Paradigmes de programmation

- Un **paradigme de programmation** est une manière de programmer et en même temps d'exécuter les programmes
  - Il fournit et détermine
    - la vue qu'a le programmeur de l'exécution de son programme
    - la manière dont l'algorithme est codé dans un langage de programmation
- Liés aux :
  - différentes théories mathématiques du calcul
    - p. ex. calcul arithmétique – programmation impérative, calcul logique – programmation logique…
  - différents langages de programmation
    - il y a plus de langages que de paradigmes
    - un paradigme peut être utilisé dans plusieurs langages
    - un langage peut être fondé sur plusieurs paradigmes
  - différents concepts de programmation
    - ce sont des techniques, mécanismes ou idées élémentaires (p. ex. boucle, récurrence, objet…)
    - un concept peut être présent dans plusieurs paradigmes

Principaux paradigmes (1)

- Programmation impérative
  - Voit le programme comme une séquence d'instructions exécutées par l'ordinateur pour changer l'état (les valeurs des données) de ce programme
  - Correspond au mode **impératif** dans les langages humains donc assez naturel
  - Reflète le mode de fonctionnement de la plupart des processeurs
  - Le plus répandu et concerne le plus grand nombre des langages
  - N'est pas toujours le meilleur choix, surtout en termes d'efficacité
  - Langages : assembleurs ; descendants de Fortran et Algol
- Programmation structurée
  - Recommande une organisation **structurée** hiérarchique du code à l'aide de laquelle de différentes étapes peuvent être discernées
  - Facilite l'achèvement de correction, fiabilité, lisibilité, compréhensibilité…
  - Langages : la plupart des descendants de Fortran et Algol sauf p. ex. Basic original

Principaux paradigmes (2)

- Programmation procédurale
  - Repose sur l'appel de **procédures** (aussi appelées fonctions – Matlab, routines...) qui contiennent des séries d'étapes à réaliser
    - Une extension et un support de la programmation structurée
  - N'importe quelle procédure peut être appelée à n'importe quelle étape de l'exécution du programme
    - Parfois aussi depuis la procédure elle-même (concept de **récursivité**)
  - Possible de réutiliser le même code à différents moments du programme sans avoir à le copier
    - Modifications plus faciles, y compris élimination d'erreurs
    - Code plus lisible, compréhensible, réutilisable, extensible
  - Langages : C, C++, Fortran, Pascal mais p. ex. pas Java ni Basic original

Principaux paradigmes (3)

- Exemple comparatif : calcul de la somme d'éléments d'un vecteur *vec* ; pour simplifier, *taille* contient déjà la taille déterminée

programmation impérative non-structurée

```
som ← 0
n ← taille
debut_somme:
si non (n > 0) alors aller à fin_somme
som ← som+vec[n]
n ← n−1
aller à debut_somme
fin_somme:
```

programmation impérative structurée

```
som ← 0
n ← taille
tant que n > 0 faire
    som ← som+vec[n]
    n ← n−1
fin tant que
```

programmation impérative procédurale

```
fonction somme(v,t)
    som ← 0
    n ← t
    tant que n > 0 faire
        som ← som+v[n]
        n ← n−1
    fin tant que
    retourner som
fin fonction
…
somme(vec,taille)
```

Principaux paradigmes (4)

- Programmation orientée objet
  - Le programme est construit autour d'**objets** qui combinent les données (attributs) et les actions (méthodes)
  - C'est une programmation structurée
  - mais pas procédurale : les actions ne sont pas séparées des données
    - Mêmes actions adaptées aux types particuliers (vecteur.moyenne, matrice.moyenne...)
  - Des méthodes servent aussi à lire et à modifier les données qui restent cachées du monde extérieur
    - Protection de données – fiabilité
  - Langages : SmallTalk, C++, C#, JavaScript, Java, VB.NET (impératifs) ; autres impératifs – comme supplément ; Python, Ruby, OCaml (fonctionnels et impératifs)

programmation orientée objet

```
classe Vec
    attributs : elems, taille
    méthode somme()
        som ← 0
        n ← taille
        tant que n > 0 faire
            som ← som+elems[n]
            n ← n−1
        fin tant que
        retourner som
    fin méthode
    créateur Vec(v,t)
        elems=v
        taille=t
    fin créateur
fin classe
…
oVec = nouveau Vec(vec,taille)
oVec.somme()
```

Principaux paradigmes (5)

- Programmation déclarative
  - Dans le programme il est **déclaré** ce que doit être réalisé mais il n'est pas dit comment
    - Le même résultat est produit quel que soit le moment et le contexte de l'appel
  - Le « comment » est laissé à l'interpréteur ou au compilateur
    - Le contraire de la programmation impérative
  - Forme primitive :
    - programmation descriptive – XML, HTML
  - Autres formes :
    - fonctionnelle
    - logique
    - par contraintes
- Programmation fonctionnelle
  - Le programme est composé de **fonctions** qui définissent les relations entre les données
  - Ici, *fonction* n'est pas un synonyme mais contraste avec *procédure* ; c'est plus proche de la fonction en mathématiques
    - Le contraire de la programmation procédurale
  - L'ordre d'actions n'est pas défini ; il peut être quelconque pourvu que les relations soient gardées
  - Il n'existe pas un état du programme / variables
  - Langages : Lisp, OCaml, Scheme (programmation procédurale y est également possible) ; Haskell

Principaux paradigmes (6)

- Programmation logique
  - Le programme définit le problème à résoudre à l'aide de faits et de règles de **logique**
    - Les interpréteurs sont des démonstrateurs de théorèmes
    - Règle : $p(X,Y)$ si $q(X)$ et $r(Y)$
    - Fait : $s(X,Y)$ vrai
    - Si l'interpréteur reçoit p(4,z) comme problème, il essaye de prouver que c'est vrai ; ainsi il va trouver (à rebours) une valeur de *z* adéquate
  - Langages : Prolog
- Idée de sommation avec récurrence
  - la somme de *n* éléments est définie comme le 1er élément (tête) plus la somme des *n*–1 éléments qui suivent (queue)
  - la somme de 0 éléments (vecteur vide) est définie explicitement comme 0

programmation fonctionnelle

```
somme : nombre → nombre
somme([]) := 0
somme([tete queue]) := …
tete + somme(queue)
…
somme(vec)
```

programmation logique

```
somme([], 0) ∧
∀(H, T, N, M)
[somme(T, M) ∧ eq(N, M+H) …
⊃ somme([H|T], N)]
…
somme(vec,som)
```

Paradigmes et langages

- Les paradigmes peuvent être mieux ou pire adaptés à des langages particuliers
  - La plupart des langages sont délibérément fondés sur un ou plusieurs paradigmes
- Avec la plupart des langages il est possible d'appliquer de différents paradigmes
  - Même distants des fondations du langage ou contradictoires entre eux
  - C est un langage structurel cependant il contient la commande *goto* qui permet de sauter vers n'importe quel emplacement du code
  - Lisp est un langage fonctionnel mais on peut y appliquer la programmation procédurale (qui est opposée à la fonctionnelle)
  - Ce n'est pas toujours bénéfique du point de vue de correction et fiabilité
    - En général : plus de liberté $\Longleftrightarrow$ plus facile de commettre des erreurs même s'il paraît plus facile d'apprendre le langage et d'écrire un code !
- Suivre les paradigmes associés avec le langage utilisé, c'est :
  - améliorer la qualité du programme
  - minimiser le risque d'erreurs de programmation

Sommation avec de différents langages et paradigmes (1)

- Pour simplifier, on ignore ce qu'on doit faire pour placer les variables *vec* et *taille* dans la mémoire et définir leurs valeurs, afficher le résultat…
- Ce ne sont pas les uniques solutions ; elles tentent de démontrer clairement les paradigmes fondateurs d'un langage donné
- Elles ne sont pas optimales en tout aspect ; elle sont en revanche comparables

Lang. Basic original
Prog. impérative instructurée

```
200  LET som = 0
210  LET n = taille
220  IF NOT n > 0 THEN GOTO 260
230  LET som = som + vec(n)
240  LET n = n - 1
250  GOTO 220
260
```

Langage 3G

w1 ≈ n (précisément ce n'est pas l'indice d'un élément mais son adresse, c.-à-d. numéro de « boîte » élémentaire dans la mémoire)

Assembleur du dsPIC30
Prog. impérative instructurée

```
          clr   w2
          mov   #Vec,w0
          mov   Taille,w1
          sl    w1,w1
          add   w1,w0,w1
boucle:   cpsgt w1,w0
          bra   finbcl
          mov   [--w1],w3
          add   w2,w3,w2
          bra   boucle
finbcl:   mov   w2,Som
```

Langage 2G

Code machine correspondant
du même processeur

```
EB0100   11101011000000010000000
208500   00100000100001010000000
8048C1   10000000100100011000001
D00081   11010000000000010000001
408080   01000000100000010000000
E60800   11100110000010000000000
370003   00110111000000000000011
7801C1   01111000000000111000001
410103   01000001000000100000011
37FFFB   00110111111111111111011
8848D2   10001000010010001101001
```

Langage 1G

Sommation avec de différents langages et paradigmes (2)

Lang. Visual Basic
Prog. impérative procédurale

```
Function Somme(v, t)
    Somme = 0
    n = t - 1
    Do While n >= 0
        Somme = Somme + v(n)
        n = n - 1
    Loop
End Function
…
Som=Somme(Vec,Taille)
```

Lang. C
Prog. impérative procédurale

```
double somme(double* v, int t)
{
    double s=0;
    while (t > 0)
        s+=v[--t];
    return s;
}
…
som=somme(vec,taille);
```

Langage 3G

Lang. Matlab
Prog. impérative procédurale

```
function s=somme(v, t)
    s=0;
    while t > 0
        s+=v(t);
        t--;
    endwhile
endfunction
…
som=somme(vec,taille);
```

Langage 4G

En Visual Basic, C, C++ les éléments du vecteur sont numérotés à commencer de 0

L'astérisque ici marque le passage indirect (par référence) de l'argument : en fait, « v » ne garde pas le vecteur mais juste l'adresse de l'emplacement (« numéro de boîte ») de son premier élément dans la mémoire

Sommation avec de différents langages et paradigmes (3)

Lang. Pascal
Prog. impérative procédurale

```
Type
    Vecteur =  Array[1..maxtaille] of Real;
Function Somme(Var v : Vecteur;
    t : Integer) : Real;
Var
    s : Real;
Begin
    s := 0;
    While t > 0 Do
    Begin
        s := s+v[t];
        t := t-1;
    End;
    Somme := s;
End;
…
som := Somme(vec,taille);
```

Pascal, C, C++ exigent une déclaration du type pour chaque variable

Lang. C++
Prog. orientée objet impérative

```
class Vec {
private:
    double* elems;
    int taille;
public:
    Vec(double* v, int t)
    {
        elems=v;
        taille=t;
    }
    double somme()
    {
        int s=0;
        int n=taille;
        while (n > 0)
            s+=elems[--n];
        return s;
    }
};
```

Le code en langage C présenté avant marcherait aussi comme un code C++ mais il ne suivrait pas le paradigme fondateur du C++ : l'orientation objet

→ suite

↓

```
Vec* oVec=new Vec(vec,taille);
…
som=oVec->somme();
```

Sommation avec de différents langages et paradigmes (4)

Lang. Lisp
Prog. fonctionnelle

```
(defun somme (v)
   (if (null v)
      0
      (+ (first v) (somme (rest v)))))
…
(somme vec)
```

Lang. Haskell
Prog. fonctionnelle

```
somme :: [Float] -> Float
somme [] = 0
somme (tete:queue) = tete + somme queue
…
somme vec
```

Lang. Lisp
Prog. procédurale

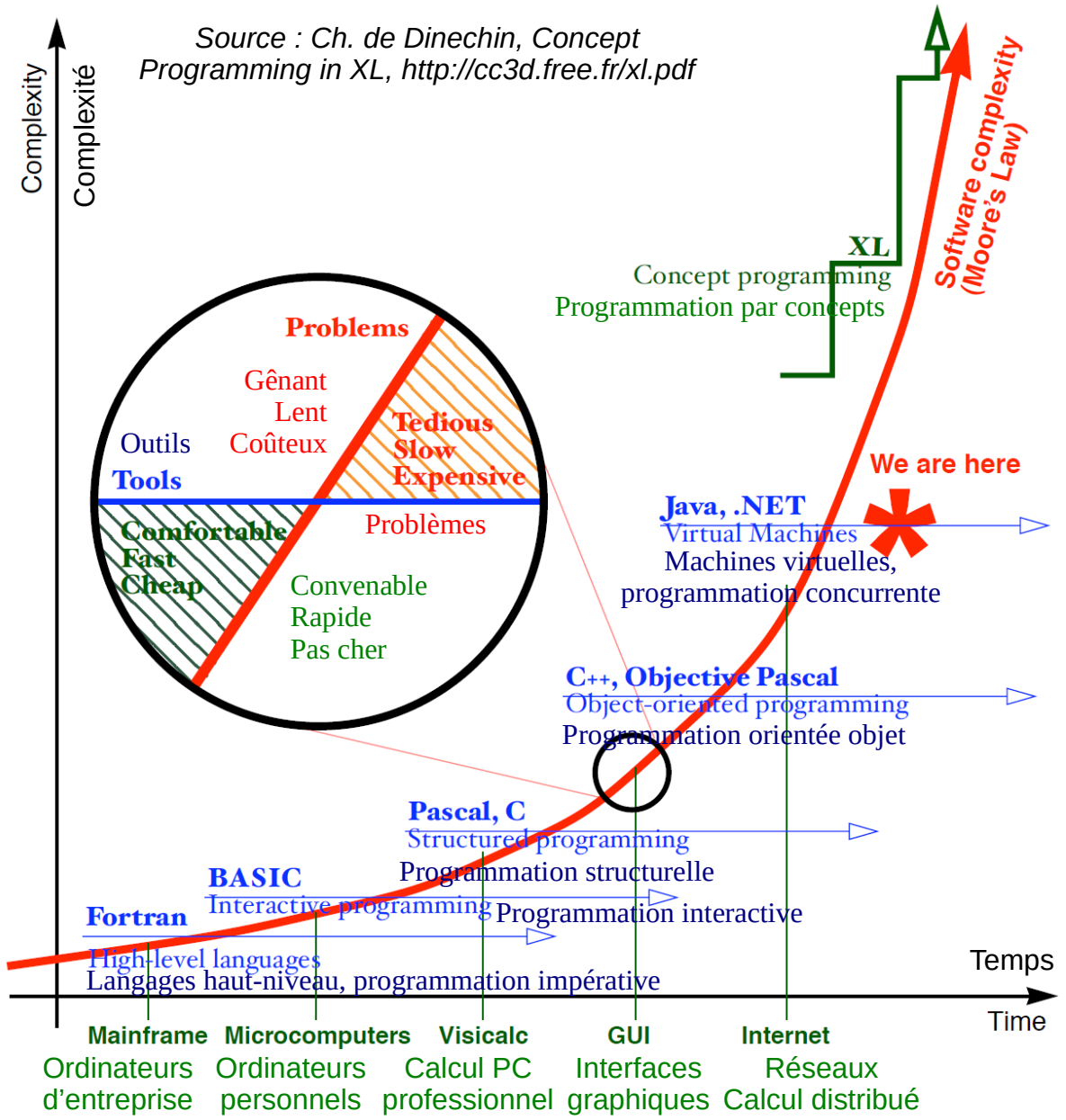
```
(defun somme (v)
   (let ((s 0))
      (do ((v v (rest v)))
         ((endp v) s)
         (incf s (first v)))))
…
(somme vec)
```

Lang. Prolog
Prog. logique

```
somme(0, []).
somme(Somme, [Tete|Queue]) :-
somme(SomTemp, Queue), Somme is Tete + SomTemp.
…
somme(Som,Vec).
```

Les deux codes en Lisp produisent le même résultat, pourtant le premier est visiblement plus court et lisible (pour quelqu'un qui connaît le langage, bien sûr) ; c'est parce qu'il repose sur le paradigme fondateur de ce langage, contrairement au deuxième code.

Progression de langages, paradigmes et outils de programmation



- Chaque nouveau paradigme et langage inventé augmente :
  - la complexité maximale de problèmes abordables
  - le niveau d'interactivité qui est (encore) facile à programmer
- Problème : la complexité accroît de façon exponentielle
  - la lois de Moore appliquée au génie logiciel

7. Erreurs d'exécution et de programmation

Gestion d'erreurs d'exécution
Erreurs d'exécution définies par l'utilisateur en Octave
Erreurs de programmation et techniques du débogage
Le débogueur d'Octave

Gestion d'erreurs d'exécution

- Une **erreur d'exécution** (en plus général – une **exception**) est une condition ou situation exceptionnelle qui apparaît lors de l'exécution d'un programme et qui gêne sa continuation
- **Gestion d'erreurs (d'exceptions)** permet d'y réagir (et parfois les remédier) tout pendant l'exécution du programme
- Structure **try-catch** (essaye-attrape)
  - **try**
    actions1
    catch
    actions2
    end
  - L'ordinateur essaye d'exécuter les commandes du bloc *actions1* jusqu'à ce qu'une erreur se produise
  - À ce moment, il saute le reste du bloc *actions1* et passe à l'exécution du bloc *actions2*
  - En Octave, le message d'erreur est accessible avec la commande **lasterr**

Gestion d'erreurs – exemple

- Sans gestion d'erreurs
  - chom=[10.7 10.1 10.1 10.6]
    coeff=[0.974 1.044 1.022 0.964]
    moy_desais=(chom*coeff)/4
    moy=mean(chom)
  - error: operator *: nonconformant arguments (op1 is 1x4, op2 is 1x4)
  - L'exécution du code est interrompue
  - La valeur de *moy* reste indéfinie
- Avec gestion d'erreurs
  - ```
    try
      moy_desais=(chom*coeff)/4
    catch
      disp("Impossible de calculer la
           moyenne desaisonnalisee !")
      disp(lasterr)
    end
    moy=mean(chom)
    ```
  - Impossible de calculer la moyenne desaisonnalisee !
    operator *: nonconformant arguments (op1 is 1x4, op2 is 1x4)
    moy = 10.375
  - Au moins on connaît la moyenne non désaisonnalisée
  - Le programme peut continuer
- On peut même remédier
  - On suppose que l'utilisateur s'est trompé et on transpose *coeff*
  - ```
    catch
      if (columns(coeff)==columns(chom)
       & rows(coeff)==rows(chom))
        moy_desais=(chom*coeff')/4
      else
        disp("Impossible de calculer")
      endif
    end
    ```
  - moy_desais = 10.377

Erreurs d'exécution définies par l'utilisateur

- **error**(*message*)
  - Affiche le message d'**erreur** et arrête l'exécution du code
  - Pour les problèmes qui rendent la continuation impossible ou vain
  - ```
    if (nbre_mois != 0)
        moyenne = total / nbre_mois;
    else
        error("Division par 0 !");
    endif
    prevision_3ans = present + moyenne*36;
    ```
    - Calcul n'est pas possible et le résultat est indispensable
- **warning**(*message*)
  - Affiche le message d'**avertissement** mais continue l'exécution du code
  - Pour les cas où la continuation est possible mais où l'utilisateur doit être conscient de l'apparition de l'exception
  - ```
    if (marge < 0)
        warning("Vous avez entre une marge negative.");
    endif
    prix_vente = prix_achat * (1+marge);
    ```
    - Inhabituel mais ne gêne pas le calcul et possiblement il y a des soldes

Erreurs de programmation

- Il n'est pas possible d'écrire un code correct dès le premier moment
  - Une **erreur de programmation** est une formulation du code d'un programme incorrecte du point de vue de la *correction* de ce programme
  - On estime de 0,5 à 3 erreurs de programmation par 1000 lignes du code
- Une erreur de programmation peut être découverte :
  - pendant la vérification du programme avant qu'il soit exécuté
  - mais souvent seulement lorsqu'elle **se manifeste** pendant l'exécution par :
    - arrêt (même de l'ordinateur) avant que le résultat complet soit fourni
    - résultat incorrect (parfois difficile de repérer, p. ex. quand il s'agit de calculs trop complexes pour être effectués à main)
  - mieux vaut que ce soit pendant l'exécution par le programmeur
    - L'utilisateur fait confiance au logiciel ; probable qu'il ne repère pas l'erreur
    - L'utilisateur est plutôt incapable de corriger le code (même s'il est informaticien lui-même) alors il abandonne le logiciel
- Le programmeur est donc obligé de :
  - tester son programme
  - éliminer les erreurs de programmation qu'il a commises

Techniques du débogage

- Par **débogage** on comprend recherche et élimination des erreurs de programmation pour assurer la correction et la fiabilité du code
  - de l'anglais « debug » = éliminer des punaises
- Lorsqu'un programme ne produit pas les résultats attendus, en général on essaye de trouver la ligne qui provoque l'erreur
  1. Réanalyser le programme ligne par ligne et essayer de prévoir les résultats
  2. Insérer des commandes d'affichage (en Matlab : en effaçant les points-virgules ou bien en utilisant *disp* ou *printf*) pour vérifier l'état des variables au moment donné de l'exécution du programme
  3. À l'aide d'un débogueur, exécuter le programme ligne par ligne et observer son avancement et les changements en valeurs des variables
  - Technique intermédiaire entre 2 et 3, disponible seulement en Octave : Insérer la commande **keyboard** dans le code du programme
    - Arrête l'exécution du code là où elle est insérée et permet d'entrer des instructions d'Octave quelconques en ligne
    - On peut alors examiner la valeur en cours de n'importe quelle variable, vérifier le résultat d'une fonction avec d'autres valeurs des arguments...

Le déboguer d'Octave

- Un **débogueur** est un outil conçu pour faciliter le débogage
  - Un débogueur étant intégré dans Octave, on l'utilise depuis sa ligne de commandes standard
  - Avec d'autres environnements de programmation, le débogueur peut être un logiciel séparé
- Les commandes du débogueur Octave
  - Mettre un point d'arrêt (ang. breakpoint)
    dbstop *nom_fonction numéro_ligne*
  - Retirer un point d'arrêt
    dbclear *nom_fonction numéro_ligne*
  - Arrêter lorsqu'un avertissement se produit
    dbstop if warning
  - Arrêter lorsqu'une erreur se produit
    dbstop if error
  - Arrêter lorsque une valeur *NaN* (pas-un-nombre) ou *Inf* (infini) apparaît
    dbstop if naninf
  - Reprendre l'exécution
    dbcont
  - Afficher la liste de points d'arrêt
    dbstatus *nom_fonction*
  - Exécuter une ou plusieurs lignes
    dbstep *nombre_lignes*
  - Quitter le débogueur
    dbquit

Exemple du débogage (1)

- Calculer la marge brute des produits vendus par chaque vendeur d'un magasin exprimée comme le pourcentage de la marge du meilleur vendeur
  - Formule arithmétique

$$r_i = \frac{v_i - c_i}{\max\{v_i - c_i\}} \cdot 100$$

où :

v_i – total des prix de vente (de l'i-ème employé)

c_i – total des coûts de revient

r_i – marge relative en pourcentage

- Programme
  - ```
    function mrel=marge_rel(vente,cout)
      mabs = vente-cout;
      mmax = maxi(mabs);
      mrel = mabs/mmax;
    endfunction
    ```
  - ```
    function xm=maxi(x)
      n = numel(x);
      xm = x(1);
      for m=2:n
        if x(m) > xm
          xm = x(n);
        endif
      endfor
    endfunction
    ```
- Vérification
  - ```
    > v=[12,10,14,8];
    > c=[11,6,12,7];
    ```
  - ```
    > marge_rel(v,c)
    ans = [0.66 1.33 0.33 1.00]
    ```

Exemple du débogage (2)

- On constate que le résultat n'est pas correct alors on essaye de trouver la ligne où l'erreur s'est produite
  - On met un point d'arrêt dans la ligne 3 de la fonction *marge_rel*
    ```
    > dbstop marge_rel 3
    ```
  - On appelle la fonction de nouveau
    ```
    > marge_rel(v,c)
    stopped in marge_rel.m at line 3
    ```
  - On vérifie si les arguments ont été passés correctement et s'ils n'ont pas été changés par hasard
    ```
    debug> vente
    vente =   20   16   18   12
    debug> cout
    cout =   18   12   17   9
    ```
    C'est correct
  - On vérifie alors si les marges absolues ont été calculées correctement
    ```
    debug> mabs
    mabs =   2   4   1   3
    ```
    C'est correct aussi

```
1  function mrel=marge_rel(vente,cout)
2    mabs = vente-cout;
3    mmax = maxi(mabs);
4    mrel = mabs/mmax;
5  endfunction
```

Exemple du débogage (3)

- On avance d'une ligne et on vérifie si *mmax* (marge maximale) a pris la valeur correcte de 4

```
debug> dbstep
stopped in marge_rel.m at line 4
debug> mmax
mmax = 3
```

```
1  function mrel=marge_rel(vente,cout)
2    mabs = vente-cout;
3    mmax = maxi(mabs);
4    mrel = mabs/mmax;
5  endfunction
```

  On constate que la source du problème, c'est la marge maximale déterminée incorrectement
- Néanmoins, le reste du code ne doit forcement pas être correct non plus ; on impose alors la valeur correcte de *mmax* et on vérifie si on obtient ainsi le résultat final correct

```
debug> mmax=4
debug> dbcont
ans = [0.50 1.00 0.25 0.75]
```

  Le résultat est correct, alors on constate que le seul problème apparaît lors de la détermination de la marge maximale
- Puisque cette détermination est effectué dans la fonction *maxi*, l'erreur doit se trouver dans le code de cette fonction

Exemple du débogage (4)

- On cherche alors dans *maxi*
  - On enlève le point d'arrêt dans la fonction *marge_rel*
    debug> dbclear marge_rel
  - On met un point d'arrêt dans la fonction *maxi*
    debug> dbstop maxi 4
  - On exécute *marge_rel* encore une fois
    debug> marge_rel(v,c)
    stopped in maxi.m at line 4
  - On avance pour voir comment la boucle « pour » est exécutée
    debug> dbstep
    stopped in sommeCarres at line 5
    debug> dbstep
    stopped in sommeCarres at line 6
    Si on est en ligne 6, alors le résultat de la comparaison est correct
  - On avance encore pour voir si la valeur maximale (*xm*) est mise à jour
    debug> dbstep
    stopped in sommeCarres at line 5
    debug> xm
    xm = 3
    Tandis qu'on attendait 4... Pourquoi est-ce que c'est arrivé ?

```
1  function xm=maxi(x)
2    n = numel(x);
3    xm = x(1);
4    for m=2:n
5      if x(m) > xm
6        xm = x(n);
7      endif
8    endfor
9  endfunction
```

Exemple du débogage (5)

- On analyse l'instruction à l'intérieur de la structure *si*
  - Le *n*, c'est le nombre des éléments de *x*
  - Alors à chaque fois on affectera *xm* avec la valeur du dernier élément de *x*
  - ...au lieu de l'affecter avec la valeur de l'élément en cours, donc numéro *m*
- On corrige le code du programme
  - On termine la session de débogage avec dbquit
  - On modifie le code de la fonction *maxi* pour qu'il contienne en ligne 6 :
    xm = x(**m**);
  - On vérifie
    > marge_rel(v,c)
    ans = 0.50 1.00 0.25 0.75
  - C'est correct maintenant
  - On a réussi à localiser et éliminer l'erreur

```
1  function xm=maxi(x)
2    n = numel(x);
3    xm = x(1);
4    for m=2:n
5      if x(m) > xm
6        xm = x(n);
7      endif
8    endfor
9  endfunction
```

Interrogation

- Composition
  - 5 problèmes composés de sous-problèmes
  - 1 sous-problème concernant la synthèse (développement) d'un programme plus 1 ou 2 sous-problèmes concernant l'analyse d'autres programmes
    - la longueur (sans compter l'en-tête et la ligne de fin) sera de 10 lignes maximum (7 en moyenne) à analyser ; 6 lignes maximum (2 en moyenne) à écrire
    - le degré de difficulté ne sera plus haut à celui des programmes analysés en conférence et développés en TP
    - environ 1/3 du nombre de points total
  - le reste aura un caractère théorique (problèmes abordés en conférence)
  - des exemples des programmes à synthétiser et à analyser ainsi que la gamme des problèmes théoriques seront donnés dans un document qui sera publié sur la page web après la dernière conférence
- Conditions
  - Comme précisé sur la page web, section *Cours magistral (CM)* ▸ *Méthode et conditions d'évaluation*