Programmation Comparée

Cours Introductif

Yann **Régis-Gianas**
yrg@pps.univ-paris-diderot.fr

PPS - Université Denis Diderot – Paris 7

Plan

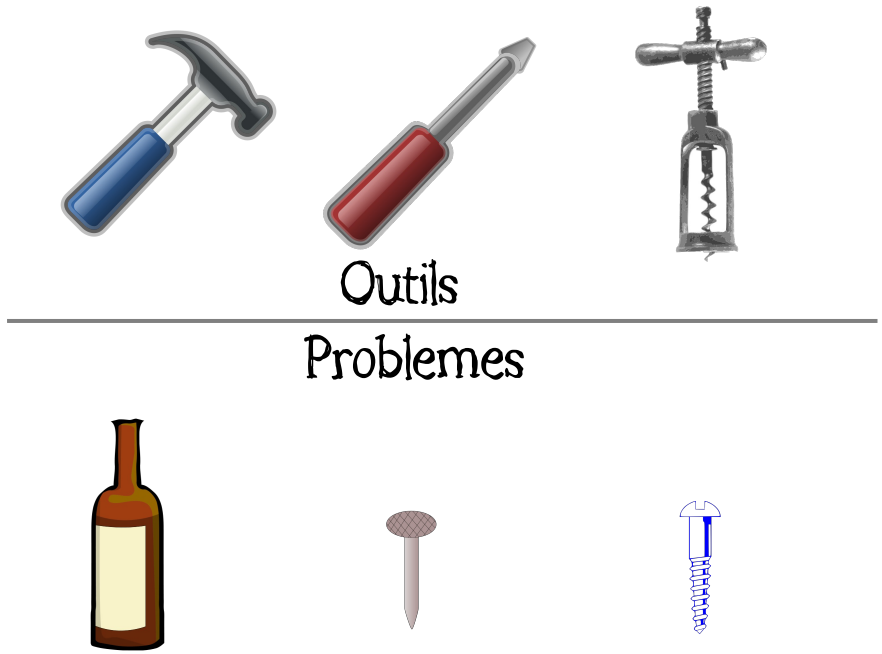
Principe du cours

Programmation : Quels outils ? Quels problèmes ?

Objectifs et fonctionnement du cours

Plan

Qu'est-ce que la programmation ?



(Une définition plus sérieuse vient un peu plus loin.)

Il faut bien comprendre l'outil en lui-même **et** son utilité.

Comment progresser en programmation ?

Apprentissage centré sur les mécanismes de programmation

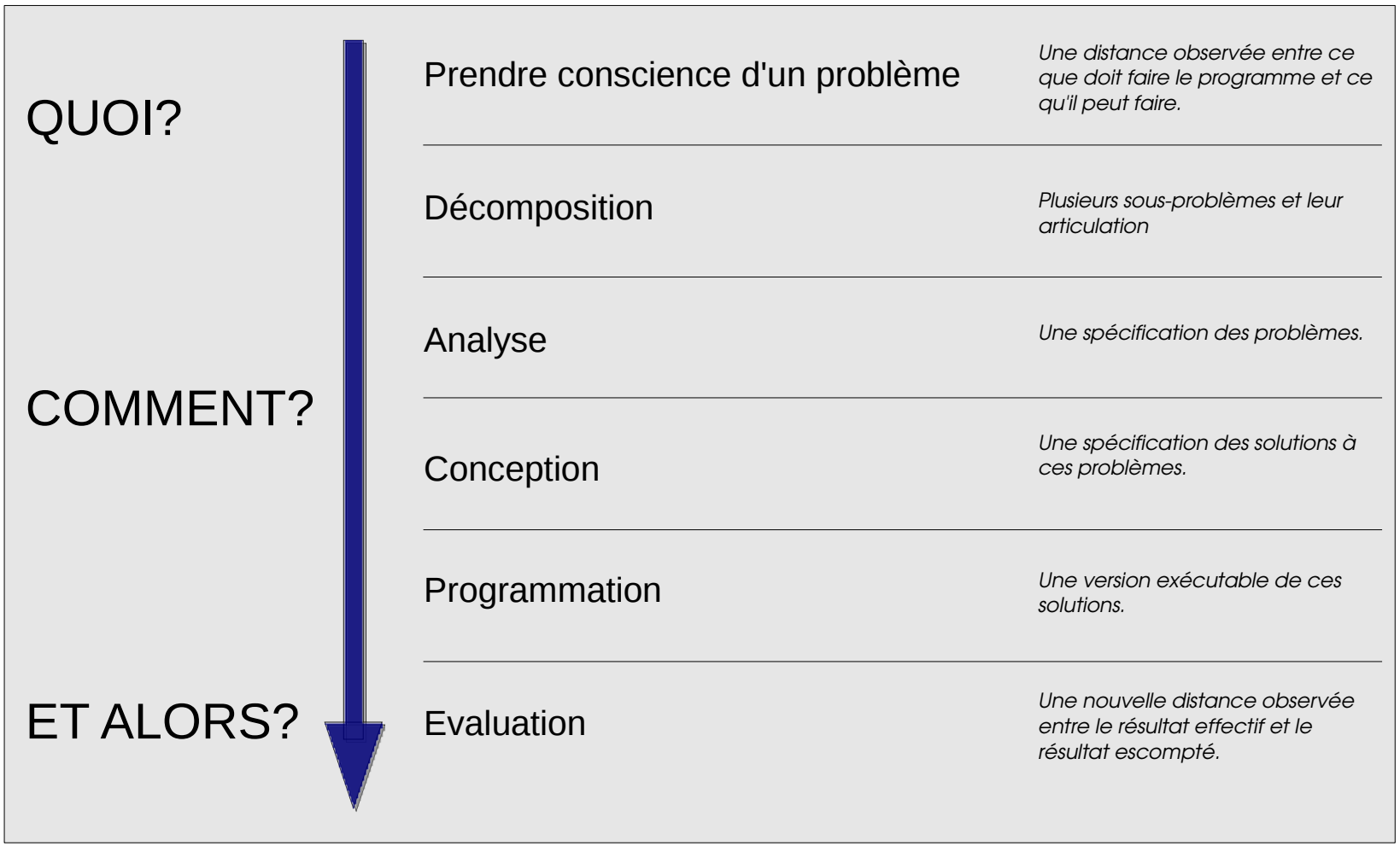
Apprentissage linguistique

1. Comprendre un mécanisme de programmation
2. Raisonner sur des programmes écrits à l'aide de ces mécanismes
3. L'intégrer dans sa boîte à outils

Apprentissage méta-linguistique

- Didactique : Apprendre à apprendre un nouveau langage
- Dialectique : Comprendre ce qui se passe (en comprenant ce qui s'est passé)

Le développement logiciel



La programmation moderne

La programmation est l'**activité** qui consiste à construire une version exécutable de la solution à un problème.

Dans un développement moderne de logiciel, cette activité prend de nombreuses formes car les outils matériels et logiciels ont énormément évolué. Ainsi, on ne construit désormais que très rarement un logiciel à partir de rien. Le travail du programmeur s'appuie sur les mécanismes de langages de programmation différents, sur des environnements préexistants (*framework*) d'architecture particulière, sur des systèmes d'exploitation variés, ... Tous ces paramètres influent sur la façon de développer et sur la qualité du logiciel final.

Comment faire ces choix ?

Plan

Langage de programmation

Langage de programmation

Un langage de programmation est un langage formel défini par une syntaxe et une sémantique. Plus un langage de programmation fournit de mécanismes de calcul distincts et plus il est dit *expressif*.

Un langage de programmation est une abstraction du code machine concrètement exécuté *in fine*. Son niveau d'abstraction dépend de sa distance à ce code machine. Plus un langage de programmation est proche de la formulation du problème issue de la phase d'analyse et plus il est dit **déclaratif**.

Outils autour des langages de programmation

Un **compilateur** traduit un programme dans un langage de plus bas niveau pour le rendre plus adapté à une exécution efficace par la machine. Ainsi, un compilateur peut produire du code natif, c'est-à-dire du code exécutable directement par le processeur de la machine physique. Il peut aussi produire du code machine pour une machine virtuelle, simulée par une ou plusieurs machines concrètes.

Un **interprète** est un programme qui évalue le code source écrit par le programmeur sans passer par une phase de traduction préalable.

Un **analyseur statique** est un programme qui, sans exécuter le code source, fournit des informations sur ce dernier. Un typeur est un exemple d'analyseur statique : il fournit la garantie qu'un programme pourra s'exécuter sans erreur grossière et produire une valeur.

En fonction de la présence ou de l'absence de ses outils, un langage est dit interprété, compilé et avec ou sans analyseurs statiques.

Critères de classification

Il existe des milliers de langages de programmation. Le site suivant en référence pas moins de 8512 :

http://hopl.murdoch.edu.au/

Il en existe de nombreuses taxonomies :

http://hopl.murdoch.edu.au/taxonomy.html
http://www.info.ucl.ac.be/~pvr/paradigmsDIAGRAMeng108.pdf

La classification que nous allons suivre s'appuiera sur une méthode moins systématique et rigoureuse que ces deux approches au profit d'un accent mis sur les familles de langages les plus utilisées.

Langage assembleur

Les langages d'**assemblages**, ou simplement **assembleur**, sont des langages de bas-niveau liés à un jeu d'instructions d'un processeur particulier. Les assembleurs ont été inventés dans les années 50. Ils étaient alors nommés langages de seconde génération car ils remplacaient les langages machines, de première génération.

Un programme écrit en assembleur est généralement formé à l'aide de trois classes syntaxiques :

- Les **mnémomiques d'instruction** décrivent les opérations effectuées par le processeur.
- Les **directives d'assemblage** donnent des informations externes sur la façon de produire le code exécutable à partir du code assembleur.
- Les **sections de données** contiennent des descriptions des constantes utilisées par le programme.

Exemple de programme assembleur i386

Source : Wikipedia

```
.globl _start
DATA:  .ascii "Hello World"
_start:  mov $4 , %eax
         mov $1 , %ebx
         mov $DATA , %ecx
         mov $8 , %edx
         int $0x80

         mov $1 , %eax
         mov $0 , %ebx
         int $0x80
```

Pour produire un exécutable sous Linux :

```
% gcc foo.S -c -o foo.o
% ld foo.o -o foo
% ./foo
```

Exercice

1. Écrire un programme assembleur qui sort avec un statut de sortie valant 42.
2. Écrire le meilleur joueur de Corewar.

Mécanismes principaux du langage assembleur

Par définition, l'assembleur ne fournit pas d'abstraction au dessus du processeur. En revanche, tous les mécanismes de calcul du processeur sont accessibles. Ainsi, du point de vue de l'utilisation optimale des fonctionnalités de la machine, le langage assembleur est très expressif.

Par ailleurs, comme la structure du code machine est totalement libre, certains mécanismes sont réalisables alors qu'ils sont inaccessibles dans (la plupart des) les langages de haut niveau :

- **Factorisation de code maximale** : les conventions d'appel de procédure créé généralement des barrières d'abstraction empêchant la factorisation de fragments de code communs entre les procédures.
- **Code auto-généré et auto-modifiant** : un programme assembleur peut (généralement) écrire dans son segment de code ce qui lui permet de se modifier pour s'optimiser (dérouler une boucle par exemple) ou encore décrypter une partie de son code.

Utilisations courantes de l'assembleur

De nos jours, l'assembleur est peu utilisé car les compilateurs des langages de haut-niveau produisent en général du code d'efficacité très proche de ce que l'on pourrait écrire à la main. En particulier, les algorithmes d'allocation des registres modernes peuvent produire des résultats qu'un programmeur aurait du mal à obtenir.

De plus, un programme écrit en assembleur est difficile à écrire et à maintenir car il est généralement moins concis et moins modulaire qu'un programme écrit dans un langage de haut niveau. De plus, il n'est pas portable.

Il reste néanmoins quelques applications où l'assembleur est utilisé :

- Certaines instructions très spécifiques des microprocesseurs ne sont pas gérées par les compilateurs. Pour en tirer parti, une routine assembleur est nécessaire.
- Les *drivers* s'appuient sur une interaction très précise avec les ports d'entrées/sorties et les registres spéciaux des processeurs que l'on ne peut pas forcément contrôler dans un langage de haut-niveau.

Exemple de routine assembleur en ligne

```
for (number = 0; number ≤ max; ++number) {
   for (i = (number ≫ 1), position = 0; i != 0; ++position)
      i ≫= 1;
   result = position;
}
```

Que fait ce programme C ?

Exemple de routine assembleur en ligne

```
for (number = 0; number ≤ max; ++number) {
   asm ("bsr1 %1, %0" :  "=r" (position) :  "r" (number));
   result = position;
}
```

Ce programme s'exécute 6 fois plus rapidement.

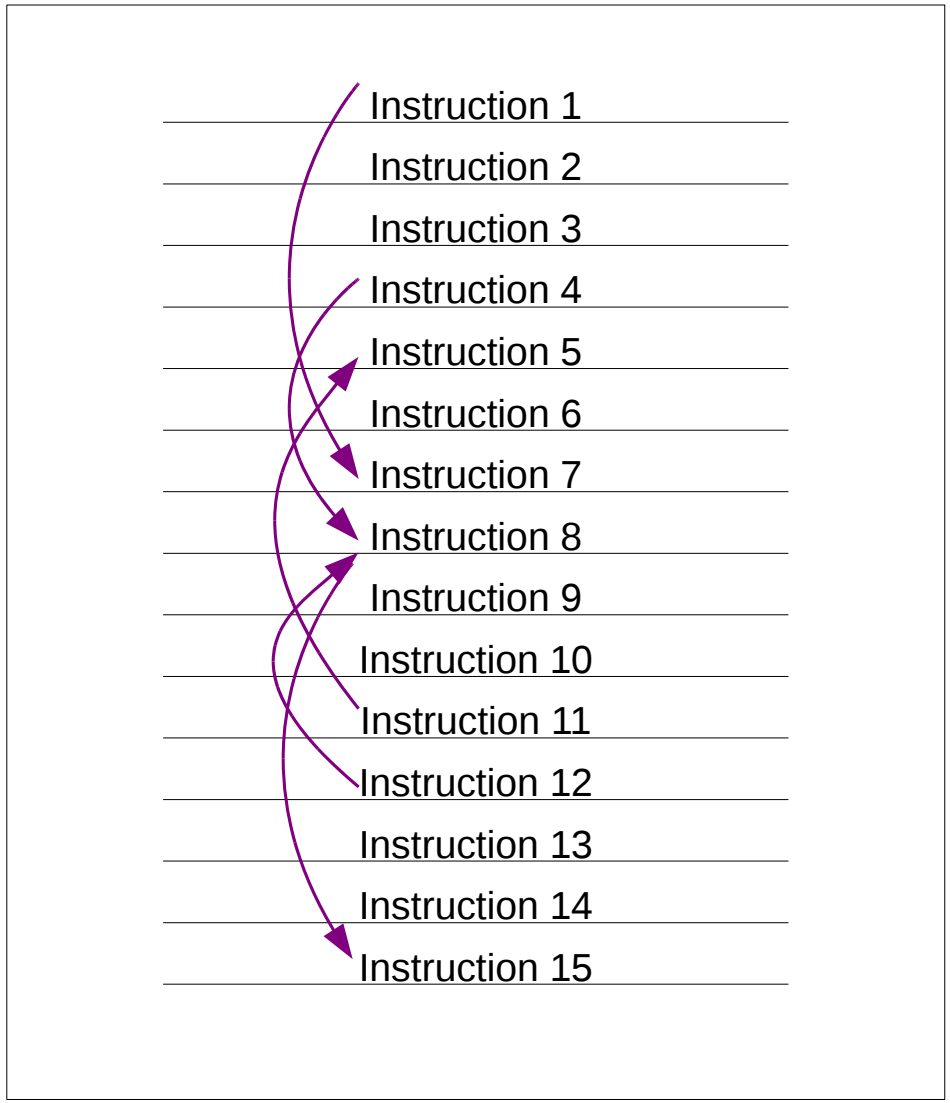
Conclusion sur l'assembleur

Nous n'étudierons pas la programmation assembleur dans ce cours de programmation comparée car son utilisation est devenue rare. Néanmoins, il est sans doute enrichissant d'avoir écrit une routine assembleur une fois dans sa vie de programmeur.

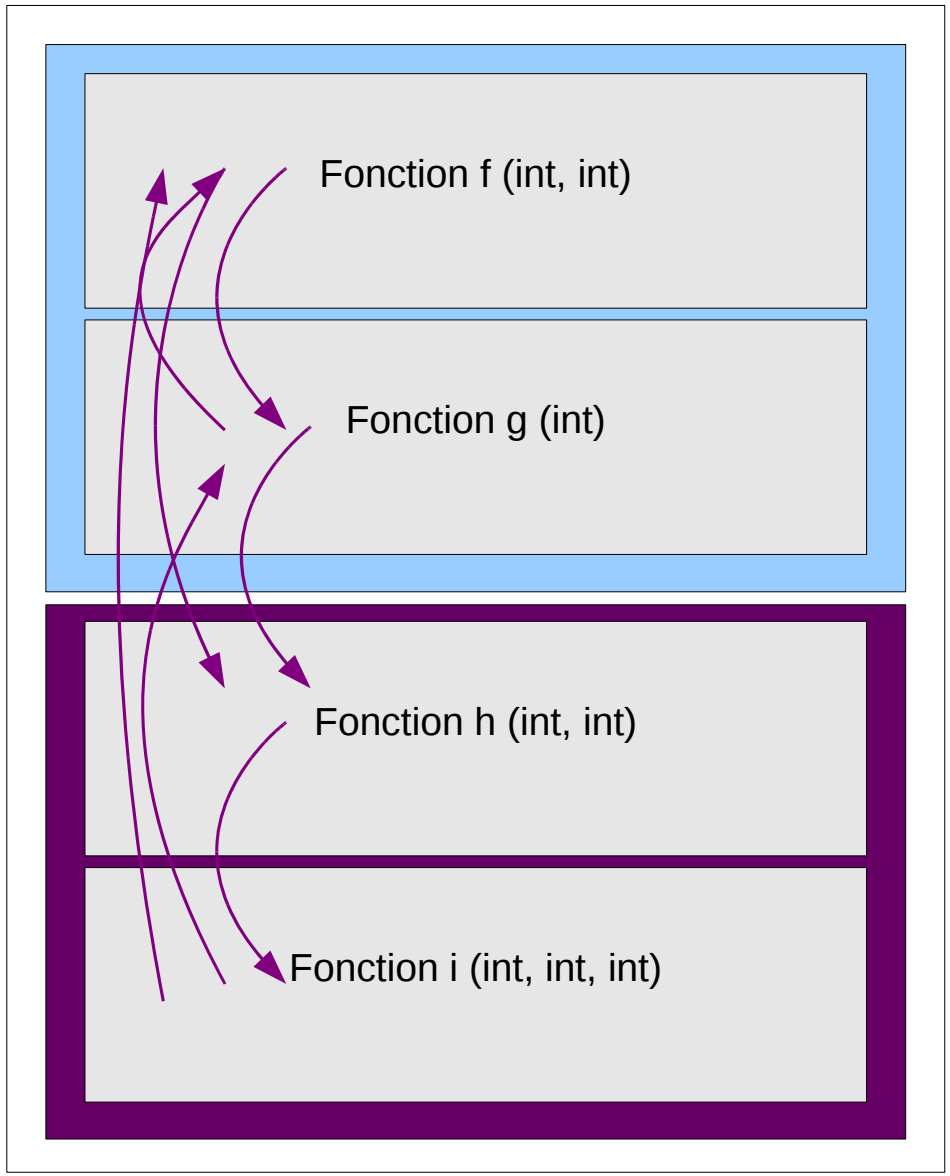
Pour aller plus loin...

- Programming from the Ground Up, Jonathan Bartlett
- Les sources Prince of Persia
- Le code source du module de guidage d'atterissage d'APOLLO 11.

De la programmation non structurée . . .



. . . à la programmation structurée.



Langages procéduraux du premier ordre

Dans les années 60, la crise du logiciel a conduit à une réflexion autour de la méthodologie de la construction des programmes informatiques, aboutissant à l'émergence du génie logiciel. Du point de vue des langages de programmation, des mécanismes pour **structurer** la programmation et les programmes sont apparus :

- Structures de contrôle de haut-niveau : **while**, **if-then-else**,...
- Procédures et fonctions (de seconde classe).
- Suppression du **goto**
  (Un point unique de sortie et d'entrée pour les boucles.)
- Minimisation des variables globales au profit de variables locales.

Un article de recherche de l'époque explique bien pourquoi ces **restrictions** de l'expressivité des langages de programmation sont bénéfiques :

Go To Statement Considered Harmful – Edsger Dijkstra
http://www.ifi.uzh.ch/req/courses/kvse/uebungen/Dijkstra_Goto.pdf

Exemple de programme procédural en ADA

```
procedure Sort (Item : in out Element_Array) is
    Pivot_Index : Index_Type;
    Pivot_Value : Element_Type;
    Right : Index_Type := Item'Last;
    Left : Index_Type := Item'First;
begin
    if Item'Length > 1 then
        Pivot_Index := Index_Type'Val((Index_Type'Pos(Item'Last) + 1 +
                                       Index_Type'Pos(Item'First)) / 2);
        Pivot_Value := Item(Pivot_Index);
        Left := Item'First;
        Right := Item'Last;
        loop
            while Left < Item'Last and then Item(Left) < Pivot_Value loop
                Left := Index_Type'Succ(Left);
            end loop;
            while Right > Item'First and then Item(Right) > Pivot_Value loop
                Right := Index_Type'Pred(Right);
            end loop;
            exit when Left ≥ Right;
            Swap(Item(Left), Item(Right));
            if Left < Item'Last and Right > Item'First then
                Left := Index_Type'Succ(Left);
                Right := Index_Type'Pred(Right);
            end if;
        end loop;
        if Right > Item'First then Sort(Item(Item'First..Index_Type'Pred(Right))); end if;
        if Left < Item'Last then Sort(Item(Left..Item'Last)); end if;
    end if;
end Sort;
```

La programmation structurée

En plus de ces langages de programmation procéduraux, cette programmation plus structurée est également caractérisée par une méthologie de conception des programmes par raffinements successifs descendants.

Nous étudierons cette méthode dans le prochain cours et la comparerons aux méthodes de modélisation que vous connaissez déjà.

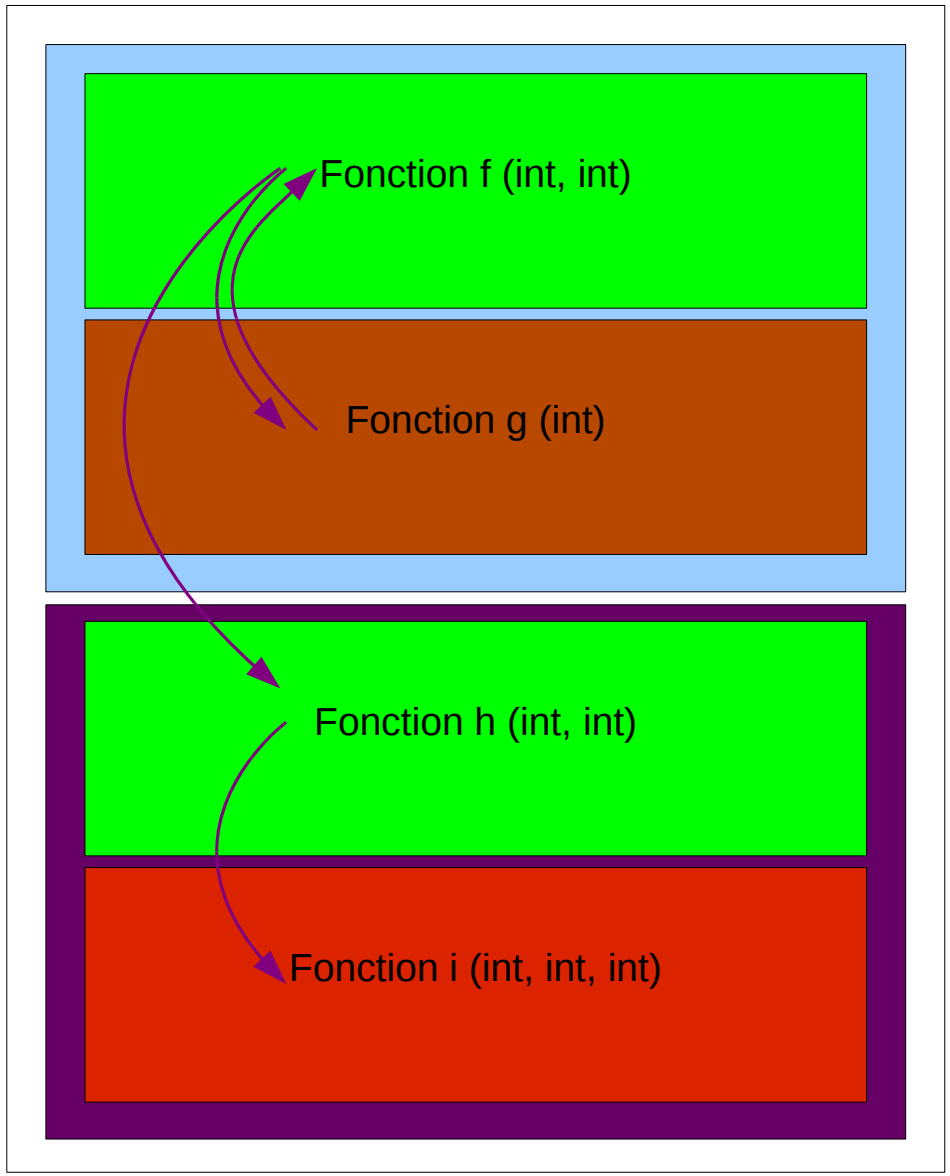
La programmation en grand

Les logiciels devenant de plus en plus complexes, les besoins de fragmentation de leur développement se sont sentis de plus en plus forts. Des outils linguistiques pour mener une “programmation en grand” (*Programming in the large*) ont alors été proposés. Ils visaient à faciliter l'interconnection de composants logiciels :

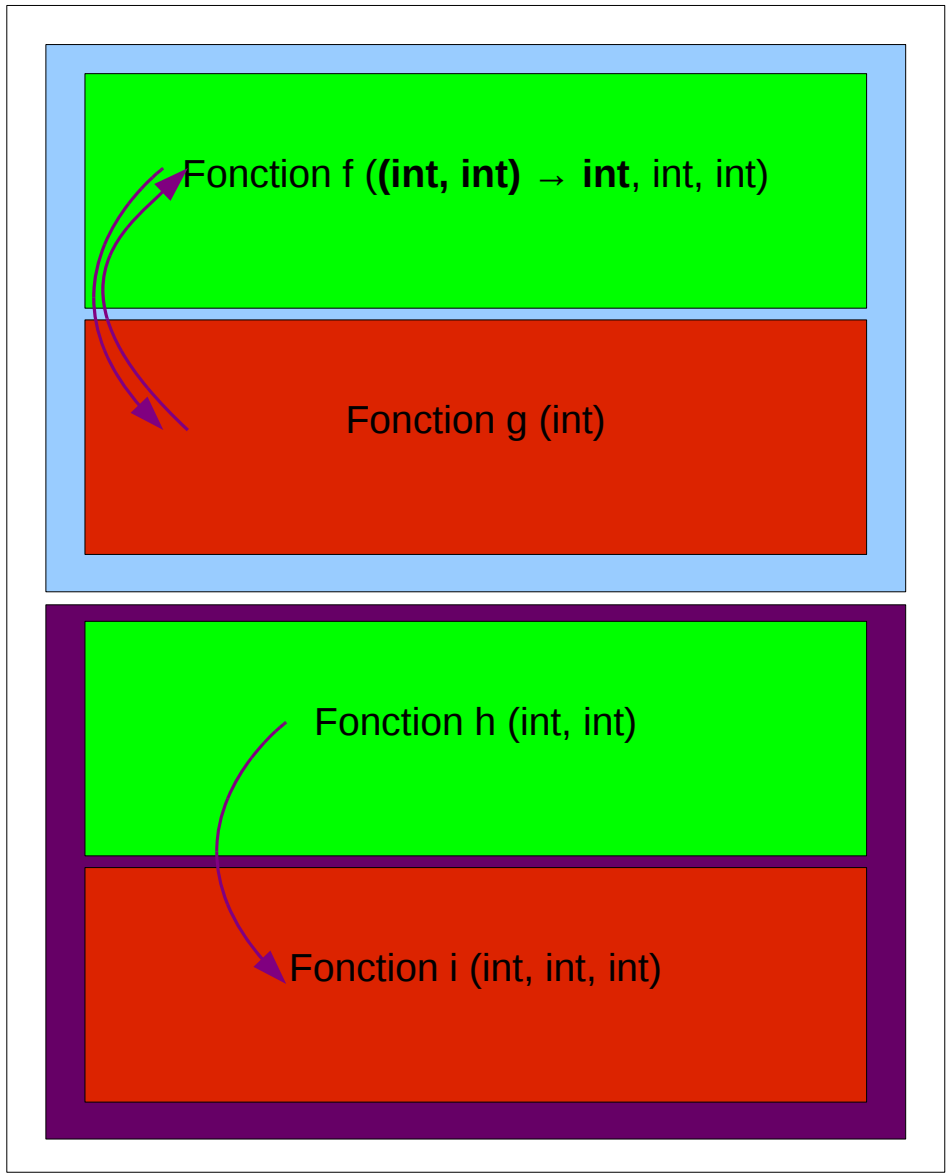
> *By large programs we mean systems consisting of many small programs (modules), possibly written by different people. We need languages for programming-in-the-small, i.e. languages not unlike the common programming languages of today, for writing modules. We also need a “module interconnection language” for knitting those modules together into an integrated whole and for providing an overview that formally records the intent of the programmer(s) and that can be checked for consistency by a compiler. We explore the software reliability aspects of such an interconnection language. Emphasis is placed on facilities for information hiding and for defining layers of virtual machines.*

Programming-in-the-large versus programming-in-the-small
DeRemer, Frank ; Kron, Hans (1975)

Des mécanismes pour . . .



. . . limiter les interdépendances



La modularité

Nous allons étendre la réflexion déjà entamée en POCA sur les propriétés de **modularité** des composants logiciels en étudiant et comparant les mécanismes suivants :

- Les types abstraits.
- Les fonctions d'ordre supérieur.
- Les modules, les classes, les mixins et les classes de type.
- Les messages de première classe.

Nous verrons aussi comment la modularité peut être obtenue par différentes formes de décomposition du logiciel en composants et composition des composants en logiciel. En particulier, nous aborderons et comparerons :

- La programmation orientée objet.
- La programmation orientée aspect.
- La programmation orientée sujet.
- La programmation orientée rôle.
- La programmation fonctionnelle.

Les langages d'ordre supérieur

Une idée au cœur de la programmation modulaire est de considérer le code exécutable comme un **objet de première classe**, c'est-à-dire comme pouvant être l'issue d'un calcul ou bien un de ses paramètres.

Nous comparerons les différentes réalisations de cette idée, qu'ils s'agissent des S-expressions de LISP ou bien des fermetures des langages objets et fonctionnels.

Pouvoir écrire une fonction d'ordre supérieur, c'est-à-dire une fonction qui manipule d'autres fonctions, induit un gain très important en expressivité puisque le programmeur peut par exemple définir lui-même ses propres opérateurs de contrôle.

Par ailleurs, nous verrons comment le paradigme de la programmation fonctionnel apporte une augmentation de la déclarativité, facilitant le raisonnement sur les programmes. On peut pousser plus loin encore cette déclarativité en **contrôlant les effets de bord** comme le font les langages de programmation fonctionnelle pure.

Exemple de programme fonctionnel

```
mkRands = mapM (randomRIO.(,)0 ). enumFromTo 1. pred

replaceAt :: Int → a → [a] → [a]
replaceAt i c = let (a,b) = splitAt i l in a++x: (drop 1 b)

swapElems :: (Int, Int) → [a] → [a]
swapElems (i,j) xs | i ≡ j = xs
                   | _ = replaceAt j (xs ! !i) $ replaceAt i (xs ! !j) xs

knuthShuffle :: [a] → IO [a]
knuthShuffle xs =
  liftM (foldr swapElems xs. zip [1..]) (mkRands (length xs))
```

Langages de programmation générique et de métaprogrammation

Certes, les langages d'ordre supérieur manipulent du code exécutable mais d'une façon assez limitée : il n'est par exemple pas possible d'écrire une fonction d'ordre supérieur qui **inspecte** une fonction qui lui est passée en argument pour en produire une autre plus efficace ou en l'adaptant pour traiter une nouvelle forme de données.

La **méta-programmation** consiste à écrire des programmes qui manipulent le code source d'autres programmes. De nombreuses transformations automatiques de programmes sont utiles pour éviter au programmeur l'écriture de code répétitif.

La distinction entre *run-time* et *compile-time* est souvent supprimée dans un langage de méta-programmation. On peut ainsi calculer et recompiler certains fragments d'un programme pendant l'exécution.

Exemple de spécialisation de programmes

```
let lift x = .<x>.
let rec member l y =
  match l with
  | [] → .<false>.
  | x :: xs → .<if .~(lift x) = .~y then true else .~(member xs y)>.

let spec_member = .< fun x → .~(member [1;2;3] x) >.
```

$spec_{member}$ est une version **spécialisée** de la fonction `member`.

Le modèle de calcul concurrent

Les systèmes informatiques peuvent interagir avec un environnement où plusieurs événements peuvent arriver simultanément, où des processus **concurrents** s'exécutent parallèlement à des rythmes distincts suivant des lois non nécessairement déterministes (par exemple, probabilistes).

Or, un programme s'exécute *in fine* sur une machine déterministe.

Comment décomposer un programme dans ce cadre ?

Une des réponses à cette question consiste à voir le programme lui-même comme un ensemble de composants concurrents. Dès lors, ces composants peuvent être exécutés sur un même processeur en entrelaçant leurs exécutions ou bien sur de multiples processeurs. La communication entre ces composants peut s'effectuer *via* une mémoire partagée ou encore *via* des messages envoyés sur des canaux de communication.

La programmation concurrente

Comment programmer dans un modèle concurrent ?

On trouve aujourd'hui de nombreuses approches distinctes pour traiter la concurrence ainsi que différents points de vue sur celle-ci. Nous comparerons :

- Le modèle à mémoire partagée.
- Le modèle par passage de messages.
- Les modèles synchrone/asynchrone.
- La concurrence optimiste/pessimiste.

ainsi que les façons de les programmer à l'aide de langages généralistes ou dédiés à la concurrence.

Exemple de programme concurrent

Une pile concurrente en JoCaml :

```
#let new_stack () =
    def state (s) & push (v) = state (v::s) & reply to push
     or state (x::s) & pop () = state (s) & reply x to pop
 in
    spawn state([]);
    pop, push
 ;;
val new_stack : unit → (unit → α) × (α → unit) = <fun>
```

Dans ce cadre, faire une opération `pop` sur une pile vide ne plante pas le programme mais le met en attente.

Langages de programmation logique

Un programme logique est une description purement déclarative d'un problème exprimé dans une logique particulière. Le caractère exécutable de cette description est obtenue à l'aide d'un prouveur automatique.

Ainsi, le programme est constitué d'une base de faits souvent exprimés à l'aide de clauses établissant des contraintes entre des données. Pour obtenir une réponse à un problème, on interroge cette base de faits pour y montrer la satisfiabilité ou l'insatisfiabilité d'une certaine relation entre des données.

En pratique, le programmeur a aussi la responsabilité de guider le prouveur automatique pour augmenter l'efficacité de la réponse à certaines requêtes.

Les langages logiques permettent la séparation entre la logique et le contrôle du programme final.

Exemple de programme logique

```
man(adam).
man(peter).
man(paul).
woman(marry).
woman(eve).
parent(adam,peter).
parent(eve,peter).
parent(adam,paul).
parent(marry,paul).
father(F,C) : -man(F),parent(F,C).
mother(M,C) : -woman(M),parent(M,C).
is_father(F) : -father(F,_).
is_mother(M) : -mother(M,_).

?-father(X,paul).
?-father(adam,X).
```

Une des particularités des programmes logiques est de ne pas spécifier les entrées et les sorties des programmes.

Langages dédiés à un domaine spécifique

Certains problèmes sont plus facilement expressibles dans un langage dédié. Par exemple, les requêtes dans une base de données relationnelle sont exprimables dans le langage de l'algèbre relationnelle implémenté par SQL. Un langage spécifique à un domaine n'est pas nécessairement turing complet mais en contrepartie de cette restriction d'expressivité calculatoire, sa syntaxe et sa sémantique peuvent capturer de façon plus précise et concise l'espace des solutions liés à un problème.

Nous étudierons quelques-uns de ces langages et les comparerons avec les solutions similaires programmées à l'aide de langages généralistes. Nous verrons aussi comment certains langages de programmation généraliste permettent d'embarquer des langages spécifiques en leur sein.

Exemple de programme dédié à un domaine : CSound

```
<CsoundSynthesizer> ;

  <CsOptions>
    csound -W -d -o tone.wav
  </CsOptions>

  <CsInstruments>
    sr = 44100 ; Sample rate.
    kr = 4410 ; Control signal rate.
    ksmps = 10 ; Samples pr. control signal.
    nchnls = 1 ; Number of output channels.

    instr 1
    a1 oscil p4, p5, 1 ; Simple oscillator.
            out a1 ; Output.
    endin
  </CsInstruments>

  <CsScore>
    f1 0 8192 10 1 ; Table containing a sine wave.
    i1 0 1 20000 1000 ; Play one second of one kHz tone.
    e
  </CsScore>

</CsoundSynthesizer>
```

Exemple de programme dédié à un domaine : Shell

```
% ls -lR | gawk '{print $4}' | uniq
```

Programmation stochastique

- Très souvent, un programme contient des paramètres *adhoc*. Ceci est particulièrement vrai en *apprentissage automatique*.
- Il est naturel de chercher *à optimiser* ces paramètres.
- La programmation **stochastique** ou **probabiliste** consiste à écrire des programmes qui optimisent automatiquement leurs paramètres en raffinant les distributions de probabibilité de leurs entrées.

Plan

Comparer les approches de programmation

Ce cours de programmation va aborder l'ensemble des approches de la programmation que nous venons d'énumérer en les comparant. Pour cela, nous commencerons par décrire précisément les mécanismes de programmation qui les caractérisent puis nous essaierons de comprendre les **façons de penser** qu'ils induisent chez le programmeur.

En effet, les outils qui sont à la disposition d'un programmeur dans un certain langage conditionne sa façon d'aborder un problème. Ces outils forment son vocabulaire pour décrire ce dernier et cette description influe sur la conception de la solution. Cette hypothèse appelée *relativité linguistique* ou hypothèse de Sapir-Whorf peut se résumer ainsi : "écrire dans un langage" signifie "penser dans ce langage". Si on accepte cette hypothèse alors on peut penser qu'en abordant différentes approches de la programmation, on peut penser les solutions de façon plus libre.

D'ailleurs, faisons une petite expérience. . .

Un exemple de problème

Soit un dictionnaire D formé par une liste de mots $w_1, \ldots, w_n$ et un mot w.
Calculer tous les anagrammes de w dans D.

Description du projet

Le projet de cette année va porter sur

la programmation d'un jeu d'Othello

Par équipe de 2 ou 3, vous devrez :

- produire un logiciel pour résoudre un problème donné **sous une contrainte fixée tirée au sort** ;
- comparer votre solution avec les solutions proposées par d'autres groupes.

Fonctionnement du cours

La note finale sera égale à 50% du projet + 50% d'examen.

Le cours aura lieu en salle de TP le jeudi de 9h30 à 12h30.