

1 Algorithmes et fonctions logarithmes

La fonction récursive python suivante

```
y=0
def f(x):
    """ compte les feuilles """
    global y
    if x>0:
        f(x//2)
        f(x//2)
    else:
        y=y+1
```

attribue à y une nouvelle valeur $f(x) = 2^{\lfloor \log_2 x \rfloor + 1}$. On peut représenter le déroulement de cette fonction par un arbre binaire. Avec $x=8$ en entrée, les premiers appels récursifs se déroulent ainsi

```

                f(8)
              f(4)
            f(2)
          f(1)
        f(0)
```

la fonction $f(0)$ incrémente la variable globale y et se termine, c'est $f(1)$ qui continue son déroulement avec un second appel à $f(0)$ qui termine le premier appel à $f(1)$ dans $f(2)$ qui enchaîne sur son second appel de $f(1)$

```

                f(8)
              f(4)
            f(2)
          f(1)  f(1)
        f(0)  f(0)
```

Le déroulement est semblable quand le premier appel à $f(4)$ de $f(8)$ se termine

```

                f(8)
              f(4)
            f(2)      f(2)
          f(1)  f(1)  f(1)  f(1)
        f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)
```

Et à la fin on a le schéma suivant:

```

                f(8)
              f(4)      f(4)
            f(2)  f(2)  f(2)  f(2)
          f(1)  f(1)  f(1)  f(1)  f(1)  f(1)  f(1)  f(1)
        f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)  f(0)
```

Remarquons qu'on garde ce schéma tant que $x < 16$

								f(15)								0
				f(7)								f(7)				1
		f(3)				f(3)				f(3)				f(3)		2
	f(1)		f(1)		f(1)		f(1)		f(1)		f(1)		f(1)		f(1)	3
f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	f(0)	4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

Indiquons les lignes $0, 1, \dots$ et comptons les appels sur cette ligne, par exemple à la ligne 4 il y a 16 appels, et notons

- $p(x)$ le nombre d'appels à la ligne x , et
- $l(x)$ la ligne correspondant à x appels.

On a par exemple $l(4) = 2$ et $p(3) = 8$. Ces fonctions ont des propriétés étranges

$$p(x+1) = p(x)p(1)$$

puisque à la ligne suivante j'ai deux fois plus d'appels et $2 = p(1)$, et

$$l(2x) = l(x) + l(2)$$

si je veux avoir deux fois plus d'appels, il faut aller une ligne plus bas et $1 = l(2)$.

Elles semblent transformer les $+$ en \times et inversement. On montrera que

- toute fonction $p : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}_*^+$ telle que $p(x+y) = p(x)p(y)$ est la fonction $p(x) = b^x$ avec $b = p(1)$;
- toute fonction $l : \mathbb{Q}_*^+ \rightarrow \mathbb{R}$, avec $l(b) = 1$, telle que $l(xy) = l(x) + l(y)$ est la fonction $l(x) = y$ telle que $b^y = x$.

plus d'autres propriétés très simples qui découlent uniquement de la définition des fonctions $l(x)$ qu'on appelle logarithme, et on note $\log_b x$ le réel y tel que $b^y = x$. Ainsi par exemple, $\log_b a \times \log_a x = \log_b x$, ou $a^{\log_b x} = x^{\log_b a}$.

Un autre exemple de fonction récursive:

```
y=0
def f(x):
    """ compte les sommets internes """
    global y
    if x>0:
        f(x//2)
        f(x//2)
        y=y+1
```

attribue à y une nouvelle valeur $f(x) = 2^{\lfloor \log_2 x \rfloor + 1} - 1$. Cette fonction, à l'inverse de l'autre qui incrémentait y uniquement pour une entrée $x=0$, incrémente y uniquement si x est non-nul. Pour dénombrer les sommets d'un arbre binaire, ou plus généralement de degré b pour un entier ≥ 2 , on montrera que

$$b^{n+1} = 1 + \sum_{i=0}^n (b-1)b^i$$

Dans l'exemple

```
y=0
def f(x):
    global y
    if x>0:
        f(x//2)
        f(x//2)
        y=y+x
```

la nouvelle valeur de y est la somme des valeurs x à chaque appel récursif (donc dans tout l'arbre). Par exemple pour $x = 15$, en se reportant à l'arbre, on a $f(x) = 15 + (2 \times 7) + (4 \times 3) + (8 \times 1)$. Pour un x quelconque, il nous faut évaluer la valeur

$$\left\lfloor \frac{\left\lfloor \frac{x}{2} \right\rfloor}{2} \right\rfloor$$

$$\left\lfloor \frac{\vdots}{2} \right\rfloor$$

que l'on obtient par des divisions de x par 2 et des arrondis successifs. Pour voir que cette valeur est en fait égale à

$$\left\lfloor \frac{x}{2^i} \right\rfloor$$

où i est le nombre de divisions/arrondis successifs, il faut utiliser la décomposition en base 2, ou en base $b \geq 2$, si l'on veut généraliser à tout entier supérieur à 2. Soit $b \geq 2$ un entier, on montrera que pour tout entier x il existe une unique suite d'entiers $x_0, x_1, \dots, x_{\lfloor \log_b x \rfloor}$ telle que

$$x = \sum_{i=0}^{\lfloor \log_b x \rfloor} x_i b^i$$

où $0 \leq x_i < b$ est un entier, pour tout $i = 0, \dots, \lfloor \log_b x \rfloor$. Finalement, pour la fonction python $f(x)$ on a

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\lfloor \log_2 x \rfloor} 2^i \left\lfloor \frac{x}{2^i} \right\rfloor$$

Cette expression n'est pas du type $x, x \log x, x^2, \dots, 2^x$, essayons donc de l'encadrer par des fonctions de ce type. On a

$$\begin{array}{rcll} x & = & x_0 & + 2x_1 & + 2^2x_2 & + 2^3x_3 & + \dots & + 2^nx_n \\ 2 \left\lfloor \frac{x}{2} \right\rfloor & = & & + 2x_1 & + 2^2x_2 & + 2^3x_3 & + \dots & + 2^nx_n \\ 2^2 \left\lfloor \frac{x}{2^2} \right\rfloor & = & & & + 2^2x_2 & + 2^3x_3 & + \dots & + 2^nx_n \\ 2^3 \left\lfloor \frac{x}{2^3} \right\rfloor & = & & & & + 2^3x_3 & + \dots & + 2^nx_n \\ \vdots & & & & & \vdots & & \\ 2^n \left\lfloor \frac{x}{2^n} \right\rfloor & = & & & & & & 2^nx_n \end{array}$$

où $n = \lfloor \log_2 x \rfloor$ est le plus grand entier tel que x_n soit non nul dans la décomposition en base 2. Il en découle

$$\frac{x(n+1)}{2} \leq f(x) \leq (n+1)x$$

puisque à chaque ligne $2^i \left\lfloor \frac{x}{2^i} \right\rfloor \geq 2^n \geq \frac{x}{2}$. On note alors $f(x) = \Theta(x \log x)$. D'une manière générale, on note

$$\begin{array}{c} f(n) = \Theta(g(n)) \\ \Updownarrow \\ \text{il existe deux constantes réelles } c, d > 0 \\ c.g(n) \leq f(n) \leq d.g(n) \\ \text{pour tout } n \text{ supérieur à une autre constante } n_0 \end{array}$$

et ici $\frac{1}{2}nx \leq f(x) \leq 2nx$ et $\frac{1}{2} \log_2 x \leq n \leq \log_2 x$, d'où $\frac{1}{4}x \log_2 x \leq f(x) \leq 2x \log_2 x$, et on a vu que $\log_b x = \Theta(\log_a x)$ pour tous entiers $a, b > 1$ (ainsi il est impropre de préciser la base du log dans un $\Theta(\cdot)$).

On classe ainsi les fonctions que l'on étudie en algorithmique en trois types principaux

- $f(x) = \Theta(x^p)$ ($p = 0$ est la classe constante, $p = 1$ est la classe linéaire)
- $f(x) = \Theta(x^p \log x)$ ($p = 0$ est la classe logarithmique, $p = 1$ est la classe pseudo-linéaire)

- $f(x) = \Theta(b^x)$ où $b > 1$ est un réel (c'est la classe exponentielle)

Par exemple on montrera que $\log n! = \Theta(n \log n)$, et on donnera p tel que $a^{\log_b x} = \Theta(x^p)$.

L'analyse algorithmique se fait donc modulo la proportionnalité, reprenons une fonction python simple comme

```
y=0
def f(x):
    global y
    if x>0:
        f(x//2)
        f(x//2)
        y=y+x**2
```

la nouvelle valeur de y est

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\lfloor \log_2 x \rfloor} 2^i \left\lfloor \frac{x}{2^i} \right\rfloor^2$$

Supposons que $x = 2^p$ est une puissance de 2, à la fois, cela simplifie l'expression, et c'est suffisant pour montrer que $f(x) = \Theta(x^2)$.

$$f(2^p) = \sum_{i=0}^p 2^i \left\lfloor \frac{2^p}{2^i} \right\rfloor^2 = \sum_{i=0}^p 2^i 2^{2(p-i)} = 2^p \sum_{i=0}^p 2^{p-i} = 2^p (2^{p+1} - 1) = \Theta(2^{2p})$$

On a $2^p \leq x < 2^{p+1}$ pour tout x , ce qui permet de passer du cas $x = 2^p$ au cas x quelconque:

$$\frac{c}{4}x^2 < \frac{c}{4}2^{2p+2} = c.2^{2p} \leq f(2^p) \leq f(x) < f(2^{p+1}) \leq d.2^{2p+2} = 4d.2^{2p} \leq 4d.x^2$$

Cette technique peut se généraliser au cas $x = b^p$ pour un entier b quelconque.

On a vu que les propriétés des fonctions puissances b^x et logarithmes $\log x$ s'établissent naturellement pour les $x \in \mathbb{Q}$ rationnels. Mais ces fonctions sont souvent à valeur non-rationnelles. On montrera que $\log_2 3$, $\log_{10} 2$, $2^{1/2}$ et $5^{1/2}$ ne sont pas rationnel.

L'analyse algorithmique approxime $f(x) = \Theta(g(x))$ les fonctions $f(x)$ étudiées. Ainsi puisque (pour $a, b > 1$)

$$c. \log_b x \leq \log_a x \leq d. \log_b x \quad \text{avec} \quad c = d = \log_a b, \quad \text{donc} \quad \log_a x = \Theta(\log_b x)$$

on notera $\Theta(\log x)$ sans jamais préciser la base du logarithme. Par exemple, on montrera que l'égalité $\int_1^x \frac{1}{t} dt = \ln x$ trouve un équivalent approximé en $\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = \Theta(\log n)$, qui se démontre avec une observation simple: on a par exemple pour n compris entre 4 et 7

$$\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \leq 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} \right) \leq \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}$$

et d'une manière générale

$$\frac{p}{2} = \sum_{i=1}^p 2^{i-1} 2^{-i} = \frac{1}{2^p} + \dots + \frac{1}{8} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \leq \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \leq \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \dots + \frac{1}{2^p} = \sum_{i=0}^p 2^i 2^{-i} = p + 1$$

où $2^p \leq n < 2^{p+1}$. On montrera aussi, étant donnée une base $b > 1$, qu'il existe une constante $c = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{b^h - 1}{h}$ telle que les dérivées des fonctions $p(x) = b^x$ et $l(x) = \log_b x$ sont $p'(x) = c.p(x)$ et $l'(x) = \frac{1}{c.x}$. (Ici la constante de Neper, ou nombre d'Euler qui est le $e = b$ tel que $c = 1$, n'est pas pertinent du point de vue approximé $\Theta(\cdot)$ de l'algorithmique.)

L'égalité $f(x) = \Theta(g(x))$ est équivalente aux deux égalités $f(x) = \Omega(g(x))$ et $f(x) = O(g(x))$, avec:

$f(n) = \Omega(g(n))$ \Updownarrow <p>il existe une constante réelle $c > 0$</p> $c.g(n) \leq f(n)$ <p>pour tout n supérieur à une autre constante n_0</p>	$f(n) = O(g(n))$ \Updownarrow <p>il existe une constante réelle $d > 0$</p> $f(n) \leq d.g(n)$ <p>pour tout n supérieur à une autre constante n_0</p>
--	---

2 Complexité

Par définition, la complexité d'un algorithme est $O(1)$ si son temps d'exécution est indépendant de la taille de ses données en entrée. Aucune distinction à ce niveau donc entre ces trois programmes `a()`, `b()`, `c()`

```
def a():
    for i in range(1):

def b():
    for i in range(1000):

def c():
    a()
    b()
    b()
```

le premier, `a()`, déclare une variable `i`, locale à la boucle, initialisée à `i=0`, teste si `i==1`, incrémente `i` à la fin de chaque passage dans la boucle, soit 2 affectations, 1 addition et 2 tests. Pour `b()` on a 1001 affectations, 1000 additions et 1001 tests. Quant à `c()` il effectue $4 + 3 \times 3002$ opérations élémentaires.

La complexité d'un algorithme s'étudie indépendamment de toute considération technologique, en considérant que la taille des données n'est pas bornée. Un algorithme dont le temps d'exécution dépend de la taille des données en entrée, fonction d'un paramètre n non-borné, est

- $\Theta(f(n))$ si son exécution se décompose en $\Theta(f(n))$ algorithmes $O(1)$
- $O(f(n))$ si son exécution se décompose en au-plus $O(f(n))$ algorithmes $O(1)$
- $\Omega(f(n))$ si son exécution se décompose en au-moins $\Omega(f(n))$ algorithmes $O(1)$

Par exemple, l'addition ou la multiplication d'entiers de taille bornée est $O(1)$, en particulier celle de deux chiffres $0, 1, \dots, 9$, ainsi l'algorithme d'addition de deux entiers a, b non-bornés, appris à la petite école, a une complexité $\Theta(n)$; l'algorithme de multiplication de deux entiers a, b , appris à la petite école, a une complexité $\Theta(n^2)$ où $n = \max\{\log a, \log b\}$ (la taille d'un entier a en base 10 est son nombre de chiffres, soit $1 + \lfloor \log_{10} a \rfloor$).

Étudions la complexité de

```
def e(a,b):
    if a*b==0:
        return a+b
    else:
        if a>b:
            return e(b,a%b)
        else:
            return e(a,b%a)

def f(n):
    if n<2:
        return n
    else:
        return f(n-1)+f(n-2)
```

Le premier est l'algorithme d'Euclide, puisque, en notant $r_0 = \max\{a, b\}$ et $r_1 = \min\{a, b\}$ on a

$$e(a, b) = e(b, a) = \begin{cases} r_0 & \text{si } r_1 = 0 \\ e(r_1, r_2) & \text{sinon} \end{cases}$$

où $r_0 = q_1 r_1 + r_2$, pour un entier q_1 et $0 \leq r_2 < r_1$. En effet, d'une part si $r_1 = 0$ le plus grand diviseur commun de r_0, r_1 est r_0 , et d'autre part

$$(\exists q, q' \text{ entiers tels que } r_0 = qd \text{ et } r_1 = q'd) \iff (\exists q', q'' \text{ entiers tels que } r_1 = q'd \text{ et } r_2 = q''d)$$

Le second, qui retourne le n ème terme de la suite de Fibonacci, a un lien avec la complexité du premier. On montre que la complexité de $\mathbf{f}(n)$ est exponentielle car

$$T(n) \geq f(n) = \Theta(\phi^n) = \Omega(1.6^n)$$

où $T(n)$ est le nombre d'opérations élémentaires de $\mathbf{f}(n)$ qui retourne la valeur $f(n) = \frac{1}{\sqrt{5}}(\phi^n - \bar{\phi}^n)$, avec $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ et $\bar{\phi} = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$. Pour cela, on remarque

1. que $g(n) = g(n-1) + g(n-2)$ pour $g(n) = x^n$ avec x satisfaisant $x^2 = x + 1$,
2. que $h(n) = h(n-1) + h(n-2)$ avec $h(n) = ag_1(n) + bg_2(n)$ où $g_i(n) = g_i(n-1) + g_i(n-2)$ pour $i = 1, 2$, et
3. que si $h(0) = 0$ et $h(1) = 1$, alors $h(n) = f(n)$.

On montre ensuite que la complexité de $\mathbf{e}(a, b)$ est $O(n)$ où $n = \Theta(\log r_1)$ est la taille des entiers a, b . Pour cela, on détaille les appels récursives de $e(r_0, r_1), e(r_2, r_1) \dots, e(r_{n-1}, r_n), e(r_n, 0)$.

$$\begin{array}{llll} r_0 = q_1 r_1 + r_2 & \text{avec} & q_1 \geq 1, & 0 \leq r_2 < r_1 < r_0 \\ r_1 = q_2 r_2 + r_3 & \text{avec} & q_2 \geq 1, & 0 \leq r_3 < r_2 < r_1 < r_0 \\ & & \vdots & \\ r_{n-2} = q_{n-1} r_{n-1} + r_n & \text{avec} & q_{n-1} \geq 1, & 0 \leq r_n < \dots < r_1 < r_0 \\ r_{n-1} = q_n r_n + 0 & \text{avec} & q_n \geq 1, & 0 = r_{n+1} < r_n < \dots < r_1 < r_0 \end{array}$$

Avec $u_i := r_{n-i+1}$, on a $u_0 = 0$, $u_1 \geq 1$, et $u_i \geq u_{i-1} + u_{i-2}$, donc $r_1 = u_n \geq f(n) = \Theta(\phi^n)$.

L'algorithme d'Euclide a une généralisation bien connue, qui n'augmente pas sa complexité:

```
def B(a,b):
    """on suppose a>=b"""
    if b==0:
        return [1,0,a]
    else:
        [x,y,d]=B(b,a%b)
        return [y,x-(a//b)*y,d]
```

On montre que l'algorithme est valide au sens que pour tout $a, b \in \mathbb{N}$, il retourne $x, y \in \mathbb{Z}$ et $d \in \mathbb{N}$ tels que $ax + by = d$, où d est le plus grand diviseur commun de a, b . Si $b = 0$, c'est vrai avec $x = 1$, $y = 0$ et $d = a$ qui est bien le pgcd de a, b . Si $b > 0$, par induction, l'étape $[x, y, d] = B(b, a \% b)$ fonctionne et on a donc: $bx + ry = d$ (avec $a = qb + r$). Il suffit de vérifier que les valeurs retournées sont valides, c'est-à-dire que $ay + b(x - qy) = d$. (Cet algorithme est une preuve du théorème de Bachet-Bézout.)

3 Récursivité de la forme $T(n) = aT(n/b) + \Theta(n^c)$

On rappelle le tri fusion qui prend un tableau t d'entiers et retourne le tableau trié $tt = \mathbf{tf}(t)$ dans l'ordre croissant:

```
def tf(t):
    if len(t) <= 1:          #len(t) = longueur de t
        return t             #si len(t)=1, alors t est déjà trié
    m = len(t)//2
    t1 = t[:m]                #t1=première moitié de t
    t2 = t[m:]                #t2= seconde moitié de t
    tt1 = tf(t1)              #tt1=t1 trié
    tt2 = tf(t2)              #tt2=t2 trié
    tt = fus(tt1,tt2)         #fusion de tt1,tt2 en tt tableau trié
    return tt
```

Si $T(n)$ est le temps d'exécution de $\text{tf}(t)$ en fonction du nombre n d'entiers dans le tableau, alors $\text{tt1} = \text{tf}(t1)$ prend un temps $T(n/2)$, $\text{tt1} = \text{tf}(t2)$ prend un temps $T(n/2)$, et $\text{tt} = \text{fus}(t1, t2)$ prend un temps $\Theta(n)$ puisque qu'on peut l'implémenter ainsi:

```
def fus(t1,t2):          #fusion: si t1 et t2 sont triés, alors tf est l'union triée de t1,t2
    i = 0
    j = 0
    l1 = len(t1)
    l2 = len(t2)
    tf = []
    while i<l1 and j<l2:
        if t1[i] < t2[j]:
            tf.append(t1[i])
            i+= 1
        else:
            tf.append(t2[j])
            j+= 1
    while i<l1:
        tf.append(t1[i])
        i+=1
    while j<l2:
        tf.append(t2[j])
        j+=1
    return tf
```

Toutes les autres opérations ont un temps $O(1)$, donc

$$T(n) = 2T(n/2) + \Theta(n), \quad \text{donc pour le tri fusion: } a = b = 2 \text{ et } c = 1$$

D'une manière générale, on montre (récurrence sur p) que si le temps d'exécution $T(n)$, en fonction de la taille n des données d'un algorithme récursif, satisfait:

$$T(n) = \begin{cases} aT(n/b) + \Theta(n^c) & \text{si } n > 1 \\ \Theta(1) & \text{sinon} \end{cases}$$

pour deux entiers $a, b \geq 1$ et un réel $c \geq 0$, alors pour tout entier $p > 1$

$$T(b^p) = \Theta\left(\sum_{i=0}^p a^i b^{c(p-i)}\right)$$

Cette égalité obtenue simplement pour le cas particulier $n = b^p$ permettra en fait d'obtenir l'expression de $T(n)$ pour tout entier n . Pour le tri-fusion par exemple, $a = b = 2$ et $c = 1$, on obtient $T(2^p) = \Theta(\sum_{i=0}^p 2^i 2^{(p-i)} = (p+1)2^p)$. Pour tout n , il existe p tel que $2^p \leq n < 2^{p+1}$ donc $p 2^p \leq n \log_2 n \leq (p+1) 2^{p+1}$, et pour $p \geq 2$, il existe $c, d > 0$ tels que:

$$\frac{c}{2} n \log_2 n \leq \frac{c}{2} (p+1) 2^{p+1} \leq c(p+1) 2^p \leq T(2^p) \leq T(n) \leq T(2^{p+1}) \leq d(p+2) 2^{p+1} \leq 4d p 2^p \leq 4d n \log_2 n$$

et on retrouve $T(n) = \Theta(n \log n)$.

Avant d'examiner d'autres exemples, on montre que pour tout réel $r > 0$

$$\sum_{i=0}^n r^i = \begin{cases} \Theta(1) & \text{si } r < 1 \quad \text{car alors } 1 \leq \frac{1-r^{n+1}}{1-r} \leq \frac{1}{1-r} \\ \Theta(r^n) & \text{si } r > 1 \quad \text{car alors } r^n = \frac{r^{n+1}}{r} \leq \frac{r^{n+1}-1}{r-1} \leq r^{n+1} \end{cases}$$

Examinons un algorithme récursif de multiplication de deux entiers x, y de taille n (c-à-d $\log x, \log y = \Theta(n)$). Avec $x = a 10^{n/2} + b$ et $y = c 10^{n/2} + d$, où a, b, c, d sont des entiers de taille $n/2$, alors $xy = ac 10^n + (ad + bc) 10^{n/2} + bd$. On peut recomposer xy à partir de ac, ad, bc, bd en $\Theta(n)$ puisqu'il ne s'agit alors que d'additions à effectuer. On peut calculer ac, ad, bc, bd avec des appels récursifs, donc le temps d'exécution satisfait $T(n) = 4T(n/2) + \Theta(n)$. C'est le cas

$a = 4$, $b = 2$ et $c = 1$, on obtient $T(2^p) = \Theta(\sum_{i=0}^p 4^i 2^{(p-i)} = 2^p \sum_{i=0}^p 2^i) = \Theta(2^{2p})$, et on trouve $T(n) = \Theta(n^2)$, puisque $2^{2p} \leq n^2 \leq 2^{2p+2}$ et

$$\frac{c}{4}n^2 \leq \frac{c}{4}2^{2p+2} \leq c2^{2p} \leq T(2^p) \leq T(n) \leq T(2^{p+1}) \leq d2^{2p+2} \leq 4d2^{2p} \leq 4dn^2$$

ce qui est pareil que l'algorithme élémentaire. La remarque suivante est cruciale: $ad+bc = (a+b)(c+d) - ac - bd$. En effet, elle permet de calculer xy en $\Theta(n)$ avec, en plus, seulement 3 appels récursifs au lieu de 4. On passe ainsi à une équation $T(n) = 3T(n/2) + \Theta(n)$. C'est le cas $a = 3$, $b = 2$ et $c = 1$, on obtient $T(2^p) = \Theta(\sum_{i=0}^p 3^i 2^{(p-i)} = 3^p \sum_{i=0}^p (\frac{2}{3})^i) = \Theta(3^p)$, et on trouve $T(n) = \Theta(n^{\log_2 3})$, puisque $3^p \leq n^{\log_2 3} = 3^{\log_2 n} \leq 3^{p+1}$ et

$$\frac{c}{3}n^{\log_2 3} \leq \frac{c}{3}3^{p+1} \leq c3^p \leq T(2^p) \leq T(n) \leq T(2^{p+1}) \leq d3^{p+1} \leq 3d3^p \leq 3dn^{\log_2 3}$$

D'une manière générale, on peut remarquer que

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^p a^i b^{c(p-i)} &= a^p \sum_{i=0}^p a^{i-p} b^{c(p-i)} \\ &= a^p \sum_{i=0}^p \left(\frac{b^c}{a}\right)^{p-i} \\ &= a^p \sum_{i=0}^p \left(\frac{b^c}{a}\right)^i \end{aligned}$$

Donc, si $a > b^c$, alors $T(b^p) = \Theta(a^p)$. D'une part, il existe $\gamma, \delta > 0$ telles que $\gamma a^p \leq T(b^p) \leq \delta a^p$, d'autre part, il existe un entier p tel que $b^p \leq n < b^{p+1}$, c'est-à-dire tel que

$$a^p \leq n^{\log_b a} = a^{\log_b n} \leq a^{p+1}$$

donc

$$\frac{\gamma}{a} n^{\log_b a} \leq \frac{\gamma}{a} a^{p+1} = \gamma a^p \leq T(b^p) \leq T(n) \leq T(b^{p+1}) \leq \delta a^{p+1} = a\delta a^p \leq a\delta n^{\log_b a}$$

et pour tout n , on a $T(n) = \Theta(n^{\log_b a})$.

On remarque aussi que

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^p a^i b^{c(p-i)} &= b^{cp} \sum_{i=0}^p a^i b^{-ic} \\ &= b^{cp} \sum_{i=0}^p \left(\frac{a}{b^c}\right)^i \end{aligned}$$

Donc, si $a < b^c$, alors $T(b^p) = \Theta(b^{cp})$. D'une part, il existe $\gamma, \delta > 0$ telles que $\gamma b^{cp} \leq T(b^p) \leq \delta b^{cp}$, d'autre part, il existe un entier p tel que $b^p \leq n < b^{p+1}$, c'est-à-dire tel que

$$b^{cp} \leq n^c \leq b^{c+p}$$

donc

$$\frac{\gamma}{b^c} n^c \leq \frac{\gamma}{b^c} b^{cp+c} = \gamma b^{cp} \leq T(b^p) \leq T(n) \leq T(b^{p+1}) \leq \delta b^{cp+c} = b^c \delta b^{cp} \leq b^c \delta n^c$$

et pour tout n , on a $T(n) = \Theta(n^c)$.

Finalement, si $a = b^c$ on a

$$\sum_{i=0}^p a^i b^{c(p-i)} = (p+1)a^p = (p+1)b^{cp}$$

D'une part, il existe $\gamma, \delta > 0$ telles que $\gamma(p+1)b^{cp} \leq T(b^p) \leq \delta(p+1)b^{cp}$, d'autre part, il existe un entier p tel que $b^p \leq n < b^{p+1}$, c'est-à-dire tel que tel que

$$pb^{cp} \leq n^c \log_b n < (p+1)b^{pc+c}$$

donc, pour $p \geq 2$ on a

$$\frac{\gamma}{b^c} n^c \log_b n \leq \frac{\gamma}{b^c} (p+1)b^{cp+c} = \gamma(p+1)b^{cp} \leq T(b^p) \leq T(n) \leq T(b^{p+1}) \leq \delta(p+1)b^{cp+c} \leq 2b^c \delta pb^{cp} \leq 2b^c \delta n^c \log_b n$$

et pour tout n , on a $T(n) = \Theta(n^c \log n)$.

4 Performance des algorithmes

Un algorithme naturel en $\Theta(n^3)$ pour déterminer le produit $C = AB$ de deux n -matrices carrées est:

```
def mult(A,B):
    n = len(A)
    C = [[0 for i in range(n)] for j in range(n)]
    for i in range(n):
        for j in range(n):
            for k in range(n):
                C[i][j] += A[i][k] * B[k][j]
    return C
```

puisque par définition

$$C = \left(\sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj} \right)_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} \quad \text{avec} \quad A = (a_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}} \quad \text{et} \quad B = (b_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq n \\ 1 \leq j \leq n}}$$

(on suppose ici que la taille des éléments des matrices est bornée.) Lorsque n est pair, on peut définir, pour toute n -matrice X carrée

$$X_{11} = (x_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq n/2 \\ 1 \leq j \leq n/2}} \quad X_{12} = (x_{ij})_{\substack{1 \leq i \leq n/2 \\ n/2 < j \leq n}} \quad X_{21} = (x_{ij})_{\substack{n/2 < i \leq n \\ 1 \leq j \leq n/2}} \quad X_{22} = (x_{ij})_{\substack{n/2 < i \leq n \\ n/2 < j \leq n}}$$

ainsi

$$AB = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11}B_{11} + A_{12}B_{21} & A_{11}B_{12} + A_{12}B_{22} \\ A_{21}B_{11} + A_{22}B_{21} & A_{21}B_{12} + A_{22}B_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} = C$$

À partir des 8 sous-produits $A_{ij}B_{kl}$ ci-dessus, on peut reconstituer le produit C en $\Theta(n^2)$, le temps des additions, donc, si n est une puissance de 2, on a un algorithme récursif de complexité $T(n) = 8T(n/2) + \Theta(n^2) = \Theta(n^{\log_2 8}) = \Theta(n^3)$.

Reprenons à la remarque cruciale: $ad + bc = (a + b)(c + d) - ac - bd$; qui permet de multiplier des entiers x, y de taille $n = O(\log(\max\{x, y\}))$ en $T(n) = 3T(n/2) + \Theta(n) = \Theta(n^{\log_2 3})$ au lieu de $T(n) = 4T(n/2) + \Theta(n) = \Theta(n^2)$. Visuellement

$$ad + bc = \begin{pmatrix} \cdot & + \\ + & \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} + & + \\ + & + \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} + & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & + \end{pmatrix}$$

où une matrice représente une combinaison à coefficients $\{0, 1\}$ des sous-produits ac, ad, bc, bd

$$\begin{pmatrix} ac & ad \\ bc & bd \end{pmatrix}$$

La structure de la matrice permet de savoir si elle peut s'obtenir en un seul produit ou non,

$$\begin{pmatrix} + & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot & + \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ + & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + & + \\ \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot & \cdot \\ + & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + & \cdot \\ + & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot & + \\ \cdot & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + & + \\ + & + \end{pmatrix}$$

s'obtiennent en un seul produit, mais pas

$$\begin{pmatrix} \cdot & + \\ + & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + & + \\ + & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + & + \\ \cdot & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + & \cdot \\ + & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} + & \cdot \\ \cdot & + \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cdot & + \\ + & \cdot \end{pmatrix}$$

Inspirons nous de cette approche pour élaborer un algorithme récursif pour multiplier les matrices n -carrées en $T(n) = 7T(n/2) + \Theta(n^2) = \Theta(n^{\log_2 7})$. Visuellement, on cherche

$$C_{11} = A_{11}B_{11} + A_{12}B_{21} = \begin{pmatrix} + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & + & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad C_{12} = A_{11}B_{12} + A_{12}B_{22} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & + & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$C_{21} = A_{21}B_{11} + A_{22}B_{21} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & + & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \quad C_{22} = A_{21}B_{12} + A_{22}B_{22} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & + & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \end{pmatrix}$$

où la matrice membre de droite des égalités représentent une combinaisons $\{-1, 0, +1\}$ des sous-produits $A_{ij}B_{k\ell}$ par des matrices

$$\begin{pmatrix} A_{11}B_{11} & A_{12}B_{11} & A_{21}B_{11} & A_{12}B_{11} \\ A_{11}B_{12} & A_{12}B_{12} & A_{21}B_{12} & A_{12}B_{12} \\ A_{11}B_{21} & A_{12}B_{21} & A_{21}B_{21} & A_{12}B_{21} \\ A_{11}B_{22} & A_{12}B_{22} & A_{21}B_{22} & A_{12}B_{22} \end{pmatrix}$$

La structure de ces matrices permet de voir si les combinaisons correspondantes peuvent d'obtenir en un seul produit, par exemple

$$-A_{11}B_{11} + A_{21}B_{11} - A_{11}B_{12} + A_{21}B_{12} = \begin{pmatrix} - & \cdot & + & \cdot \\ - & \cdot & + & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} = (-A_{11} + A_{21})(B_{11} + B_{12})$$

s'obtient par un unique produit mais pas

$$-A_{11}B_{11} + A_{21}B_{11} - A_{11}B_{12} = \begin{pmatrix} - & \cdot & + & \cdot \\ - & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} = -A_{11}(B_{11} + B_{12}) + A_{21}B_{11}$$

On obtient ainsi les quatre sous-matrices composant $C = AB$ à partir de seulement 7 produits de sous-matrices: d'abord on peut utiliser 4 matrices pour obtenir deux sous-matrices de C

$$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & + & \cdot & \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & + & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ - & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & + & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & + & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & - \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

puis on remarque qu'en combinant ces matrices avec une cinquième on peut obtenir deux nouvelles matrices

$$\begin{pmatrix} + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & - & \cdot & + \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} + & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ + & \cdot & \cdot & + \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & - \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & + & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} + & \cdot & - & \cdot \\ + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} + & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ + & \cdot & \cdot & + \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ - & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & + & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

Au final, on a donc les deux sous-matrices de C manquantes avec seulement deux autres matrices

$$\begin{pmatrix} + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & + & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} + & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ + & \cdot & \cdot & + \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & - \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & + & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & + & \cdot & - \\ \cdot & + & \cdot & - \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & + & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} + & \cdot & \cdot & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & + \\ + & \cdot & \cdot & + \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ + & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ - & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & + & + \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} - & \cdot & + & \cdot \\ - & \cdot & + & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix}$$

soit bien seulement 7 matrices en tout.

5 Tri

L'algorithme implémenté en python par `tf(t)`, de la forme $T(n) = 2T(n/2) + \Theta(n) = \Theta(n \log n)$, trie dans l'ordre croissant le tableau d'entier `t`. L'algorithme suivant, implémenté par `heapsort(A)`, retourne le tableau trié `B` qui contient les éléments de `A` sauf `A[0]==0`.

```
def tas(A,i):          #A[0]==0 and A[i]>0
    n=len(A)
    if 2*i<n:
        x=2*i
        if 2*i+1<n and A[2*i+1]<A[x]:
            x=2*i+1
        if A[x]<A[i]:
            z=A[x]
            A[x]=A[i]
            A[i]=z
            tas(A,x)
def heap(A): #A[0]==0 and A[i]>0
    n=len(A)-1
    for i in range(n/2+1):
        tas(A,n/2-i)
def heapsort(A): #A[0]==0 and A[i]>0
    n=len(A)
    heap(A)
    B=[0 for i in range(n-1)]
    for i in range(n-1):
        B[i]=A[1]
        A[1]=A[n-1-i]
        A=A[:n-1-i]
        tas(A,1)
    return B
```

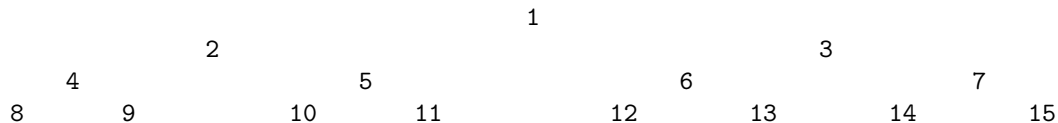
On note $A[1], \dots, A[n]$ les d'éléments non-nuls du tableau. Si on a:

$$A[i] \leq \min\{A[2i], A[2i+1]\} \quad \forall i = 2, 3, \dots, \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$$

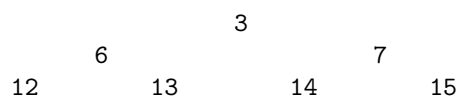
alors, on montre par une récurrence sur $h = \lfloor \log_2 n \rfloor - 1$, c'est-à-dire la hauteur de l'arbre binaire de racine 1, où $2i$ et $2i+1$ sont les fils de i , qu'après l'appel de la procédure `tas(A,1)`

$$A[i] \leq \min\{A[2i], A[2i+1]\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$$

Cette propriété est vraie pour le tableau grâce à la structure d'arbre binaire qu'il possède implicitement,



et elle est aussi vraie pour les sous-tableaux possédant cette structure, comme par exemple le sous-tableau engendré par 3



Si on a:

$$A[i] \leq \min\{A[2i], A[2i+1]\} \quad \forall i = 6, 7$$

alors, après l'appel de la procédure `tas(A,3)`, on a

$$A[i] \leq \min\{A[2i], A[2i+1]\} \quad \forall i = 3, 6, 7$$

Donc `heap(A)` permute les valeurs des éléments pour avoir $A[i] \leq \min\{A[2i], A[2i+1]\}$ partout. Ainsi $A[1]$ est la valeur non-nulle minimum du tableau et `heapsort(A)` renvoie les valeurs non-nulles triées dans l'ordre croissant. La complexité au pire cas de `heapsort(A)` est $\Theta(n \log n)$ puisqu'au pire cas, `tas(A,i)` est $\Theta(\log n)$.

Un autre algorithme de tri est:

```
def trins(A):
    for j in range(1,len(A)):
        x=A[j]
        i=j-1
        while i>=0 and A[i]>x:
            A[i+1]=A[i]
            i -= 1
        A[i+1]=x
```

On montre, par induction sur j , qu'après `trins(A)` la tableau est trié car:

- $A[:j]$ est trié si $j = 1$
- si $A[:j]$ est trié, alors $A[:j+1]$ est trié après l'exécution des tâches dans le corps de la boucle `for`

Le nombre de passages dans la boucle `while` dépend de $A[:j]$

- (1) Si $A[0]>x$, alors on passe j fois
- (2) Si $A[j-1]<x$, alors on ne passe pas dans la boucle

Si la tableau est déjà trié, c'est le cas (2) à chaque passage et la complexité est $\Theta(n)$. Au contraire, s'il est trié à l'envers, c'est le cas (1) à chaque passage et la complexité est $\Theta(n^2) = \sum_{j=1}^{n-1} j = n(n-1)/2$. En moyenne, ça reste $\Theta(n^2) = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{j}{2} = n(n-1)/4$.

Tout algorithme (déterministe) de tri basé sur des comparaisons peut être représenté par un arbre binaire dont la racine est la première comparaison, la comparaison suivante est le fils gauche ou droite selon la résultat de la comparaison effectuée au sommet père. Les feuilles de l'arbre sont les différentes permutations effectuées par l'algorithme. Si l'algorithme est valide, il trie n'importe quelle permutation et le nombre de feuilles est donc $\geq n!$. Par-ailleurs, l'arbre étant binaire, il a au plus 2^h feuilles, où h est la hauteur de l'arbre. D'où $n! \leq 2^h$ et $h \geq \log_2 n! = \Theta(n \log n)$. Ainsi la complexité au pire cas d'un tel algorithme est $\Theta(n \log n)$, et cette borne est atteinte par les tri fusion et par tas.

Un autre algorithme de tri est

```
def max(A):
    m=A[0]
    for i in range(1,len(A)):
        if A[i]>m:
            m=A[i]
    return m

def triden(A):
    n=len(A)
    m=max(A)
    B=[0 for i in range(n)]
    C=[0 for j in range(m+1)]
    for i in range(n):
        C[A[i]] += 1
    for j in range(1,m+1):
        C[j]=C[j-1]+C[j]
    for i in range(n):
        B[C[A[i]]-1]=A[i]
    return B
```

Sa validité vient du fait qu'il y a exactement $C[A[i]]-1$ éléments de A plus petit que $A[i]$. Sa complexité est $\Theta(n + m)$ où m est la valeur renvoyée par $\max(A)$.

6 Force brute

Après l'initialisation d'un tableau A de taille $n=\text{len}(A)$ et d'un entier b , par exemple

```
b=2
n=3
A=[0 for i in range(n)]
```

l'appel à `count(0)` affichera l'expression en base b de tous les entiers de 0 à $b^n - 1$.

```
def count(i):
    for j in range(b):
        A[i]=j
        if i==n-1:
            print A
        else:
            count(i+1)
```

Clairement `count(n-1)` affiche A avec $A[:n-1]$ inchangé et $A[n-1]=j$ pour $j = 0, \dots, b-1$. On peut montrer par induction sur i que `count(n-i)` affiche A avec $A[:n-i]$ inchangé et $A[n-i:]$ qui sont les expressions en base b des entiers de $0, \dots, b^i - 1$. Pour les valeurs en exemple, les premiers appels récursifs à `count(0)` avec $A[0]=0$, puis `count(1)` avec $A[1]=0$, puis `count(2)` avec $A[2]=0$ et `print` puis $A[2]=1$ et `print`, donneront le schéma

```

                                ...
                        0..
            00.
000      001
```

Après l'exécution de $A[0]=1$ lors du deuxième passage dans `for` de l'appel à `count(0)`, on aura le schéma

```

                                ...
                        0..                                1..
            00.                                01.
000      001                                010      011
```

On affiche bien les expressions en base 2 des entiers de 0 à 7:

```

                                ...
                        0..                                1..
            00.                                01.                                10.                                11.
000      001                                010      011                                100      101                                110      111
```

Pour $b = 2$, `count(0)` est équivalent à l'énumération d'objets mathématiques classiques puisque les ensembles suivants sont en bijection

- tableaux A de longueur $n=\text{len}(A)$ avec $A[i]=0$ ou $A[i]=1$ pour tout $i = 0, \dots, n-1$
- vecteurs $x \in \{0, 1\}^n$
- sous-ensembles de $\{1, \dots, n\}$

On peut ainsi modifier la procédure `count` pour énumérer tous les vecteurs $x \in \{0, 1\}^n$ satisfaisant des contraintes $Ax \leq \mathbf{1}$ où A est une matrice 0-1. Par exemple avec

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

On initialise

```

n=5
X=[0 for i in range(n)]
G=[[0,1],[0,2],[1,2],[0,4],[2,3],[3,4]]

```

Puis on énumère tous les vecteurs $x \in \{0,1\}^5$ en testant, avant affichage, que les contraintes $Ax \leq \mathbf{1}$, stockées dans G , sont satisfaites

```

def stable(i):
    for j in range(2):
        X[i]=j
        if i==n-1:
            t=1
            for e in range(m):
                if X[G[e][0]]==1 and X[G[e][1]]==1:
                    t=0
            if t==1:
                print X
        else:
            stable(i+1)

```

Un autre exemple est l'énumération des placements de 8 reines dans un échiquier sans aucune menace entre elles. L'échiquier sans pièce est représenté par

```

n=8
Q=[-1 for i in range(n)]
r=[0 for i in range(n)]
c=[0 for i in range(2*n-1)]
d=[0 for i in range(2*n-1)]

```

Les tableaux Q ayant des valeurs $Q[i]$ dans $\{0,1,\dots,7\}$ sont en bijection avec les échiquiers contenant exactement une reine par colonne. L'instruction $Q[i]=j$ place une reine en colonne i ligne j , et

1. $r[j]=1$ signifie que la j ème ligne
2. $c[i+j]=1$ signifie que la $(i+j)$ ème diagonale Nord-Ouest
3. $d[i-j+n-1]=1$ signifie que la $(i-j+n-1)$ ème diagonale Nord-Est

est alors menacée par cette reine. Ainsi `queen(0)` affiche tous les placements possibles:

```

def queen(i):
    for j in range(n):
        if r[j]==0 and c[i+j]==0 and d[i-j+n-1]==0:
            Q[i]=j
            r[j]=c[i+j]=d[i-j+n-1]=1
            if i==n-1:
                print Q
            else:
                queen(i+1)
            r[j]=c[i+j]=d[i-j+n-1]=0

```

Illustrons le cas $n = 4$. Les numéros des lignes et diagonales Nord-Ouest et Nord-Est sont respectivement:

j			
3	3	3	3
2	2	2	2
1	1	1	1
0	0	0	0

$i+j$			
3	4	5	6
2	3	4	5
1	2	3	4
0	1	2	3

$i-j+3$			
0	1	2	3
1	2	3	4
2	3	4	5
3	4	5	6

Les premiers appels récursifs placent:

queen(0)	queen(1)	queen(2)	queen(1)	queen(2)	queen(3)																																																																																																								
<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>													Q				<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>						Q							Q				<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>										Q			Q				<table><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		Q											Q				<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td>Q</td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>															Q		Q				<table><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td>Q</td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		Q														Q	Q			
Q																																																																																																													
	Q																																																																																																												
Q																																																																																																													
	Q																																																																																																												
Q																																																																																																													
	Q																																																																																																												
Q																																																																																																													
		Q																																																																																																											
Q																																																																																																													
	Q																																																																																																												
			Q																																																																																																										
Q																																																																																																													
queen(2)	queen(1)	queen(0)	queen(1)	queen(2)	queen(3)																																																																																																								
<table><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		Q											Q				<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>													Q				<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>													Q				<table><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		Q							Q								<table><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td>Q</td></tr><tr><td>Q</td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		Q														Q	Q				<table><tr><td></td><td>Q</td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td>Q</td></tr><tr><td></td><td></td><td>Q</td><td></td></tr></table>		Q														Q			Q	
	Q																																																																																																												
Q																																																																																																													
Q																																																																																																													
Q																																																																																																													
	Q																																																																																																												
Q																																																																																																													
	Q																																																																																																												
			Q																																																																																																										
Q																																																																																																													
	Q																																																																																																												
			Q																																																																																																										
		Q																																																																																																											

et affiche un premier placement sans menace.