

Algorithmique

ISIMA FISA1

Introduction, complexité algorithmique

Florent Foucaud

Organisation du cours

- 7 séances de cours-TD + DS la 8e séance
- contact : florent.foucaud@uca.fr
- supports (prochainement) disponibles sur <https://perso.limos.fr/ffoucaud/Teaching/index.html>
- en suivant, 4 séances avec Renaud Chicoisne <https://sites.google.com/view/renaud-chicoisne> + évaluation

Programme :

- Complexité algorithmique en temps
- Complexité avancée : diviser pour régner, programmation dynamique
- Structures de données avancées (R. Chicoisne)

Historique

- Premiers algorithmes :
 - ▶ Babylone, -2500 / Égypte ancienne, -1500 / Inde, -800 : premiers algorithmes (ex : divisions)
 - ▶ Grèce antique, -250 : nombres premiers (Euclide, Ératosthène)
 - ▶ Inde, 450 : résolution d'équations (Kuttaka)
 - ▶ monde arabo-persan, 850 : cryptographie, arithmétique
(Muhammad ibn Musa al Khwarizmi, mathématicien le plus lu au Moyen-Âge)
 - ▶ 1230 : → Alchoarismi → Algorismo : notion d'algorithme



Muhammad ibn Musa al Khwarizmi
(780-850)



al-Kitab al-mukhtasar fi hisab
al-jabr wal-muqabala (820)

Historique

- Premiers algorithmes :
 - ▶ Babylone, -2500 / Égypte ancienne, -1500 / Inde, -800 : premiers algorithmes (ex : divisions)
 - ▶ Grèce antique, -250 : nombres premiers (Euclide, Ératosthène)
 - ▶ Inde, 450 : résolution d'équations (Kuttaka)
 - ▶ monde arabo-persan, 850 : cryptographie, arithmétique
(Muhammad ibn Musa al Khwarizmi, mathématicien le plus lu au Moyen-Âge)
 - ▶ 1230 : → Alchoarismi → Algorismo : notion d'algorithme
- David Hilbert, 1928 : existe-t-il un algorithme pour résoudre toute question mathématique? (*Entscheidungsproblem*, traduit en "problème de décision")



David Hilbert (1862-1943)

Historique

- Premiers algorithmes :
 - ▶ Babylone, -2500 / Égypte ancienne, -1500 / Inde, -800 : premiers algorithmes (ex : divisions)
 - ▶ Grèce antique, -250 : nombres premiers (Euclide, Ératosthène)
 - ▶ Inde, 450 : résolution d'équations (Kuttaka)
 - ▶ monde arabo-persan, 850 : cryptographie, arithmétique
(Muhammad ibn Musa al Khwarizmi, mathématicien le plus lu au Moyen-Âge)
 - ▶ 1230 : → Alchoarismi → Algorismo : notion d'algorithme
- David Hilbert, 1928 : existe-t-il un algorithme pour résoudre toute question mathématique? (*Entscheidungsproblem*, traduit en "problème de décision")
- Kurt Gödel, 1931 : théorème d'incomplétude (logique mathématique)



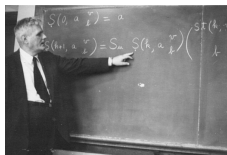
Kurt Gödel (1906-1978)

Historique

- Premiers algorithmes :
 - ▶ Babylone, -2500 / Égypte ancienne, -1500 / Inde, -800 : premiers algorithmes (ex : divisions)
 - ▶ Grèce antique, -250 : nombres premiers (Euclide, Ératosthène)
 - ▶ Inde, 450 : résolution d'équations (Kuttaka)
 - ▶ monde arabo-persan, 850 : cryptographie, arithmétique (Muhammad ibn Musa al Khwarizmi, mathématicien le plus lu au Moyen-Âge)
 - ▶ 1230 : → Alchoarismi → Algorismo : notion d'algorithme
- David Hilbert, 1928 : existe-t-il un algorithme pour résoudre toute question mathématique? (*Entscheidungsproblem*, traduit en "problème de décision")
- Kurt Gödel, 1931 : théorème d'incomplétude (logique mathématique)
- Alonzo Church et Alan Turing, 1936 : solution à l'Entscheidungsproblem : NON ! (→ problème de l'arrêt, machines de Turing)



Alan Turing (1912-1954)



Alonzo Church (1903-1995)

Historique

- Premiers algorithmes :
 - ▶ Babylone, -2500 / Égypte ancienne, -1500 / Inde, -800 : premiers algorithmes (ex : divisions)
 - ▶ Grèce antique, -250 : nombres premiers (Euclide, Ératosthène)
 - ▶ Inde, 450 : résolution d'équations (Kuttaka)
 - ▶ monde arabo-persan, 850 : cryptographie, arithmétique
(Muhammad ibn Musa al Khwarizmi, mathématicien le plus lu au Moyen-Âge)
 - ▶ 1230 : → Alchoarismi → Algorismo : notion d'algorithme
- David Hilbert, 1928 : existe-t-il un algorithme pour résoudre toute question mathématique ? (*Entscheidungsproblem*, traduit en "problème de décision")
- Kurt Gödel, 1931 : théorème d'incomplétude (logique mathématique)
- Alonzo Church et Alan Turing, 1936 : solution à l'Entscheidungsproblem : NON !
(→ problème de l'arrêt, machines de Turing)
- Alan Cobham et Jack Edmonds, 1965 :
un algorithme est efficace s'il est polynomial



Jack Edmonds (1934-)



Alan B. Cobham (1927-2011)

Historique

- Premiers algorithmes :
 - ▶ Babylone, -2500 / Égypte ancienne, -1500 / Inde, -800 : premiers algorithmes (ex : divisions)
 - ▶ Grèce antique, -250 : nombres premiers (Euclide, Ératosthène)
 - ▶ Inde, 450 : résolution d'équations (Kuttaka)
 - ▶ monde arabo-persan, 850 : cryptographie, arithmétique
(Muhammad ibn Musa al Khwarizmi, mathématicien le plus lu au Moyen-Âge)
 - ▶ 1230 : → Alchoarismi → Algorismo : notion d'algorithme
- David Hilbert, 1928 : existe-t-il un algorithme pour résoudre toute question mathématique ? (*Entscheidungsproblem*, traduit en "problème de décision")
- Kurt Gödel, 1931 : théorème d'incomplétude (logique mathématique)
- Alonzo Church et Alan Turing, 1936 : solution à l'Entscheidungsproblem : NON !
(→ problème de l'arrêt, machines de Turing)
- Alan Cobham et Jack Edmonds, 1965 :
un algorithme est efficace s'il est polynomial
- Années 1970 : théorie de la complexité

Problématiques

Question

Mon algorithme se **termine**-t-il, ou au contraire, peut-il boucler à l'infini ?

Problématiques

Question

Mon algorithme se **termine**-t-il, ou au contraire, peut-il boucler à l'infini ?

Question

Mon algorithme est-il **correct** ? Calcule-t-il bien ce qu'il est sensé calculer ?

Problématiques

Question

Mon algorithme se **termine**-t-il, ou au contraire, peut-il boucler à l'infini ?

Question

Mon algorithme est-il **correct** ? Calcule-t-il bien ce qu'il est sensé calculer ?

Question

Mon algorithme est-il **efficace** ? Ou peut-on trouver un meilleur algorithme pour résoudre le même problème ?

Complexité d'un problème algorithmique

Problème algorithmique : une entrée + une sortie attendue

Exemples :

- Multiplier deux nombres
Entrée : les 2 nombres en binaire. Sortie : leur produit en binaire.
- Trier une liste d'entiers
Entrée : la liste non triée. Sortie : la liste triée.
- Trouver un plus court chemin de A à B dans un graphe
Entrée : le graphe, les 2 sommets A et B. Sortie : le chemin.
- Couvrir un réseau avec k antennes radio
Entrée : le réseau (graphe), l'entier k . Sortie : la position des antennes.

Complexité d'un problème algorithmique

Problème algorithmique : une entrée + une sortie attendue

Exemples :

- Multiplier deux nombres

Entrée : les 2 nombres en binaire. Sortie : leur produit en binaire.

- Trier une liste d'entiers

Entrée : la liste non triée. Sortie : la liste triée.

- Trouver un plus court chemin de A à B dans un graphe

Entrée : le graphe, les 2 sommets A et B. Sortie : le chemin.

- Couvrir un réseau avec k antennes radio

Entrée : le réseau (graphe), l'entier k . Sortie : la position des antennes.

Algorithme : série d'instructions qui résout un problème algorithmique donné
pour un humain : manuel, instructions, recette de cuisine...
pour une machine : $\approx$ programme informatique

Complexité algorithmique

Complexité d'un algorithme : quantité de ressources nécessaires à l'algorithme, en fonction de la taille n de l'entrée

Complexité algorithmique

Complexité d'un algorithme : quantité de ressources nécessaires à l'algorithme, en fonction de la taille n de l'entrée

Complexité d'un problème algorithmique P : meilleure complexité d'un algorithme qui résout le problème P

Complexité algorithmique

Complexité d'un algorithme : quantité de ressources nécessaires à l'algorithme, en fonction de la taille n de l'entrée

Complexité d'un problème algorithmique P : meilleure complexité d'un algorithme qui résout le problème P

Quelles ressources mesure-t-on ?

- Complexité **en temps** $T(n)$: plus petit nombre d'étapes
- Complexité **en mémoire** $M(n)$: plus petit espace mémoire
- ...

Complexité algorithmique

Complexité d'un algorithme : quantité de ressources nécessaires à l'algorithme, en fonction de la taille n de l'entrée

Complexité d'un problème algorithmique P : meilleure complexité d'un algorithme qui résout le problème P

Quelles ressources mesure-t-on ?

- Complexité **en temps** $T(n)$: plus petit nombre d'étapes
- Complexité **en mémoire** $M(n)$: plus petit espace mémoire
- ...

Remarque : $M(n) \leq T(n)$

Complexité algorithmique

Complexité d'un algorithme : quantité de ressources nécessaires à l'algorithme, en fonction de la taille n de l'entrée

Complexité d'un problème algorithmique P : meilleure complexité d'un algorithme qui résout le problème P

Quelles ressources mesure-t-on ?

- Complexité **en temps** $T(n)$: plus petit nombre d'étapes
- Complexité **en mémoire** $M(n)$: plus petit espace mémoire
- ...

Remarque : $M(n) \leq T(n)$

Comment les mesure-t-on ?

- Complexité **dans le pire des cas** (coût maximum)
- Complexité **en moyenne** (coût moyen)
 - selon une distribution probabiliste des entrées
- Complexité **amortie** (coût moyen)
 - sur un ensemble d'exécutions successives
- ...

Taille de l'entrée

Attention à l'encodage !

Taille de l'entrée

Attention à l'encodage !

- Entier n quelconque $\rightarrow \lceil \log_2(n) \rceil$ bits

Taille de l'entrée

Attention à l'encodage !

- Entier n quelconque $\rightarrow \lceil \log_2(n) \rceil$ bits
- Entier en langage C $\rightarrow$ borné par 8 octets (constante)

Taille de l'entrée

Attention à l'encodage !

- Entier n quelconque $\rightarrow \lceil \log_2(n) \rceil$ bits
- Entier en langage C $\rightarrow$ borné par 8 octets (constante)
- Tableau d'entiers de longueur $n \rightarrow n \times$ (taille d'un entier)

Taille de l'entrée

Attention à l'encodage !

- Entier n quelconque $\rightarrow \lceil \log_2(n) \rceil$ bits
- Entier en langage C $\rightarrow$ borné par 8 octets (constante)
- Tableau d'entiers de longueur $n \rightarrow n \times$ (taille d'un entier)
- Graphe à n sommets et m arêtes $\rightarrow (n + m) \times$ (taille d'un entier)

Explosion combinatoire

Complexité algorithmique en temps pour un problème donné :
 $T(n)$ instructions pour une entrée de taille n

Meilleurs problèmes : complexité **constante** $T(n) \rightarrow 1, 10$ ou **logarithmique**
 $T(n) \rightarrow \log_2(n), 3 \log(n) \dots$

Très bons problèmes : complexité **linéaire** $T(n) \rightarrow 10n, 2n, 1000n, n \dots$

Problèmes “raisonnables” : complexité **polynomiale** $T(n) \rightarrow 4n^2, 10n^3, n^{1000} \dots$
(en pratique : au-delà de $O(n^2)$, c'est compliqué)

Problèmes difficiles : complexité **exponentielle** $T(n) \rightarrow 2^n, n!, n^n, 2^{2^n} \dots$
 $\rightarrow$ Intuition : *on teste toutes les solutions possibles*

Explosion combinatoire

Complexité algorithmique en temps pour un problème donné :

$T(n)$ instructions pour une entrée de taille n

Meilleurs problèmes : complexité **constante** $T(n) \rightarrow 1, 10$ ou **logarithmique** $T(n) \rightarrow \log_2(n), 3 \log(n) \dots$

Très bons problèmes : complexité **linéaire** $T(n) \rightarrow 10n, 2n, 1000n, n \dots$

Problèmes “raisonnables” : complexité **polynomiale** $T(n) \rightarrow 4n^2, 10n^3, n^{1000} \dots$
(en pratique : au-delà de $O(n^2)$, c'est compliqué)

Problèmes difficiles : complexité **exponentielle** $T(n) \rightarrow 2^n, n!, n^n, 2^{2^n} \dots$
→ Intuition : on teste toutes les solutions possibles

$T(n)$	$n = 10$	$n = 50$	$n = 100$	$n = 200$	$n = 300$
n	10	50	100	200	300
$100n$	1000	5000	10000	20000	30000
n^2	100	2500	10000	40000	90000
2^n	1024	(16 chiffres)	(31 chiffres)	(60 chiffres)	(91 chiffres)
$n!$	3628800	(64 chiffres)	(157 chiffres)	(374 chiffres)	(614 chiffres)

Explosion combinatoire

Complexité algorithmique en temps pour un problème donné :

$T(n)$ instructions pour une entrée de taille n

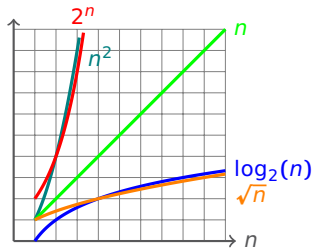
Meilleurs problèmes : complexité **constante** $T(n) \rightarrow 1, 10$ ou **logarithmique**
 $T(n) \rightarrow \log_2(n), 3 \log(n) \dots$

Très bons problèmes : complexité **linéaire** $T(n) \rightarrow 10n, 2n, 1000n, n \dots$

Problèmes "raisonnables" : complexité **polynomiale** $T(n) \rightarrow 4n^2, 10n^3, n^{1000} \dots$
(en pratique : au-delà de $O(n^2)$, c'est compliqué)

Problèmes difficiles : complexité **exponentielle** $T(n) \rightarrow 2^n, n!, n^n, 2^{2^n} \dots$

→ Intuition : on teste toutes les solutions possibles



n varie de 0 à 10

Explosion combinatoire

Complexité algorithmique en temps pour un problème donné :

$T(n)$ instructions pour une entrée de taille n

Meilleurs problèmes : complexité **constante** $T(n) \rightarrow 1$, 10 ou **logarithmique**

$$T(n) \rightarrow \log_2(n), 3 \log(n) \dots$$

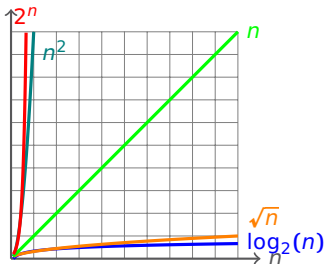
Très bons problèmes : complexité **linéaire** $T(n) \rightarrow 10n, 2n, 1000n, n \dots$

Problèmes “raisonnables” : complexité **polynomiale** $T(n) \rightarrow 4n^2, 10n^3, n^{1000} \dots$

(en pratique : au-delà de $O(n^2)$, c'est compliqué)

Problèmes difficiles : complexité **exponentielle** $T(n) \rightarrow 2^n, n!, n^n, 2^{2^n} \dots$

→ Intuition : on teste toutes les solutions possibles



n varie de 0 à 100

Explosion combinatoire

Complexité algorithmique en temps pour un problème donné :

$T(n)$ instructions pour une entrée de taille n

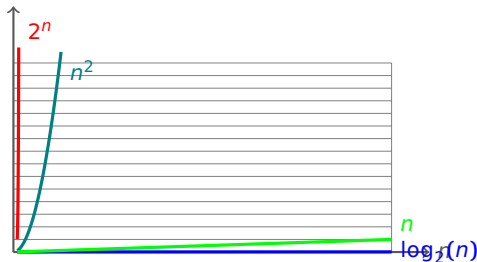
Meilleurs problèmes : complexité **constante** $T(n) \rightarrow 1, 10$ ou **logarithmique**
 $T(n) \rightarrow \log_2(n), 3 \log(n) \dots$

Très bons problèmes : complexité **linéaire** $T(n) \rightarrow 10n, 2n, 1000n, n \dots$

Problèmes "raisonnables" : complexité **polynomiale** $T(n) \rightarrow 4n^2, 10n^3, n^{1000} \dots$
(en pratique : au-delà de $O(n^2)$, c'est compliqué)

Problèmes difficiles : complexité **exponentielle** $T(n) \rightarrow 2^n, n!, n^n, 2^{2^n} \dots$

→ Intuition : on teste toutes les solutions possibles



n varie de 0 à 1000 (échelle aplatie)

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$
- $i = n$
- $res = 1$
- Tant que $i > 1$ faire :
 - $res = res * i$
 - $i = i - 1$
- Retourner res

Instructions élémentaires :

- affectations
- opérations arithmétiques
- opérations booléennes
- accès à un tableau

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$
- $i = n$
- $res = 1$
- Tant que $i > 1$ faire :
 - $res = res * i$
 - $i = i - 1$
- Retourner res

1 instruction : affectation

Instructions élémentaires :

- affectations
- opérations arithmétiques
- opérations booléennes
- accès à un tableau

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$
- $i = n$
- $res = 1$
- Tant que $i > 1$ faire :
 - $res = res * i$
 - $i = i - 1$
- Retourner res

1 instruction : affectation

1 instruction : affectation

Instructions élémentaires :

- affectations
- opérations arithmétiques
- opérations booléennes
- accès à un tableau

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$

- $i = n$ 1 instruction : affectation
- $res = 1$ 1 instruction : affectation
- Tant que $i > 1$ faire : 1 instruction par tour de boucle
+ 1 instruction supplémentaire
 - $res = res * i$
 - $i = i - 1$
- Retourner res

Instructions élémentaires :

- affectations
- opérations arithmétiques
- opérations booléennes
- accès à un tableau

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$
- $i = n$ 1 instruction : affectation
- $res = 1$ 1 instruction : affectation
- Tant que $i > 1$ faire : 1 instruction par tour de boucle
+ 1 instruction supplémentaire
 - $res = res * i$ 2 instructions : affectation et multiplication
 - $i = i - 1$
- Retourner res

Instructions élémentaires :

- affectations
- opérations arithmétiques
- opérations booléennes
- accès à un tableau

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$
- $i = n$ 1 instruction : affectation
- $res = 1$ 1 instruction : affectation
- Tant que $i > 1$ faire : 1 instruction par tour de boucle
+ 1 instruction supplémentaire
 - $res = res * i$ 2 instructions : affectation et multiplication
 - $i = i - 1$ 2 instructions (idem)
- Retourner res

Instructions élémentaires :

- affectations
- opérations arithmétiques
- opérations booléennes
- accès à un tableau

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$
- $i = n$ 1 instruction : affectation
- $res = 1$ 1 instruction : affectation
- Tant que $i > 1$ faire : 1 instruction par tour de boucle
+ 1 instruction supplémentaire
 - $res = res * i$ 2 instructions : affectation et multiplication
 - $i = i - 1$ 2 instructions (idem)
- Retourner res 1 instruction

Instructions élémentaires :

- affectations
- opérations arithmétiques
- opérations booléennes
- accès à un tableau

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(*n*) :

- Entrée : un entier *n*
- Sortie : *n*!
- *i* = *n* 1 instruction : affectation
- *res* = 1 1 instruction : affectation
- Tant que *i* > 1 faire : 1 instruction par tour de boucle
+ 1 instruction supplémentaire
 - *res* = *res* * *i* 2 instructions : affectation et multiplication
 - *i* = *i* - 1 2 instructions (idem)
- Retourner *res* 1 instruction

Au total on a :

$$\begin{aligned}T(n) &= 2 + 5(n-1) + 1 + 1 \\&= 2 + 5n - 5 + 1 + 1 \\&= 5n - 1\end{aligned}$$

Un exemple simple : calcul de la factorielle

factorielle(n) :

- Entrée : un entier n
- Sortie : $n!$
- $i = n$ 1 instruction : affectation
- $res = 1$ 1 instruction : affectation
- Tant que $i > 1$ faire : 1 instruction par tour de boucle
+ 1 instruction supplémentaire
 - $res = res * i$ 2 instructions : affectation et multiplication
 - $i = i - 1$ 2 instructions (idem)
- Retourner res 1 instruction

Au total on a :

$$\begin{aligned}T(n) &= 2 + 5(n-1) + 1 + 1 \\&= 2 + 5n - 5 + 1 + 1 \\&= 5n - 1\end{aligned}$$

Complexité **linéaire** en n

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)
- Trier naïvement un tableau d'entiers : n^2 (quadratique)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$ (logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)
- Trier naïvement un tableau d'entiers : n^2 (quadratique)
- k boucles imbriquées de longueur n chacune : n^k (polynomial)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)
- Trier naïvement un tableau d'entiers : n^2 (quadratique)
- k boucles imbriquées de longueur n chacune : n^k (polynomial)
- Parcourir les sous-ensembles d'un ensemble de taille n : 2^n
(exponentiel simple)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)
- Trier naïvement un tableau d'entiers : n^2 (quadratique)
- k boucles imbriquées de longueur n chacune : n^k (polynomial)
- Parcourir les sous-ensembles d'un ensemble de taille n : 2^n
(exponentiel simple)
- Énumérer toutes les partitions d'un ensemble de taille n : n^n
($= 2^{n \log_2(n)}$, super-exponentiel)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)
- Trier naïvement un tableau d'entiers : n^2 (quadratique)
- k boucles imbriquées de longueur n chacune : n^k (polynomial)
- Parcourir les sous-ensembles d'un ensemble de taille n : 2^n
(exponentiel simple)
- Énumérer toutes les partitions d'un ensemble de taille n : n^n
($= 2^{n \log_2(n)}$, super-exponentiel)
- Énumérer toutes les permutations d'un ensemble de taille n : $n!$
 $\approx n^n$ par l'approximation de Stirling $n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)
- Trier naïvement un tableau d'entiers : n^2 (quadratique)
- k boucles imbriquées de longueur n chacune : n^k (polynomial)
- Parcourir les sous-ensembles d'un ensemble de taille n : 2^n
(exponentiel simple)
- Énumérer toutes les partitions d'un ensemble de taille n : n^n
($= 2^{n \log_2(n)}$, super-exponentiel)
- Énumérer toutes les permutations d'un ensemble de taille n : $n!$
 $\approx n^n$ par l'approximation de Stirling $n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$
- Énumérer les sous-ensembles de sous-ensembles : 2^{2^n}
(doublement exponentiel)

Complexités typiques : des exemples concrets

- Recherche dichotomique dans un ensemble trié de taille n : $\log_2(n)$
(logarithmique)
- Parcourir un ensemble de taille n non trié : n (linéaire)
- Multiplier 2 nombres binaires à n bits : $n \log n$ (2021, presque linéaire)
- Trier naïvement un tableau d'entiers : n^2 (quadratique)
- k boucles imbriquées de longueur n chacune : n^k (polynomial)
- Parcourir les sous-ensembles d'un ensemble de taille n : 2^n
(exponentiel simple)
- Énumérer toutes les partitions d'un ensemble de taille n : n^n
($= 2^{n \log_2(n)}$, super-exponentiel)
- Énumérer toutes les permutations d'un ensemble de taille n : $n!$
 $\approx n^n$ par l'approximation de Stirling $n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$
- Énumérer les sous-ensembles de sous-ensembles : 2^{2^n}
(doublement exponentiel)
- ...

Faut-il vraiment être si précis ?

Le plus souvent, on souhaite simplement distinguer les **types de complexité**
→ logarithmique, linéaire, quadratique, exponentiel...

Faut-il vraiment être si précis ?

Le plus souvent, on souhaite simplement distinguer les **types de complexité**
→ logarithmique, linéaire, quadratique, exponentiel...

La complexité *exacte* dépend de toute façon de la machine, du langage de programmation, du compilateur...

Faut-il vraiment être si précis ?

Le plus souvent, on souhaite simplement distinguer les **types de complexité**
→ logarithmique, linéaire, quadratique, exponentiel...

La complexité *exacte* dépend de toute façon de la machine, du langage de programmation, du compilateur...

On utilise pour cela des **notations asymptotiques** qui omettent les **facteurs constants** et les “cas de base pathologiques”.

Notations asymptotiques : grand Oh

Inventées de 1894 à 1960 par Bachmann, Hardy, Knuth, Landau, Littlewood...

Définition (Grand Oh)

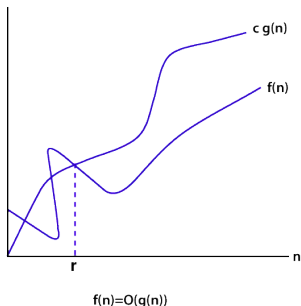
Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in O(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \leq c \cdot g(i)$.

Notations asymptotiques : grand Oh

Inventées de 1894 à 1960 par Bachmann, Hardy, Knuth, Landau, Littlewood...

Définition (Grand Oh)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in O(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \leq c \cdot g(i)$.

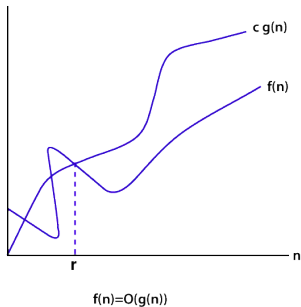


Notations asymptotiques : grand Oh

Inventées de 1894 à 1960 par Bachmann, Hardy, Knuth, Landau, Littlewood...

Définition (Grand Oh)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in O(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \leq c \cdot g(i)$.



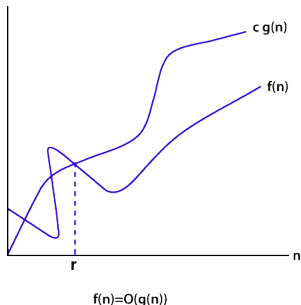
Intuitivement : f ne grandit pas plus vite que g (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Notations asymptotiques : grand Oh

Inventées de 1894 à 1960 par Bachmann, Hardy, Knuth, Landau, Littlewood...

Définition (Grand Oh)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in O(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \leq c \cdot g(i)$.



Exemples :

- $2^{1000} \in O(1)$
- $100n \in O(n/1000)$
- $1000n \in O(n^2/10)$
- $n + n^2 + \log(n) \in O(n^3)$

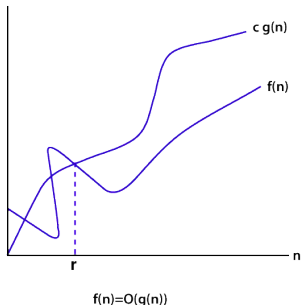
Intuitivement : f ne grandit pas plus vite que g (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Notations asymptotiques : grand Oh

Inventées de 1894 à 1960 par Bachmann, Hardy, Knuth, Landau, Littlewood...

Définition (Grand Oh)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in O(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \leq c \cdot g(i)$.



Exemples :

- $2^{1000} \in O(1)$
- $100n \in O(n/1000)$
- $1000n \in O(n^2/10)$
- $n + n^2 + \log(n) \in O(n^3)$

Intuitivement : f ne grandit pas plus vite que g (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Abus de notation : $10n = O(n^2)$

Notations asymptotiques : grand Omega

“La réciproque du Grand Oh”

Définition (Grand Omega)

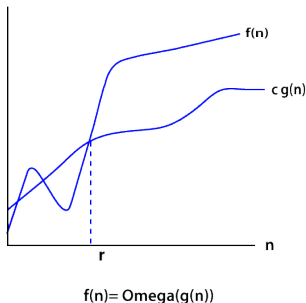
Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Omega(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \geq c \cdot g(i)$.

Notations asymptotiques : grand Omega

“La réciproque du Grand Oh”

Définition (Grand Omega)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Omega(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \geq c \cdot g(i)$.

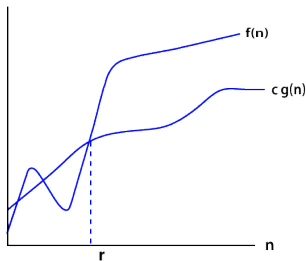


Notations asymptotiques : grand Omega

“La réciproque du Grand Oh”

Définition (Grand Omega)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Omega(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \geq c \cdot g(i)$.



$f(n) = \Omega(g(n))$

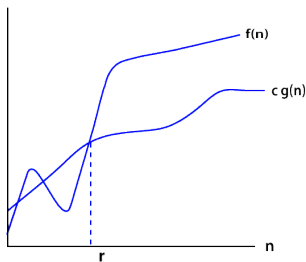
Intuitivement : f ne grandit pas moins vite que g (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Notations asymptotiques : grand Omega

"La réciproque du Grand Oh"

Définition (Grand Omega)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Omega(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \geq c \cdot g(i)$.



$f(n) = \Omega(g(n))$

Exemples :

- $2^{1000} \in \Omega(1)$
- $n^2/1000 \in \Omega(100000n^2)$
- $n \log(n)/10 \in \Omega(100n)$
- $n^3 - n^2 \in \Omega(n^2)$

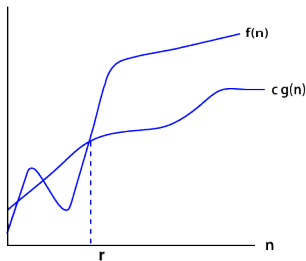
Intuitivement : f ne grandit pas moins vite que g (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Notations asymptotiques : grand Omega

"La réciproque du Grand Oh"

Définition (Grand Omega)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Omega(g(n))$ si il existe une constante $c > 0 \in \mathbb{R}$ et un rang $r \in \mathbb{N}$ tels que, pour tout entier $i \geq r$, on a $f(i) \geq c \cdot g(i)$.



$f(n) = \Omega(g(n))$

Exemples :

- $2^{1000} \in \Omega(1)$
- $n^2/1000 \in \Omega(100000n^2)$
- $n \log(n)/10 \in \Omega(100n)$
- $n^3 - n^2 \in \Omega(n^2)$

Intuitivement : f ne grandit pas moins vite que g (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Remarque : Si $f(n) \in O(g(n))$, alors $g(n) \in \Omega(f(n))$ et inversement

Notations asymptotiques : Theta

“La combinaison du grand Oh et du grand Omega”

Définition (Grand Theta)

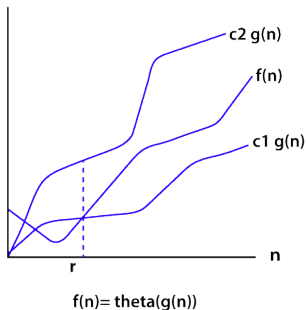
Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Theta(g(n))$ si $f(n) \in O(g(n))$ et $f(n) \in \Omega(g(n))$.

Notations asymptotiques : Theta

“La combinaison du grand Oh et du grand Omega”

Définition (Grand Theta)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Theta(g(n))$ si $f(n) \in O(g(n))$ et $f(n) \in \Omega(g(n))$.

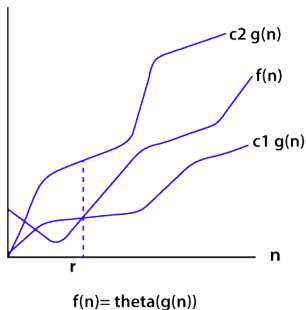


Notations asymptotiques : Theta

“La combinaison du grand Oh et du grand Omega”

Définition (Grand Theta)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Theta(g(n))$ si $f(n) \in O(g(n))$ et $f(n) \in \Omega(g(n))$.



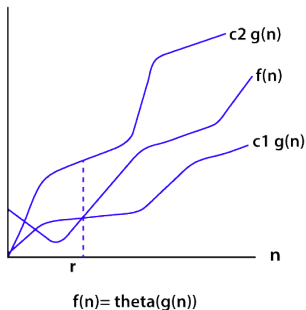
Intuitivement : f et g grandissent aussi vite l'une que l'autre (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Notations asymptotiques : Theta

“La combinaison du grand Oh et du grand Omega”

Définition (Grand Theta)

Soient deux fonctions $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$. $f(n) \in \Theta(g(n))$ si $f(n) \in O(g(n))$ et $f(n) \in \Omega(g(n))$.



Exemples :

- $2^{1000} \in \Theta(1)$
- $1000n \in \Theta(n/1000)$
- $10n^2 + 36n \in \Theta(n^2)$
- $n^3 - n^2 \in \Theta(n^3)$

Intuitivement : f et g grandissent aussi vite l'une que l'autre (à facteur constant près) lorsque n est suffisamment grand

Classes de complexité

- Complexité **logarithmique** : $\Theta(\log(n))$
- Complexité **linéaire** : $\Theta(n)$
- Complexité **quadratique** : $\Theta(n^2)$
- Complexité **cubique** : $\Theta(n^3)$
- Complexité **polynomiale** : $\Theta(n^c)$ pour $c > 1$
- Complexité **exponentielle** : $\Theta(c^n)$ pour $c > 1$
- ...