

# CI 2 : ALGORITHMIQUE & PROGRAMMATION

## CHAPITRE 4 – INTRODUCTION À LA COMPLEXITÉ

Savoir

SAVOIRS :

- s'interroger sur l'efficacité algorithmique temporelle.

1	Mise en évidence du problème	1
1.1	Premier exemple	1
1.2	Deuxième exemple	2
2	Complexité des algorithmes	3
2.1	Présentation	3
2.2	Coût temporel d'un algorithme et d'une opération	4
2.3	Exemple	5
2.4	D'autres exemples	7
2.5	Complexité algorithmique	9
3	Profiling des algorithmes	10

## 1 Mise en évidence du problème

### 1.1 Premier exemple

On introduit les algorithmes de tri suivant :

python

```
#Tri par sélection
def tri_selection (tab):
    for i in range(0,len(tab)):
        indice = i
        for j in range(i+1,len(tab)):
            if tab[j]<tab[indice]:
                indice = j
        tab[i], tab[indice]=tab[indice], tab[i]
    return tab
```

python

```
#Tri par insertion
def tri_insertion (tab):
    for i in range(1, len(tab)):
        a=tab[i]
        j=i-1
        while j>=0 and tab[j]>a:
```

python

```
    tab[j+1]=tab[j]
    j=j-1
    tab[j+1]=a
    return tab
```

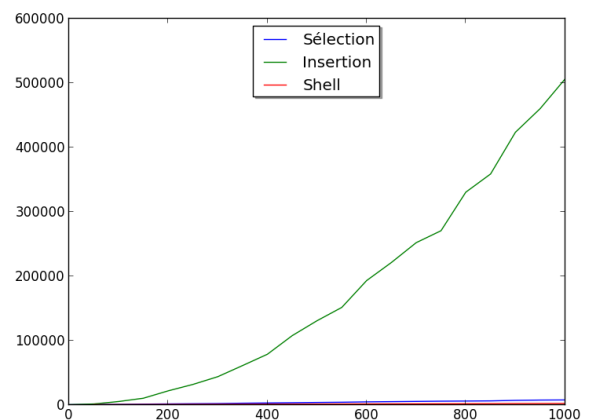
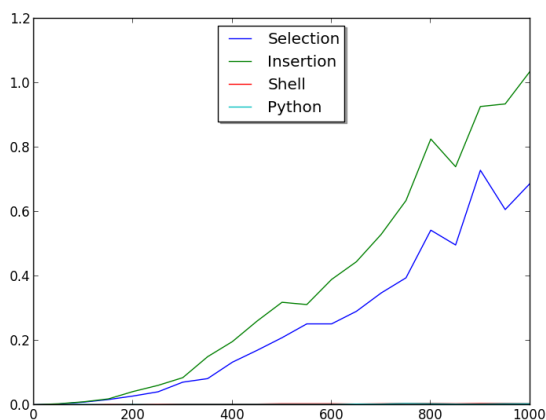
python

```
def shellSort ( array ) :
    "Shell sort using Shell 's ( original ) gap sequence: n/2, n/4, ..., 1."
    "http://en.wikibooks.org/wiki/Algorithm_Implementation/Sorting/Shell_sort#Python"
    gap = len(array) // 2
    # loop over the gaps
    while gap > 0:
        # do the insertion sort
        for i in range(gap, len(array)):
            val = array[i]
            j = i
            while j >= gap and array[j - gap] > val:
                array[j] = array[j - gap]
                j -= gap
            array[j] = val
        gap //= 2
```

La figure ci-dessous montre le temps en secondes pour trier des tableaux de 1 à 1000 éléments en utilisant les méthodes de tri suivant :

- tri par sélection ;
- tri par insertion ;
- tri shell ;
- méthode de tri utilisée par Python.

Le premier graphe montre le temps de calcul et le second une estimation du nombre d'opérations.



## 1.2 Deuxième exemple

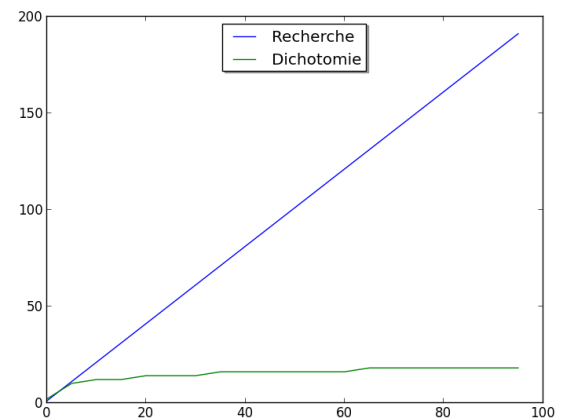
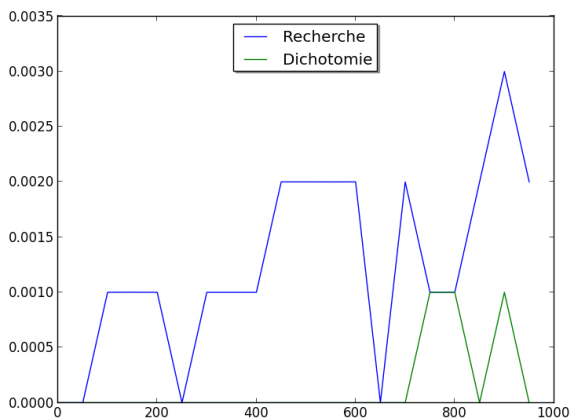
On prend maintenant l'exemple de la recherche d'un élément dans une liste :

python

```
def recherche(x, tab):
    for i in range(len(tab)):
        if tab[i] == x:
            return True
    return False
```

python

```
def recherche_dichotomique(x, a):
    g, d = 0, len(a)-1
    while g <= d:
        m = (g + d) // 2
        if a[m] == x:
            return True
        if a[m] < x:
            g = m+1
        else:
            d = m-1
    return None
```



## 2 Complexité des algorithmes

### 2.1 Présentation

Il existe souvent plusieurs façons de programmer un algorithme. Si le nombre d'opérations à effectuer est peu important et les données d'entrée de l'algorithme sont de faibles tailles, le choix de la solution importe peu. En revanche, lorsque le nombre d'opérations et la taille des données d'entrée deviennent importants, deux paramètres deviennent déterminants : le temps d'exécution et l'occupation mémoire.

Définition

#### Complexité en temps

La complexité en temps donne le nombre d'opérations effectuées lors de l'exécution d'un programme. On appelle  $C_o$  le coût en temps d'une opération  $o$ .

Définition

### Complexité en mémoire (ou en espace)

La complexité en mémoire donne le nombre d'emplacements mémoires occupés lors de l'exécution d'un programme.

Remarque

On distingue la complexité dans le pire des cas, la complexité dans le meilleur des cas, ou la complexité en moyenne. En effet, pour un même algorithme, suivant les données à manipuler, le résultat sera déterminé plus ou moins rapidement.

Généralement, on s'intéresse au cas le plus défavorable à savoir, la complexité dans le pire des cas.

## 2.2 Coût temporel d'un algorithme et d'une opération

Résultat

On considère que le coût élémentaire  $C_e$  correspond au coût d'une affectation, d'une comparaison ou de l'évaluation d'une opération arithmétique.

Exemple

Chacune de ces 3 opérations expressions ont le même coût temporel  $C_e$  :

```
python
>>> a=20
>>> a<=100
>>> a+a
```

Résultat

Pour une séquence de deux instructions de coûts respectifs  $C_1$  et  $C_2$ , le coût total est de la séquence est de  $C_1 + C_2$ .

Exemple

```
python
>>> a=20
>>> print(a)
```

Le coût temporel correspond à l'addition du coût élémentaire de l'affectation ajouté au coût de l'affichage.

Résultat

Le coût d'un test `if test : inst_1 else : inst_2` est inférieur ou égal au maximum du coût de l'instruction 1 et du coût de l'instruction 2 additionné au coût du test (coût élémentaire).

Exemple

Soit le programme suivant (sans application réelle) :

```
>>> if x<0 :
        x=x+1
        x=x+2
    else :
        x=x+1
```

La comparaison a un coût élémentaire  $C_e$ . Dans le « pire » des cas, on réalise deux additions et deux affectations. Le coût temporel total est donc  $C_e + 4C_e = 5C_e$ .

Résultat

Le coût d'une boucle `for i in range(n) : inst` est égal à :  $n$  fois le coût de l'instruction `inst` si elle est indépendante de la valeur de  $i$ .

Exemple

```
>>> for i in range(20) : print(i)
```

Si on note  $C_p$  le coût de l'affichage, le coût total est de  $20C_p$ .

Résultat

Soit la boucle `while cond : inst`, la condition `cond` faisant intervenir un variant de boucle. Il est donc possible de connaître le nombre  $n$  d'itérations de la boucle. Le coût de la boucle est donc égal à  $n$  fois le coût de l'instruction `inst`.

## 2.3 Exemple

Exemple

*Calcul de factorielle*

Pseudo Code

```

Début Fonction
factorielle(n) :
  si n=0 alors
    retourner 1
  sinon
    i ← 1
    res ← 1
    tant que i ≤ n faire
      res ← res · i
      i ← i + 1
    fin
  retourner res
fin
Fin

```

**Complexité en mémoire :** lors de l'exécution du programme, il sera nécessaire de stocker les variables suivantes :

- $n$  ;
- $res$  ;
- $i$ .

**Complexité en temps :** La première comparaison a un coût élémentaire  $C_e$ .

Pour  $n = 0$  le coût du retour est  $C_r$ .

Pour  $n \neq 0$  :

- les deux affectations ont un coût respectif  $C_e$  ;
- la boucle tant que sera réalisée  $n$  fois. Pour chaque itération,
  - la multiplication ainsi que l'affectation ont chacun un coût  $C_e$  ;
  - l'incrément et l'affectation ont chacun un coût  $C_e$  ;
- le coût du retour est  $C_r$ .

En conséquence, la complexité en temps s'élève à :

$$C_T(n) = C_e + \max(C_r; C_e + C_e + n(4C_e) + C_r)$$

Ainsi  $C_T(n) = C_e(3+4n) + C_r$  et  $C_T(n) \underset{+\infty}{\sim} 4C_e n$  lorsque  $n$  tend vers l'infini. On parle d'une complexité algorithmique linéaire, notée  $\mathcal{O}(n)$ .

Exemple

Il est fréquent que la complexité en temps soit améliorée au prix d'une augmentation de la complexité en espace, et vice-versa. La complexité dépend notamment :

- de la puissance de la machine sur laquelle l'algorithme est exécuté ;
- du langage et compilateur / interpréteur utilisé pour coder l'algorithme ;
- du style du programmeur.

Remarque

Le coût de la mémoire étant aujourd'hui relativement faible, on cherche en général à améliorer la complexité en temps plutôt que la complexité en mémoire.

## 2.4 D'autres exemples

### 2.4.1 Recherche d'un maximum

*Soit une liste de nombre entiers désordonnés. Comment déterminer le plus grand nombre de la liste ?*

Intuitivement, une solution est de parcourir la liste d'éléments et de déterminer le plus grand élément par comparaisons successives.

Pseudo Code

```
Data : tab tableau de taille n
max ← −∞
for i = 1 to n do
    if tab[i] > max then
        | max ← tab[i]
    end
end
```

Exemple

Dans ce cas, le coût temporel est :  $C_T(n) = C_e + n(2C_e)$ . Ici encore, la complexité de cet algorithme est linéaire car  $C_T(n) \underset{+\infty}{\sim} 2C_e n$ .

### 2.4.2 Tri d'une liste

#### Algorithme naïf

*Soit une liste de nombre entiers désordonnés. Comment les trier par ordre croissant ?*

Une méthode dite naïve pourrait être la suivante :

- trouver le plus petit élément du tableau. Notons *min* son indice ;
- on permute alors le *min*<sup>e</sup> élément avec le premier élément ;
- ...
- on trouve le plus petit élément du tableau compris entre l'indice *i* et *N* ;
- on permute alors le *min*<sup>e</sup> élément avec le *i*<sup>e</sup> élément.

Exemple

Pseudo Code

**Data :** *tab* tableau d'entiers désordonnés de taille *n*

**Result :** *tab* tableau d'entiers ordonnés

```

for i = 1 to n - 1 do
    min ← i
    for j = i + 1 to n do
        if tab[j] < tab[min] then
            | min ← j
        end
    end
    tmp ← tab[i]
    tab[i] ← tab[min]
    tab[min] ← tmp
end
    
```

Ici les bornes de la boucle imbriquée dépendent de l'indice *i*. Ainsi :

- au rang 1,  $C_1 = C_e + (n - 1)(2C_e) + 3C_e$  ;
- au rang 2,  $C_2 = C_e + (n - 2)(2C_e) + 3C_e$  ;
- au rang *i*,  $C_i = C_e + (n - i)(2C_e) + 3C_e$ .

Le coût temporel peut donc s'exprimer ainsi :

$$\begin{aligned}
 C_T(n) &= \sum_{i=0}^n (C_e + (n - i)(2C_e) + 3C_e) = C_e \sum_{i=0}^n (1 + 2n - 2i + 3) \\
 &= C_e \sum_{i=0}^n (4 + 2n - 2i) = C_e \left( 4n + 2n^2 - 2 \frac{n(n+1)}{2} \right) = C_e (3n + n^2)
 \end{aligned}$$

Dans ce cas,  $C_T(n) \sim C_e n^2$ . On parle de complexité quadratique. Lorsque la taille du tableau double, le temps de calcul est multiplié par 4.

Exemple

### 2.4.3 Diviser pour régner – recherche dichotomique

Exemple



```

def recherche_dichotomique(x, a):
    g, d = 0, len(a)-1
    while g <= d:
        m = (g + d) // 2
        if a[m] == x:
            return m
        elif a[m] < x:
            g = m+1
        else:
            d = m-1
    return None
    
```



Exemple

On peut montrer que la suite  $d - g$  décroît strictement (car  $d$  décroît et  $g$  croît). Dans ce cas, la difficulté consiste en déterminer le nombre de fois que sera exécutée la boucle while. On note  $C_w = C_e + \max(C_e + C_r; 2C_e + 2C_e; 3C_e + C_e) = C_e + \max(C_e + C_r; 4C_e)$  le coût d'une itération de la boucle while.

Au cours de l'algorithme, on va devoir diviser en 2 la taille le tableau jusqu'à ce qu'on trouve (ou pas) l'élément recherché. On cherche donc combien de fois  $m$  on peut diviser par 2 la taille du tableau  $n$  :

$$\frac{n}{2^m} \geq 1 \iff n \geq 2^m \iff \ln(n) \geq m \ln(2)$$

On parlera ici de complexité logarithmique.

## 2.5 Complexité algorithmique

Définition

[5] Soient  $f$  et  $g$  deux fonctions  $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}_*^+$ . On note  $f(n) = \mathcal{O}(g(n))$  lorsqu'il existe des entiers  $c$  et  $n_0$  tels que pour tout  $n \geq n_0$ ,

$$f(n) \leq c \cdot g(n)$$

Intuitivement, cela signifie que  $f$  est inférieur à  $g$  à une constante multiplicative près pour les données suffisamment grandes.

Exemple

Ainsi, l'algorithme de recherche du maximum dans une liste non trié (présenté précédemment) est de complexité  $\mathcal{O}(n)$  où  $n$  est le nombre d'éléments de la liste. Cet algorithme est proportionnel au nombre d'éléments.

L'algorithme de tri naïf est de complexité  $\mathcal{O}(n^2)$ . On parle d'algorithme quadratique. Le temps d'exécution devient très grand lorsque le nombre de données est très important.

Par ordre de complexité croissante on a donc :

- $\mathcal{O}(1)$  : algorithme s'exécutant en temps constant, quelle que soit la taille des données ;
- $\mathcal{O}(\log(n))$  : algorithme rapide (complexité logarithmique) (Exemple : recherche par dichotomie dans un tableau trié) ;
- $\mathcal{O}(n)$  : algorithme linéaire ;
- $\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$  : complexité  $n \log n$  ;
- $\mathcal{O}(n^2)$  : complexité quadratique ;
- $\mathcal{O}(2^n)$  : complexité exponentielle.

Exemple

- Le coût temporel de l'algorithme pour calculer une factorielle est  $4C_e n$  et on a  $4C_e n \leq cn$ . La complexité de l'algorithme est en  $\mathcal{O}(n)$ .
- Le coût temporel de l'algorithme de recherche d'un maximum est  $2C_e n$  et on a  $2C_e n \leq cn$ . La complexité de l'algorithme est en  $\mathcal{O}(n)$ .
- Le coût temporel de l'algorithme de tri dans une liste en utilisant l'algorithme naïf est  $C_e n^2$  et on a  $C_e n^2 \leq cn^2$ . La complexité de l'algorithme est en  $\mathcal{O}(n^2)$ .
- Le coût temporel de l'algorithme de recherche dichotomique est de l'ordre de  $C_w \frac{\ln(n)}{\ln(2)}$  et on a  $C_w \frac{\ln(n)}{\ln(2)} \leq c \ln(n)$ . La complexité de l'algorithme est en  $\mathcal{O}(\log(n))$ .

Pour une opération ayant un temps d'exécution de  $10^{-9}s$ , on peut calculer le temps d'exécution en fonction du nombre de données et de la complexité de l'algorithme :

Données	$\mathcal{O}(\log(n))$	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(n \cdot \log(n))$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(2^n)$
100	$2 \cdot 10^{-9} s$	$0,1 \cdot 10^{-6} s$	$0,2 \cdot 10^{-6} s$	$10 \cdot 10^{-6} s$	$1,26765 \cdot 10^{21} s$
1 000	$3 \cdot 10^{-9} s$	$1 \cdot 10^{-6} s$	$3 \cdot 10^{-6} s$	$0,001 s$	$1,0715 \cdot 10^{292} s$
10 000	$4 \cdot 10^{-9} s$	$10 \cdot 10^{-6} s$	$40 \cdot 10^{-6} s$	$0,1 s$	$+\infty$

### 3 Profiling des algorithmes

Afin d'évaluer la performance des algorithmes, il existe des fonctionnalités permettant de compter le temps consacré à chacune des fonctions ou à chacune des instructions utilisées dans un programme <http://docs.python.org/2/library/profile.html>.

Voici un exemple du crible d'Eratosthène.

```
def crible (n):
    tab=[]
    for i in range(2,n):
        tab.append(i)
    # Liste en comprehension tab=[x for x in range(2,n)]
    for i in range(0,len(tab)):
        for j in range(len(tab)-1,i,-1):
            if (tab[j]%tab[i]==0):
                tab.remove(tab[j])
    return tab

import cProfile
cProfile.run(' crible (10000)')
```

cProfile renvoie alors le message suivant :

28770 function calls in 1.957 seconds

Ordered by: standard name

ncalls	totttime	percall	cumtime	percall	filename:lineno(function)
1	0.000	0.000	1.957	1.957	<string>:1(<module>)
1	0.420	0.420	1.957	1.957	eratosthene.py:4( crible )
1	0.000	0.000	1.957	1.957	{ built-in method exec }
9999	0.015	0.000	0.015	0.000	{ built-in method len }
9998	0.016	0.000	0.016	0.000	{ method 'append' of ' list ' objects }
1	0.000	0.000	0.000	0.000	{ method 'disable' of ' _lsprof. Profiler ' objects }
8769	1.505	0.000	1.505	0.000	{ method 'remove' of ' list ' objects }

Exemple

On alors le bilan du temps passé à effectuer chacune des opérations. Ainsi pour améliorer notablement l'algorithme, le plus intéressant serait d'optimiser la méthode remove.

## Références

- [1] François Denis <http://pageperso.lif.univ-mrs.fr/~francois.denis/algoL2/chap1.pdf>
- [2] Alain Soyeur <http://asoyeur.free.fr/>
- [3] François Morain, Cours de l'Ecole Polytechnique, <http://www.enseignement.polytechnique.fr/profs/informatique/Francois.Morain/TC/X2004/Poly/www-poly009.html>.
- [4] Renaud Kerivent et Pascal Monasse, La programmation pour ... , Cours de l'École des Ponts ParisTech - 2012/2013 <http://imagine.enpc.fr/~monasse/Info>.
- [5] Olivier Bournez, Cours INFO 561 de l'Ecole Polytechnique, Algorithmes et programmation, <http://www.enseignement.polytechnique.fr/informatique/INF561/uploads/Main/poly-good.pdf>.
- [6] Wack et Al., *L'informatique pour tous en classes préparatoires aux grandes écoles*, Editions Eyrolles.