal à la valeur reçue en argument
 - une fonction f3 qui fait la même chose que f2 mais renvoie une valeur entière (0) en retour.
 - un programme qui appelle chacune des fonctions après les avoir déclarées et implémentées dans un module (fonction.h et fonction.c)
- Pour un ménage X avec un revenu total R et n membres du foyer, l'impôt est de
 - 10% de R si $R/n < 500\text{€}$
 - 20% de R sinon
 - Ecrire une fonction impot qui calcule l'impôt en fonction de R et n
 - Ecrire une fonction revenu_net qui calcule le revenu net d'un ménage après paiement de l'impôt en fonction de R et n.
 - Ecrire un programme qui saisit R et n au clavier et affiche l'impôt et le revenu net

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - Compilation Séparée
 - Programmation par Contrat
 - ✓ Principe
 - ✓ Spécifications
 - ✓ Programmation Défensive
 - ✓ Application
 - Variable Statique
 - Variable Globale
 - Macro

Principe

- La programmation par contrat est une méthodologie de développement à appliquer à un module
 - avant d'écrire l'implémentation d'un module
 - revient à "formaliser" la définition d'un (sous-)problème
- On définit:
 - les **suppositions** sur les arguments en entrée
 - les **certifications** après exécution du module

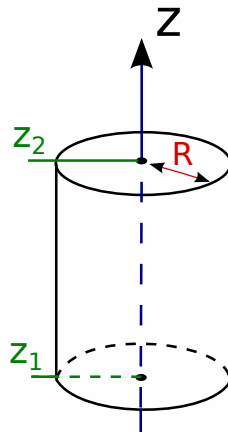


Principe (2)

- Avantage(s)
 - on empêche les cas particuliers/effets de bord
 - ✓ à tout le moins, on ne les oublie pas!
 - on auto-documente le module
 - ✓ cfr. INFO0030, Partie 2, Chap. 4
 - c'est une aide aux tests, garantie de la validité
 - ✓ réduction des bugs
 - ✓ cfr. INFO0030, Partie 2, Chap. 3
- Inconvénient(s)
 - travail supplémentaire en amont

Principe (3)

- Exemple
 - calcul du volume d'un cylindre de rayon R entre $z = [z_1, z_2]$
 - $\pi \times R^2 \times (z_2 - z_1)$



Principe (4)

- Quelles sont les suppositions sur les arguments?
 - z_1 et z_2 représentent des coordonnées telles que $z_2 > z_1$
 - R représente le rayon tel que $R > 0$
- Quelles sont les certifications après exécution du module?
 - renvoi un volume (> 0) correspondant au cylindre décrit

Principe (5)

- Code

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

float volume(float z1, float z2, float R){
    return M_PI * R * R * (z2 - z1);
} //fin volume()

int main(){
    float v1 = volume(1, 2, 0.5);
    float v2 = volume(0, 10, 8);
    float v3 = volume(-4, 8, 1);
    float v4 = volume(5, 1, 1);
    float v5 = volume(1, 4, -1);

    return 0;
} //fin programme
```

Spécifications

- Dans un programme, un module possède
 - une **interface** qui regroupe
 - ✓ son nom
 - ✓ le nombre, le type, et la signification de ses paramètres
 - ✓ le type et la signification de son éventuelle valeur de retour
 - ✓ une description du travail qu'il effectue
 - ✓ des contraintes d'utilisation éventuelles
 - une **implémentation**
 - ✓ suite d'instructions qui forment le corps du module
- Il est donc possible d'utiliser un module sans en connaître son implémentation

Spécifications (2)

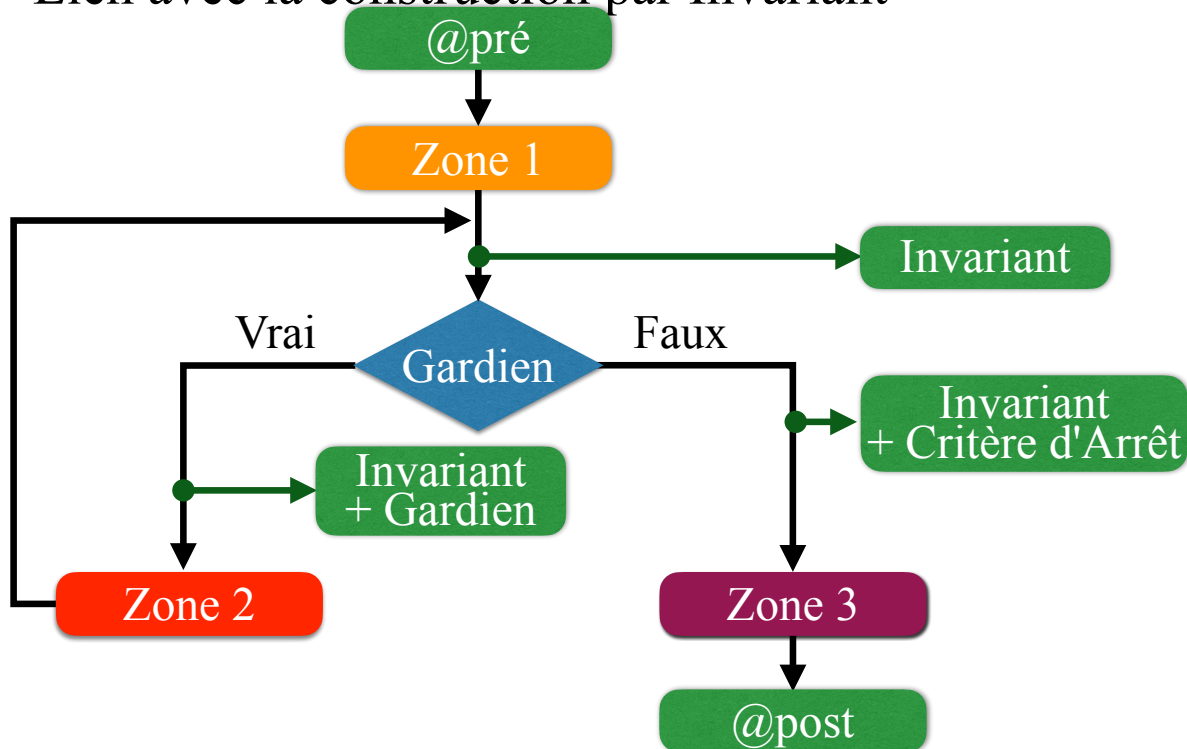
- La description du travail et les contraintes d'utilisation sont expliquées grâce à des **spécifications**
- Contrat logiciel qui lie
 - ✓ le programmeur du module
 - ✓ l'utilisateur du module
- Une spécification est définie en deux temps
 - **précondition**
 - ✓ caractérise les conditions initiales d'exécution du module
 - ✓ en particulier les données (paramètres)
 - ✓ doit être satisfaite avant l'appel au module
 - ✓ *supposition*
 - **postcondition**
 - ✓ caractérise les conditions finales d'exécution du module
 - ✓ en particulier le résultat
 - ✓ sera satisfaite après l'appel
 - ✓ *certification*

Spécifications (3)

- Qualités d'une spécification
 - simple, claire, précise
 - complète, non ambiguë
 - non-contradictoire

Spécifications (4)

- Lien avec la construction par Invariant

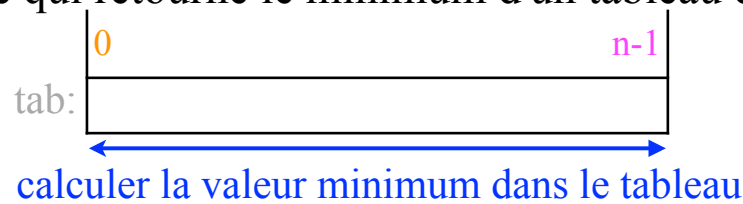


Spécifications (5)

- Comment écrire correctement un module et sa spécification?
- **Faire un dessin** (quand applicable) et répondre à 3 questions
 1. quels sont les paramètres (nom, type, signification) nécessaires pour atteindre l'objectif du module?
 - ✓ prototype du module
 2. quel est l'objectif de mon module?
 - ✓ postcondition
 3. quelles sont les contraintes sur ces paramètres?
 - ✓ précondition

Spécifications (6)

- Exemple 1
 - module qui retourne le minimum d'un tableau d'entiers



- Trois questions
 - quels sont les paramètres?
 - ✓ un tableau `tab` de `n` valeurs entières
 - quel est l'objectif de la fonction?
 - ✓ retourner le minimum de `tab`
 - ✓ postcondition: retourne le minimum du tableau `tab`
 - quelles sont les contraintes sur les paramètres?
 - ✓ `n` ne peut être négatif ou nul
 - ✓ `tab` doit exister et contenir des valeurs
 - ✓ précondition: `tab` initialisé, $n > 0$

Spécifications (7)

- Exemple 1
 - fonction qui retourne le minimum d'un tableau d'entier

```
/*
 * @pre: tab est initialisé, n > 0
 * @post: minimum retourne le minimum du tableau tab
 */
int minimum(int tab[], int n){
    int min = tab[0], i;

    //Inv: min = MINIMUM{tab[0], ..., tab[i-1]} ^ 1 ≤ i ≤ n
    for(i=1; i<n; i++){
        if(tab[i]<min)
            min = tab[i];
    }//fin for - i
    //Inv: min = MINIMIM{tab[0], ..., tab[i-1]} ^ 1 ≤ i ≤ n
    //      ^ i≥n
    //⇒ min=MINIMUM{tab[0], ..., tab[n-1]}
    return min;
} //fin minimum()
```

Spécifications (8)

- Exemple 2
 - fonction qui calcule le volume d'un cylindre de rayon R entre $z = [z_1, z_2]$
- Trois questions
 1. quels sont les paramètres?
 - ✓ les coordonnées z_1, z_2
 - ✓ le rayon R
 2. quel est l'objectif de la fonction?
 - ✓ retourner le volume du cylindre décrit
 - ✓ postcondition: le volume du cylindre (>0) de rayon R et de coordonnées (z_1, z_2)
 3. quelles sont les contraintes sur les paramètres?
 - ✓ R ne peut être que strictement positif
 - ✓ z_2 doit être plus supérieur à z_1
 - ✓ précondition: $R > 0, z_2 > z_1$

Spécifications (9)

- Exemple 2
 - fonction qui calcule le volume d'un cylindre de rayon R entre $z = [z_1, z_2]$

```
/*  
 * @pre:  $R > 0, z_2 > z_1$   
 * @post: volume vaut le volume du cylindre ( $>0$ ) de rayon  
 *         $R$  et de coordonnées  $(z_1, z_2)$   
 */  
float volume(float z1, float z2, float R){  
    return M_PI * R * R * (z2 - z1);  
} //fin volume()
```

Spécifications (10)

- Exemple 3
 - approximation de $\sin(x)$ par un développement en série de Taylor
- On dispose de 3 sous-problèmes
 - calcul de la factorielle
 - calcul de la puissance
 - calcul du sinus

Spécifications (11)

```
/*
 * @pre:  $n \geq 0$ 
 * @post: factorielle vaut  $n!$ 
 */
int factorielle(int n);

/*
 * @pre:  $b \geq 0$ 
 * @post: factorielle vaut  $a^b$ 
 */
double puissance(double a, int b);

/*
 * @pre: ?????
 * @post: ?????
 */
double sinus_taylor(double x, int precision);
```


Progra. Défensive

- Une spécification est un contrat logiciel entre
 - le programmeur du module
 - l'utilisateur du module
- Au fond, qu'est-ce qui nous garantit que l'utilisateur va bien lire les spécifications?
- Quid si le programme est exécuté avec des données ne respectant pas les spécifications?
 - quid si `factorielle(-5)`?
 - on ne peut rien dire du résultat!
- Solution
 - *programmation défensive*

Progra. Défensive (2)

- Programmation défensive
 - vérifier certaines préconditions dans le corps du module même
 - il s'agit donc d'une programmation "prudente"
- Que faire en cas de non-respect d'une précondition?
 - message d'erreur à l'écran et arrêt du programme
 - résultat "spécial"
 - ✓ cfr. le **return** dans la fonction `main()`
 - utiliser `void assert(int expression)`
 - ✓ c'est ce qu'on va utiliser dans le cadre du cours

Progra. Défensive (3)

- La procédure `void assert(int)` est définie dans `assert.h`
 - dérive de compilation: `#include <assert.h>`
 - permet l'inscription, à l'écran, d'un diagnostic de fonctionnement
- Fonctionnement?
 - si l'expression évaluée par `assert(int)` est vraie
 - ✓ le programme poursuit normalement son exécution
 - sinon
 - ✓ un message d'erreur est envoyé à l'écran
 - ✓ l'exécution du programme est terminée automatiquement

Progra. Défensive (4)

- Exemple 1
 - calcul de factorielle

```
#include <assert.h>
```

dérive de compilation

```
/*  
 * @pre: n ≥ 0  
 * @post: factorielle vaut n!  
 */
```

```
int factorielle(int n){
```

```
    assert(n>=0);
```

vérifie la précondition sur n

```
    int fact = 1, i;  
    for(i=1; i<=n; i++)  
        fact *= i;
```

```
    return fact;
```

```
}//fin factorielle()
```

Progra. Défensive (5)

```
int main(){
    printf("%d\n", factorielle(5));
    printf("%d\n", factorielle(0));
    printf("%d\n", factorielle(-10));

    return 0;
} //fin programme
```

```
$> gcc -o factorielle factorielle.c
$> ./factorielle
120
1
Assertion failed: (n>=0), function factorielle, file
factorielle.c, line 9.
Abort trap: 6
```

Progra. Défensive (6)

- Exemple 2
 - fonction qui calcule le volume d'un cylindre de rayon R entre $z = [z_1, z_2]$

```
#include <assert.h>

/*
 * @pre: R>0, z2 > z1
 * @post: volume vaut le volume du cylindre (>0) de rayon
 *        R et de coordonnées (z1, z2)
 */
float volume(float z1, float z2, float R){
    assert((z2>z1) && (R>0));

    return M_PI * R * R * (z2 - z1);
} //fin volume()
```

Application

- Tri d'un tableau
- Les algorithmes de tri sont parmi les plus étudiés
 - différents algorithmes
 - toujours un sujet de recherche
 - ✓ trouver le meilleur algorithme pour une certaine charge de travail
- Différentes idées peuvent être apprises via ces algorithmes
 - découpe en sous-problèmes
 - complexité
 - récursivité + diviser et régner
- Le tri est une composante fondamentale de l'informatique

Application (2)

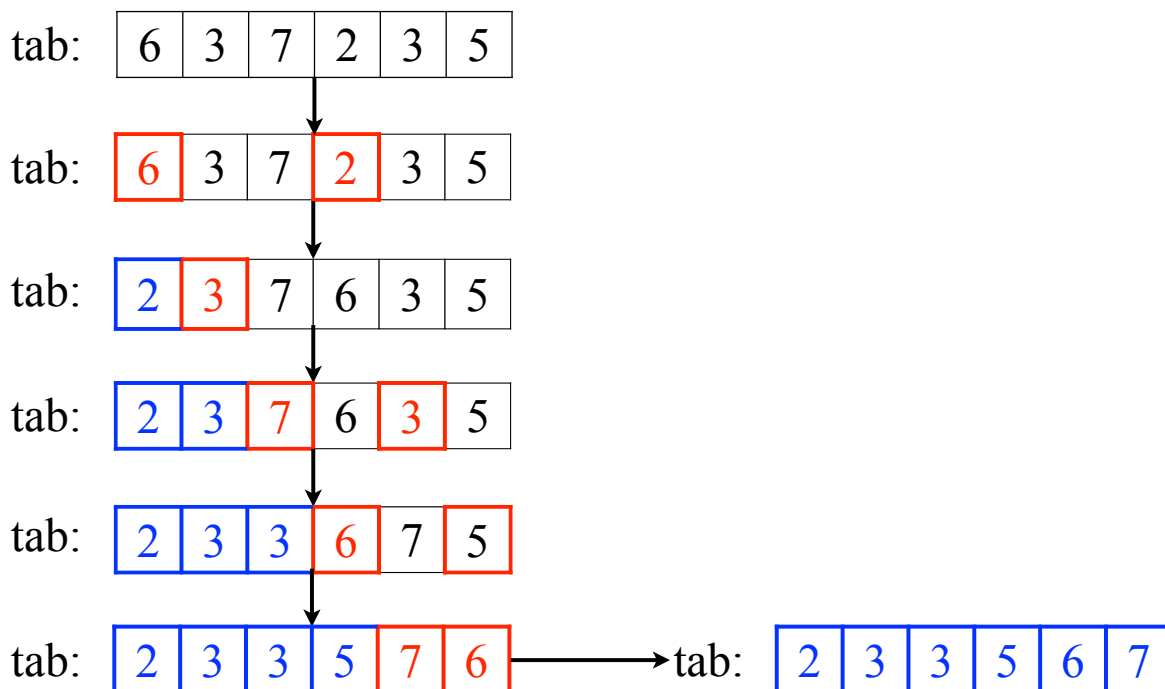
- Applications du tri
 1. recherche
 - ✓ recherche dichotomique
 2. paire la plus proche
 - ✓ étant donné n nombres, trouver les paires
 - ✓ une fois le tri effectué, c'est un problème "évident"
 3. unicité d'un élément
 - ✓ étant donné n nombres dans un "ensemble", sont-ils unique ou existe-t-il des duplicatas?
 4. calcul de statistiques
 - ✓ distribution de fréquence
 - ✓ calcul de la médiane (et autres quantiles)
 5. etc.

Application (3)

- Algorithme de tri
 - tri par sélection de valeurs
 - *Selection Sort*
- Principe
 - soit un tableau `tab` de n entiers
 - on cherche le minimum de tous les éléments et on le place en 1^{ère} position dans le tableau
 - ✓ il reste à trier $n-1$ éléments
 - on prend le minimum sur les $n-1$ éléments restants et on le place en 2^{ème} position dans le tableau
 - ✓ il reste à trier $n-2$ éléments
 - et ainsi de suite

Application (4)

- Illustration du principe de l'algorithme

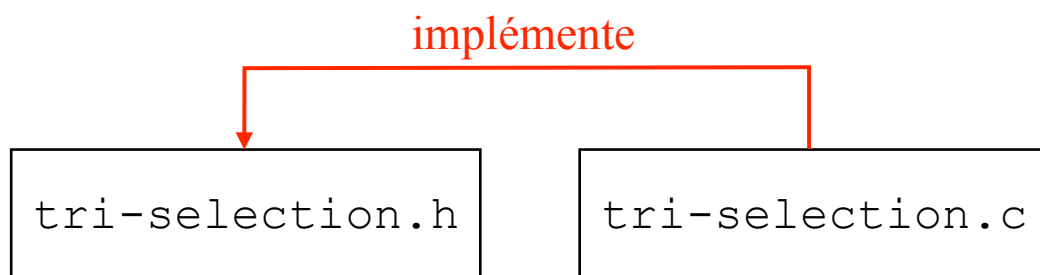


Application (5)

- Définition du problème
 - Input
 - ✓ `tab`, tableau d'entiers
 - ✓ `n`, taille du tableau
 - Output
 - ✓ le tableau est trié par ordre croissant
 - Objets Utilisés
 - ✓ $n \in \mathbb{N}_0$
 - ✓ le tableau `tab` existe et contient `n` valeurs entières

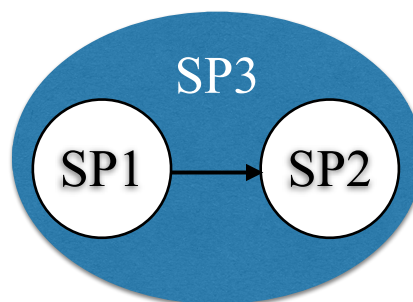
Application (6)

- Analyse du problème
 - architecture générale du code



Application (7)

- Analyse du problème (cont.)
 - SP1: retrouver l'indice du minimum dans un sous-tableau
 - SP2: permuter 2 éléments du tableau
 - SP3: problème général (i.e., tri)
- Interaction entre les SPs
 - $(SP1 \rightarrow SP2) \subset SP3$



Application (8)

- Spécification du SP1 (indice du minimum)
 1. quels sont les paramètres?
 - ✓ un tableau, `tab`, de n valeurs entières
 - ✓ un indice, `debut`, indiquant le début du sous-tableau
 2. quel est l'objectif de ma fonction?
 - ✓ retourner la position du minimum dans `tab[debut ... n-1]`
 - ✓ postcondition: la position du minimum dans `tab[debut ... n-1]`
 3. quelles sont les contraintes sur les paramètres?
 - ✓ n ne peut être négatif ou nul
 - ✓ `tab` doit exister et contenir des valeurs
 - ✓ `debut` doit se trouver dans les bornes du tableau
 - ✓ `tab[0 ... debut-1]` déjà trié
 - ✓ précondition: `tab` initialisé, $0 \leq \text{debut} < n$, $n > 0$, `tab[0 ... debut-1]` trié ↗

Application (9)

- Spécification du SP2 (permutation)
 1. quels sont les paramètres?
 - ✓ un tableau, `tab`, de n valeurs entières
 - ✓ deux indices, i et j , indiquant les positions des éléments à permuter
 2. quel est l'objectif de ma fonction?
 - ✓ permuter les valeurs de `tab[i]` et `tab[j]`
 - ✓ postcondition: `tab[i] <==> tab[j]`
 3. quelles sont les contraintes sur les paramètres?
 - ✓ n ne peut être négatif ou nul
 - ✓ `tab` doit exister et contenir des valeurs
 - ✓ i et j doivent se trouver dans les bornes du tableau
 - ✓ précondition: `tab` initialisé, $0 \leq i, j < n$, $n > 0$

Application (10)

- Spécification du SP3 (tri)
 1. quels sont les paramètres?
 - ✓ un tableau, `tab`, de n valeurs entières
 2. quel est l'objectif de ma fonction?
 - ✓ trier par ordre croissant `tab`
 - ✓ postcondition: `tab` trié par ordre croissant
 3. quelles sont les contraintes sur les paramètres?
 - ✓ n ne peut être négatif ou nul
 - ✓ `tab` doit exister et contenir des valeurs
 - ✓ précondition: `tab` initialisé, $n > 0$

Application (11)

- Fichier `tri-selection.h`

```
/*
 * @pre: tab initialisé, 0 ≤ debut < n, n > 0, tab[0..debut-1] trié ↗
 * @post: minimum vaut la position du minimum dans
 *         tab[debut ... n-1]
 */
int minimum(int tab[], int n, int debut);

/*
 * @pre: tab initialisé, 0 ≤ i, j < n, n > 0
 * @post: tab[i] <=> tab[j]
 */
void permutation(int tab[], int n, int i, int j);

/*
 * @pre: tab initialisé, n > 0
 * @post: tab trié par ordre croissant
 */
void tri(int tab[], int n);
```

Application (12)

- Fichier `tri-selection.c`

```
#include <assert.h>
#include "tri-selection.h"
```

Application (13)

- Définition du SP1
 - Input
 - ✓ un tableau `tab` à n valeurs entières
 - ✓ `debut`, l'indice du début du sous-tableau
 - Output
 - ✓ la position du minimum dans `tab[debut ... n-1]`
 - Objets Utilisés
 - ✓ `tab` (tableau d'entiers), `n` (entier), `debut` (entier)
- Analyse
 - \emptyset
- Idée de solution
 - parcourir le tableau à partir de `debut` jusque `n-1`
 - maintenir le minimum "jusque maintenant" et sa position
 - retourner la position du minimum

Application (14)

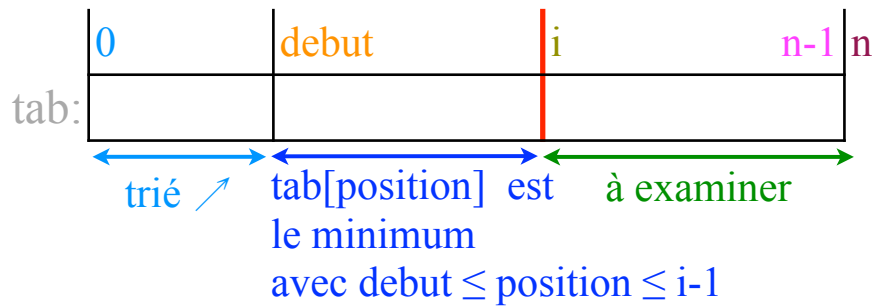
- Représentation graphique de l'Output

```
/*  
 * @pre: tab initialisé,  $0 \leq \text{debut} < n$ ,  $n > 0$ , tab[0..debut-1] trié ↗  
 * @post: minimum vaut la position du minimum dans  
 *        tab[debut ... n-1]  
 */  
int minimum(int tab[], int n, int debut);
```



Application (15)

- Invariant Graphique pour le SP1

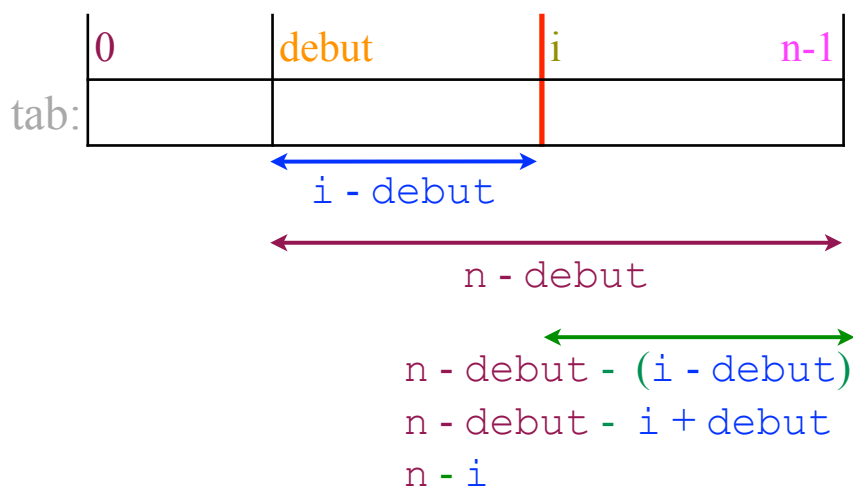


Légende:

- Règle 1
- Règle 2
- Règle 3
- Règle 4
- Règle 5
- Règle 6

Application (16)

- Construction de la fonction de terminaison



\Rightarrow Fonction de Terminaison: $n-i$

Application (17)

- Code SP1

```
int minimum(int tab[], int n, int debut){
    assert(tab!=NULL && debut>=0 && debut<n && n>0);

    int position=debut, i = debut+1;

    while(i<n){
        if(tab[i]<tab[position])
            position = i;

        i++;
    }//fin while - i

    return position;
}//fin minimum()
```

Diagram illustrating the selection sort algorithm's state during the `while` loop. The array `tab` is shown with indices `0`, `debut`, `i`, and `n-1`. The region from `0` to `i` is labeled "trié ↗" (sorted). The region from `debut` to `i` is labeled "tab[position] est le minimum" and "debut ≤ position ≤ i-1". The region from `i` to `n-1` is labeled "à examiner" (to be examined).

Application (18)

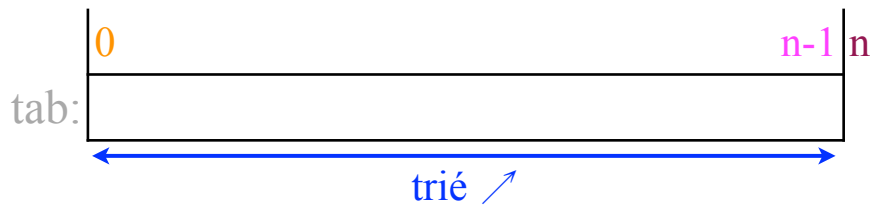
- Code SP2

```
void permutation(int tab[], int n, int i, int j){
    assert(tab!=NULL && i>=0 && i<n && j>=0 && j<n && n>0);

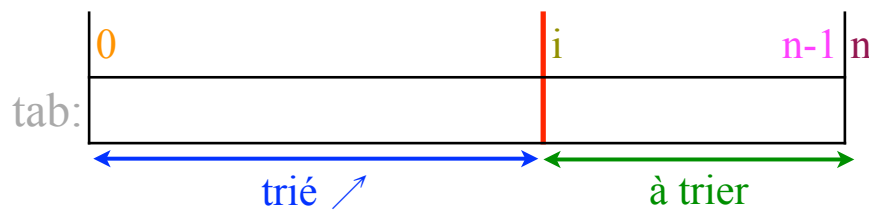
    int tmp = tab[i];
    tab[i] = tab[j];
    tab[j] = tmp;
}//fin permutation()
```

Application (19)

- Représentation graphique de l'Output du SP3



- Invariant Graphique pour le SP3



Légende:

- Règle 1
- Règle 2
- Règle 3
- Règle 4
- Règle 5
- Règle 6

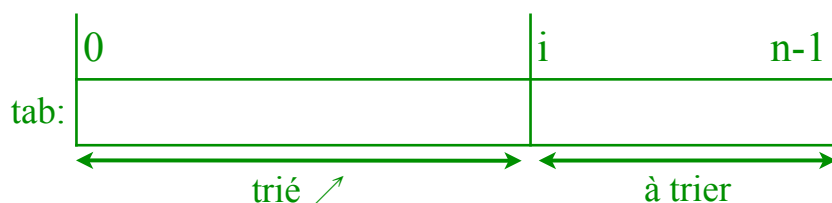
- Fonction de Terminaison
 - $n-i$

Application (20)

- Code SP3

```
void tri(int tab[], int n){
    assert(tab!=NULL && n>0);
    int i, min_pos;

    for(i=0; i<n; i++){
        min_pos = minimum(tab, n, i);
        permutation(tab, n, i, min_pos);
    } //fin for - i
} //fin tri()
```



Application (21)

- Complexité du selection sort?

```
void tri(int tab[], int n){
```

```
    assert(tab!=NULL && n>0);  
    int i = 0, min_pos;
```

$T(A)$

```
    while(i<n){
```

```
        min_pos = minimum(tab, n, i);
```

$T(B')$

```
        permutation(tab, n, i, min_pos);
```

$T(B)$

$T(B'')$

```
        i++;
```

$T(B''')$

```
    } //fin for - i
```

```
} //fin tri()
```

Application (22)

- Par application des règles 2 & 6

- $T(n) = T(A) + T(B)$

- Par application des règles 1 & 5

$$T(n) = T(A) + T(B)$$

$$= 1 + \sum_{i=0}^{n-1} (T(B') + T(B'') + T(B'''))$$

$$= 1 + \sum_{i=0}^{n-1} (T(B') + 2)$$

- Quid de $T(B')$?

- évaluer la complexité de la fonction `minimum()`

Application (23)

- Complexité de `minimum()`

```
int minimum(int tab[], int n, int debut){
```

```
    assert(tab!=NULL && debut>=0 && debut<n && n>0);  
    int position=debut, i = debut+1;
```

$T(A)$

```
    while(i<n){
```

```
        if(tab[i]<tab[position])  
            position = i;
```

$T(B')$

```
        i++;
```

$T(B'')$

```
    }//fin while - i
```

$T(B)$

```
    return position;
```

$T(C)$

```
}//fin minimum()
```

Application (24)

- Complexité de `minimum()` (cont.)

$$T(n) = T(A) + T(B) + T(C)$$

$$= 1 + \sum_{i=debut}^{n-1} (T(B') + T(B'')) + 1$$

$$= 2 + \sum_{i=debut}^{n-1} (1 + 1)$$

$$= 2 + \sum_{i=debut}^{n-1} 2$$

$$= 2 + \sum_{i=0}^{n-1} 2$$

$$= 2 \times n + 2$$

Application (25)

- Retour à la complexité du selection sort
 - $T(B') = 2 \times n + 2$
- Il vient

$$\begin{aligned}T(n) &= 1 + \sum_{i=0}^{n-1} (2 \times n + 2 + 2) \\&= 1 + \sum_{i=0}^{n-1} (2 \times n + 4) \\&= 1 + 2 \times n^2 + 4 \times n \\&= 2 \times n^2 + 4 \times n + 1\end{aligned}$$

- Par quoi borner $T(n)$?
 - $O(n^2)$
 - **complexité quadratique**

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - Compilation Séparée
 - Programmation par Contrat
 - Variable Statique
 - ✓ Principe
 - ✓ Application
 - Variable Globale
 - Macro

Principe

- A l'intérieur d'une fonction, on peut déclarer une variable comme **static**
- La variable sera alors allouée statiquement
 - l'initialisation de la variable se fait une et une seule fois
 - la variable est partagée entre tous les appels de la fonction
- Une variable **static** dans une fonction est partagée entre tous les appels

Principe (2)

- Il est aussi possible de déclarer une fonction/procédure avec le mot-clé **static**
- Intérêt?
 - la fonction/procédure ne sera visible/utilisable qu'à l'intérieur du module dans lequel elle est définie

Application

- Exemple

```
#include <stdio.h>

int compteur(){
    static int x = 0;
    x++;

    return x;
} //fin compteur()

int main(){
    int i;

    for(i=0; i<3; i++)
        printf("%d\n", compteur());

    return 0;
} //fin programme
```

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - Compilation Séparée
 - Programmation par Contrat
 - Variable Statique
 - Variable Globale
 - ✓ Principe
 - ✓ Application
 - Macro

Principe

- Jusqu'à maintenant, on a considéré uniquement des variables définies dans un bloc
 - variables locales
- Il est possible, en C, de définir des variables en dehors de toute fonction (ou bloc d'instructions)
 - variables globales

```
type de la      identificateur
variable globale de la variable globale

[static][const] type identificateur [= valeur]
                [, identificateur [= valeur]]
                ...
                [, identificateur [=valeur]];
limitation de la portée au fichier
de définition de la variable
```

Principe (2)

- La portée de la variable globale s'étend à tout le programme
 - même si le code est réparti dans plusieurs fichiers
- Pour utiliser une telle variable globale, il faut aider le compilateur à connaître son nom et son type

```
extern type identificateur [,identificateur [,...]];
```

Mot-clé indiquant que la variable globale
est définie dans un autre fichier source

Principe (3)

- Les variables globales doivent être utilisées avec prudence
 - effets de bord
 - ✓ les fonctions peuvent manipuler et modifier les variables globales
 - ✓ risque d'inconsistance
 - conflits de nom
 - ✓ si pas **static**, il peut y avoir des conflits de nom dans les grands programmes

Application

- Exemple: Compteur simple
 - fichier `compteur.h`

```
extern int compteur_valeur;

/*
 * @pre: -
 * @post: compteur_valeur initialisé à 0
 */
void compteur_init(void);

/*
 * @pre: compteur_valeur ≥ 0
 * @post: le compteur est incrémenté d'une unité
 */
void compteur_plus(void);
```

Application (2)

- Exemple: Compteur simple
 - fichier `compteur.h` (suite)

```
/*
 * @pre: compteur_valeur ≥ 0
 * @post: compteur_valeur décrémenté de 1 unité &
 *         compteur_valeur ≥ 0
 */
void compteur_moins(void);

/*
 * @pre: compteur_valeur ≥ 0
 * @post: (compteur_valeur==0)
 */
int compteur_est_zero(void);
```

Application (3)

- Fichier `compteur.c`

<pre>#include "compteur.h" int compteur_valeur; void compteur_init(){ compteur_valeur = 0; } //fin compteur_init() void compteur_plus(){ compteur_valeur++; } //fin compteur_plus() void compteur_moins(){ if(compteur_valeur>0) compteur_valeur--; } //fin compteur_moins()</pre>	<pre>int compteur_est_zero(){ return !compteur_valeur; } //fin compteur_est_zero()</pre>
--	--

Application (4)

- Fichier `compteur-main.c`

```
#include <stdio.h>
#include "compteur.h"

static void affiche(){
    printf(compteur_est_zero() ? "== 0\n" : "!= 0\n");
} //fin affiche()

int main(){
    compteur_init(); compteur_plus(); compteur_plus();
    compteur_moins();
    affiche();
    compteur_moins();
    affiche();

    return 0;
} //fin programme
```

Agenda

- Chapitre 6: Modularité du Code
 - Principe
 - Fonctions et Procédures
 - Compilation Séparée
 - Programmation par Contrat
 - Variable Statique
 - Variable Globale
 - Macro

Macro

- Il existe, en C, un mécanisme (autre que la fonction) permettant de déployer un même fragment de code à plusieurs endroits
 - **macro**
- Directive de pré-traitement
 - il s'agit d'une substitution syntaxique
 - appliquée avant la compilation
- Construction

```
#define nom [(id1 [,id2 [,...]])] texte
```

Paramètres éventuels

Directive de pré-traitement

toute occurrence de “nom”
sera remplacée par “texte”
dans la suite du programme

Macro (2)

- Exemples

```
#define PI 3.141592653589793238
```

```
#define square(x) ((x) * (x))
```

```
#define max(a, b) ((a) > (b) ? (a) : (b))
```

- Les macros ne sont pas des fonctions!
 - le comportement diffère quand l'évaluation des arguments provoque des effets de bords
 - ✓ `square(n++)` se substitue en `((n++) * (n++))`
 - ✓ `n` incrémenté deux fois
 - la substitution se fait vraiment de manière textuelle
 - ✓ `#define N = 5`
 - ✓ `int t[N] ⇒ int t[= 5]`

Macro (3)

- Attention à la priorité des opérateurs
 - `#define square(x) x * x`
 - `square(a+b)`
 - ✓ `a+b * a+b`
 - ce n'est pas ce que l'on souhaite
- Emploi des parenthèses conseillé
- Globalement, à utiliser avec beaucoup de prudence