

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 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:
            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
```

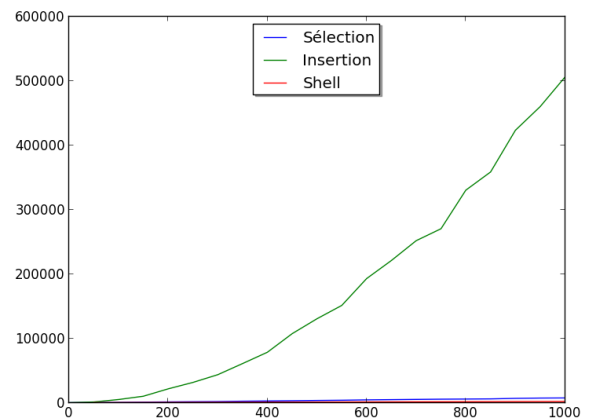
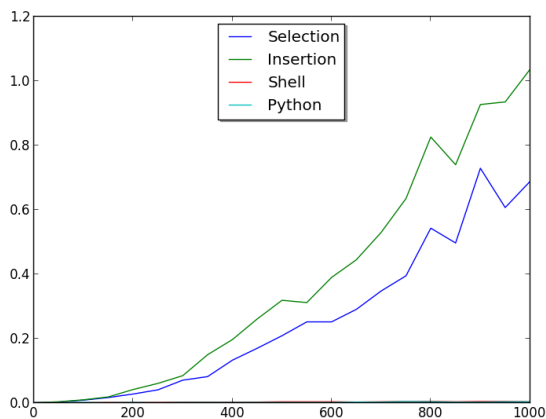


```
while j >= gap and array[j - gap] > val:
    array[j] = array[j - gap]
    j -= gap
array[j] = val
gap //= 2
```

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

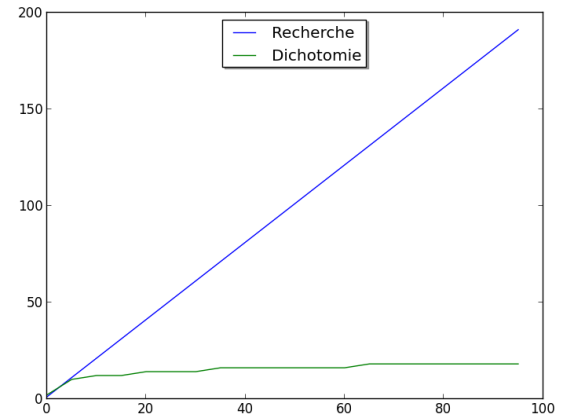
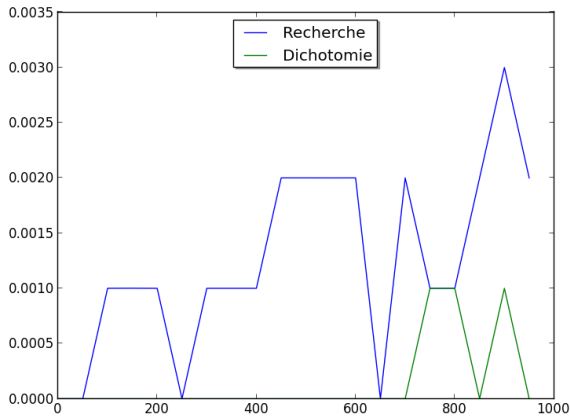
On prend maintenant l'exemple de la recherche d'un élément dans une liste :



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



```
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 .

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.

Résultat

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

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).

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

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

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

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.

Exemple

Soit le programme suivant (sans application réelle) :

```
python
>>> 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 $C_e + 4C_e = 5C_e$.

Exemple

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

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

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

Calcul de factorielle

Pseudo Code

```

Début Fonction
factorielle( $n$ ) :
  si  $n=0$  alors
    | retourner 1
  sinon
    |  $i \leftarrow 1$ 
    |  $res \leftarrow 1$ 
    | tant que  $i \leq n$  faire
    |   |  $res \leftarrow res \cdot i$ 
    |   |  $i \leftarrow i + 1$ 
    | 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 : On réalise une première comparaison dont on note le coût C_c . lorsque $n > 0$, on réalise à chaque incrément :

- une comparaison de coût C_c ;
- une multiplication de coût C_m ;
- une addition (itération) de coût C_i ;
- deux affectations de coût C_a ;

Pour calculer $n!$ la boucle est réitérée n fois. En conséquence, la complexité en temps s'élève à :

$$C = n \cdot (C_c + C_m + C_a + C_i) + C_c$$

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 le 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

Ainsi, quelle que soit la taille n du tableau, il faudra n itération pour connaître le plus grand élément de la liste.

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^e 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^e élément avec le i^e 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
    
```

Dans ce cas, pour un tableau de taille n , la première boucle sera réalisée $n - 1$ fois. Lors de l'itération i , la comparaison située dans la seconde boucle sera exécutée $N - (i + 1)$ fois.

En considérant que seule la comparaison à un coût C , le coût total s'obtient en comptant le nombre de comparaisons :

$$\begin{aligned}
 (N - (1 + 1) + 1) &+ (N - (2 + 1) + 1) + \dots + (N - (i + 1) + 1) + \dots + (N - (N) + 1) + (N - (N + 1) + 1) \\
 &= (N - 1) + (N - 2) + \dots + 1 \\
 &= \frac{N(N - 1)}{2}
 \end{aligned}$$

Exemple

Remarque

Il existe d'autres algorithmes de tris plus performant que l'algorithme présenté ci-dessus :

- tri de shell (shell sort) ;
- tri fusion (merge sort) ;
- tri rapide (quick sort)...

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.

Exemple

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.

Résultat

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>.

Exemple

Voici un exemple du crible d'Eratosthène.



```
def crible(n):
    tab=[]
    for i in range(2,n):
        tab.append(i)
    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	tottime	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}

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.

Exemple



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.