

Partie 7 : Complexité

- ▶ La notion de complexité fait référence à l'efficacité d'un algorithme.
- ▶ Il existe 2 formes de complexité pour un algorithme :
 - Complexité spatiale = espace mémoire occupé.
 - **Complexité temporelle** = temps d'exécution



Temps d'exécution

- ▶ Temps d'exécution d'un algorithme: pourquoi le mesurer ?
- ▶ Temps d'exécution d'un algorithme: Comment le mesurer ?



Temps d'exécution : Pourquoi ?

- Pour un problème donné, il y a plusieurs algorithmes.
- Il est facile d'écrire des algorithmes faux ou inefficaces.
- Un algorithme inefficace peut faire la différence entre plusieurs années et quelques minutes de calculs sur une même machine.



Temps d'exécution : Pourquoi ?

Exemple :

Construire une ville de 15 maisons en évitant aux livreurs de pizzas qui suivent les rues un trajet trop long depuis la pizzeria.

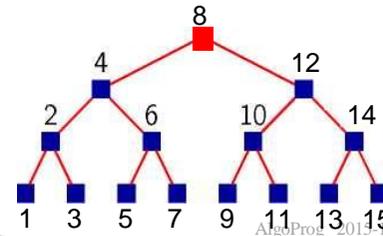
Organisation 1 : Linéaire. Numéros croissants. Pizzeria au numéro 1.



Organisation 2 : Embranchements.

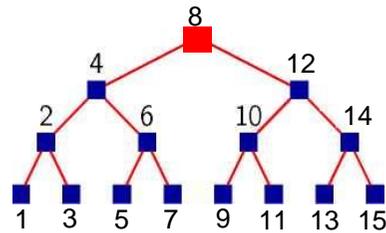
À l'ouest de la maison k , $n^\circ < k$, et à l'est, $n^\circ > k$.

La pizzeria est au numéro 8.



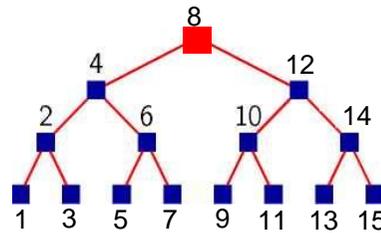
Temps d'exécution : Pourquoi ?

- ▶ Dans les deux organisations, le livreur a une méthode simple pour trouver une maison en partant de la pizzeria.



Temps d'exécution : Pourquoi ?

- ▶ On suppose qu'il faut une unité de temps pour passer d'une maison à une autre (en suivant une rue).
- ▶ Dans le cas le pire, quel est le temps mis par un livreur pour aller jusqu'à une maison depuis la pizzeria ?



Temps d'exécution : Pourquoi ?

Nombre de maisons	Temps avec organisation 1	Temps avec organisation 2
15	14	3
1023	1022	9
1 073 741 823	1073741822	29
n	$n-1$	$\sim \log_2(n)$

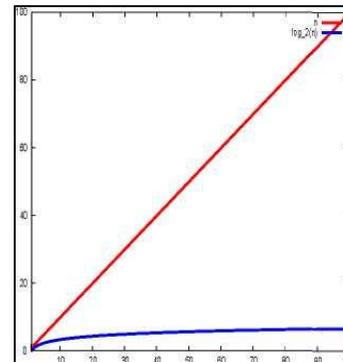


Temps d'exécution : Pourquoi ?

- ▶ Différence entre n et $\log n$:

Pour notre livreur de pizza :

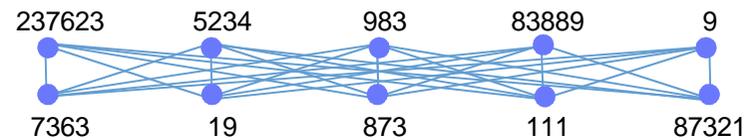
- Si $n = 10^6$, alors $\log_2 \approx 20$
Il fait **50 000 fois moins** de déplacements si les maisons sont organisés par « embranchements ».
- Si $n = 10^9$, alors $\log_2 n \approx 30$, il fait alors **30 000 000 fois moins** de déplacements.



Temps d'exécution : Pourquoi

2^{ème} exemple

- ▶ Problème : déterminer si 2 ensembles $E1$, $E2$ de n entiers ont une valeur commune.
- ▶ Algorithme 1 : comparer successivement chaque élément de $E1$ avec chaque élément de $E2$. Il faudra environ n^2 comparaisons.



Temps d'exécution : Pourquoi

2^{ème} exemple

- ▶ [Problème](#) : déterminer si 2 ensembles $E1$, $E2$ de n entiers ont une valeur commune.
- ▶ [Algorithme 2](#) : Avec une structure de données adaptée, on peut résoudre le problème avec environ $n \cdot \log(n)$

$ E1 = E2 $	Algorithme 1	Algorithme 2
n	n^2	$n \cdot \log(n)$
10	100	10
1000	1000000	3000
100000	10000000000	500000



Temps d'exécution : Pourquoi

Différence entre n^2 et $n \cdot \log(n)$

Sur un ordinateur exécutant une instruction élémentaire en 10^{-9} s.

- ▶ Si les ensembles $E1$ et $E2$ ont $n = 1\,000\,000 = 10^6$ éléments
 - Exécuter $n \cdot \log n$ instructions élémentaires nécessite **0,006s**.
 - Exécuter n^2 instructions élémentaires nécessite **10^3 s** soit environ **16mn40s**.
- ▶ Si les ensembles $E1$ et $E2$ ont $n = 10\,000\,000 = 10^7$ éléments
 - Exécuter $n \cdot \log n$ instructions élémentaires nécessite **0,07s**.
 - Exécuter n^2 instructions élémentaires nécessite **10^5 s** soit plus **d'une journée**.
- ▶ En informatique, on manipule parfois des ensembles énormes
 - Google indexe plusieurs milliards de pages web,
 - Google reçoit près de 8 milliards 640 millions de requêtes/jour.



Temps d'exécution : Comment ?

- ▶ 1^{ère} idée : **Faire une étude expérimentale.**
 - **Implémenter** le ou les algorithmes.
 - **Exécuter** le programme pour différentes valeurs de n .
 - **Mesurer** précisément le temps d'exécution.
 - **En déduire** une approximation du temps d'exécution.
- ▶ Exemple: déterminer si 2 ensembles $E1, E2$ de n entiers ont une valeur commune.

$ E1 = E2 $	Algorithme 1	Algorithme 2
10	100	10
1000	1000000	3000
100000	10000000000	500000
n	n^2	$n \cdot \log(n)$

Temps d'exécution : Comment ?

- ▶ 1^{ère} idée : **Faire une étude expérimentale.**

Inconvénients :

- ▶ Il faut programmer les algorithmes.
 - Conséquences ?
- ▶ On ne pourra tester qu'un sous-ensemble des cas possibles.
 - Conséquences ?
- ▶ Pour comparer 2 algorithmes on devra utiliser les mêmes environnements matériel et logiciel.
 - Conséquences ?



Temps d'exécution : Comment ?

- ▶ 2^{ème} idée : **Utiliser une méthode théorique** qui :
- ▶ **Utilise l'algorithme** et est indépendante de l'implémentation et du langage de programmation.
- ▶ Définit le temps d'exécution comme **une fonction** dépendante **de la taille des données** d'entrée.
- ▶ Prends en compte **toutes les entrées possibles**.
- ▶ Est **indépendante des environnements** matériel et logiciel.



Complexité temporelle : Définition

- ▶ Le **temps de calcul** (ou complexité) d'un algorithme est la **fonction qui à un entier n associe le nombre maximal d'instructions élémentaires** que l'algorithme effectue, lorsqu'on travaille sur des objets de taille n .
- ▶ La fonction compte les instructions élémentaires au lieu de mesurer le temps.
- ▶ On s'intéresse en particulier à la **complexité dans le pire des cas**.
- ▶ Exemples d'opérations élémentaires :
 - **additionner, soustraire, multiplier ou diviser** deux nombres,
 - **tester** si une valeur est égale à une autre valeur,
 - **affecter** une valeur à une variable.

Complexité temporelle : Définition

- ▶ Le décompte des instructions peut être fastidieux si on compte aussi les accès aux structures de données, les E/S, appels de fonctions, etc
- ▶ Même en se limitant à une seule opération on peut obtenir une expression qu'il faudra approximer pour obtenir une solution
- ▶ Même si les opérations élémentaires ont des temps d'exécution constants sur une machine donnée, ils varient d'une machine à l'autre.
- ▶ Donc pour simplifier le calcul sans perdre sa pertinence on négligera les constantes.
- ▶ En pratique, on se contente d'un **ordre de grandeur asymptotique**.

Ordres de grandeur

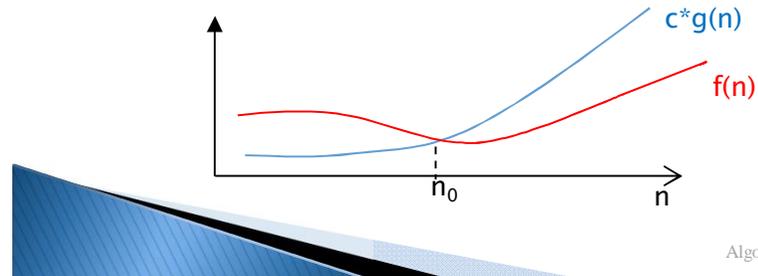
Limite asymptotique supérieure - O (Grand O)

Soient 2 fonctions $f(n)$ et $g(n)$ de \mathbb{N} dans \mathbb{R} .

On dit que $f(n)$ est $O(g(n))$ ou $f(n) = O(g(n))$

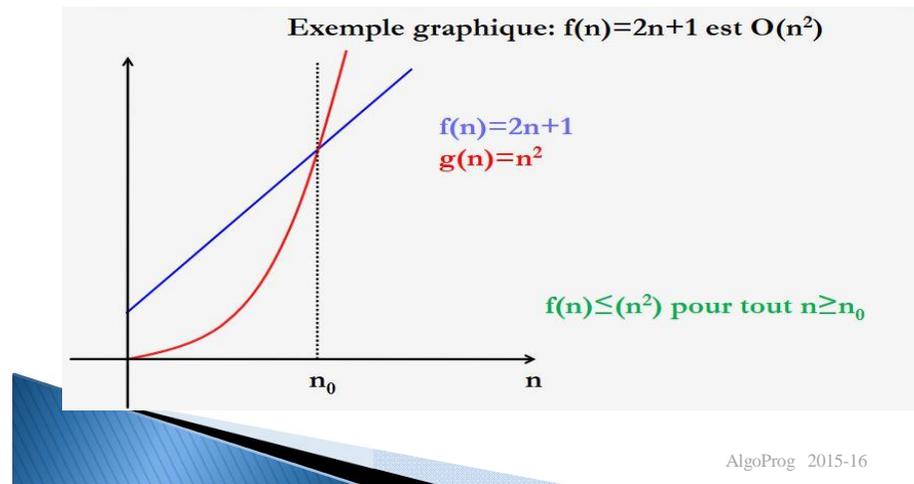
si et seulement si :

$$\exists c \in \mathbb{R}^{+*}, \exists n_0 \in \mathbb{N}^* / f(n) \leq c * g(n) \forall n \geq n_0$$



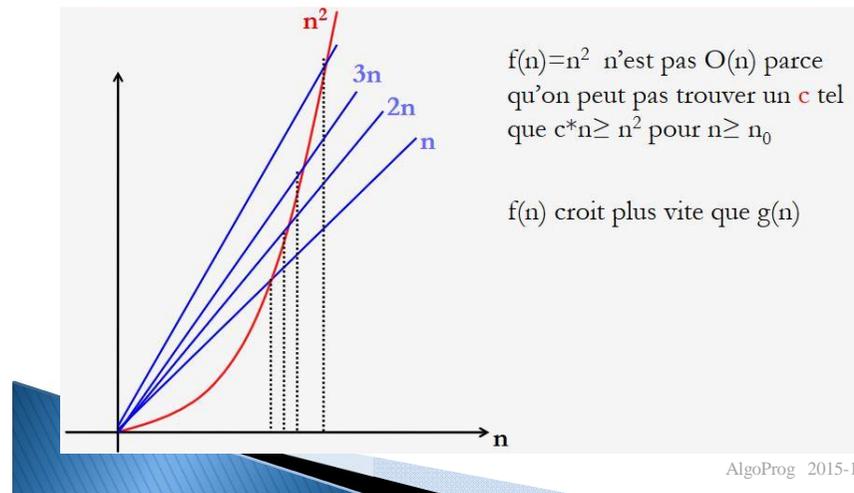
Ordres de grandeur

Limite asymptotique supérieure O (Grand O)



Ordres de grandeur

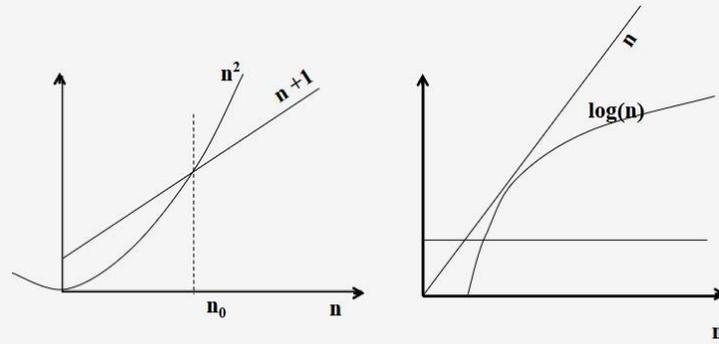
Limite asymptotique supérieure O (Grand O)



Ordres de grandeur

Limite asymptotique supérieure O (Grand O)

$O(1) < O(\log n) < O(n) < O(n \log n) < O(n^2) < O(n^3) < O(2^n) \dots$



Ordres de grandeur

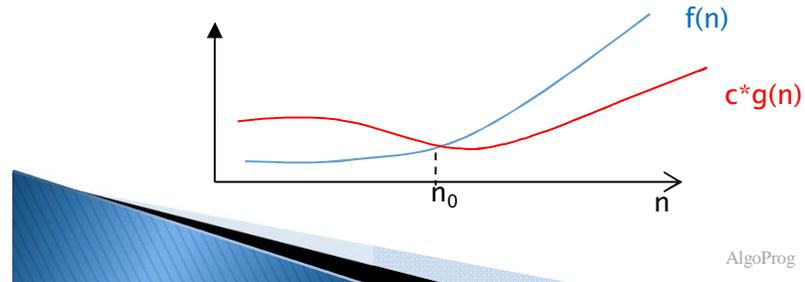
Limite asymptotique inférieure- Ω (Grand Oméga)

Soient 2 fonctions $f(n)$ et $g(n)$ de \mathbb{N} dans \mathbb{R} .

On dit que $f(n)$ est $\Omega(g(n))$ ou $f(n) = \Omega(g(n))$

si et seulement si :

$$\exists c \in \mathbb{R}^{+*}, \exists n_0 \in \mathbb{N}^* / f(n) \geq c * g(n) \forall n \geq n_0$$



Ordres de grandeur

Limite asymptotique - Θ (Grand thêta)

Soient 2 fonctions $f(n)$ et $g(n)$ de \mathbb{N} dans \mathbb{R} .

On dit que $f(n)$ est $\Theta(g(n))$ ou $f(n)$

$= \Theta(g(n))$

si et seulement si :

$f(n)$ est $O(g(n))$ et $f(n)$ est $\Omega(g(n))$



Ordres de grandeur : comportements asymptotiques

Intuitivement :

- ▶ Grand O : $f(n)$ est $O(g(n))$ si $f(n)$ est plus petite ou égale à $g(n)$ quand n est grand.
- ▶ Grand Oméga : $f(n)$ est $\Omega(g(n))$ si $f(n)$ est plus grande ou égale à $g(n)$ quand n est grand.
- ▶ Grand thêta : $f(n)$ est $\Theta(g(n))$ si $f(n)$ est à peu près égale $g(n)$ quand n est grand.



Complexité : Exemple

```

int
multiplication (int x, int y){
    int p=0;
    for(int i=1; i<=y; i++){
        p=p+x;
    }
    return (p);
}

```

op élémentaires

1+1+1
2
2
} y fois

1

4 + 4*y

$1 * y \leq 4 + 4 * y \leq 5 * y \quad \forall y > 5$
 donc la complexité est $\theta(y)$



Complexité : Exemple

```
int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x; }
        x = 2*x; /*decalages*/
        y = y//2; /*decalages*/
    }
    return (p);
}
```

x=7	y=9	p=0
x=7	y=9	p=7
↓*2	↓/2	
x=14	y=4	p=7
x=28	y=2	p=7
x=56	y=1	p=63
x=112	y=0	p=63
return 63		



Complexité : Exemple

```
x=7   y=9   p=0
x=7   y=9   p=7
  ↓*2  ↓/2
x=14  y=4   p=7
x=28  y=2   p=7
x=56  y=1   p=63
x=112 y=0   p=63
return 63
```

```
x=111   y=1001 p=0
x=111   y=1001 p=7
  ↓*2   ↓/2
x=1110  y=100  p=7
x=11100 y=10   p=7
x=111000 y=1   p=63
x=1110000 y=0   p=63
return 63
```

Complexité : Exemple

```

int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x;
            x = 2*x; /*decalages*/
            y = y//2; /*decalages*/
        }
    }
    return (p);
}

```

op élémentaires

1	1	
1 (+1-sortie)	2	
2	0 ou 2	}
2	2	
2	2	
1	1	
[3+7*k, 3+9*k]		k fois

Que vaut k ?

Complexité : Exemple

```
int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x;
            x = 2*x; /*decalages*/
            y = y//2; /*decalages*/
        }
    }
    return (p);
}
```

op élémentaires

p=0	→	1	
while (y>0){	→	1 (+1-sortie)	
if (y%2 ==1) {	→	2	} k fois
p=p+x; }	→	0 ou 2	
x = 2*x; /*decalages*/	→	2	
y = y//2; /*decalages*/	→	2	
}			
return (p);	→	1	
}			

[3+7*k, 3+9*k]

k est tel que $2^{k-1} \leq y < 2^k$

Complexité : Exemple

```

int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x;
            x = 2*x; /*decalages*/
            y = y//2; /*decalages*/
        }
    }
    return (p);
}

```

op élémentaires

<code>p=0</code>	→	1	
<code>while (y>0){</code>	→	1 (+1-sortie)	
<code>if (y%2 ==1) {</code>	→	2	
<code>p=p+x; }</code>	→	0 ou 2	} k fois
<code>x = 2*x; /*decalages*/</code>	→	2	
<code>y = y//2; /*decalages*/</code>	→	2	
<code>return (p);</code>	→	1	
		[3+7*k, 3+9*k]	

k est tel que $\log(2^{k-1}) \leq \log(y) < \log(2^k)$

Complexité : Exemple

```

int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x; }
        x = 2*x; /*decalages*/
        y = y//2; /*decalages*/
    }
    return (p);
}

```

op élémentaires

	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	
	→		→		→	

[3+7*k, 3+9*k]

k est tel que $(k - 1)\log(2) \leq \log(y) < k * \log(2)$

Complexité : Exemple

```

int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x;
            x = 2*x; /*decalages*/
            y = y//2; /*decalages*/
        }
    }
    return (p);
}

```

op élémentaires

<code>p=0</code>	→	1	
<code>while (y>0){</code>	→	1 (+1-sortie)	
<code>if (y%2 ==1) {</code>	→	2	} k fois
<code>p=p+x; }</code>	→	0 ou 2	
<code>x = 2*x; /*decalages*/</code>	→	2	
<code>y = y//2; /*decalages*/</code>	→	2	
<code>}</code>	→		
<code>return (p);</code>	→	1	
<code>}</code>	→		

[3+7*k,3+9*k]

k est tel que $(k - 1) \leq \log_2(y) < k$

Complexité : Exemple

```
int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x;
            x = 2*x; /*decalages*/
            y = y//2; /*decalages*/
        }
    }
    return (p);
}
```

op élémentaires

p=0	→	1	
while (y>0){	→	1 (+1-sortie)	
if (y%2 ==1) {	→	2	} k fois
p=p+x; }	→	0 ou 2	
x = 2*x; /*decalages*/	→	2	
y = y//2; /*decalages*/	→	2	
}			
return (p);	→	1	
}			

[3+7*k, 3+9*k]

k est tel que $k \leq \log_2(y) + 1 < k + 1$

Complexité : Exemple

```

int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x; }
        x = 2*x; /*decalages*/
        y = y//2; /*decalages*/
    }
    return (p);
}

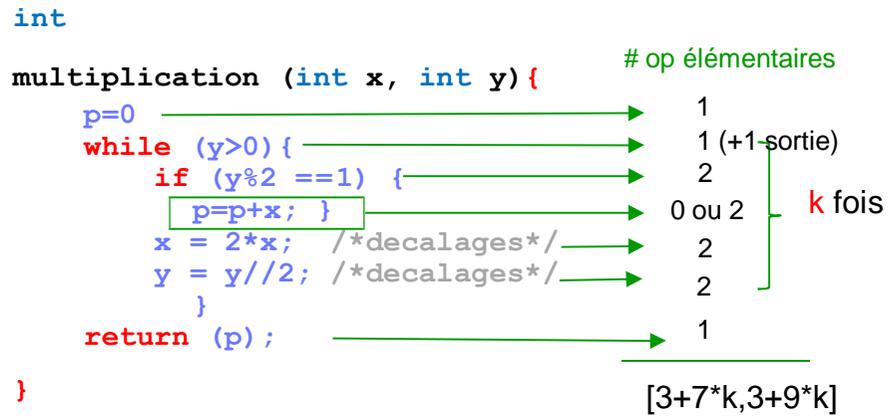
```

op élémentaires

<code>p=0</code>	→	1	
<code>while (y>0){</code>	→	1 (+1-sortie)	
<code>if (y%2 ==1) {</code>	→	2	
<code>p=p+x; }</code>	→	0 ou 2	} k fois
<code>x = 2*x; /*decalages*/</code>	→	2	
<code>y = y//2; /*decalages*/</code>	→	2	
<code>return (p);</code>	→	1	
			[3+7*k, 3+9*k]

donc $k < \log_2(y)$

Complexité : Exemple



*donc $3 + 7 * \log_2(y) < \# \text{op élémentaires} < 3 + 9 * \log_2(y)$*

Complexité : Exemple

```
int
multiplication (int x, int y){
    p=0
    while (y>0){
        if (y%2 ==1) {
            p=p+x;
            x = 2*x; /*decalages*/
            y = y//2; /*decalages*/
        }
    }
    return (p);
}
```

op élémentaires

p=0	→	1	
while (y>0){	→	1 (+1-sortie)	
if (y%2 ==1) {	→	2	} k fois
p=p+x; }	→	0 ou 2	
x = 2*x; /*decalages*/	→	2	
y = y//2; /*decalages*/	→	2	
}			
return (p);	→	1	
}			

[3+7*k, 3+9*k]

donc la complexité est $\Theta(\log_2(y))$

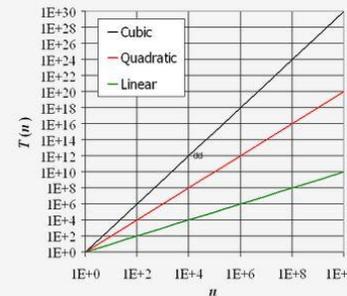
Complexité : ordre de grandeur

n =	2	16	256	1024
$\log(\log n)$	0	2	3	3.32
$\log n$	1	4	8	10
n	2	16	256	1024
$n \log n$	2	64	2048	10 240
n^2	4	256	65 536	1 048 576
n^3	8	4 096	16 777 216	$1.07 * 10^9$
2^n	4	65 536	$1.15 * 10^{77}$	$1.79 * 10^{308}$

Complexité : vocabulaire

Terminologie: Types de complexité

Constante:	$O(1)$
Logarithmique:	$O(\log(n))$
Linéaire:	$O(n)$
Quasi-linéaire:	$O(n \cdot \log(n))$
Quadratique:	$O(n^2)$
Cubique:	$O(n^3)$
Polynomiale:	$O(n^k), k > 0$
Quasi-polynomiale	$O(n^{\log(n)})$
Exponentielle:	$O(a^n), a > 1$
Factorielle	$O(n!)$



Pour mémoire

Propriétés des logarithmes:

$$\log_b(x*y) = \log_b x + \log_b y$$

$$\log_b(x/y) = \log_b x - \log_b y$$

$$\log_b x^a = a * \log_b x$$

$$\log_b a = \log_x a / \log_x b$$