



# Cours: Algorithmes et Structures des Données

## Chapitre 10: La complexité des algorithmes

Réalisé par:

Dr. Sakka Rouis Taoufik

## I. Introduction

La classe des algorithmes qui satisfont une spécification donnée, si elle n'est pas vide, contient en général une infinité d'éléments.

En effet, un problème ayant une spécification donnée peut avoir peut avoir plusieurs algorithmes :  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ .

Par exemple, on cite : problème de tri et le problème de recherche dans une table.

### Questions posées :

- Sur quelle base peut-on comparer ces algorithmes deux à deux ?
- Quels critères est-il pertinent d'utiliser dans la pratique ?<sub>2</sub>

## I. Introduction

Typiquement, on distingue des **critères statiques** (c'est-à-dire indépendants de l'exécution de l'algorithme) et des critères dynamiques. En ce qui concerne les critères statiques, nous pouvons citer :

-le temps de développement d'une solution (d'un algorithme) à partir d'une spécification : (la lisibilité du programme ; sa maintenabilité ; la qualité de son ergonomie ; sa sécurité d'utilisation ; sa longueur ; etc)

→ Les quatre premiers points ne doivent être négligés, mais ils sont **trop subjectifs**. Ils dépendent autant du programmeur et /ou du lecteur que de l'algorithme lui-même pour permettre une comparaison **impartiale**.

## I. Introduction

L'objectif de sécurité est, du point de vue des outils qui permettent d'évaluer l'algorithme, très lié à **la notion de correction** du programme par rapport à sa spécification.

**Illustration :** Démontrer qu'une propriété est satisfaite pour le programme comme par exemple le programme ne modifie que des fichiers locaux.

Le critère longueur est à la base de la notion de complexité de **Kolmogorov**.

En ce qui concerne les **critères dynamiques**, ils portent soit sur la place mémoire (**la complexité spatiale**) utilisée pour une exécution soit sur le temps d'exécution (**la complexité temporelle**).

## I. Introduction

La complexité algorithmique permet de mesurer les performances d'un algorithme et de le comparer avec d'autres algorithmes réalisant les même fonctionnalités.

La complexité d'un algorithmique consiste en l'étude de la quantité de ressources ( de **temps** ou **espace**) nécessaire à l'exécution de cet algorithme

La complexité algorithmique est un concept fondamental pour tout informaticien, elle permet de déterminer si un algorithme **a** est meilleur qu'un algorithme **b** et s'il est optimal ou s'il ne doit pas être utilisé. . .

### II. Complexité spatiale versus complexité temporelle

Plusieurs arguments militent en faveur du critère temporel plutôt que du critère spatial :

-pour occuper de la place il faut consommer du temps : l'inverse n'est pas vrai

-la place occupée à l'issue de l'exécution, en supposant que l'exécution termine, et est à nouveau disponible. La mémoire est une ressource recyclable.

-la complexité temporelle établit une ligne de partage consensuelle entre les solutions praticables et les autres. Penser aux algorithmes de complexité exponentielle et supérieurs.

### III. Notion de croissance asymptotique

#### Comparaison de fonctions

Considérons le problème du tri d'un tableau sans doublon. Ce problème est spécifié informellement de la manière suivante :

«la fonction  $\text{tri}(t)$  délivre un tableau représentant la permutation triée par ordre croissant des valeurs de  $t$ .» Supposons que nous cherchions à comparer la complexité de deux fonctions déterministes  $\text{tri}_1(t)$  et  $\text{tri}_2(t)$  qui satisfont cette spécification.

Supposons par ailleurs que la complexité de la fonction  $\text{tri}_1$  (respectivement  $\text{tri}_2$ ) soit donnée par la fonction  $f_1(n)$  (respectivement  $f_2(n)$ ),  $n$  étant la taille de  $t$ .

## III. Notion de croissance asymptotique

Nous intéressons aux fonctions de profil  $N \rightarrow N$  ou  $N \rightarrow R^+$ .

Ce choix est justifié par le fait que la complexité d'un algorithme est une fonction à valeurs entières ou réelles non négatives définie sur une grandeur scalaire discrète, typiquement **la taille de la donnée**.

Le caractère total de ces fonctions tient au fait qu'en général toutes **les tailles sont significatives**.

## III. Notion de croissance asymptotique

### Définition 1 (Notation O omicron)

Soit  $g(n)$  une fonction de  $N \rightarrow R^+$ . On définit :

$$O(g(n)) = \{f(n) \mid \exists c > 0, \exists n_0 \geq 0, \forall n \geq n_0, f(n) \leq c g(n)\}$$

→ Cela signifie qu'à partir d'un certain rang, la fonction  $f$  est majorée par une constante fois la fonction  $g$ . Il s'agit donc d'une situation de **domination** de la fonction  $f$  par la fonction  $g$ .

Exemples:

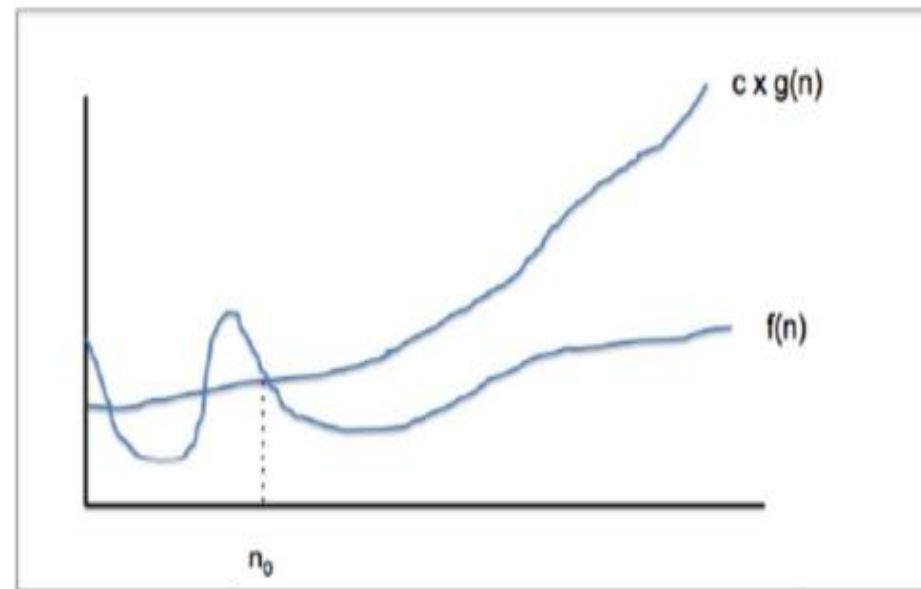
$$n^2 \in O(2^n + 2n)$$

$$20n^2 \in O(3n^3 + 2n + 1)$$

$$20n^2 \in O(20n^2 + 50n + 5)$$

$$20n^2 \in O(19n^2)$$

$$n^2 \notin O(200n)$$



## III. Notion de croissance asymptotique

### Exercices sur la notation O omicron

**Exercice 1:** Prouver que :

1) Si  $f(n)=4$  alors  $f(n)= \mathbf{O}(1)$ ,

→ prendre par exemple  $c=5$  et  $n_0 = 1$

2) Si  $f(n)=3n+2$  alors  $f(n)= \mathbf{O}(n)$ ,

→ prendre par exemple  $c=4$  et  $n_0 = 2$

3) Si  $f(n)=2n^2+3$  alors  $f(n)= \mathbf{O}(n^2)$ ,

→ prendre par exemple  $c=3$  et  $n_0 = 2$

## III. Notion de croissance asymptotique

### Exercices sur la notation O omicron

#### Exercice 2:

Pour chacune des fonctions  $T_i(n)$  suivantes déterminer sa complexité asymptotique dans la notation O.

#### Exemple

$$0) T_0(n) = 3n \quad \in O(n)$$

$$1) T_1(n) = 6n^3 + 10n^2 + 5n + 2$$

$$2) T_2(n) = 3 \log n + 4$$

$$3) T_3(n) = 2^n + 6n^2 + 7n$$

$$4) T_4(n) = 7k + 2$$

$$5) T_5(n) = 4 \log n + n$$

$$6) T_6(n) = 6n^3 + 10n^2 + 5n + 2$$

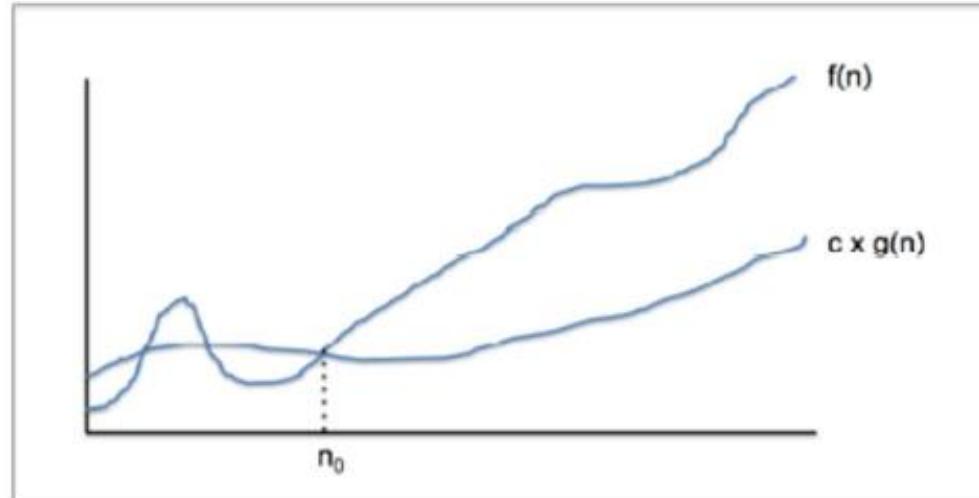
## III. Notion de croissance asymptotique

### Définition 2 (Notation $\Omega$ oméga)

Soit  $g(n)$  une fonction de  $N \rightarrow R^+$ . On définit

$$\Omega(g(n)) = \{f(n) \mid \exists c > 0, \exists n_0 \geq 0, \forall n \geq n_0, c g(n) \leq f(n)\}$$

→ Cela signifie qu'à partir d'un certain rang, la fonction  $f$  est minorée par une constante fois la fonction  $g$ . Il s'agit donc d'une situation de **domination** de la fonction  $g$  par la fonction  $f$ .



### III. Notion de croissance asymptotique

#### Exercice sur la notation $\Omega$ oméga

Prouver que :

- 1) Si  $f(n)=4$  alors  $f(n)= \Omega(1)$ ,
- 2) Si  $f(n)=4n+2$  alors  $f(n)= \Omega(n)$
- 3) Si  $f(n)=4n^2+1$  alors  $f(n)= \Omega(n)$

## III. Notion de croissance asymptotique

### Définition 3 (Notation $\Theta$ théta)

Soit  $g(n)$  une fonction de  $N \rightarrow R^+$ . On définit :

$$\Theta(g(n)) = \{f(n) \mid \exists c_1 > 0, \exists c_2 > 0, \exists n_0 \geq 0, \forall n \geq n_0, c_1 g(n) \leq f(n) \leq c_2 g(n)\}$$

→  $g$  est équivalent (ou comparable) asymptotiquement à  $f$

- A partir d'un certain rang  $n_0$

la fonction  $f(n)$  peut être bornée inférieurement par  $c_1 * g(n)$ ;

la fonction  $f(n)$  peut être bornée supérieurement par  $c_2 * g(n)$ ;

### Exemples

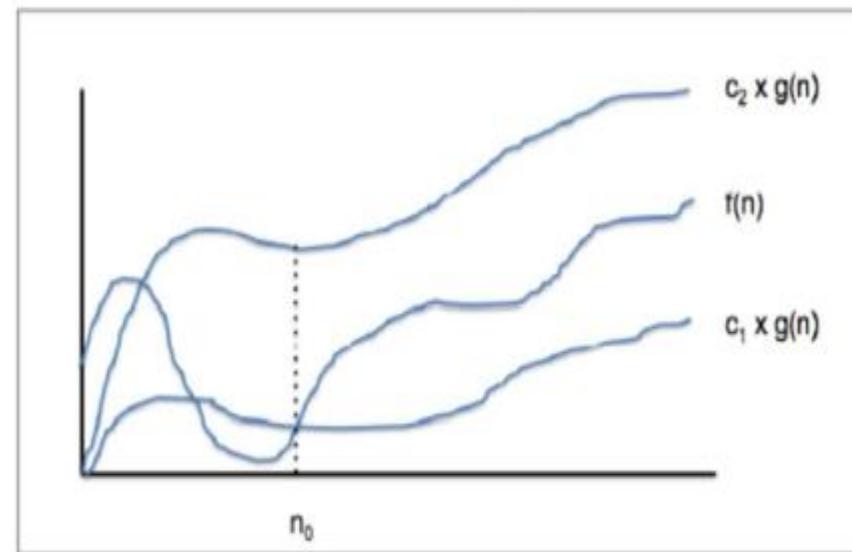
$$n^2 \notin \Theta(2^n + 2n)$$

$$20 n^2 \notin \Theta(3n^3 + 2n + 1)$$

$$20 n^2 \in \Theta(20n^2 + 50n + 5)$$

$$20 n^2 \in \Theta(19n^2)$$

$$n^2 \notin \Theta(200n)$$



### III. Notion de croissance asymptotique

**Exercice sur la notation  $\theta$  théta:** Prouver que :

- 1) Si  $f(n)=4$  alors  $f(n) \in \theta(1)$ ,
- 2) Si  $f(n)=4n+2$  alors  $f(n) \in \theta(n)$ ,
- 3) Si  $f(n)=4n^2+1$  alors  $f(n) \in \theta(n^2)$

### IV. Règles de calcul de la complexité en O

Pour calculer la complexité grand **O** d'un algorithme il faut compter le nombre **d'opérations de base** qui effectue comme :

- Opération arithmétique ou logique
- Opération d'affectation
- Vérification d'une condition
- Opération d'entrée/Sortie
- ➔ La complexité de chaque opération de base est **constante** ou **O(1)**

## IV. Règles de calcul de la complexité en O

Complexité temporelle d'une suite d'opérations élémentaires

➤ **Cas d'une instruction simple** (écriture, lecture, affectation):

Le temps d'exécution de chaque instruction simple est **O(1)**

➤ **Cas d'une suite d'instruction simple:**

Le temps d'exécution d'une séquence d'instructions est déterminée par la règle de la somme. C'est donc le temps de la séquence qui a le plus grand temps d'exécution:

$$O(T) = O(T_1 + T_2) = \max(O(T_1); O(T_2))$$

Traitement 1  $T_1(n)$

Traitement 2  $T_2(n)$

## IV. Règles de calcul de la complexité en O

### ➤ Cas d'un traitement conditionnel

Le temps d'exécution d'une instruction **Si** est le temps d'exécution des instructions exécutées sous condition, + le temps pour évaluer la condition . Pour une alternative, on se place dans le cas le plus défavorable.

**Exemple:**

**Si** (condition) **Alors**

    Traitement 1

**Sinon**

    Traitement 2

**Fin Si**

$$O(T) = O(T_{\text{cond}}) + \max [O(T_{\text{trait 1}}), O(T_{\text{trait 2}})]$$

## IV. Règles de calcul de la complexité en O

### ➤ Cas d'un traitement itératif

Le temps d'exécution d'une boucle est la somme du temps pour évaluer le corps et du temps pour évaluer la condition. Souvent ce temps est le produit du nombre d'itérations de la boucle par le plus grand temps possible pour une exécution du corps,

```
while (cond ){  
/* trait */
```

```
}
```

```
do{  
/* trait */
```

```
}while (cond);
```

```
For ( ; cond; ){  
/* trait */
```

```
}
```

$$O(T) = \text{nombre d'itérations} \times [ O(T_{\text{cond}}) + O(T_{\text{trait}}) ]$$

## IV. Règles de calcul de la complexité en O

Quelle est l'opération fondamentale ou élémentaire dans cette fonction?

```
int somme(int T[], int n)
{
    int i, S=0;
    for (i=0 ; i<n ; i++) /* n itérations */
        S=S+T[i];           /* opération fondamentale ou élémentaire */
    return S;
}
```

La complexité Temporelle de l'exemple ci-dessus est :  $O(N)$   
→ Temps Linéaire

La complexité spatiale =  $O(n+ 3)$  ( $n$  cases de  $T$  + $i$  +  $S$ +  $n$ ) = $O(N)$

## IV. Règles de calcul de la complexité en O

**Question:** Quelle est l'opération fondamentale ou élémentaire dans cette fonction?

```
int recherche (int T[], int n , int info)
{
    int i=0;
    do
    {
        if (T[i]==info) /* opération fondamentale ou élémentaire */
            return 1;
        else
            i=i+1;
    }while(i<n);
    return 0;
}
```

La complexité spatiale =  $O(n+ 3) = O(N)$

### IV. Règles de calcul de la complexité en O

Pour la complexité temporelle: On compte le nombre de répétition de l'opération fondamentale ou élémentaire ( $T[i]==info$ ) ?

- 1 fois : si  $info==T[0]$  : meilleur des cas (ou cas optimiste ou minimum) → la complexité temporelle est  $O(1)$
- $n/2$  fois: si  $info==T[(n-1)/2]$  : cas moyen (ou cas réaliste) → la complexité temporelle est  $O(n/2) \rightarrow O(n)$
- $n$  fois : si  $info==T[n-1]$  : pire des cas (ou cas pessimiste ou maximal) → la complexité temporelle est  $O(n)$

### V. Analyse classique de la complexité des fonctions

On distingue trois cas :

- cas optimiste ou favorable ou meilleur  $T_{\min}$  : une donnée qui nécessite le temps minimum d'exécution
- cas pessimiste ou le plus défavorable ou pire  $T_{\max}$  : une donnée qui nécessite le temps maximum d'exécution
- cas moyen  $T_{\text{moy}}$ : une donnée dont le temps d'exécution est quelque part entre  $T_{\min}$  et  $T_{\max}$

### V. Analyse classique de la complexité des fonctions

#### Remarque

Certains algorithmes sont insensibles à la donnée initiale. Par exemple, le tri par sélection ne dépend pas de la configuration initiale du tableau à trier. Ainsi pour cet algorithme  $T_{\min} = T_{\max} = T_{\text{moy}} = (n^2)$  où  $n$  est la taille du tableau à trier.

## VII. Exercises d'application

### Exercice 1: problème de recherche dichotomique

La technique de recherche dichotomique n'est applicable que si le tableau est déjà trié (par exemple dans l'ordre croissant). Le but de recherche dichotomique est de diviser l'intervalle de recherche par 2 à chaque itération. Pour cela, on procède de la façon suivante :

Soient premier et dernier les extrémités gauche et droite de l'intervalle dans lequel on cherche la valeur  $x$ , on calcule  $M$ , l'indice de l'élément médian :

$$M = (\text{premier} + \text{dernier}) \text{ div } 2$$

Il y a 3 cas possibles :

$x = T[M]$  : l'élément de valeur  $x$  est trouvé, la recherche est terminée

$x < T[M]$  : l'élément  $x$ , s'il existe, se trouve dans l'intervalle [premier.. $M-1$ ]

$x > T[M]$  : l'élément  $x$ , s'il existe, se trouve dans l'intervalle [ $M+1$ ..dernier]

La recherche dichotomique consiste à itérer ce processus jusqu'à ce que l'on trouve  $x$  ou que l'intervalle de recherche soit vide.

## VII. Exercises d'application

### 1) Réalisation

## VII. Exercises d'application

### 2) Complexité

-Complexité en temps :

On va comptabiliser l'opération de comparaison?

On distingue les cas suivant :

-Cas minimum ou optimiste: une seul comparaison, ceci traduit que  $x$  coïncide avec  $T[0+(N-1)/2]$ .

-Cas maximum ou pessimiste : (dans le pire des cas) un tel cas traduit  $x$  n'appartient pas à nom. À chaque itération, on part d'un problème de taille  $N$  et moyennant une comparaison, on tombe sur un problème de taille  $N/2$ . L'algorithme de recherche dichotomique applique le principe « diviser pour résoudre » ou encore « diviser pour régner » : le problème initiale est divisé en deux sous problème disjoints et de taille plus ou moins égale.

## VII. Exercises d'application

### 2) Complexité

Supposant que  $N$  est le nombre d'éléments

On note  $C_N$  : le nombre de fois où l'instruction de base est effectuée.

$$\rightarrow C_N = C_{N/2} + 1$$

$$\text{avec } C_1 = 1$$

$$\text{On pose } N = 2^n \text{ ou } n = \log_2 N \rightarrow C_N = C_2^n$$

$$C_2^n = C_2^{n-1} + 1$$

$$= C_2^{n-2} + 1 + 1$$

$$= C_2^{n-3} + 3$$

...

$$= C_1 + n - 1 + n - 1 + \log_2 N$$

Ainsi, cet algorithme est  $O(\log_2 N)$

-**Cas moyen** : entre 1 et  $\log_2 N$

## VII. Exercice d'application

### 2) Complexité

**Remarque :** le gain apporté par l'application de l'algorithme de recherche dichotomique sur un tableau **trié** peut être illustré par l'exemple suivant :

On souhaite effectuer une recherche sur un tableau trié T de taille N=10000.

Si on applique

l'algorithme de recherche séquentielle,  
la complexité au pire des cas est 10000

l'algorithme de recherche dichotomique,  
la complexité au pire des cas est  
 $O(\log_2 10000) \approx 14$

## VII. Exercises d'application

### Exercice 2:

Quelle est la complexité de la méthode suivante ?

```
int puissance (int n, int a) {  
    int aux = n ;  
    int puissanceDea = a ;  
    int resultat=1 ;  
    while ( aux != 0 ) {  
        if (aux mod 2 == 1) {  
            resultat = resultat * puissanceDea ;  
        }  
        aux=aux/2 ;  
        puissanceDea = puissanceDea * puissanceDea ;  
    }  
    return resultat ;  
}
```

## VII. Exercises d'application

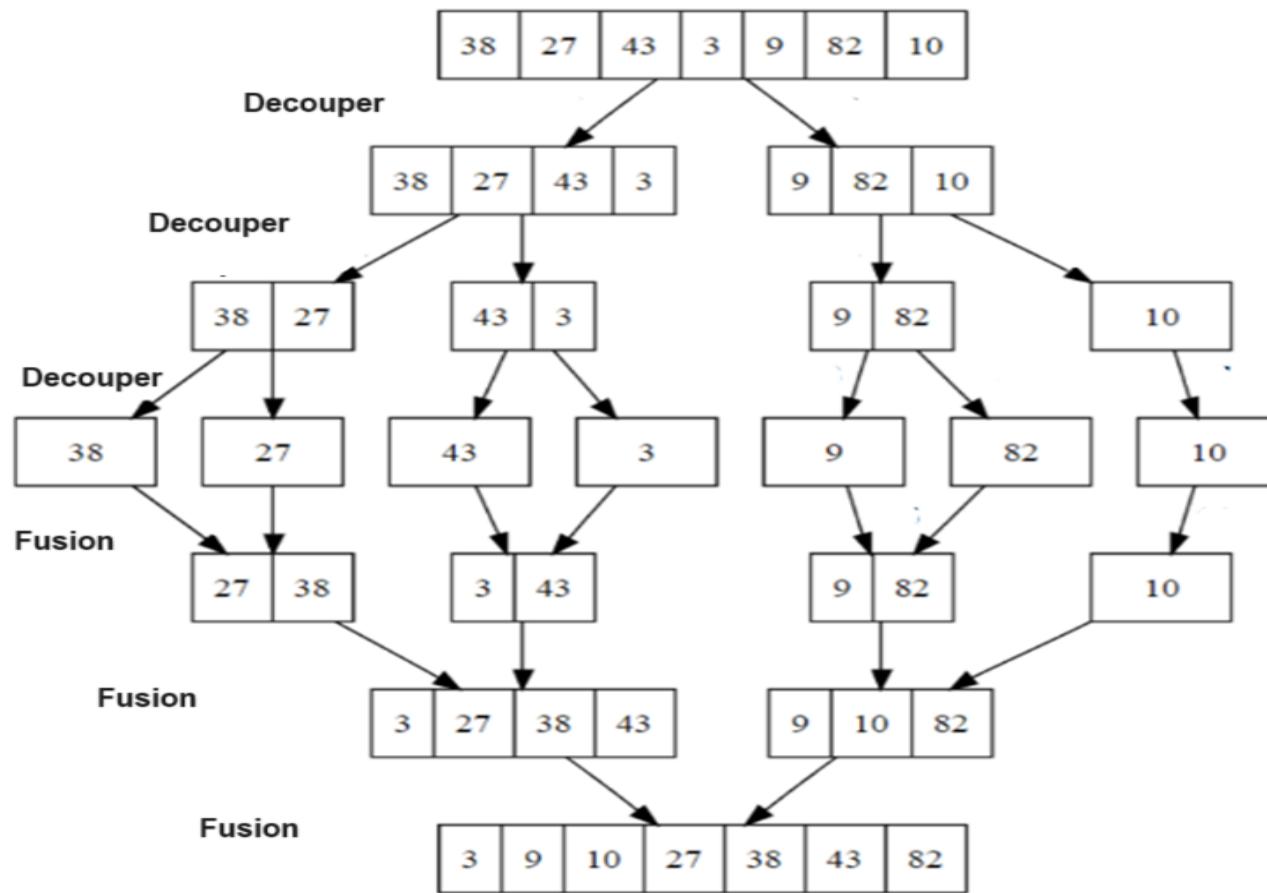
### Exercice 3: problème de tri fusion

Le principe de **trie par fusion** est :

- Découper le tableau  $T[1, \dots n]$  à trier en deux sous-tableaux  $T[1, \dots n/2]$  et  $T[n/2 + 1, \dots n]$
  - Trier les deux sous-tableaux  $T[1, \dots n/2]$  et  $T[n/2 + 1, \dots n]$  (récursevement, ou on ne fait rien s'ils sont de taille 1)
  - Fusionner les deux sous-tableaux triés  $T[1, \dots n/2]$  et  $T[n/2 + 1, \dots n]$  de sorte à ce que le tableau final soit trié.
- 1) Proposer une implémentation récursive pour cette technique
  - 2) Déterminer sa complexité.

## VII. Exercises d'application

Illustration de l'algorithme de **trie par fusion** est :



## VII. Exercises d'application

### 1) Réalisation

```
#include <stdio.h>
void fusion (int T [ ], int g, int m, int d); /* → O(n) */

void TriFusion(int T [ ], int g, int d){
    int m;
    if (g<d){
        m=(g+d)/2;
        TriFusion(T, g, m) ;
        TriFusion(T, m+1, d) ;
        Fusion(T, g, m, d) ;
    }
}
void tri (int T [ ], int n){
    TriFusion( T, , n-1) ;
}
```

## VII. Exercises d'application

```
void fusion (int tab [ ], int g, int m, int d) {  
    int n1 = m - g + 1, n2 = d - m;  
    int i, j, k;  
    int T1 [n1], T2 [n2] ;  
    for (i = 0; i < n1; i++)  
        T1[i] = tab[g + i];  
    for (j = 0; j < n2; j++)  
        T2[j] = tab[m + 1 + j];  
/* maintient trois pointeurs, un pour chacun des deux tableaux et un pour  
maintenir l'index actuel du tableau trié final */  
    i = 0;      j = 0;      k = g;  
    while (i < n1 && j < n2)  
        if (T1[i] <= T2[j])  
            tab[k++] = T1[i++];  
        else  
            tab[k++] = T2[j++];  
/* tab[k++]= (T1[i] <= T2[j]) ? T1[i++]:T2[j++]; */  
// Copiez tous les éléments restants du tableau non vide  
    while (i < n1)      tab[k++] = T1[i++];  
    while (j < n2)      tab[k++] = T2[j++];  
}
```

## VII. Exercices d'application

### 2) Complexité au pire des cas

Supposant que  $N$  est le nombre d'éléments

On note  $C_N$  : le nombre de fois où l'instruction de base est effectuée.

$$\rightarrow C_N = 2 * C_{N/2} + N$$

avec  $C_1 = 0$  ( 1 seul élément donc rien à faire)

On pose  $N=2^n$  ou  $n=\log_2 N \rightarrow C_N = C_{2^n}$

$$\begin{aligned} C_{2^n} &= 2 * C_{2^{n-1}} + 2^n \\ &= 2 * (2 * C_{2^{n-2}} + 2^{n-1}) + 2^n \\ &= 2^2 * C_{2^{n-2}} + 2^n + 2^n \\ &= 2^2 * C_{2^{n-2}} + 2 * 2^n \\ &= 2^2 * (2 * C_{2^{n-3}} + 2^{n-2}) + 2 * 2^n \\ &= 2^3 * C_{2^{n-3}} + 2^n + 2 * 2^n \\ &= 2^3 * C_{2^{n-3}} + 3 * 2^n \\ &\dots \\ &= 2^n * C_{2^{n-n}} + n * 2^n = 0 + (\log_2 N) * N \end{aligned}$$

Ainsi, cet algorithme est  $O(N \log_2 N)$