Complexité

Quentin Fortier

September 29, 2021

Définition : Algorithme

Un algorithme est composé de :

- Une (des) entrée(s)
- Une (des) sortie(s)
- Des instructions pour passer de l'entrée à la sortie

Complexité

Complexité (en temps)

La complexité d'un algorithme est le nombre d'opérations élémentaires (+, -, *, ...) qu'il effectue, en fonction de la taille de l'entrée.

Complexité

```
let rec mem e l = match l with
    (* teste si e appartient à l *)
    | [] -> false
    | x::q -> x = e || mem e q
```

Complexité

```
let rec mem e l = match l with
    (* teste si e appartient à l *)
    | [] -> false
    | x::q -> x = e || mem e q
```

Les opérations élémentaires effectuées par `mem` sont `match`, `x = e`, `||`.

Complexité

```
let rec mem e l = match l with
    (* teste si e appartient à l *)
    | [] -> false
    | x::q -> x = e || mem e q
```

Les opérations élémentaires effectuées par `mem` sont `match`, `x = e`, `||`.
La complexité de `mem e l` pour une liste de taille n est donc au plus $3n$.

Complexité

```ocaml
let rec mem e l = match l with
    (* teste si e appartient à l *)
    | [] -> false
    | x::q -> x = e || mem e q
```

Les opérations élémentaires effectuées par `mem` sont `match`, `x = e`, `||`.
La complexité de `mem e l` pour une liste de taille n est donc au plus $3n$.

Remarque : Si on trouve `e` dès le début de la liste, on va effectuer moins de n opérations. Par défaut, on s'intéresse à la **complexité dans le pire cas**.

Complexité

On considère un algorithme et n la taille de son entrée (par exemple, taille de la liste en argument).

Complexité dans le pire cas

La complexité dans le pire cas est le nombre maximum d'opérations pour une entrée de taille n.
Quand on ne donne pas de précision, c'est de cette complexité dont on parle.

Complexité

On considère un algorithme et n la taille de son entrée (par exemple, taille de la liste en argument).

Complexité dans le pire cas

La complexité dans le pire cas est le nombre maximum d'opérations pour une entrée de taille n.
Quand on ne donne pas de précision, c'est de cette complexité dont on parle.

Complexité dans le meilleur cas

La complexité dans le meilleur cas est le nombre minimum d'opérations pour une entrée de taille n

Complexité

On considère un algorithme et n la taille de son entrée (par exemple, taille de la liste en argument).

Complexité dans le pire cas

La complexité dans le pire cas est le nombre maximum d'opérations pour une entrée de taille n.
Quand on ne donne pas de précision, c'est de cette complexité dont on parle.

Complexité dans le meilleur cas

La complexité dans le meilleur cas est le nombre minimum d'opérations pour une entrée de taille n

complexité en moyenne

La complexité en moyenne est le nombre moyen d'opérations sur toutes les entrées de taille n

Complexité

En pratique, on veut juste avoir un ordre de grandeur du nombre d'opérations en fonction de n.

Complexité

En pratique, on veut juste avoir un ordre de grandeur du nombre d'opérations en fonction de n.

Notation O (grand O)

Soit f et g deux fonctions. On dit que $f(n) = O(g(n))$ si :

$$\exists A \geq 0,\ \exists N,\ \forall n \geq N,\ f(n) \leq Ag(n)$$

Complexité

En pratique, on veut juste avoir un ordre de grandeur du nombre d'opérations en fonction de n.

Notation O (grand O)

Soit f et g deux fonctions. On dit que $f(n) = O(g(n))$ si :

$$\exists A \geq 0,\ \exists N,\ \forall n \geq N,\ f(n) \leq Ag(n)$$

« $f(n)$ est inférieur à $g(n)$, à une constante près et pour n assez grand »

Complexité

Notation O (grand O)

Soit f et g deux fonctions. On dit que $f(n) = O(g(n))$ si :

$$\exists A \geq 0,\ \exists N,\ \forall n \geq N,\ f(n) \leq Ag(n)$$

Exemples :

- $3n =$

Complexité

Notation O (grand O)

Soit f et g deux fonctions. On dit que $f(n) = O(g(n))$ si :

$$\exists A \geq 0,\ \exists N,\ \forall n \geq N,\ f(n) \leq Ag(n)$$

Exemples :

- $3n = \mathrm{O}(n)$
- $n \ln(n) + 2n =$

Notation O (grand O)

Soit f et g deux fonctions. On dit que $f(n) = O(g(n))$ si :

$$\exists A \geq 0,\ \exists N,\ \forall n \geq N,\ f(n) \leq Ag(n)$$

Exemples :

- $3n = \mathrm{O}(n)$
- $n \ln(n) + 2n = \mathrm{O}(n \ln n)$
- $5 \ln(n) + 2\sqrt{n} =$

Complexité

Notation O (grand O)

Soit f et g deux fonctions. On dit que $f(n) = O(g(n))$ si :

$$\exists A \geq 0,\ \exists N,\ \forall n \geq N,\ f(n) \leq Ag(n)$$

Exemples :

- $3n = \mathrm{O}(n)$
- $n \ln(n) + 2n = \mathrm{O}(n \ln n)$
- $5 \ln(n) + 2\sqrt{n} = \mathrm{O}(\sqrt{n})$

Complexité

Notation O (grand O)

Soit f et g deux fonctions. On dit que $f(n) = O(g(n))$ si :

$$\exists A \geq 0,\ \exists N,\ \forall n \geq N,\ f(n) \leq Ag(n)$$

Exemples :

- $3n = \mathrm{O}(n)$
- $n\ln(n) + 2n = \mathrm{O}(n \ln n)$
- $5\ln(n) + 2\sqrt{n} = \mathrm{O}(\sqrt{n})$

On conserve dans le O(...) le terme qui augmente le plus vite quand $n \longrightarrow \infty$, sans la constante.

Complexité

Exemples de calculs sur les O(...) :

- $O(n) + O(n^2) =$

Complexité

Exemples de calculs sur les O(...) :

- $O(n) + O(n^2) = O(n^2)$
- $O(n) \times O(n^2) =$

Complexité

Exemples de calculs sur les O(...) :

- $O(n) + O(n^2) = O(n^2)$
- $O(n) \times O(n^2) = O(n^3)$

Complexité

Complexités classiques, de la meilleure (plus petite) à la plus mauvaise :

- O(1) : **complexité constante**
  $\rightarrow$ `a.(i)`, `Array.length`, `e::l`

Complexité

Complexités classiques, de la meilleure (plus petite) à la plus mauvaise :

- O(1) : **complexité constante**
  $\rightarrow$ `a.(i)`, `Array.length`, `e::l`
- O(ln(n)) : **complexité logarithmique**
  $\rightarrow$ dichotomie, exponentiation rapide

Complexité

Complexités classiques, de la meilleure (plus petite) à la plus mauvaise :

- $O(1)$: **complexité constante**
  $\rightarrow$ `a.(i)`, `Array.length`, `e::l`
- $O(\ln(n))$: **complexité logarithmique**
  $\rightarrow$ dichotomie, exponentiation rapide
- $O(n)$: **complexité linéaire**
  $\rightarrow$ dernier élément d'une liste, `Array.make`

Complexité

Complexités classiques, de la meilleure (plus petite) à la plus mauvaise :

- $O(1)$: **complexité constante**
  $\rightarrow$ `a.(i)`, `Array.length`, `e::l`
- $O(\ln(n))$: **complexité logarithmique**
  $\rightarrow$ dichotomie, exponentiation rapide
- $O(n)$: **complexité linéaire**
  $\rightarrow$ dernier élément d'une liste, `Array.make`
- $O(n \log(n))$: **complexité presque linéaire**
  $\rightarrow$ complexité optimale d'un tri (ex : tri fusion)

Complexité

Complexités classiques, de la meilleure (plus petite) à la plus mauvaise :

- $O(1)$: **complexité constante**
  $\rightarrow$ `a.(i)`, `Array.length`, `e::l`
- $O(\ln(n))$: **complexité logarithmique**
  $\rightarrow$ dichotomie, exponentiation rapide
- $O(n)$: **complexité linéaire**
  $\rightarrow$ dernier élément d'une liste, `Array.make`
- $O(n \log(n))$: **complexité presque linéaire**
  $\rightarrow$ complexité optimale d'un tri (ex : tri fusion)
- $O(a^n)$: **complexité exponentielle**
  $\rightarrow$ force brute (tester toutes les possibilités)

Complexité

Complexités classiques, de la meilleure (plus petite) à la plus mauvaise :

- $O(1)$: **complexité constante**
  → `a.(i)`, `Array.length`, `e::l`
- $O(\ln(n))$: **complexité logarithmique**
  → dichotomie, exponentiation rapide
- $O(n)$: **complexité linéaire**
  → dernier élément d'une liste, `Array.make`
- $O(n \log(n))$: **complexité presque linéaire**
  → complexité optimale d'un tri (ex : tri fusion)
- $O(a^n)$: **complexité exponentielle**
  → force brute (tester toutes les possibilités)

Remarque : Un algorithme en $O(n)$ est aussi en $O(n^2)$, $O(2^n)$... On donnera la meilleure borne possible.

Exemples

```
let s = ref 0 in
for i=1 to n do
   s := !s + i
done
```

Complexité :

Exemples

```
let s = ref 0 in
for i=1 to n do
   s := !s + i
done
```

Complexité : $O(n)$

Exemples

```
let s = ref 0 in
for i=1 to n do
   s := !s + i
done
```

Complexité : $O(n)$

```
for i=0 to n - 1 do
   for j=0 to i do
      print_int j
   done
done
```

Complexité :

Exemples

```
let s = ref 0 in
for i=1 to n do
   s := !s + i
done
```

Complexité : $O(n)$

```
for i=0 to n - 1 do
   for j=0 to i do
      print_int j
   done
done
```

Complexité : $\sum_{i=0}^{n} i = O(n^2)$

Exemples

Exercice

Quelle complexité pour calculer la somme des termes d'une matrice $n \times p$?

Exemples

Exercice

Quelle complexité pour calculer la somme des termes d'une matrice $n \times p$?

```
let somme m =
    let res = ref 0 in
    let n, p = Array.length m, Array.length m.(0) in
    for i = 0 to n - 1 do
        for j = 0 to p - 1 do
            res := !res + m.(i).(j)
        done
    done;
    !res
```

Exemples

```
let somme m =
    let res = ref 0 in
    let n, p = Array.length m, Array.length m.(0) in
    for i = 0 to n - 1 do
        for j = 0 to p - 1 do
            res := !res + m.(i).(j)
        done
    done;
    !res
```

Exemples

```
let somme m =
    let res = ref 0 in
    let n, p = Array.length m, Array.length m.(0) in
    for i = 0 to n - 1 do
        for j = 0 to p - 1 do
            res := !res + m.(i).(j)
        done
    done;
    !res
```

L'instruction `res := !res + m.(i).(j)` est répétée $n \times p$ fois.
$\rightarrow$ Complexité $O(np)$

Exemples

Quand on **imbrique** des boucles for (l'un dans l'autre), on **multiplie** les complexités

Quand on **enchaîne** des instructions (l'un après l'autre), on **additionne** les complexités.

Exemples

Pour trouver la complexité d'une fonction récursive/boucle while, lorsque ce n'est pas évident, on cherche souvent une équation de récurrence sur le nombre d'appels récursifs / d'itérations.

Exponentiation rapide

Problème

Calculer a^n.

Méthode 1 : utiliser $a^n = \underbrace{a \times a ... \times a}_{n} \quad \rightarrow n - 1$ multiplications

Exponentiation rapide

Problème

Calculer a^n.

Méthode 1 : utiliser $a^n = \underbrace{a \times a ... \times a}_{n} \quad \rightarrow n-1$ multiplications

Méthode 2 :

$$\begin{cases} a^n = (a^{\frac{n}{2}})^2 & \text{si } n \text{ est pair} \\ a^n = a \times (a^{\frac{n-1}{2}})^2 & \text{sinon} \end{cases}$$

Exponentiation rapide

```
let rec exp_rapide a n =
    if n = 0 then 1
    else let b = exp_rapide a (n/2) in
    if n mod 2 = 0 then b*b
    else a*b*b
```

Exponentiation rapide

```
let rec exp_rapide a n =
    if n = 0 then 1
    else let b = exp_rapide a (n/2) in
    if n mod 2 = 0 then b*b
    else a*b*b
```

Soit $C(n)$ le nombre d'appels récursifs de `exp_rapide a n`.

Exponentiation rapide

```
let rec exp_rapide a n =
    if n = 0 then 1
    else let b = exp_rapide a (n/2) in
    if n mod 2 = 0 then b*b
    else a*b*b
```

Soit $C(n)$ le nombre d'appels récursifs de `exp_rapide a n`.

$$\begin{aligned} C(n) &= 1 + C(n/2) \qquad (*) \\ &= 1 + 1 + C(n/4) \\ &= \underbrace{1 + ... + 1}_{p} + C(n/2^p) \end{aligned}$$

Exponentiation rapide

```
let rec exp_rapide a n =
    if n = 0 then 1
    else let b = exp_rapide a (n/2) in
    if n mod 2 = 0 then b*b
    else a*b*b
```

Soit $C(n)$ le nombre d'appels récursifs de `exp_rapide a n`.

$$\begin{aligned} C(n) &= 1 + C(n/2) \qquad (*) \\ &= 1 + 1 + C(n/4) \\ &= \underbrace{1 + \ldots + 1}_{p} + C(n/2^p) \end{aligned}$$

En appliquant $p = \log_2(n)$ $(\pm\ 1)$ fois $(*)$, on obtient :

$$C(n) = \log_2(n) + C(1) = \boxed{O(\log_2(n))}$$

Exponentiation rapide

```
let rec exp_rapide a n =
    if n = 0 then 1
    else let b = exp_rapide a (n/2) in
    if n mod 2 = 0 then b*b
    else a*b*b
```

`exp_rapide a n` effectue $O(\log(n))$ appels récursifs et chaque appel récursif effectue un nombre constant d'opérations (en dehors de l'appel récursif).

Exponentiation rapide

```
let rec exp_rapide a n =
    if n = 0 then 1
    else let b = exp_rapide a (n/2) in
    if n mod 2 = 0 then b*b
    else a*b*b
```

`exp_rapide a n` effectue $O(\log(n))$ appels récursifs et chaque appel récursif effectue un nombre constant d'opérations (en dehors de l'appel récursif).

Donc `exp_rapide a n` est en complexité $O(\log(n))$.

Recherche par dichotomie

La recherche par dichotomie permet de savoir si un élément appartient à un tableau **trié** plus rapidement que la recherche séquentielle.

```
let dicho t e =
    (* détermine si e appartient au tableau trié t *)
    let rec aux i j =
    (* détermine si e appartient à t.(i), ..., t.(j) *)
        if i > j then false (* aucun élément *)
        else let m = (i + j)/2 in (* milieu *)
             if t.(m) = e then true
             else if t.(m) < e then aux (m + 1) j
             else aux i (m - 1) (* regarde à gauche *)
    in aux 0 (Array.length t - 1)
```

Recherche par dichotomie

La recherche par dichotomie permet de savoir si un élément appartient à un tableau **trié** plus rapidement que la recherche séquentielle.

```
let dicho t e =
    (* détermine si e appartient au tableau trié t *)
    let rec aux i j =
    (* détermine si e appartient à t.(i), ..., t.(j) *)
        if i > j then false (* aucun élément *)
        else let m = (i + j)/2 in (* milieu *)
             if t.(m) = e then true
             else if t.(m) < e then aux (m + 1) j
             else aux i (m - 1) (* regarde à gauche *)
    in aux 0 (Array.length t - 1)
```

Attention : la dichotomie est inutile pour une liste car l'accès au milieu demande une complexité linéaire.

Recherche par dichotomie

```
let dicho t e =
    let rec aux i j =
    if i > j then false
        else let m = (i + j)/2 in
            if t.(m) = e then true
            else if t.(m) < e then aux (m + 1) j
            else aux i (m - 1)
    in aux 0 (Array.length t - 1)
```

À chaque appel récursif, on divise au moins par 2 la taille de l'intervalle où on recherche e.

Recherche par dichotomie

```
let dicho t e =
    let rec aux i j =
    if i > j then false
        else let m = (i + j)/2 in
            if t.(m) = e then true
            else if t.(m) < e then aux (m + 1) j
            else aux i (m - 1)
    in aux 0 (Array.length t - 1)
```

À chaque appel récursif, on divise au moins par 2 la taille de l'intervalle où on recherche e.

Donc au bout de p appels récursifs, la taille de cet intervalle est $\leq \dfrac{n}{2^p}$

Recherche par dichotomie

```
let dicho t e =
    let rec aux i j =
    if i > j then false
        else let m = (i + j)/2 in
            if t.(m) = e then true
            else if t.(m) < e then aux (m + 1) j
            else aux i (m - 1)
    in aux 0 (Array.length t - 1)
```

À chaque appel récursif, on divise au moins par 2 la taille de l'intervalle où on recherche e.
Donc au bout de p appels récursifs, la taille de cet intervalle est $\leq \dfrac{n}{2^p}$
Quand $p \geq \log_2(n)$, il y a donc au plus $\dfrac{n}{n} = 1$ élément à chercher donc la fonction s'arrête. Donc :

Recherche par dichotomie

```
let dicho t e =
    let rec aux i j =
    if i > j then false
        else let m = (i + j)/2 in
            if t.(m) = e then true
            else if t.(m) < e then aux (m + 1) j
            else aux i (m - 1)
    in aux 0 (Array.length t - 1)
```

À chaque appel récursif, on divise au moins par 2 la taille de l'intervalle où on recherche e.

Donc au bout de p appels récursifs, la taille de cet intervalle est $\leq \dfrac{n}{2^p}$

Quand $p \geq \log_2(n)$, il y a donc au plus $\dfrac{n}{n} = 1$ élément à chercher donc la fonction s'arrête. Donc :

dicho est en complexité $\boxed{\mathrm{O}(\log(n))}$ sur un tableau trié de taille n

Tri fusion

Un algorithme de tri permet de trier par ordre croissant une liste ou un tableau.

- Tri par insertion : $O(n^2)$
- Tri par selection : $O(n^2)$
- Tri rapide : $O(n^2)$
- Tri fusion : $O(n \log(n))$ (optimale)
- Tri par tas : $O(n \log(n))$ (optimale)

Tri fusion

[5, 1, -4, 2, -8, 7]

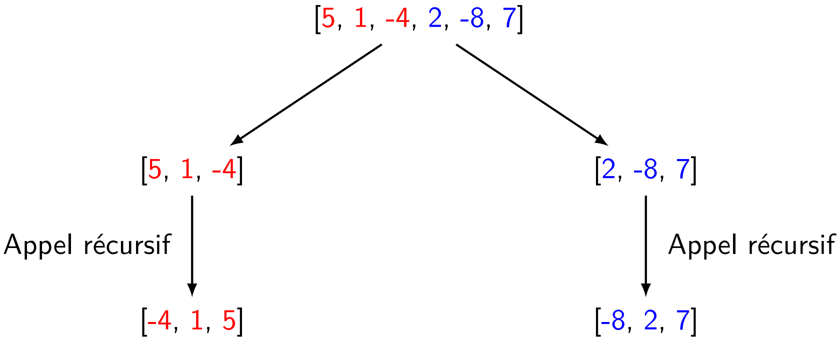
Tri fusion

[5, 1, -4, 2, -8, 7]

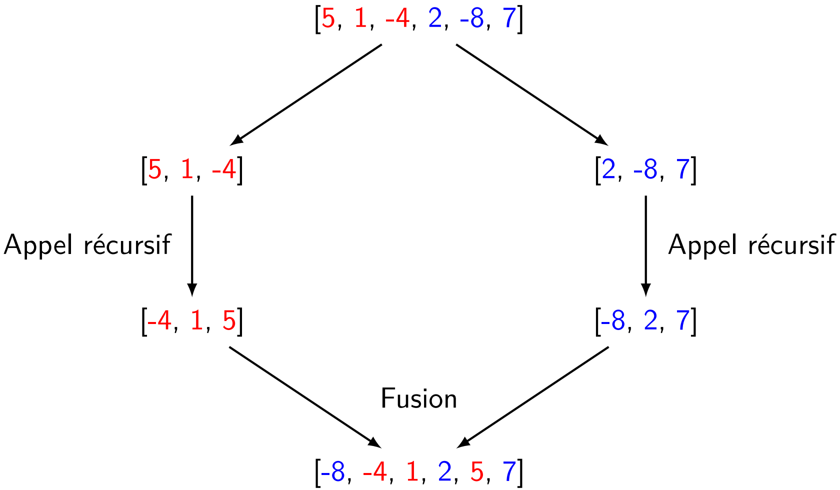
[5, 1, -4]

[2, -8, 7]

Tri fusion



Tri fusion


[5, 1, -4, 2, -8, 7]
[5, 1, -4]
[2, -8, 7]
Appel récursif
Appel récursif
[-4, 1, 5]
[-8, 2, 7]
Fusion
[-8, -4, 1, 2, 5, 7]

Tri fusion

Diviser une liste en deux :

```
let rec split = function
    | [] -> [], []
    | [e] -> [e], []
    | e1::e2::q -> let q1, q2 = split q in
                   e1::q1, e2::q2
```

Complexité :

Tri fusion

Diviser une liste en deux :

```
let rec split = function
    | [] -> [], []
    | [e] -> [e], []
    | e1::e2::q -> let q1, q2 = split q in
                   e1::q1, e2::q2
```

Complexité : $O(n)$ où n est la taille de la liste

Tri fusion

Fusionner deux listes triées :

```
let rec fusion l1 l2 = match l1, l2 with
    | [], _ -> l2
    | _, [] -> l1
    | e1::q1, e2::q2 when e1 < e2 -> e1::fusion q1 l2
    | e1::q1, e2::q2 -> e2::fusion l1 q2
```

Complexité :

Tri fusion

Fusionner deux listes triées :

```
let rec fusion l1 l2 = match l1, l2 with
    | [], _ -> l2
    | _, [] -> l1
    | e1::q1, e2::q2 when e1 < e2 -> e1::fusion q1 l2
    | e1::q1, e2::q2 -> e2::fusion l1 q2
```

Complexité : $O(n)$ où n est la taille de la plus petite liste

Tri fusion

Tri fusion :

```
let rec tri = function
    | [] -> []
    | [e] -> [e] (* tri ne termine pas sans ce cas *)
    | l -> let l1, l2 = split l in
           fusion (tri l1) (tri l2);;
```

Complexité :

Tri fusion

Tri fusion :

```
let rec tri = function
    | [] -> []
    | [e] -> [e] (* tri ne termine pas sans ce cas *)
    | l -> let l1, l2 = split l in
           fusion (tri l1) (tri l2);;
```

Complexité : Soit $C(n)$ la complexité de `tri l` pour `l` de taille n.

Tri fusion

Tri fusion :

```
let rec tri = function
    | [] -> []
    | [e] -> [e] (* tri ne termine pas sans ce cas *)
    | l -> let l1, l2 = split l in
           fusion (tri l1) (tri l2);;
```

Complexité : Soit $C(n)$ la complexité de `tri l` pour `l` de taille n.

$$\begin{aligned}
C(n) &= \underbrace{O(n)}_{split} + \underbrace{O(n)}_{fusion} + 2C(n/2) = O(n) + 2C(n/2) \\
&= O(n) + 2O(n/2) + 4C(n/4) = O(n) + O(n) + 4C(n/4) \\
&= pO(n) + 2^p C(n/2^p) \underset{p=\log_2(n)}{=} \boxed{O(n \log_2(n))}
\end{aligned}$$

Complexité en espace

Complexité en espace (ou : en mémoire)

La complexité en espace d'un algorithme est l'espace mémoire qu'il a besoin d'utiliser, en fonction de la taille de l'entrée.

Rédaction

Conseils de redaction :

- Réfléchissez avant d'écrire du code. Si vous n'êtes pas sûr, utilisez un brouillon. Si vous vous trompez, rayez proprement.
- Utiliser si possible une couleur différente pour le code et le reste.
- Justifier toutes les complexités. Mais si la complexité est évidente (une boucle for par exemple), une ligne de justification suffit.