

COMPLEXITÉ

À la fin de ce chapitre, je sais :

- ✎ définir les concepts de complexité temporelle et complexité mémoire
- ✎ calculer la complexité d'algorithmes simples
- ✎ calculer la complexité d'algorithmes récurrents

A Complexités algorithmiques

Lorsque la taille des données d'entrée à traiter d'un algorithme augmente, le résultat est que l'algorithme met généralement plus de temps à s'exécuter. Pourquoi est-ce un problème ? C'est un problème car, dans les activités humaines, lorsqu'un système fonctionne, on a souvent tendance à lui en demander plus, très vite. Or, si le système développé est capable de gérer trois utilisateurs, peut-il en gérer un million en un temps raisonnable et sans s'effondrer ? C'est peu probable.

La question est donc de savoir :

- comment mesurer la sensibilité d'un algorithme au changement d'échelle des données d'entrée,
- comment mesurer cette sensibilité indépendamment des machines concrètes (processeurs), car on se doute bien que selon la puissance de la machine, le résultat ne sera pas le même.

■ **Définition 1 — Complexité temporelle.** La complexité temporelle est une mesure de l'évolution du temps nécessaire à un algorithme pour s'exécuter correctement en fonction de la taille des données d'entrée. La complexité temporelle est directement liée au nombre d'instructions à exécuter.

■ **Définition 2 — Complexité mémoire ou spatiale.** La complexité mémoire est une mesure de l'évolution de l'espace nécessaire à un algorithme pour s'exécuter correctement en fonction de la taille des données d'entrée. La complexité mémoire est associée à la taille de l'espace mémoire occupé par un algorithme au cours de son exécution.

D'un point de vue opérationnel, si la taille des données d'entrées augmente (n croît), un bon algorithme doit pouvoir délivrer des résultats en un temps fini, même si le nombre d'ins-

tructions lié aux boucles ou aux appels récursifs dépend de n . C'est pourquoi la complexité est un calcul asymptotique : on s'intéresse au comportement de l'algorithme lorsque n tend vers l'infini.

B Notation asymptotique

On utilise la notation de Landau O pour qualifier le comportement asymptotique de la complexité¹. Le tableau 1 recense les principales complexités et donne un exemple associé.

■ **Définition 3 — Notation de Landau O .** Soit $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}_+$ et $g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}_+$. On dit que f ne croît pas plus vite que g et on note $f = O(g)$ si et seulement si :

$$\exists C \in \mathbb{N}, \exists n_i \in \mathbb{N}, \forall n \in \mathbb{N}, n \geq n_i \Rightarrow f(n) \leq Cg(n)$$

Ⓡ Cette définition signifie simplement qu'au bout d'un certain rang, la fonction f ne croît jamais plus vite que la fonction g .

Théorème 1 — Propriétés de O . Soit f, f_1, f_2, g, g_1 et $g_2 : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}_+$.

1. $\forall k \in \mathbb{N}, O(k.f) = O(f)$
2. $f = O(g) \Rightarrow f + g \in O(g)$
3. $f_1 = O(g_1), f_2 = O(g_2) \Rightarrow f_1 + f_2 = O(\max(g_1 + g_2))$
4. $f_1 = O(g_1), f_2 = O(g_2) \Rightarrow f_1 f_2 = O(g_1 g_2)$
5. $\forall k \in \mathbb{N}, f = O(g) \Rightarrow k.f = O(g)$

■ **Exemple 1 — Simplification de notations asymptotiques.** Supposons qu'on ait compté le nombre d'opérations d'un algorithme en fonction de n et qu'on ait trouvé : $2n^2 + 4n + 3$. Alors la complexité de l'algorithme est $O(n^2)$. En effet, on a bien $\forall n \in \mathbb{N}, 2n^2 + 4n + 3 < 10n^2$. Si vous avez un doute, étudiez le signe du trinôme $-8n^2 + 4n + 3$.

De même, $10\log(n) + 5(\log(n))^3 + 7n + 3n^2 + 6n^3 = O(n^3)$. Pour le montrer, il suffit d'utiliser le théorème sur les croissances comparées.

1. $O(n)$ se dit «grand o de n».

Complexité	Nom	Description
$O(1)$	Constante	Instructions exécutées un nombre constant de fois Indépendante de la taille de l'entrée
$O(\log(n))$	Logarithmique	Légèrement plus lent lorsque n augmente.
$O(n)$	Linéaire	L'algorithme effectue une tâche constante pour chaque élément de l'entrée.
$O(n \log(n))$	Linéarithmique	L'algorithme effectue une tâche logarithmique pour chaque élément de l'entrée.
$O(n^2)$	Quadratique	L'algorithme effectue une tâche linéaire pour chaque élément de l'entrée.
$O(n^k)$	Polynomiale	Typiquement k tâches linéaires imbriquées.
$O(k^n)$	Exponentielle	L'algorithme effectue une tâche constante sur tous les sous-ensembles de l'entrée.
$O(n!)$	Factorielle	L'algorithme effectue une tâche dont la complexité est multipliée par une quantité croissante proportionnelle à n .

TABLE 1 – Hiérarchie des complexités temporelles de la moins complexe à la plus complexe.

Taille de l'entrée	$O(\log n)$	$O(n)$	$O(n \log n)$	$O(n^2)$	$O(n^3)$	$O(2^n)$
10^2	2,3 ns	50 ns	230 ns	5 μ s	500 μ s	335 années
10^3	3,4 ns	500 ns	3,45 μ s	500 μ s	500 ms	10^{282} années
10^4	4,6 ns	5 μ s	46 μ s	50 ms	500 s	...
10^5	5,7 ns	50 μ s	575 μ s	5 s	2h20 min	...
10^6	6,9 ns	500 μ s	6,9 ms	500 s	96 jours	...
10^9	10 ns	500 ms	10,4 s	96 jours

TABLE 2 – Sur une machine cadencée à 2 Ghz, quelle est la durée prévisible d'exécution d'un algorithme en fonction de la taille des données d'entrée et de sa complexité? On suppose qu'une seule période d'horloge est nécessaire au traitement d'une donnée.



FIGURE 1 – Comparaison des croissances des complexités usuelles

C Typologie de la complexité

Selon l'algorithme étudié, on est amené à s'intéresser à différentes complexités :

- La complexité dans le pire des cas, c'est à dire l'estimation du nombre d'instructions nécessaires dans le cas le plus défavorable.
- La complexité dans le meilleur des cas, idem dans le cas le plus favorable.
- La complexité moyenne, c'est à dire une moyenne de la complexité de tous les cas possibles.

R Ces trois calculs de complexité sont parfois nécessaires pour faire un choix d'algorithme et la connaissance statistique de la nature des données d'entrée peut influencer sur le ce choix.

D Calcul du coût d'une instruction

Il est difficile de savoir exactement en combien de temps une instruction d'un programme s'exécute pour plusieurs raisons :

1. les compilateurs disposent de fonctions d'optimisation en langage machine ou en code interprétable qui font que le code source n'est pas nécessairement représentatif du code exécuté. Il serait donc nécessaire d'examiner le code exécutable pour statuer.
2. selon les architectures électroniques et les machines virtuelles, le coût d'une même opération varie.

Cependant, dans le cadre d'un calcul de complexité d'un algorithme, on peut s'abstraire de ces considérations électroniques et considérer qu'une opération élémentaire i possède un coût constant qu'on notera c .

Dans ce qui suit, on suppose qu'on dispose d'une machine pour tester l'algorithme. On fait l'hypothèse réaliste que les opérations élémentaires suivantes sont réalisées en un temps constant c par cette machine :

- opération arithmétique $+$, $-$, $*$, $/$, $//$, $\%$,
- tests $=$, $!$, $<$, $>$,
- affectation \leftarrow ,
- accès à un élément indicé $t[i]$,
- structures de contrôles (structures conditionnelle et boucles), coût associé négligé,
- échange de deux éléments dans le tableau,
- accès à la longueur d'un tableau.

Finalement, on fait l'approximation supplémentaire qu'une combinaison simple de ces opérations est également réalisée en un temps constant c .

E Calculs classiques de complexité

■ **Exemple 2 — Calcul d'une complexité linéaire.** On souhaite calculer la complexité de l'algorithme 1. La taille du problème dépend de n , c'est à dire la puissance à laquelle on veut calculer le nombre a . En effet, pour différents a , plus petits ou plus grands, l'exécution ne sera pas plus chronophage. Le coût total $C(n)$ associé à cet algorithme peut donc s'écrire :

$$C(n) = c + n \times c = O(nc) = cO(n) = O(n) \quad (1)$$

Comme un coût c constant est $O(1)$, car constant en fonction de n , la complexité de l'algorithme 1 est donc linéaire.

Algorithme 1 Calcul de a^n

1: Fonction PUISSANCE(a, n)	▷ a et n sont des entiers naturels
2: $p \leftarrow 1$	▷ coût : c
3: pour $i = 1, \dots, n$ répéter	▷ on répète n fois
4: $p \leftarrow p \times a$	▷ coût : c
5: renvoyer p	

■ **Exemple 3 — Calcul d'une complexité quadratique.** On souhaite calculer la complexité de l'algorithme 2. Le coût total associé à cet algorithme peut donc s'écrire :

$$C(n) = c + \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} c = c + c \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} 1 = c + n^2 c = O(n^2) \quad (2)$$

C'est pourquoi, la complexité de l'algorithme 2 est en $O(n^2)$.

Algorithme 2 Produit de deux vecteurs $(n, 1) \times (1, n) \longrightarrow (n, n)$

1: Fonction PVEC(u, v)	▷ u est $(n, 1)$ et v est $(1, n)$
2: $t \leftarrow$ nouveau tableau de taille (n, n)	▷ coût : c
3: pour i de 0 à $n - 1$ répéter	▷ on répète n fois
4: pour j de 0 à $n - 1$ répéter	▷ on répète n fois
5: $t[i, j] \leftarrow u[i] \times v[j]$	▷ coût : c
6: renvoyer t	▷ le résultat

■ **Exemple 4 — Calcul d'une complexité quadratique plus subtile.** On souhaite calculer la complexité de l'algorithme 3 qui fait lui-même appel à un autre algorithme qui calcule une puissance en une complexité linéaire ^a $c_p n$.

Le coût total associé à cet algorithme 3 peut s'écrire :

$$C(n) = c + n \times (c + c_p n) = c + cn + c_p n^2 = O(n^2) \quad (3)$$

C'est pourquoi, la complexité de l'algorithme 3 est en $O(n^2)$. C'est pourquoi, il faut veiller à bien étudier tous les coûts, directs et indirects, afin de ne pas conclure hâtivement parce qu'il n'y a qu'une seule boucle que la complexité est linéaire...

a. Oui, on peut faire mieux!

Algorithme 3 Somme de puissances $1 + 2^n + \dots + n^n$

1: Fonction SOMME_PUISSANCE(n)	▷ n est un entier naturel
2: $acc \leftarrow 0$	▷ coût : c
3: pour k de 1 à n répéter	▷ on répète n fois
4: $acc \leftarrow acc + \text{PUISSANCE}(k, n)$	▷ coût : $c + c_p n$
5: renvoyer acc	▷ le résultat

■ **Exemple 5 — Complexité quadratique.** On souhaite calculer la complexité de l'algorithme 4. On peut calculer le coût total de l'algorithme 4 comme suit :

$$C(n) = c + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^k c \quad (4)$$

$$= c + c \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^k 1 \quad (5)$$

$$= c + c \sum_{k=1}^n k \quad (6)$$

$$= c + c \frac{n(n+1)}{2} \quad (7)$$

$$= O(n^2) \quad (8)$$

Algorithme 4 Accumuler

1: Fonction QACC(n)	
2: $a \leftarrow 0$	▷ coût : c
3: pour k de 1 à n répéter	▷ on répète n fois
4: pour i de 1 à k répéter	▷ on répète k fois
5: $a \leftarrow a + i$	▷ coût : c
6: renvoyer a	▷ le résultat

■ **Exemple 6 — Complexité polynomiale.** On souhaite calculer la complexité de l'algorithme 5. On suppose qu'on connaît la complexité de f et qu'elle est linéaire. On peut donc calculer

le coût total de l'algorithme 5 comme suit :

$$c = c + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^k c + c_f i = c + c \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^k 1 + c_f \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^k i \quad (9)$$

$$= c + c \frac{n(n+1)}{2} + \sum_{k=1}^n \frac{k(k+1)}{2} = c + c \frac{n(n+1)}{2} + \sum_{k=1}^n \frac{k}{2} + \frac{k^2}{2} \quad (10)$$

$$= c + c \frac{n(n+1)}{2} + c_f \frac{n(n+1)}{4} + c_f \frac{n(n+1)(2n+1)}{12} \quad (11)$$

$$= O(n^3) \quad (12)$$

Algorithme 5 Appliquer une fonction et accumuler

1: Fonction FACC(n)	▷ Applique f et accumule n fois
2: $a \leftarrow 0$	▷ coût : c
3: pour k de 1 à n répéter	▷ on répète n fois
4: pour i de 1 à k répéter	▷ on répète k fois
5: $a \leftarrow a + f(i)$	▷ coût : $c + c_f i$
6: return c	▷ le résultat

D'autres exemples de calcul de complexité sont abordés dans ce cours, notamment au chapitre ?? et au chapitre ??.

F Exemple de la recherche dichotomique

■ **Exemple 7 — Recherche dichotomique.** L'algorithme de recherche dichotomique 6 est un exemple d'algorithme de type diviser pour régner : la division du problème en sous-problèmes est opérée via la ligne 8. La résolution des sous-problèmes est effectuée par des appels récursifs. La combinaison des résultats n'est pas explicite mais s'effectue sur le tableau lui-même grâce aux indices g et d .

(R) La recherche dichotomique est donc bien un cas particulier d'algorithme diviser pour régner avec $r = 1$ et $d = 2$, c'est à dire un seul appel récursif par chemin d'exécution et une division de la taille du problème par deux.

Supposons que le tableau d'entrée de l'algorithme possède n éléments et que le nombre d'opérations nécessaires à l'algorithme est $T(n)$. Pour simplifier le calcul, on fait l'hypothèse que n est une puissance de deux. On peut expliciter formellement la relation de récurrence qui existe entre $T(n)$ et $T(n/2)$: on a $T(n) = T(n/2) + c$, car en dehors de l'appel récursif, le coût de l'exécution vaut c . Les différents appels récursifs sont illustrés sur la figure 2.

Algorithme 6 Recherche récursive d'un élément par dichotomie dans un tableau trié

```

1: Fonction REC_DICH(t, g, d, elem)
2:   si g = d alors                                     ▷ Condition d'arrêt
3:     si t[g] = elem alors
4:       renvoyer g
5:     sinon
6:       renvoyer l'élément n'a pas été trouvé
7:   sinon
8:     m ← (g+d)//2                                       ▷ Diviser : coût c
9:     si t[m] < elem alors
10:      REC_DICH(t, m+1, d, elem)                       ▷ résoudre
11:    sinon
12:      REC_DICH(t, g, m, elem)                         ▷ résoudre

```



FIGURE 2 – Structure d'arbre et appels récursifs pour la récurrence de la recherche dichotomique : $T(n) = T(n/2) + c$ et $\frac{n}{2^k} = 1$. Hors appel récursif, la fonction opère un nombre constant d'opérations c .

On peut donc écrire :

$$T(n) = T(n/2) + c \quad (13)$$

$$= T(n/4) + c + c = T(n/4) + 2c \quad (14)$$

$$= T(n/8) + 3c \quad (15)$$

$$= \dots \quad (16)$$

$$= T(n/2^k) + kc \quad (17)$$

$$= T(1) + kc \quad (18)$$

D'après l'algorithme 6, la condition d'arrêt s'effectue en un nombre constant d'opérations : $T(1) = O(1)$. Donc on a $T(n) = O(k)$. Or, on a $\frac{n}{2^k} = 1$. Donc $k = \log_2 n$ et $T(n) = O(\log n)$.

On peut également le montrer plus mathématiquement en considérant $k = \log_2 n$ et la suite $(u_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$ telle que $u_k = u_{k-1} + c$ et $u_1 = c$. C'est une suite arithmétique, $u_k = kc$. D'où le résultat.

G Exemple de l'exponentiation rapide

L'algorithme naïf de l'exponentiation (cf. algorithme 7) qui permet d'obtenir a^n en multipliant a par lui-même n fois n'est pas très efficace : sa complexité étant en $O(n)$.

Algorithme 7 Exponentiation naïve a^n

```

1 : Fonction EXP_NAIVE(a,n)
2 :   api ← 1
3 :   pour i de 0 à n – 1 répéter
4 :     api ← api × a
5 :   renvoyer api

```

Or, l'exponentiation est une opération très récurrente qu'il est nécessaire de pouvoir exécuter le plus rapidement possible. L'exponentiation rapide (cf. algorithme 8) propose une version récursive de type diviser pour régner dont la complexité est en $O(\log n)$.

Algorithme 8 Exponentiation rapide a^n

```

1 : Fonction EXP_RAPIDE(a,n)
2 :   si n = 0 alors                                     ▷ Condition d'arrêt
3 :     renvoyer 1
4 :   sinon si n est pair alors
5 :     p ← EXP_RAPIDE(a, n//2)                           ▷ Appel récursif
6 :     renvoyer p × p
7 :   sinon
8 :     p ← EXP_RAPIDE(a, (n-1)//2)                         ▷ Appel récursif
9 :     renvoyer p × p × a

```

L'analyse de l'algorithme 8 montre que :

- c'est un cas particulier d'algorithme diviser pour régner avec $r = 1$ et $d = 2$, c'est à dire un seul appel récursif par chemin d'exécution et une division de la taille du problème par deux²,
- l'évolution du coût ne dépend pas de a mais de n , c'est à dire l'exposant.

On peut procéder de la même manière qu'avec l'algorithme 6 pour calculer la complexité et s'appuyer sur l'arbre de la figure 2. Pour simplifier le calcul, on peut considérer que la taille du problème est divisée par deux. Le coût hors appel récursif est constant car il s'agit de multiplications. On a donc $T(n) = O(\log n)$.

2. à un près si n est pair

H Exemple du tri fusion

Les tris génériques abordés jusqu'à présent, par sélection ou insertion, présentent des complexités polynomiales en $O(n^2)$ dans le pire des cas. L'algorithme de tri fusion a été inventé par John von Neumann en 1945. C'est un bel exemple d'algorithme de type diviser pour régner avec $r = 2$ et $d = 2$, c'est à dire deux appels récursifs par chemin d'exécution et une division de la taille du problème par deux (cf. figure 3). Il permet de dépasser cette limite et d'obtenir un tri générique de complexité logarithmique. Ce tri est comparatif, il peut s'effectuer en place et les implémentations peuvent être stables.

Son principe (cf. algorithmes 9 et 10) est simple : transformer le tri d'un tableau à n éléments en sous-tableaux ne comportant qu'un seul élément³ puis les recombinaison en un seul tableau en conservant l'ordre. L'algorithme est divisé en deux fonctions :

- TRI_FUSION qui opère concrètement la division et la résolution des sous-problèmes,
- FUSION qui combine les solutions des sous-problèmes en fusionnant deux sous-tableaux triés.

Pour le calcul de la complexité, on a la relation de récurrence $T(n) = 2T(n/2) + f(n)$ où $f(n)$ représente le nombre d'opérations élémentaires nécessaires pour fusionner deux sous-tableaux de taille $n/2$. On fait l'hypothèse que n est une puissance de deux pour simplifier le calcul.

La condition d'arrêt de la récursivité est atteinte pour $\frac{n}{2^k} = 1$ c'est à dire pour $k = \log_2 n$. Par ailleurs, on remarque que $T(1) = c$ est une opération à coût constant, suite à la condition d'arrêt on ne fait que retourner le tableau non modifié.

Dans le pire des cas, l'étape de fusion des deux tableaux effectue la combinaison de deux sous-tableaux de dimension $n/2$. Les boucles de la fonction FUSION ne sont pas imbriquées et effectuent $n/2$ tours au maximum. On a alors $f(n) = cn$, la complexité de la fusion est linéaire.

$$T(n) = 2T(n/2) + cn \quad (19)$$

$$= 4T(n/4) + 2cn \quad (20)$$

$$= 8T(n/8) + 3cn \quad (21)$$

$$= \dots \quad (22)$$

$$= 2^k T(1) + kcn \quad (23)$$

$$= O(\log_2 n + n \log_2 n) \quad (24)$$

$$= O(n \log n) \quad (25)$$

C'est pourquoi, la complexité du tri fusion vaut $T(n) = O(n \log n)$

3. et donc déjà triés!

Algorithme 9 Tri fusion

```

1: Fonction TRI_FUSION(t, g, d)
2:   si g < d alors
3:     m ← (g+d)//2                                ▷ on découpe au milieu
4:     TRI_FUSION(t, g, m)
5:     TRI_FUSION(t, m+1, d)
6:     FUSION(t, g, m, d)

```

▷ Sinon on n'arrête!

Algorithme 10 Fusion de sous-tableaux triés

```

1: Fonction FUSION(t, g, m, d)
2:   ng ← m - g + 1
3:   nd ← d - m
4:   G, D ← deux tableaux de taille ng et nd
5:   pour k de 0 à ng répéter
6:     G[k] ← t[g + k]
7:   pour k de 0 à nd répéter
8:     D[k] ← t[m + 1 + k]
9:   i ← 0
10:  j ← 0
11:  k ← g
12:  tant que i < ng et j < nd répéter
13:    si G[i] ≤ D[j] alors
14:      t[k] ← G[i]
15:      i ← i + 1
16:    sinon
17:      t[k] ← D[j]
18:      j ← j + 1
19:    k ← k + 1
20:  tant que i < ng répéter
21:    t[k] ← G[i]
22:    i ← i + 1
23:    k ← k + 1
24:  tant que j < nd répéter
25:    t[k] ← D[j]
26:    j ← j + 1
27:    k ← k + 1

```



FIGURE 3 – Structure d'arbre et appels récurrents pour le tri fusion : $T(n) = 2T(n/2) + f(n)$ et $\frac{n}{2^k} = 1$. La fonction FUSION opère un nombre d'opérations $f(n)$.