

# Introduction à l'algorithmique

Master 1 Bio-Informatique, Université de Bordeaux

2020-2024 - Version 0.45 - En cours d'écriture

Sous licence libre Creative Commons BY-NC-SA 4.0

## Table des matières

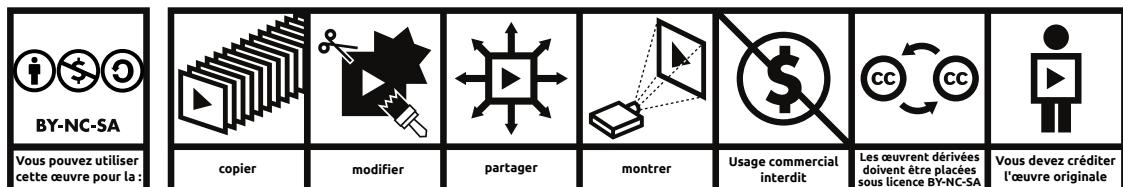
<b>1 Licence</b>	<b>4</b>
<b>2 Fonctionnement d'un ordinateur</b>	<b>4</b>
2.1 Architecture d'un ordinateur . . . . .	4
2.2 La mémoire . . . . .	6
2.3 Programme . . . . .	7
2.4 L'algorithmique . . . . .	12
2.4.1 Algorithmes prouvés ou algorithmes classiques . . . . .	12
2.4.2 Algorithmes statistiques et apprentissage machine (machine learning) . . . . .	15
<b>3 Le langage python</b>	<b>20</b>
3.1 Utilisation de Pythontutor pour maîtriser l'utilisation de la mémoire . . . . .	20
3.2 Variable et références . . . . .	20
3.3 Passage par références . . . . .	21
3.4 Exercice . . . . .	22
<b>4 Interface et bibliothèque</b>	<b>25</b>
4.1 Bibliothèque . . . . .	25
4.2 Prototypes et implémentations multiples . . . . .	25
<b>5 Pile et File</b>	<b>28</b>
5.1 Les piles (LIFO) . . . . .	28
5.2 Les files (FIFO) . . . . .	30
<b>6 La récursivité</b>	<b>33</b>
6.1 La pile d'exécution . . . . .	33
6.2 La récursivité . . . . .	38
<b>7 Recherche d'un élément dans une tableau</b>	<b>40</b>
7.1 Recherche linéaire . . . . .	40
7.2 Recherche dichotomique . . . . .	40
7.3 Estimer le nombre d'instructions de l'algorithme de recherche dichotomique (optionnel- à regarder à la fin de la séance) . . . . .	41
<b>8 Listes</b>	<b>42</b>
8.1 Listes chaînées ou listes simplement chaînées . . . . .	42
8.2 Listes doublement chaînées . . . . .	45

<b>9 La Complexité</b>	<b>47</b>
9.1 Présentation du problème . . . . .	47
9.2 La complexité en pire cas et en meilleur cas . . . . .	48
9.3 Comparer les algorithmes en utilisant des comparaisons asymptotiques . . . . .	49
9.4 Règles de calculs pour $\mathcal{O}$ . . . . .	50
9.5 Quelques exemples . . . . .	50
9.6 Complexité en moyenne et complexité amortie . . . . .	50
<b>10 Algorithmes de Tri</b>	<b>50</b>
10.1 Tri à bulles . . . . .	50
10.2 Tri par insertion (tri du joueur de carte) . . . . .	51
10.3 Tri par sélection . . . . .	52
10.4 Tri rapide . . . . .	52
10.5 Tri fusion . . . . .	53
<b>11 Arbres</b>	<b>54</b>
11.1 Arbres . . . . .	54
11.2 Exemples d'arbres en informatique . . . . .	58
11.3 Une API pour les arbres . . . . .	59
11.4 Arbres binaires . . . . .	62
11.5 Une API pour les arbres binaires . . . . .	66
11.6 Quelques définitions pour les arbres et les arbres binaires . . . . .	68
11.7 Parcours d'un arbre . . . . .	69
11.8 Arbres binaires de recherche . . . . .	73
<b>12 Les graphes</b>	<b>79</b>
12.1 Ensembles, multiensembles, listes et mots . . . . .	79
12.2 Définition des graphes . . . . .	81
12.2.1 Les graphes non orientés . . . . .	81
12.2.2 Les graphes orientés . . . . .	82
12.2.3 Les graphes étiquetés (orientés et non orienté) . . . . .	84
12.2.4 Arêtes et arcs multiples, cas particuliers et notations abusives . . . . .	84
12.2.5 Chemins et chaînes . . . . .	85
12.2.6 Accessibilité, connexité, forte conexité, composantes connexes et composantes fortement connexes . . . . .	87
12.2.7 Cycles, circuits et arbres . . . . .	89
12.2.8 Degré d'un sommet et degré total d'un graphe . . . . .	91
12.3 Implémentation des graphes . . . . .	92
12.3.1 Matrice d'adjacence . . . . .	92
12.3.2 Liste d'arcs adjacents et liste d'arêtes adjacentes . . . . .	96
12.3.3 Liste d'adjacence (liste de sommets adjacents) . . . . .	97
12.3.4 Matrice d'incidence . . . . .	98
12.3.5 Avantages et inconvénients des différentes structures de données de graphe . . . . .	99
12.4 Parcours en Largeur et parcours en profondeur . . . . .	99
12.4.1 Parcours en Largeur . . . . .	99
12.4.2 Parcours en profondeur . . . . .	99
12.5 Tri topologique et calcul de composantes fortement connexes . . . . .	100
12.5.1 Tri topologique . . . . .	100
12.5.2 Composantes fortement connexes . . . . .	100
12.6 Algorithmes de plus court chemin . . . . .	100
12.6.1 Dijkstra . . . . .	100
12.6.2 Bellman . . . . .	101
<b>13 Références</b>	<b>102</b>

<b>A Le langage de programmation Python</b>	<b>103</b>
A.1 Écrire et exécuter un programme écrit en Python . . . . .	103
A.2 Les variables et les affectations . . . . .	103
A.2.1 Les variables . . . . .	103
A.2.2 Afficher le contenu d'une variable . . . . .	104
A.2.3 Copier le contenu de la mémoire . . . . .	104
A.3 Les commentaires . . . . .	105
A.4 Les entiers, les réels, les booléens et les opérations arithmétiques . . . . .	105
A.5 Les fonctions . . . . .	106
A.6 Les saut conditionnels . . . . .	108
A.7 Les boucles . . . . .	110
A.8 Les listes et les tableaux . . . . .	110
A.9 Les tuples . . . . .	112
A.10 Le texte et les chaînes de caractères . . . . .	112
<b>B Quelques calculs pour la complexité</b>	<b>113</b>
B.1 Quelques symboles classiques . . . . .	113
B.2 Les sommes et les produits . . . . .	113
B.3 Les binomiaux . . . . .	114
B.4 Calcul de sommes classiques . . . . .	115

# 1 Licence

Ce cours est sous licence libre Creative Commons BY-NC-SA dans sa version 4.0. Les droits et devoirs associés à cette licence sont résumés dans l'image suivante qui a été conçue originallement<sup>1</sup> par Piotrek Chuchla.



## 2 Fonctionnement d'un ordinateur

### 2.1 Architecture d'un ordinateur

Un *ordinateur* est un système constitué d'une unité de calcul et d'une mémoire. La *mémoire* contient un ensemble de données codées par une suite de 1 et de 0. L'*unité de calcul* est la partie de l'ordinateur qui permet de lire, écrire et modifier la mémoire. La figure 1 montre cette architecture de l'ordinateur.

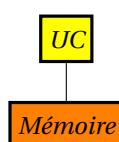


FIGURE 1 – Architecture d'un ordinateur

Il existe différentes façons de réaliser un ordinateur. Par exemple, la machine de Turing (que nous ne présenterons pas dans ce cours), représentée à la figure 2, est un modèle purement théorique d'un ordinateur.

1. L'œuvre originale, sous licence CC-BY 3.0, est de Piotrek Chuchla et est accessible à l'adresse <https://www.behance.net/gallery/5783221/Creative-Commons-poster> (accédé le 24 février 2020). Cette œuvre a elle-même été traduite et adaptée par Pascal Combemorel, sous licence CC-BY 4.0, et est accessible à l'adresse [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Poster\\_Creative\\_Commons.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Poster_Creative_Commons.svg) (accédé le 24 février 2020)

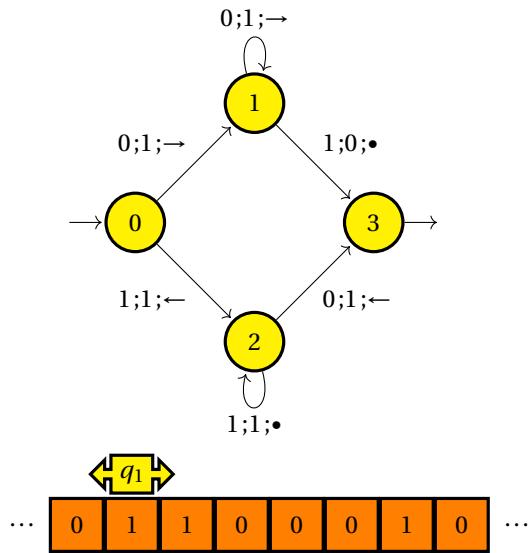


FIGURE 2 – Exemple d'une machine de Turing

Un modèle théorique d'un ordinateur est une représentation abstraite d'un ordinateur d'écrite à l'aide du langage mathématique. Dans la pratique, il n'est pas utilisé pour réaliser des programmes. Il est utilisé pour démontrer qu'un problème peut être résolu par un ordinateur. Vous pouvez consulter le livre de Pierre Wolper, *Introduction à la calculabilité* (cf. [4]), pour obtenir plus d'information sur ce sujet.

Les téléphones portables, les ordinateurs de bureaux, les ordinateurs portables, les consoles de jeux sont des exemples d'ordinateurs.

Dans les ordinateurs modernes, l'unité centrale et la mémoire sont situées dans différents endroits. L'ordinateur est aussi accompagné de nombreux *périphériques* : claviers, écrans, enceintes, afin de permettre aux utilisateurs d'interagir avec l'ordinateur. La figure 3 montre l'architecture d'un ordinateur actuel :

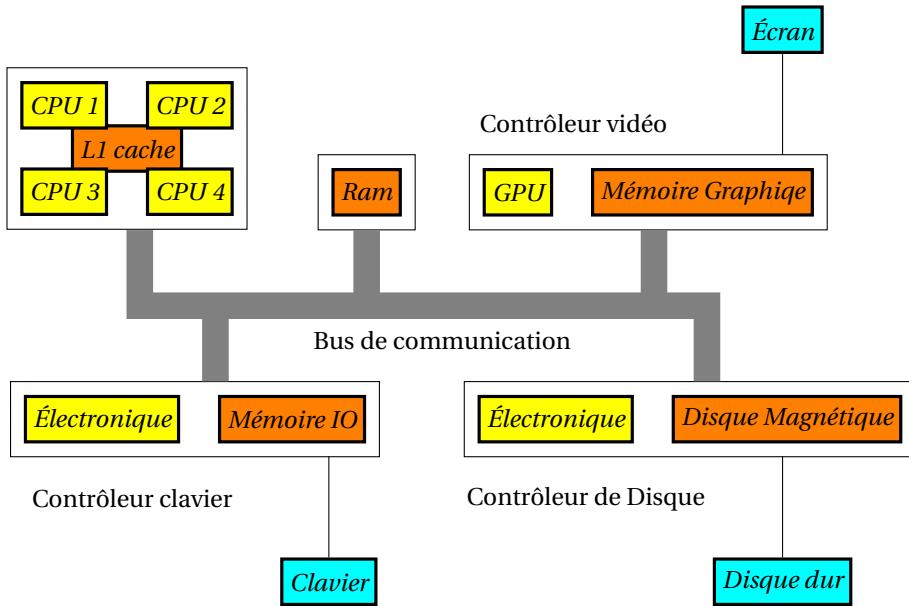


FIGURE 3 – Architecture simplifiée d'un ordinateur

Dans la figure 3, les boîtes oranges représentent la mémoire, les boîtes jaunes les unités de calculs et les boîtes bleues les périphériques. Dans un ordinateur, le système d'exploitation gère les unité de calcul et les mémoires de sorte que, pour le programmeur, tout se passe comme s'il y avait une unique mémoire et une unique unité de calcul, comme cela est présentée dans la figure 1.

Des ordinateurs, il y a en plein partout, en électronique on parle de micro-controlleur. Un exemple de micro-controlleur est le stm32F4 dont vous pouvez, juste par curiosité, trouver son architecture en tapant, dans un moteur de recherche les mots clefs suivant : stm32f4, datasheet et pdf. Vous pouvez trouver son architecture à la figure “block diagram”. Sachez que, malgré l'extrême complexité de ces documentations techniques, ces processeurs se programment en C mais aussi depuis 2015 en python : <http://micropython.org/>. Sur ce site, vous y trouverez un exemple de micro-controlleur habillé dans le plus simple appareil. ;)

## 2.2 La mémoire

La *mémoire* d'un ordinateur est une suite de 0 et de 1.

Voici à quoi ressemble un fragment de mémoire :

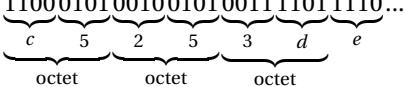
...1100010100100101001111011110...

Chaque entier de cette suite est appelé un bit (en anglais : bit). Il désigne la quantité élémentaire d'information en informatique.

Généralement, en informatique, on regroupe les bits par groupe de 8 que l'on appelle *octet* (en anglais : Byte (avec un grand B). Chaque octet est décomposé en 2 groupes de 4 bits, (0000, 0001, 0010, ..., 1111) qui est représenté par une lettre parmi 0, 1, 2, ..., 9, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, où la correspondance, appelée code hexadécimal, est donnée par :

0000 $\Rightarrow$ 0	1000 $\Rightarrow$ 8
0001 $\Rightarrow$ 1	1001 $\Rightarrow$ 9
0010 $\Rightarrow$ 2	1010 $\Rightarrow$ <i>a</i>
0011 $\Rightarrow$ 3	1011 $\Rightarrow$ <i>b</i>
0100 $\Rightarrow$ 4	1100 $\Rightarrow$ <i>c</i>
0101 $\Rightarrow$ 5	1101 $\Rightarrow$ <i>d</i>
0110 $\Rightarrow$ 6	1110 $\Rightarrow$ <i>e</i>
0111 $\Rightarrow$ 7	1111 $\Rightarrow$ <i>f</i>

Le fragment de mémoire donné précédemment ce code ainsi, en hexadécimal :

...110001010010010100111101110...  


ce qui donne :

... *c5 25 3d e* ...

On décrit les tailles des différentes mémoires à l'aide de cette unité (l'octet).

### Exercice 1

Convertissez en hexadécimal le code suivant :

0010110010100010101111100001001.

Ainsi,

- un disque dur contient généralement entre 100 Go et 400 Go;
- une clé usb contient entre 1 et 32 Go;
- une mémoire vive (RAM : Random Access Memory) contient 1 à 4 Go;
- la mémoire cache du processeur contient (1 à 4 Mo);
- la taille d'un film en définition normale est d'environ 700 Mo;
- la taille d'une musique est d'environ 3 Mo;
- les registres mémoires d'un processeur contiennent 4 ou 8 octets (32 bits ou 64 bits) selon l'architecture du processeur.

Un *registre de processeur* est un emplacement mémoire interne au processeur. Il sert à réaliser des calculs et des transferts de données. Pour donner une image (grossière), son équivalent en cuisine est le “verre de cuisine” : c'est le plus petit “récipient” disponible pour transférer et mesurer les quantités d'ingrédient à utiliser pour faire une recette.

Dans ce cours, on appellera *petit espace mémoire* un espace mémoire de la taille d'un registre de processeur. Sa taille est de 32 ou 64 bits (4 ou 8 octets) selon l'architecture.

## 2.3 Programme

On appelle programme l'ensemble des instructions qui doivent être exécutées par l'unité de calcul (processeur) de l'ordinateur.

Voici un exemple de programme écrit en Python :

```

print( "Bonjour" )
print( "L'ordinateur va compter jusqu'à 4 :" )
for i in range(4):
    print( "numero : " + str(i+1) )

```

On appelle *langage* les règles d'écritures de ces inscriptions.

Il existe beaucoup de langages :

- Le langage machine
- L'assembleur
- Le C
- Python
- Java
- etc ...

Le langage machine est un langage lisible directement par le processeur. Il est très peu compréhensible pour un humain normal.

Par exemple, voici un exemple de langage machine :

```

457f 464c 0102 0001 0000 0000 0000 0000
0002 003e 0001 0000 04c0 0040 0000 0000
0040 0000 0000 0000 1168 0000 0000 0000
0000 0000 0040 0038 0009 0040 001f 001c
0006 0000 0005 0000 0040 0000 0000 0000
0040 0040 0000 0000 0040 0040 0000 0000
01f8 0000 0000 0000 01f8 0000 0000 0000
0008 0000 0000 0000 0003 0000 0004 0000
0238 0000 0000 0000 0238 0040 0000 0000
0238 0040 0000 0000 001c 0000 0000 0000
...

```

L'assembleur et le C sont deux langages, compréhensibles par l'utilisateur, mais pas par la machine.

Voici, par exemple, le programme précédent (écrit en langage machine), mais écrit maintenant en assembleur :

```

.file "essai.c"
.section .rodata
.LC0:
.string "Bonjour"
.text
.globl main
.type main, @function
main:
.LFB0:
.cfi_startproc
pushq %rbp
.cfi_def_cfa_offset 16
.cfi_offset 6, -16
movq %rsp, %rbp
.cfi_def_cfa_register 6
movl $.LC0, %edi
call puts
movl $0, %eax
popq %rbp

```

```

.cfi_def_cfa 7, 8
ret
.cfi_endproc
.LFE0:
.size main, .-main
.ident "GCC: (GNU) 4.6.0"
.section .note.GNU-stack,"",@progbits

```

Voici, maintenant, toujours le même programme, mais écrit en C :

```

#include <stdio.h>
int main(){
    printf("Bonjour\n");
    return 0;
}

```

L'ordinateur exécute sans problèmes les instructions du tout premier programme, puisqu'il est écrit en langage machine.

Par contre, ce n'est pas le cas des deux derniers.

Pour que l'ordinateur puisse réaliser les instructions des deux derniers programmes, il faut convertir ces programmes en langage machine, avant de les exécuter. C'est à dire transformer les deux derniers pour obtenir le tout premier programme.

Pour ce faire, on utilise un compilateur. Un compilateur est un programme qui prend le code source écrit dans un langage compréhensible par un humain et le convertit intégralement en un programme écrit en langage machine, que l'on appelle généralement exécutable.

Par exemple, les développeurs d'un jeux vidéos, écrivent le jeu dans un langage donné (le C/C++ par exemple), le compile ensuite et ils diffusent aux joueurs l'exécutable (en langage machine) pour qu'il puisse démarrer le jeu et jouer.

Dans ce cours, nous allons utiliser le langage de programmation *python*.

Voici la traduction en python des programmes précédent :

```
print("Bonjour")
```

Le code python ne se compile pas, pour exécuter les instructions d'un langage écrit en python, il faut utiliser un interpréteur. Un interpréteur est un programme qui lit les instructions écrits en python, les convertit en instructions processeurs (langage machine) et fait exécuter ces instructions, à la volée au fur et à mesure de la lecture du code source.

La figure 4 résume le processus qui permet d'exécuter les instructions d'un programme par un ordinateur.

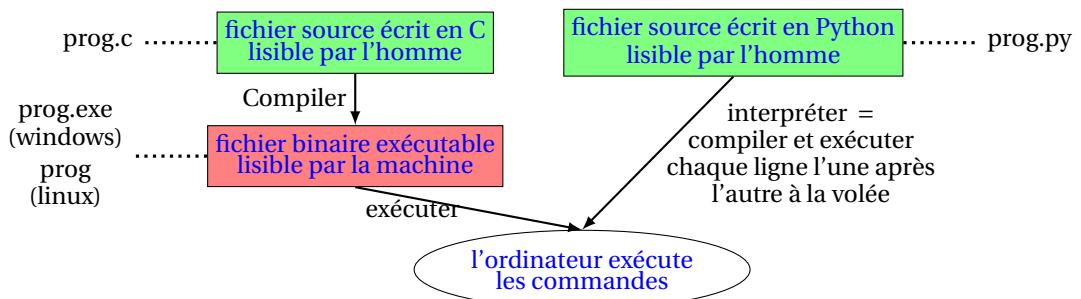


FIGURE 4 – Compilation/exécution vs interprétation d'un code source

Pour bien comprendre le processus de la figure 4, effectuez les exercices suivants :

### **Exercice 2: Compiler et exécuter un programme en C**

Créer un fichier fichier prog.c à l'aide de gedit (en texte brut - codage ASCII - sans utiliser librofice ) et contenant

```
#include <stdio.h>
int main(){
    printf("Bonjour\n");
    printf("Ceci est mon premier programme\n");
    printf("2 + 3 = %d \n", 3+2);
    return 0;
}
```

Ouvrez un terminal et compiler le programme à l'aide de la ligne de commande suivante :

```
gcc prog.c -o prog
```

Ouvrez à l'aide de gedit le programme prog obtenu. Regardez ensuite directement son code hexadécimal en tapant :

```
hexedit prog
```

Vérifiez que le code est illisible car c'est du code machine.  
Exécutez le programme en tapant en ligne de commande :

```
./prog
```

Vous venez de créer, de manière simplifiée un programme. Cette façon de procéder (en plus compliqué) est très utilisé dans la communauté des développeurs d'outils Gnu/Linux, ou dans la communauté des développeurs de jeux vidéos.

### **Exercice 3: Interpréter un programme python**

Créer un fichier fichier prog.py à l'aide de gedit (en texte brut - codage ASCII - sans utiliser librofice ) et contenant

```
print( "Bonjour" )
print( "Ceci est mon premier programme" )
print( "2 + 3 = " + str(3+2) )
```

Ouvrez un terminal et exécutez directement le script :

```
python3 prog.py
```

Vous venez de créer, de manière simplifiée un programme. Cette façon de procéder (en plus compliqué) est très utilisé dans la communauté scientifique, mais aussi en ingénierie quand il faut développer rapidement des fonctionnalités, il est aussi largement utilisé pour les administrateurs réseaux et système.

### **Exercice 4: Interraction manuelle avec ipython3**

Démarrer l'interpréteur python ipython3 en tapant la ligne de commande :

```
ipython3
```

Vous pouvez maintenant écrire et exécuter chaque ligne du programme de l'exercice ?? en les

tapant manuellement . Vous obtiendrez ceci :

```
In [1]: print( "Bonjour" )
Bonjour

In [2]: print( "Ceci est mon premier programme" )
Ceci est mon premier programme

In [3]: print( "2 + 3 = " + str(3+2) )
2 + 3 = 5
```

Essayez aussi les commandes suivantes qui sont propres à l'interpréteur ipython3 :

```
l = [3,4,5]
help(l)
l?
help(l.append)

pwd
path =_
print(path)
cd /tmp
ls
cd $path # Attention, ceci n'est pas du python, c'est spécifique à l'interpréteur ipython3
ls
```

Vous pouvez exécuter tous le programme d'un coup à l'aide de la commande :

```
%load prog.py
```

Vous pouvez modifier le programme en tapant (cela provoquera automatiquement son exécution quand vous quitterez l'éditeur)

```
%edit prog.py
```

ajouter à la fin le code :

```
var = [42, 3, 2]
```

Tapez maintenant :

```
var
```

La variable est accessible et vous pouvez maintenant la manipuler à votre guise.  
Ainsi, vous voyez qu'il n'est pas nécessaire de faire des menus, et des interfaces graphiques pour pouvoir interagir avec les calculs réalisés par un ordinateur. C'est pour cela que les langages interprétés sont très utilisés par les administrateurs systèmes ou par les scientifiques qui cherchent à faire des expérimentations calculatoires sans avoir à s'occuper de gérer une interface graphique ou une interface utilisateur.

Par exemple, utilisez ipython3 comme une super calculatrice en exécutant ipython3, puis en tapant le code suivant :

```
from math import *
sqrt(5)
resultat = pi + sqrt(3) - 2**3
resultat
```

Ambiancez-vous et essayez le code suivant, pour réaliser à quel point il est pratique d'utiliser des langages interprétés. Nous n'expliquerons pas le code réalisé, qui utilise une bibliothèque de calcul scientifique.

```
import numpy # Bibliothèque de calcul scientifique
from matplotlib import pyplot

X = numpy.arange(0, 2, 0.01) # Tableaux de réels de 0 à 2
                           # par pas de 0.01
Y1 = numpy.sqrt(X) # Attention ! X n'est pas une
                   # liste python classique !
                   # Mais un tableau numpy.
Y2 = X*X + X - 1 # Idem, X n'est pas un liste python
                  # classique ou cette opération serait
                  # illégale.
pyplot.plot(X, Y1)
pyplot.plot(X, Y2)
pyplot.show()
```

Pour finir, sachez qu'utiliser un langage interprété à un coût : les temps d'exécutions des langages interprétés sont plus longs. Ainsi un code C est généralement 1000 fois plus rapide que le même code écrit en python. Cela explique pourquoi les développeurs de gros jeux vidéos continuent à utiliser le C/C++ pour écrire leurs logiciels. En fait, la réalité est légèrement plus complexe. Les jeux sont des applications hybrides où le cœur est programmé en C/C++ pour la vitesse d'exécution et le scénario et les règles du jeu, qui ne nécessitent pas une vitesse d'exécution rapide, sont eux scriptés et écrits dans un autre langage interprété comme "Lua" ou "Python" par exemple.

## 2.4 L'algorithme

Un *algorithme* est une suite finie et non-ambiguë d'opérations ou d'instructions permettant de résoudre un problème.

Le mot algorithme vient du nom latinisé du mathématicien arabo-musulman Al-Khawarizmi, surnommé "le père de l'algèbre". Le domaine qui étudie les algorithmes est appelé l'*algorithmique*.

L'*algorithmique* est l'ensemble des règles et des techniques qui sont impliquées dans la définition et la conception d'algorithmes, c'est-à-dire de processus systématiques de résolution d'un problème permettant de décrire les étapes vers le résultat.

Les dernières avancées en recherche informatique ont rendu populaires l'utilisation d'IA générative basé sur LLM (Large Language Model) et les réseaux de neurones. Il s'agit d'algorithmes spéciaux dit algorithmes statistiques.

On peut classer les algorithmes en deux types : les algorithmes prouvés et les algorithmes statis-tiques.

Le sujet de ce cours concerne l'*algorithmique prouvé*, appelé aussi *algorithmiques classiques*. Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous allons présenter la distinction entre ces deux types d'algorithmes (A FAIRE : et discuter des conséquences méthodologiques et éthiques vis à vis de leurs usages dans le cadre ou en dehors du cadre de ce cours).

### 2.4.1 Algorithmes prouvés ou algorithmes classiques

Les algorithmes prouvés sont des algorithmes dont le comportement est explicite et dont, généralement, chacune des instructions, interprétées globalement avec les autres instructions, recouvre un domaine théorique vaste qui ne se limite pas à la compréhension de l'exécution de l'instruction. On

dit qu'un algorithme est prouvé si une preuve mathématique est fournie avec l'algorithme pour démontrer le bon fonctionnement de l'algorithme. Ces algorithmes font partie du domaine appelé "algorithmique classique".

Voici, par exemple, un algorithme prouvé qui calcule la somme des entiers de 0 à n exclu :

```
def somme(n):
    s = 0
    for i in range(0, n):
        s = s + i
    retourner s
```

C'est un algorithme prouvé car on peut fournir une preuve de son bon fonctionnement. Il suffit d'ajouter des commentaires appelés invariants correspondant à des propriétés que la mémoire de l'ordinateur doit vérifier tout au long de l'exécution et que l'on démontre mathématiquement.

A titre d'exemple, bien que cela sort du cadre du cours qui est une introduction à l'algorithmique, voici comment on prouve cet algorithme. Vous pouvez passer cet encadré en première lecture ou si vous n'êtes pas intéressé par la problématique.

On introduit 4 invariants de boucles : A, D, F et B que l'on place ainsi :

```
1 def somme(n):
2     s = 0
3     # A
4     for i in range(1, n):
5         # D(i)
6         s = s + i
7         # F(i)
8         # B
9     retourner s
```

et qui code les propriétés suivantes.

Lorsque le programme arrive à la execution du commentaire

- # A, la mémoire associé à la variable *s* contient 0;
- # D(*i*), la mémoire associé à la variable *s* contient

$$\begin{cases} 0 & \text{si } i \text{ contient 0,} \\ 0 + 1 + \dots + i - 1 & \text{sinon.} \end{cases}$$

- # F(*i*), la mémoire associé à la variable *s* contient  $0 + 1 + \dots + i$ .
- # B, la mémoire associé à la variable *s* contient  $0 + 1 + \dots + n - 1$ .

On peut procéder à une preuve mathématique de l'algorithme :

*Démonstration.* Démontrons chacun des invariants # A, # D(*i*) # F(*i*) et #B :

- Démonstration de l'invariant # A :

Entre la ligne 2 et la ligne 3, la mémoire associé à la variable *s* n'est pas modifiée. Lors de l'exécution de l'invariant, la mémoire de *s* vaut la valeur assignée en ligne 2, à savoir 0. L'invariant # A est donc vrai.

- Démonstration de l'invariant # D(*i*) et # F(*i*) par récurrence sur *i* :

→ initialisation : Si *i* = 0, *s* n'est pas modifiée entre la ligne 3 et la ligne 4. On en déduit que *s* vaut 0 et # D(0) est vrai. Entre la ligne 5, et la ligne 7, la mémoire de *s* est modifiée par l'execution de la ligne 6 qui réalise la substitution  $s \leftarrow s + i$ , c'est à dire,  $s \leftarrow 0 + 0$ . La mémoire de *s* vaut donc 0 qui est égale à  $0 + \dots + 0 = 0 + \dots + i$ . L'invariant de boucle # F(0) est donc vrai.

→ hérédité : Soit  $I$  un entier positif. Supposons que  $\# D(i)$  et  $\# F(i)$  sont vrais pour  $i=I$ , sont-ils vrais pour  $i = I + 1$  ?

On suppose que l'on a fini d'executer la boucle numéro  $I$  de la boucle for et que l'on démarre l'exécution de la boucle  $I+1$ . La mémoire associée à la variable  $i$  vaut donc  $I+1$ .

Commençons par démontrer que  $\# D(I+1)$  est vrai. Entre la ligne 7 de l'execution du corps de boucle numéro  $I$  et la ligne 5 de l'execution du corps du boucle numéro  $I + 1$ , la variable  $s$  n'est pas modifiée. Par hypothèse de récurrence on sait  $\# F(I)$  est vrai, donc à la ligne 5, quand  $i$  vaut  $I$  (boucle numéro  $I$ ), la variable  $s$  vaut  $0 + \dots + I = 0 + \dots + (I+1) - 1$ . Ainsi, à la ligne 5, quand  $i = I + 1$  (boucle numéro  $I + 1$ ),  $\# D(I+1)$  est vraie.

Démontrons maintenant  $\# F(I+1)$ . Entre la ligne 5 et la ligne 7, la variable  $s$  est uniquement modifiée par la ligne 6 qui procède à la substitution suivante :  $s \leftarrow s + i$ , c'est à dire, sachant  $\# D(I+1)$  vrai,  $s \leftarrow \underbrace{(0 + \dots + (I+1) - 1)}_{\#D(I+1) \text{ est vrai}} + \underbrace{(I+1)}_i$ . Ainsi,  $s$  vaut  $0 + 1 + \dots + I + 1$  qui est  $0 + 1 + \dots + i$ . L'invariant de boucle  $\#F(i)$  est donc vrai.

Conclusion : pour tout valeur de  $i \geq 0$ ,  $\# D(i)$  et  $\# F(i)$  sont vrais.

- Démonstration de l'invariant  $\# B$  : entre la ligne 7 de la dernière execution du corps de boucle (à savoir  $i = n - 1$ ) et la ligne 8, la variable  $s$  n'est pas modifiée. Comme  $\# F(i=I-1)$  est vrai, on en déduit qu'à la ligne 7,  $s = 0 + \dots + i = 0 + \dots + n - 1$ , qui reste vraie à la ligne 8. Ainsi, l'invarint  $\# B$  est vrai.

Le programme *somme(n)* renvoit donc la valeur de  $s$  qui vaut  $0 + 1 + \dots + n - 1$ . □

Dans cet exemple, l'algorithme est prouvé et ses instructions sont comprises localement et globalement puisque l'on calcule une somme arithmétique. On peut donc utiliser et s'appuyer sur le domaine de connaissances liés aux suites arithmétiques.

Par exemple, on sait, depuis Gauss, que :  $0 + 1 + \dots + n - 1 = \frac{(n-1) \cdot n}{2}$ . On peut donc proposer une nouvelle implémentation complètement équivalente de la fonction somme :

```
def somme(n):
    return ((n-1) * n) / 2
```

Les deux fonctions font la même choses.

On peut aussi utiliser cette fonction dans tous autres domaines scientifiques connus. Le site OEIS peut donner un liste non exausthve : <https://oeis.org/A000217> de l'aparition de cette fonction dans d'autres problématiques liées à la combinatoire. On y apprend que ces nombres sont liés à la fonction binomale qui est important en statistiques, que cette fonction peut être utilisée pour compter les arêtes d'un graphe complet non orienté, ou pour compter le nombre de façons que l'on peut couper en un ou plusieurs bouts, une chaîne avec *n* liens; etc...

Enfin, comme l'algorithme est prouvé, vous pouvez l'utiliser pour construire des programmes complexes avec l'assurance de leurs bon fonctionnement en toutes circonstances.

Le sujet de ce cours concerne les algorithmes prouvés. Si vous cherchez plus d'informations sur le sujet, vous pouvez consulter le livre de

Thomas H. CORMEN et al. *Introduction to Algorithms*. 3nd. The MIT Press, 2009,

Si vous cherchez plus d'information sur la calculabilité, une discipline qui prouve que certains problèmes ne sont pas résolubles par n'importe quel ordinateur (y compris quantique), vous pouvez lire

cet excellent livre de

Pierre WOLPER. *Introduction à la calculabilité*. 3nd. Dunod, 2006

qui présente les automates, la machine de Turing, la calculabilité et la complexité.

Le cours que vous êtes en train de lire a été écrit en utilisant le premier de Cormen et al. et d'autres que vous trouverez dans la section Références (section 13) de ce document.

#### 2.4.2 Algorithmes statistiques et apprentissage machine (machine learning)

Les algorithmes dimensionnés et vérifiés expérimentalement sont appelés algorithmes statistiques. Ces algorithmes sont conçus pour maximiser le nombre de bonnes réponses qu'ils doivent donner pour un corpus constitué de problèmes-solutions que les informaticiens appelle *jeu de données*, mais que l'on pourrait appeler, dans le langage courant, examen ou devoir.

Ces algorithmes donnent des solutions à des problèmes avec un taux d'erreur que le concepteur a essayé de minimiser mais **de ne surtout pas nullifier** ! Ce dernier point est souvent assez peu connu et peut surprendre, mais c'est lié à la nature statistique de la méthodologie utilisée, et cela peut être résumé ainsi : un algorithme statistique qui ne fait pas d'erreur est un algorithme qui a appris par cœur son jeu de donné. La probabilité qu'il continue à résoudre avec un taux de réussite similaire (c'est à dire avec un taux légèrement plus faible) est alors quasiment nulle<sup>2</sup> Il est donc impératif que l'algorithme

---

2. En fait, cette probabilité dépend du nombre de données en relation avec le nombre et la nature des paramètres du modèle à entraîner. Si le modèle possède peu de paramètres et que l'on dispose de suffisamment de données, alors le phénomène de surapprentissage ne peut pas avoir lieu, ce qui constitue une preuve (statistique) que l'algorithme ne se trompe pas. Mais cette situation n'arrive jamais car on utilise généralement des modèles avec beaucoup plus de paramètres que de données disponibles. Ainsi, si l'ensemble des paramétrisations possibles du modèle permet d'obtenir au plus  $N$  modèles paramétrisés possibles, alors on peut estimer la probabilité de ne pas surapprendre le jeu de données à l'aide de la formule  $P(\tau_g - \tau_e \leq \sqrt{\frac{\ln N - \ln v}{2 \times l}}) = 1 - v$  où  $\tau_g$  est le taux d'erreur que fera l'algorithme dans le futur,  $\tau_e$  est le taux d'erreur que l'algorithme fait avec le jeu de donnée qui a servi à l'entraînement du modèle,  $l$  est la taille du jeu de donnée et  $v$  est une probabilité entre 0 et 1. Ce résultat, qui est une conséquence de l'inégalité de Chernoff ou inégalité de Hoeffding, est tiré du livre *Statistical Learning Theory* de Vladimir N. Vapnik, 1988, John Wiley & sons, page 123, formule (4.8). Par exemple, un modèle paramétré avec 100 booléens donnera  $N = 2^{100} = 1.26 \times 10^{30}$  paramétrisations possibles. Pour une IA générative comme ChatGPT, le modèle possède 100 000 milliards de paramètres réels et si on considère naïvement qu'un paramètre réel est juste un entier codé sur 64 bits alors son nombre de paramétrisations possibles est égale à  $N = 2^{(64 \times 100000 \times 10^9)}$  ! Maintenant, si l'on veut que le taux d'erreur  $\tau_g$  diffère de celui de  $\tau_e$  d'au plus 0.1% avec une probabilité de 99.9% =  $1 - v$ , alors il faut entraîner notre modèle paramétré de 100 booléens, avec au moins  $l = \frac{\ln N - \ln v}{2 \times \max(\tau_g - \tau_e)^2} = \frac{\ln 2^{100} - \ln(1 - 99.9\%)}{2 \times (0.1\%)^2} = 38\,111\,236$  échantillons. Pour ChatGPT, notre évaluation naïve nous dit qu'il faudrait probablement  $2.2 \times 10^{19} = 22.1$  millions de téra échantillons ; à titre d'exemple, chatGPT-4 a été entraînée avec seulement 1000 To de données, qui est beaucoup plus petit que 1000 Tera échantillons ! Ainsi, rapidement, en machine learning, pour avoir des garanties de fonctionnement, il faut beaucoup trop d'échantillons.

Pour contourner ce problème, l'apprentissage se fait en deux phases. Il y a la phase d'entraînement et la phase de test avant publication de l'algorithme. Ces deux phases porteront sur deux jeux de données distincts et disjoints. On notera dans la discussion par  $\tau_e$  le taux d'erreur obtenu à l'issu de la phase d'entraînement et par  $\tau_t$  celui obtenu à la phase de test.

La phase d'entraînement essaye de trouver les meilleurs paramètres qui ne nullifient pas le taux d'erreurs mais le minimise avec des fonctions d'erreurs spécifiques (on dit qu'elles sont régulées). Comme, il n'y a pas assez d'échantillons, nullifier le taux d'erreur  $\tau_e$  obtenu à la phase d'entraînement est une promesse de mauvais résultats à la phase de test, car il y a toute les chances que  $\tau_t > \tau_e$  et que  $\tau_t - \tau_e$  s'approche de  $\sqrt{\frac{\ln N - \ln v}{2 \times l}}$  qui est trop grand. Des stratégies sont donc utilisées pour s'assurer que les bons résultats obtenus se conserveront à la phase de test. Ces stratégies empêchent de nullifier le taux d'erreur  $\tau_e$ . Une stratégie classique consiste à simuler la phase de test à venir en coupant encore le jeu de donnée d'entraînement en 2, l'un utilisé pour chercher les paramètres optimaux, l'autre, utilisé parcimonieusement, pour simuler la phase de test à venir et vérifier que l'entraînement ne surapprend pas les données.

La phase de test, quand à elle, se fait uniquement lors de la publication de l'algorithme et se charge de vérifier et garantir que le modèle entraîné produit de bons résultats. Ainsi, le nombre d'échantillons nécessaires pour garantir un taux d'erreur futur  $\tau_g$  proche de celui de  $\tau_t$  est petit et toujours constant, quelque soit le modèle à tester, car il n'y a qu'un seul modèle paramétré à tester et  $N = 1$ . En effet, si  $N = 1$  et si on tolère toujours un écart entre  $\tau_g$  et  $\tau_e$  de 0.1% avec une probabilité de 99.9% alors le nombre d'échantillons nécessaires pour la phase de test est égal à  $l = \frac{\ln 1 - \ln(1 - 99.9\%)}{2 \times (0.1\%)^2} = 3\,453\,877$  éléments. Cette valeur est toujours la même, quelque soit le modèle paramétré sélectionné pendant la phase d'entraînement. Si on tolère un écart entre  $\tau_g$  et  $\tau_t$  de 1% plutôt, ce nombre tombe à  $l = \frac{\ln 1 - \ln(1 - 99.9\%)}{2 \times (1\%)^2} = 34\,538$ , ce qui est un nombre d'échantillons plus facile à obtenir, mais qui rend l'évaluation de l'algorithme sélectionné plus incertaine vis à vis des tâches qui lui seront proposées durant son exploitation future. Au vu de cette discussion, on comprend mieux la nature statistique des algorithmes obtenus et :

— pourquoi les personnes qui travaillent en machine learning sont toujours à la recherche de plus de données représentatives

se trompe pour garantir un bon taux de réussite dans la résolution de futur nouveaux problèmes encore jamais vus. Cette méthodologie de dimensionnement des algorithmes est appelé l'apprentissage statistique, ou bien l'apprentissage machine (machine learning).

Enfin, pour terminer, l'apprentissage permet l'emploi d'algorithmes dit algorithmes en boîte noire, dont la compréhension est locale à l'instruction, et pas globale à l'ensemble des instructions du programme. Seul l'architecture du programme couvre des connaissances conséquentes, mais empiriques et non prouvés, voire arbitraires. Ainsi, l'algorithme conçu n'est quasiment jamais rattaché à des domaines de connaissances mathématiques. C'est le cas des architectures en réseaux de neurones, utilisés dans les IA génératives basée sur les LLM par exemples (misral, chatGPT, claude, etc...).

Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas de connaissances dans le domaine de l'IA générative et en machine learning, loin de là, mais cette connaissance ne se situe pas, en l'état des recherches actuelles, dans le programme final obtenu. Il se situe dans la mise en oeuvre de l'apprentissage machine et dans le choix de l'architecture utilisé pour construire la boîte noire.

L'usage en boîte noire a eut un grand succès car il permet de traiter, au prix d'un taux d'erreur non nul et plus ou moins important, des problèmes que l'on ne sait pas résoudre théoriquement et que l'on ne saura peut-être jamais résoudre.

Le machine learning est donc une avancée quand il s'agit de traiter des problématiques que les maths et l'informatique classique échouent à traiter. Cependant, il faut l'utiliser conjointement avec d'autres outils prouvés pour valider les résultats obtenus. Si on ne le fait pas, les algorithmes statistiques produisent des résultats :

- non justifiés;
- sans garantie de véracité;
- faux avec une probabilité qu'il n'est pas possible de réduire à 0, par construction.

Par exemple, la vidéo de Defekator, *L'IA fait du SALE sur ses propres recherches*, 29 min, 26/02/2025, consultable à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=GSDzr6IrCmA> (consulté le 06/11/2025) montre des exemples de résultats non justifiés et faux obtenus avec des IA génératives.

Pour fixer les idées sur le sujet, nous allons créer un algorithme statistique cherchant à calculer la somme allant de 0 à  $n$  exclu. Vous pouvez passer cet encadré en première lecture ou si vous n'êtes pas intéressé par la problématique.

On procède en 6 étapes :

1. On définit le jeu de donnée d'entraînement ("les sujets des contrôles continus");
2. On définit le jeu de donnée de test que l'on garde secret ("le sujet de l'examen final");
3. On définit la boîte noire : l'architecture de l'algorithme et ses instructions ("on sélectionne un candidat prometteur à entraîner");
4. On définit la fonction d'erreur ("le barème de notation utilisé pour évaluer le candidat avec les contrôles continus et l'examen final");
5. on applique les algorithmes d'apprentissage qui modifient les paramètres de la boîte noire afin qu'elle donne le meilleur résultat possible vis à vis du jeu de donnée d'entraînement et de sa fonction d'erreur ("on entraîne le candidat avec les devoirs en control continu muni de leurs barèmes");
6. on publie l'algo somme obtenu en fixant les paramètres de la boîte noire avec les meilleurs paramètres trouvés. On publie ensuite le taux d'erreur de l'algo à la base de donnée de

tives des tâches à réaliser;

- pourquoi, plus on demande à l'algorithme une tâche généraliste (comme les IA génératives telle que chatGPT, Mistral, etc...), plus la tâche est compliquée, plus il faut de paramètres au modèle, plus il faut de données d'entraînement et moins le résultat obtenu est fiable par manque de suffisamment de données représentatives durant la phase d'entraînement;
- pourquoi les IA génératives généralistes comme chatGPT et mistral, en l'état actuel de la recherche (novembre 2025), se trompent souvent et manquent de fiabilités car trop généralistes;
- pourquoi les IA spécialisées dans une tâche précise sont performantes mais inadaptées en dehors de leurs spécialités.

tests pour déterminer l'efficacité en condition réelle de l'algorithme ("publication du résultat de l'examen final que l'on a fait passé à notre candidat entraîné");

Usuellement, le machine learning utilise d'autres étapes supplémentaires, mais nous proposons ici une version simplifiée de la méthodologie.

#### Étape 1 : On définit le jeu de donnée d'entraînement ("les sujets des contrôles continus")

```
X_train_questions = [0, 1, 2, 3, 4, 10, 20] # n
Y_train_reponses = [0, 0, 1, 3, 6, 45, 190] # 0+1+2+...+n-1
```

#### Étape 2 : On définit le jeu de donnée de test que l'on garde secret ("le sujet de l'examen final")

```
X_test_questions = [0, 3, 11] # n
Y_test_reponses = [0, 3, 55] # 0+1+2+...+n-1
```

#### Étape 3 : On définit la boîte noire : l'architecture de l'algorithme et ses instructions ("on sélectionne un candidat prometteur à entraîner")

Pour le choix de la boîte noire, on va utiliser la formule suivante :

$$\text{int}( a \times 1 + b \times n + c \times \sqrt{n} ).$$

Il s'agit d'un réseau de neurone à une seule couche. Les entrées du réseau sont 1,  $n$  et  $\sqrt{n}$ , les paramètres sont  $a$ ,  $b$  et  $c$  et la fonction d'activation est  $\text{int}$ .

Ce réseau de neurone est dessiné sous forme de graphe à la Figure 5. Le symbole  $\Sigma$  est le symbole de sommation, il représente les + dans la formule.

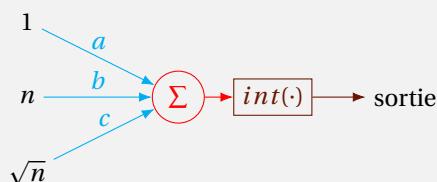


FIGURE 5 – L'architecture choisie pour la boîte noire : un réseau de neurone à une couche.

La boîte noire s'implémente donc ainsi :

```
def somme_boite_noire(n, parametres):
    a, b, c = parametres
    return int(a * 1 + b * n + c * sqrt(n))
```

En machine learning, on dit que la boîte noire à 1 entrée  $n$  et 3 paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$ .

Ici, on ne comprend pas, de manière globale, ce que fait la boîte noire. Nous savons juste ce qu'elle fait localement, calcul après calcul. Elle réalise un calcul obscur à partir des paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  que l'on va chercher à déterminer pour obtenir les meilleurs résultats possibles sur le jeu d'entraînement.

Par exemple, si, à la fin de l'apprentissage, on trouve que les meilleurs paramètres possibles sont  $.2$ ,  $.4$ ,  $.5$ , alors on publira l'algorithme `somme(n)` comme étant `somme_boite_noire(n, [.2, .4, .5])`.

#### **Étape 4 : la définition de la fonction d'erreur ("le barème de notation utilisé pour évaluer la boîte noire avec les contrôles continus et l'examen final")**

Il y a plein de façon de procéder. En voici une particulièrement naïve, qui compte le nombre de mauvaises réponses données à des questions :

```
def erreur(boite_noire, parametres, questions, reponses):
    nb_erreurs = 0
    nb_questions = len(questions)
    for i in range(nb_questions):
        if boite_noire(questions[i], parametres) != reponses[i] :
            nb_erreurs += 1
    return nb_erreurs / nb_questions # le taux d'erreur
```

Dans ce code, on donne à la fonction `erreur`, la boîte noire à évaluer, les paramètres à utiliser pour la boîte noire, les questions et les réponses du test et la fonction nous renvoie le taux d'erreur que fait la boîte noire vis à vis des questions réponses.

Par exemple, si l'on execute le programme suivant :

```
parametres_choisis = [0, 0, 0]
print(erreur(
    somme_boite_noire, parametres_choisis, X_train_questions,
    Y_train_reponses
))
```

on obtient 0.7142. En effet, si on paramètre la boîte avec 0, 0, 0, elle renvoie toujours 0, ce qui constitue, dans le jeu d'entraînement, 5 erreurs sur 7 questions. Cela représente un taux d'erreur de 71 %.

#### **Étape 5 : on réalise la phase d'apprentissage en testant plein de paramètres ("on entraîne le candidat avec les devoirs en control continu muni de leurs barèmes")**

Généralement, cette phase est réalisée par une descente de gradient. Mais comme cette discussion sort du cadre du cours, on va plutôt utiliser l'algorithme d'apprentissage naïf suivant :

```
parametres_a_posibles = [ i/10 for i in range(-50, 50)]
parametres_b_posibles = [ i/10 for i in range(-50, 50)]
parametres_c_posibles = [ i/10 for i in range(-50, 50)]

meilleur_parametres = [0, 0, 0]
meilleur_erreur = erreur(
    somme_boite_noire, meilleur_parametres, X_train_questions, Y_train_reponses
)

for a in parametres_a_posibles:
    for b in parametres_b_posibles:
        for c in parametres_c_posibles:
            err = erreur(
                somme_boite_noire, [a, b, c],
                X_train_questions, Y_train_reponses
            )
            if err < meilleur_erreur:
                meilleur_erreur = err
                meilleur_parametres = [a, b, c]

print(f"meilleur parametres : {meilleur_parametres}")
```

```
print(f"meilleur erreur : {meilleur_erreur}")
```

Cette algo passe en paramètre un grand nombre de paramètres et garde les paramètres qui permettent de minimiser le taux de mauvaises réponses sur le jeu d'entraînement. Les meilleurs paramètres obtenus sont  $[-0.9, 2.6, -1.7]$  pour un taux d'erreur de 28.5 %, soit 2 erreurs sur 7.

**Étape 6 : on publie l'algorithme somme obtenu avec son taux d'erreur sur la base de donnée de tests ("publication du résultat de l'examen final que l'on a fait passé à notre candidat entraîné")**

On construit l'algorithme final obtenu :

```
def somme(n):
    return somme_boite_noire(n, [-0.9, 2.6, -1.7])
```

On l'évalue sur le jeu test :

```
parametres_a_publier = [-0.9, 2.6, -1.7]
taux_erreur_final = erreur(
    somme_boite_noire, parametres_a_publier,
    X_test_questions, Y_test_reponses
)
print(f"taux d'erreur sur le jeu de test : {taux_erreur_final}")
```

Le taux d'erreur sur le jeu de test est de 66 %. Dans notre cas la méthode d'apprentissage et l'architecture de notre boîte noire ne permet pas d'avoir de bons résultats. La différence de taux d'erreur entre l'entraînement et le test montre qu'en fait, notre boîte noire à "appris par coeurs" via ses paramètres un certains nombres de bonnes réponses qu'elle se contente de restituer au mieux. On dit ici que l'algorithme a surappris.

Pour ce problème, on peut faire mieux!

En fait, comme ce problème admet une solution mathématique, on peut "tricher", regarder la solution trouvée dans la section 2.4.1 pour choisir une architecture de boîte noire qui admet un paramétrage qui garantie d'avoir un taux d'erreur nul (c'est le point fort des algorithmes prouvés). Je vous laisse en exercice le choix de la bonne boîte noire, qui est du coups, pour ce problème spécifique, complètement transparante (aide : il suffit juste de mieux choisir les entrées du réseau de neurone) !

Mais si, à la place de calculer une somme on cherche à reconnaître des chats sur des images, on perdra les avantages apportés par les algorithmes prouvés, car il n'existe pas encore, dans la littérature scientifique d'algorithmes pour détecter avec certitude les chats. La boîte noire risque donc d'être empirique, voir arbitraire et le résultat aura donc un taux d'erreur plus ou moins important et non nul pour éviter un surapprentissage, c'est à dire, un trop gros écart entre le résultat obtenu pendant la phase d'entraînement et celui pendant la phase de test qui préfigure sa futur exploitation en condition réelle.

Enfin, toujours pour fixer les idées, le site <https://dcato98.github.io/playground/> (consulté le 07/11/2025) montre de manière graphique l'apprentissage d'un réseau de neurones convolutionnel où vous pouvez voir les paramètres du réseau être modifiés en temps réel. Dans cet exemple, le même réseau de neurones est appliqué à chaque pixel d'une image. L'entrée du réseau de neurone est la position  $(vx, vy)$  du pixel et la sortie, la couleur du pixel codée par un réel entre -1 et 1. Le but est de déterminer si un pixel d'une image est bleu (couleur de sortie du pixel  $> 0$ ) ou orange (couleur de sortie du pixel  $< 0$ ) à partir d'un jeu de données qui contient un ensemble de pixels déjà coloriés. En bas de page, l'implémentation du réseau de neurone complet est donné et vous pouvez voir les paramètres,

codés en dur, changer en temps réel.

Si vous voulez aller plus loin dans l'étude des algorithmes statistiques, vous pouvez lire le livre de

Aurélien GÉRON. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. 3nd. O'Reilly, 2022.

Si vous voulez savoir comment fonctionne et comment se comporte les IAs Génératives, basées sur les LLMs et les Transformers (une architecture de réseau de neurones) comme ChatGPT ou Mistral, vous pouvez consulter les vidéos suivantes :

- Alexandre TL. *Les réseaux de neurones récurrents illustrés*, vidéo youtube, 7 min, 13/06/2023, <https://www.youtube.com/watch?v=1YGoH7pU3J4> (consulté le 10/11/2025).
- Alexandre TL. *Comprendre les Transformers en 10 minutes #1*, vidéo youtube, 11 min, 26/06/2023, <https://www.youtube.com/watch?v=46Xbjplgw0w> (consulté le 10/11/2025).
- Alexandre TL. *Transformets : têtes d'attention et couches #2*, vidéo youtube, 10 min, 02/07/2023, [https://www.youtube.com/watch?v=Xe---F4RGN\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=Xe---F4RGN_0) (consulté le 10/11/2025).
- Alexandre TL. *Architecture encodeur-décodeur du Transformer #3*, vidéo youtube, 16 min, 10/09/2023, <https://www.youtube.com/watch?v=1CMHkS1KT-c> (consulté le 10/11/2025).
- ScienceEtonnante. *Les 4 étapes pour entraîner un LLM*, vidéo youtube, 40 min, 25/04/2025, <https://www.youtube.com/watch?v=YcIbZGTRMjI> (consulté le 10/11/2025).
- Mr Phi. *Comment parler intelligemment d'intelligence*, vidéo youtube, 41 min, 04/07/2023, <https://www.youtube.com/watch?v=AwUpxj0DogQ> (consulté le 10/11/2025).
- Defekator. *L'IA fait du SALE sur ses propres recherches*, vidéo youtube, 29 min, 26/06/2025, <https://www.youtube.com/watch?v=GSdzc6IrCmA> (consulté le 10/11/2025).

Bon ... le sujet de ce cours concerne les algorithmes classiques. Revenons donc à nos moutons.

### 3 Le langage python

Dans ce cours, nous allons utiliser le langage de programmation Python pour étudier différentes structures algorithmiques et différents algorithmes qui sont aux fondements de la discipline.

Nous supposons que le lecteur a déjà suivi un cours de programmation de python. Si ce n'est pas le cas, le lecteur trouvera à l'annexe A une introduction en la matière.

Dans cette section, nous allons mettre en valeur quelques conseils et détails techniques qu'il faut impérativement maîtriser pour pouvoir faire les exercices et comprendre les exemples de ce cours.

#### 3.1 Utilisation de Pythontutor pour maîtriser l'utilisation de la mémoire

Il est impératif de maîtriser le fonctionnement de la mémoire et la gestion par python de celle-ci.

Pour vous aider à parfaire vos connaissances ou à les vérifier, nous vous conseillons d'utiliser le site *pythontutor* accessible à l'adresse : <http://pythontutor.com/visualize.html>.

Ce site permet d'exécuter et visualiser l'évolution de la mémoire d'un programme python simple.

#### 3.2 Variable et références

En python, une variable est le nom donné à un petit espace mémoire. Par exemple, si vous écrivez :

```
valeur = 3
```

alors, en mémoire, il sera alloué un petit espace mémoire qui aura pour nom "valeur" et dont son contenu sera le codage en binaire de 3. Utilisez PythonTutor pour vérifier cela.

La variable "valeur" est le nom d'un petit espace mémoire(de la taille d'un registre processeur)! il n'est donc pas possible de mettre deux ou trois réels dans son espace mémoire. Ainsi, si vous écrivez maintenant :

```
valeur = [3, 4, 5]
```

alors, "valeur" reste toujours le nom d'un petit espace mémoire. Mais cette fois-ci, l'espace mémoire associé à "valeur" contient la référence vers un autre objet en mémoire (qui n'est pas dans l'environnement du programme principal) beaucoup plus grand où se trouve 3 éléments consécutifs : [3, 4, 5]. Une référence contient la position dans la mémoire des données stockées. On appelle aussi cette position l'adresse en mémoire.

Utilisez PythonTutor pour vérifier cela, comment PythonTutor symbolise-t-il une adresse? La réponse est donc cette note de bas de page :<sup>3</sup>.

Ainsi, si vous écrivez :

```
valeur = [3, 4, 5]
p = valeur
p[1] = 42
print(valeur)
```

alors "p" est le nom d'un petit espace mémoire et son contenu est la copie bit à bit de l'espace ayant pour nom "valeur" à savoir une adresse : la position où se trouve la liste en mémoire.

Il est important de comprendre que vous n'avez pas copié la liste! On dit que "p" et "valeur" pointe vers la même liste. Ainsi, l'affichage obtenu sur le terminal de programme précédent donne [3, 42, 5].

Utilisez PythonTutor pour vérifier cela.

### 3.3 Passage par références

Voici un exemple d'utilisation de deux fonctions en python

```
def f(x):
    tmp = x
    tmp = 5
    print(tmp)
def g(l):
    tmp = l
    tmp[0] = 4
    print(tmp)
v = [1,2,3]
n = 4
f(n)
f(v)
g(v)
print( n )
print( v )
```

Utilisez PythonTutor pour voir comment python exécute ce code.

Lorsque l'on exécute une fonction en python, un espace mémoire spécifique est créé pour la fonction. Cet espace mémoire contient les petits espaces mémoires associées aux paramètres, et tous les petits espaces mémoires associés aux variables que vous allez créer dans le corps de la fonction.

L'initialisation des paramètres se fait par copie bit à bit du contenu du petit espace mémoire des variables qui ont été passées en paramètre à la fonction. Ainsi, quand la variable passé en paramètre

3. Il le symbolise par une flèche

contient une référence vers un objet, comme une liste par exemple, l'objet n'est pas copié, c'est l'adresse qui est copié! C'est ce qui se passe dans l'exemple précédent où la fonction `g` finit par modifier le contenu de la liste `v` en utilisant la référence passée en paramètre.

Si vous voulez faire une copie, dite copie profonde, des paramètres, vous devez utiliser la bibliothèque `copy` de la façon suivante :

```
from copy import deepcopy

def g(l):
    tmp = deepcopy(l)
    tmp[0] = 4
    print(tmp)
v = [1,2,3]
g(v)
print(v)
```

Testez le programme précédent avec PythonTutor .

### 3.4 Exercice

#### Exercice 5

Pour chacun des programmes suivant, vous essayerez de prévoir l'exécution du programme et vous essayerez de dessiner la mémoire de la même manière que PythonTutor la dessine. Vous ferez cela SANS utiliser PythonTutor .

Une fois fait, vous vérifierez le résultat obtenu en utilisant PythonTutor .

**Methodologie :** Il est TRÈS important de n'exécuter PythonTutor , qu'une fois les dessins de la mémoire et la prévision d'exécution faite. Prenez le temps de donner une réponse qui soit complètement logique et TOUJOURS reproductible. Cette étape est importante, car, en cas d'échec, vous pourrez faire une introspection sur votre raisonnement et comprendre pourquoi vous vous êtes trompé. Si vous ne faites pas cela, alors, l'introspection ne sera pas possible et vous n'aurez aucune possibilité pour corriger vos erreurs de raisonnement que vous conserverez.

Voici les programmes à analyser.

Programme 1 :

```
r = [1,2,3]
p = r
p[0] = 30
print(r)
print(p)
```

Programme 2 :

```
r = 1
p = r
p = 30
print(r)
print(p)
```

Programme 3 :

```
r = [[1,2,3], [4,5,6], [7,8,9]]  
p = r[0]  
print( r )  
print( p )  
r[0][2] = 42  
p[0] = 22  
print( r )  
print( p )
```

Programme 4 :

```
r = [1, 2, 3]  
p = r[0]  
print( r )  
print( p )  
r[0] = 42  
p = 22  
print( r )  
print( p )
```

Programme 5 :

```
r = [1, 2, 3]  
def f(x):  
    x = 42  
    print(x)  
f(r)  
print(r)
```

Programme 6 :

```
r = [1, 2, 3]  
def f(r):  
    r = 42  
    print(r)  
f(r)  
print(r)
```

Programme 7 :

```
r = [1, 2, 3]  
def f(x):  
    x[0] = 42  
    print(x)  
f(r)  
print(r)
```

Programme 8 :

```
r = [1, 2, 3]  
def f(r):  
    r[0] = 42  
    print(r)  
f(r)  
print(r)
```

Programme 9 :

```
r = 1  
def f(x):  
    x = 42  
    print(x)  
f(r)  
print(r)
```

Programme 10 :

```
r = 1  
def f(r):  
    r = 42  
    print(r)  
f(r)  
print(r)
```

Programme 11 :

```
r = [[1, 2, 3], 4]  
def g(r):  
    r[0] = 42  
    print(r)  
def f(r):  
    r[1] = r[0]  
    g(r[0])  
f(r)  
print(r)
```

Programme 12 :

```
r = [[1, 2, 3], 4]  
def g(r):  
    r[0] = 42  
    print(r)  
def f(r):  
    r[1] = r[0]  
    g(r)  
f(r)  
print(r)
```

Programme 13 :

```
r = []
for i in range(3):
    r.append([1, 2, 3])
print(r)
r[0][0] = 42
print(r)
```

Programme 14 :

```
r = []
g = [1, 2, 3]
for i in range(3):
    r.append(g)
print(g)
print(r)
r[0][0] = 42
print(g)
print(r)
```

Programme 15 :

```
from copy import deepcopy
r = []
g = [1, 2, 3]
for i in range(3):
    r.append(deepcopy(g))
print(g)
print(r)
r[0][0] = 42
print(g)
print(r)
```

Programme 16 :

```
r = [[1, 2, 3] for i in range(3)]
print(r)
r[0][0] = 42
print(r)
```

Programme 17 :

```
g = [1, 2, 3]
r = [g for i in range(3)]
print(g)
print(r)
r[0][0] = 42
print(g)
print(r)
```

Programme 18 :

```
from copy import deepcopy
g = [1, 2, 3]
r = [deepcopy(g) for i in range(3)]
print(g)
print(r)
r[0][0] = 42
print(g)
print(r)
```

Programme 19 :

```
r = [1, 2, 3]
def f(t):
    t[0] = 42
    return t
g = f(r)
print(r)
print(g)
g[1] = 100
print(r)
print(g)
```

Programme 20 :

```
from copy import deepcopy
r = [1, 2, 3]
def f(t):
    t[0] = 42
    return deepcopy(t)
g = f(r)
print(r)
print(g)
g[1] = 100
print(r)
print(g)
```

Programme 21 :

```
from copy import deepcopy
r = [1, 2, 3]
def f(t):
    t = deepcopy(t)
    t[0] = 42
    return t
g = f(r)
print(r)
print(g)
g[1] = 100
print(r)
print(g)
```

### Exercice 6: DIFFICILE - A faire en fin de séance

Construire, en python, une structure de donnée  $l$ , utilisant des listes uniquement, telle que l'on puisse écrire :

$$l \underbrace{[0][0][0][0][0] \dots [0]}_{n \text{ fois}} [1]$$

où  $n$  est arbitraire (c'est à dire que  $n$  n'est pas donné par l'utilisateur à l'avance), sans produire d'erreur à l'exécution!

Le code ressemblera donc à :

VOTRE CODE

```
print(l[0][0][0][0][0][0][0][1]) # Le nombre de 0 peut changer à la convenance de l'utilisateur.
```

## 4 Interface et bibliothèque

### 4.1 Bibliothèque

En informatique, il existe de nombreuses bibliothèques. Il s'agit d'un ensemble de fichiers contenant le code de nombreuses fonctions.

Les bibliothèques sont utiles, car elles permettent à leurs utilisateurs de ne pas réimplémenter des outils déjà existants. On a déjà vu précédemment, les bibliothèques : copy, math, numpy et matplotlib.

En Python, tout fichier est une bibliothèque qu'il est possible d'importer.

Par exemple, si vous créez le fichier `mathematiques.py`, contenant :

```
def somme(x,y):
    """
    Retourne la somme de deux entiers

    x : float
        Le premier terme de la somme
    y : float
        Le deuxième terme de la somme
    return : float
    """
    return float(x+y)

def produit(x,y):
    """
    Retourne la produit de deux réels

    x : float
        Le premier réel de la somme
    y : float
        Le deuxième réel de la somme
    return : float
    """
    return float(x*y)
```

Alors, dans une autre programme, que vous nommerez `test.py`, vous pouvez importer les fonctions de cette bibliothèque en tapant :

```
import mathematiques as tools

a = tools.somme(3,2)
print(a)
b = tools.produit(3,2)
print(b)
```

### 4.2 Prototypes et implémentations multiples

On appelle API (Application Programming Interface) d'une bibliothèque, la définition des différentes fonctions qui la compose ainsi que la description de leurs fonctionnalités.

Par exemple, la bibliothèque précédente a pour API :

```
def somme(x,y):
    """
    Retourne la somme de deux entiers
```

```

x : float
    Le premier terme de la somme
y : float
    Le deuxième terme de la somme
return : float
"""
return NotImplemented

def produit(x,y):
"""
Retourne la produit de deux réels

x : float
    Le premier terme de la somme
y : float
    Le deuxième terme de la somme
return : float
"""
return NotImplemented

```

A partir d'une API, on peut proposer plusieurs implémentation d'une bibliothèque.  
Par exemple, la bibliothèque `gogogadgeto.py` suivante, implémente le même prototype que `mathematique.py`

```

def somme(x,y):
"""
Retourne la somme de deux réels

x : float
    Le premier terme de la somme
y : float
    Le deuxième terme de la somme
return : float
"""
return float(x+1+y-1)

def produit(x,y):
"""
Retourne la produit de deux réels

x : float
    Le premier réel de la somme
y : float
    Le deuxième réel de la somme
return : float
"""
return float(x*2*y/2)

```

L'intérêt d'avoir recours à plusieurs implémentation de bibliothèque, c'est que l'on peut, dans un programme, passer d'une implémentation à une autre en changeant une seule ligne de code. Par exemple, le programme suivant :

```

import gogogadgeto as tools

a = tools.somme(3,2)

```

```

print(a)
b = tools.produit(3,2)
print(b)

```

donne le même résultat que celui utilisant la bibliothèque mathématique.

En informatique nous utilisons les bibliothèques car cela permet de factoriser le code, de tester facilement l'efficacité de différentes implémentations, d'utiliser différentes implémentations selon différents contextes.

Une bibliothèque est correctement utilisée et correctement implémentée, si l'on peut la remplacer par une autre qui implémente le même prototype sans changer le fonctionnement du programme.

Par exemple, voici une bibliothèque `titine.py` :

```

def creer_vehicule(nb_roues):
    """
    retourne un véhicule avec un nombre de roues donné

    nb_roues : int
        le nombre de roues du véhicule
    """

    return {"nb_roues": nb_roues}

def nb_roues(vehicule):
    """
    renvoie le nombre de roues d'un véhicule donné

    return : int
    """

    return voiture["nb_roues"]

```

et voici une mauvaise utilisation de la bibliothèque `titine.py` :

```

import titine as véhicule

voiture = véhicule.creer_vehicule(4)
print( "Le véhicule a " + str(voiture["nb_roues"]) + " roues. " )

```

En effet, si, à la place de `titine.py`, on utilise l'implémentation `auto.py` suivante :

```

def creer_vehicule(nb_roues):
    """
    retourne un véhicule avec un nombre de roues données

    nb_roues : int
        le nombre de roues du véhicule
    """

    return [nb_roues]

def nb_roues(vehicule):
    """
    renvoie le nombre de roues d'un véhicule donné

    return : int
    """

    return voiture[0]

```

Alors le programme que l'on a écrit devient :

```

import auto as véhicule

```

```

voiture = vehicule.creer_vehicule(4)
print( voiture["nb_roues"] )

```

et il ne fonctionne plus! Une bonne utilisation de ces deux bibliothèques consiste à utiliser uniquement les fonctions proposées par leur API. On obtient alors le programme suivant :

```

import auto as vehicule

voiture = vehicule.creer_vehicule(4)
print( vehicule.nb_roues(voiture) )

```

Dans ce cas, que vous utilisez `titine.py` ou `auto.py`, le programme continue de fonctionner, alors que vous n'avez changé qu'une seule ligne de code.

L'algorithmique, c'est l'étude des structures de donnée et de leurs algorithmes associés. Nous allons tout au long de ce cours, définir de nouvelles structure de donnée et de nouvelles façon de les utiliser en proposant à chaque fois des prototypes de fonction (dans des API) qui vont décrire des fonctionnalités et des concepts informatiques pour résoudre des problèmes génériques.

Pour cela, on implémentera tous ces algorithmes et structures dans des bibliothèques où les fonctions pourront être étudiés et comparés ensemble, tout comme l'on a comparé `titine.py` et `auto.py` à l'aide du programme `test.py`.

## 5 Pile et File

### 5.1 Les piles (LIFO)

Imaginons la manipulation d'un tube de comprimés. Le tube est opaque et il n'est pas possible de voir son contenu. Le tube contient plusieurs comprimés numérotés portant éventuellement le même numéro. Lorsque l'on manipule le tube et ses comprimés, seulement deux opérations sont possibles :

- ajouter un comprimé dans le tube en le plaçant sur le dessus de la pile de comprimés déjà présents ;
- retirer le comprimé situé sur le dessus de la pile.

Il n'est pas possible de faire d'autres opérations. Par exemple, il n'est pas possible d'inspecter un comprimé situé à l'intérieur du tube car il est inaccessible. Si l'on veut accéder à ce comprimé, pour connaître son numéro, il faut d'abord dépiler tous les comprimés situés juste au dessus de lui, puis retirer le comprimé recherché pour l'inspecter.

En programmation, des structures de données qui se comportent comme des tubes de comprimés existent. On les appelle des piles (stack en anglais). Voici comment elles sont formellement définies.

Les *piles*  $P$  sont des structures de données contenant des éléments qui peuvent apparaître en plusieurs exemplaires et possédant 2 opérations :

- `empiler(P, e)` qui ajoute l'élément  $e$  dans  $P$  ;
- `depiler(P)` qui enlève et renvoie un élément de la pile  $P$  ;

et qui vérifient la propriété suivante : si un élément  $e$  est ajouté avant l'élément  $f$  alors l'élément  $e$  sera enlevé après  $f$ .

Les piles sont aussi appelées *LIFO*, pour "Last In First Out", c'est à dire en français, Dernier Entré Premier Sorti.

Par exemple, dans la figure 6, on montre l'exemple d'utilisation d'une pile où l'on empile et dépile plusieurs éléments.

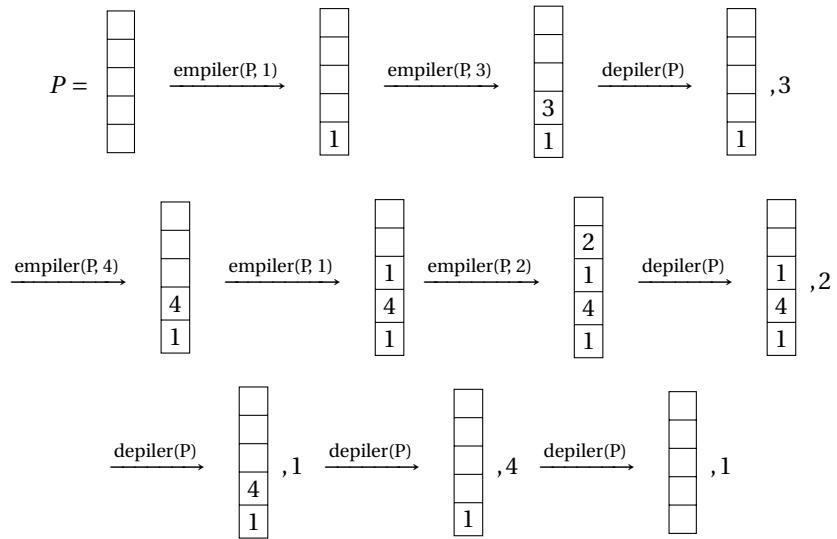


FIGURE 6 – Un exemple de manipulation d'une pile

Une API possible pour les piles est la suivante :

```
def creer_pile():
    """
    Retourne une pile vide
    """
    return NotImplemented

def empiler( p, e ):
    """
    Ajoute l'élément `e` dans la pile `p`.

    p : une pile
    e : un élément
    """
    raise NotImplementedError()

def depiler( p ):
    """
    Retire le dernier élément de la pile `p` et le renvoie.

    p : une pile
    e : un élément
    """
    return NotImplemented
```

Voici une implémentation possible de cette API :

```
def creer_pile():
    return []

def empiler( p, e ):
    p.append( e )
```

```
def depiler( p ):
    return p.pop()
```

L'utilisation de la méthode `pop()` n'est pas rapide dans python. Son temps d'exécution est proportionnel au nombre d'éléments dans la liste. Ce n'est pas le cas de l'opération `append()` qui a un temps d'exécution constant quelque soit la taille de la pile (cf. la documentation <https://wiki.python.org/moin/TimeComplexity>).

En effet, en python, les listes sont des tableaux et nous verrons plus tard, que cela implique les complexités présentées ci-dessus.

Si l'on veut implémenter une pile dont toutes les opérations sont en temps constant, il faut utiliser la classe `deque` du module `collections` :

```
import collections

def creer_pile():
    return collections.deque()

def empiler( p, e ):
    p.append( e )

def depiler( p ):
    return p.pop()
```

Généralement, les API fournissent une fonction complémentaire qui permet d'obtenir la taille de la pile, c'est à dire le nombre d'éléments contenus dans la pile.

Voici un exemple, d'API complémentaire :

```
def taille_pile( p ):
    """
    Retourne la taille de la pile passée en paramètre.
    """
    return NotImplemented
```

Cette API s'implémente généralement ainsi :

```
def taille_pile( p ):
    return len(p)
```

Cette fonction (bien que très utile et toujours présente dans les bibliothèques) n'est pas requise pour définir une pile. Nous verrons, dans un des exercices proposés dans la feuille de TD, que l'on peut se passer de cette fonction.

## 5.2 Les files (FIFO)

Imaginons un distributeur de gobelets. Le distributeur de gobelets est constitué d'un cylindre opaque, ouvert en haut et en bas, avec un système en bas qui retient les gobelets pour qu'ils ne tombent pas. On remplit le distributeur par le haut et les personnes qui souhaitent un gobelet pour boire, retire les gobelets par le bas. Les gobelets sont numérotés et peuvent partager des numéros identiques. Lorsque l'on manipule le distributeur de gobelets, seulement deux opérations sont possibles :

- ajouter un gobelet dans le tube en le plaçant sur le dessus du cylindre, par dessus les gobelets déjà présents dans le distributeur;
- retirer le gobelet situé en bas du distributeur, en dessous de tous les gobelets déjà présents dans le distributeur.

Il n'est pas possible de faire d'autres opérations. Par exemple, il n'est pas possible d'inspecter un gobelet situé à l'intérieur du cylindre car il est opaque et le gobelet inaccessible. Si l'on veut accéder à ce gobelet, pour connaître son numéro, il faut d'abord retirer tous les gobelets situés juste au dessous de lui, puis retirer le gobelet recherché pour l'inspecter.

En programmation, des structures de données qui se comportent comme des distributeurs de gobelets existent. On les appelle des files (queue en anglais). On tire son nom des files d'attentes, où la première personne qui sort de la file d'attente est la première à y être entrée. Voici comment on définit formellement les files.

Les *files F* sont des structures de données contenant des éléments qui peuvent apparaître en plusieurs exemplaires et possédant 2 opérations :

- `enfiler(F, e)` qui ajoute l'élément  $e$  dans  $F$ ;
- `defiler(F)` qui enlève un élément de la file  $F$ ;

et qui vérifient la propriété suivante : si un élément  $e$  est ajouté avant l'élément  $f$  alors l'élément  $e$  sera enlevé avant  $f$ .

Les files sont aussi appelées *FIFO*, pour "First In First Out", c'est à dire en français, Premier Entré Premier Sorti.

Par exemple, dans la figure 7, on montre l'exemple d'utilisation d'une file où l'on enfile et défile plusieurs éléments.

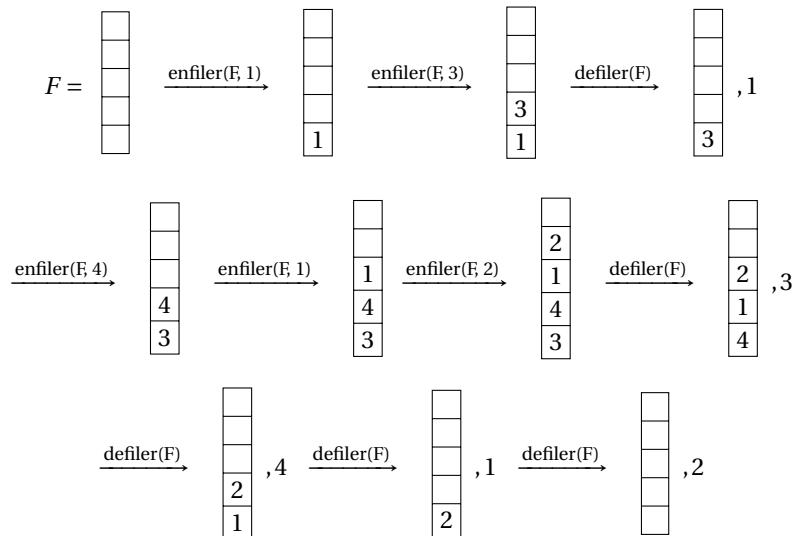


FIGURE 7 – Un exemple de manipulation d'une file

On est évidemment pas obligé de décaller tous les éléments de la file à chaque fois que l'on retire un élément (comme pour le distributeur de gobelet). On obtiendrait alors la figure 8.

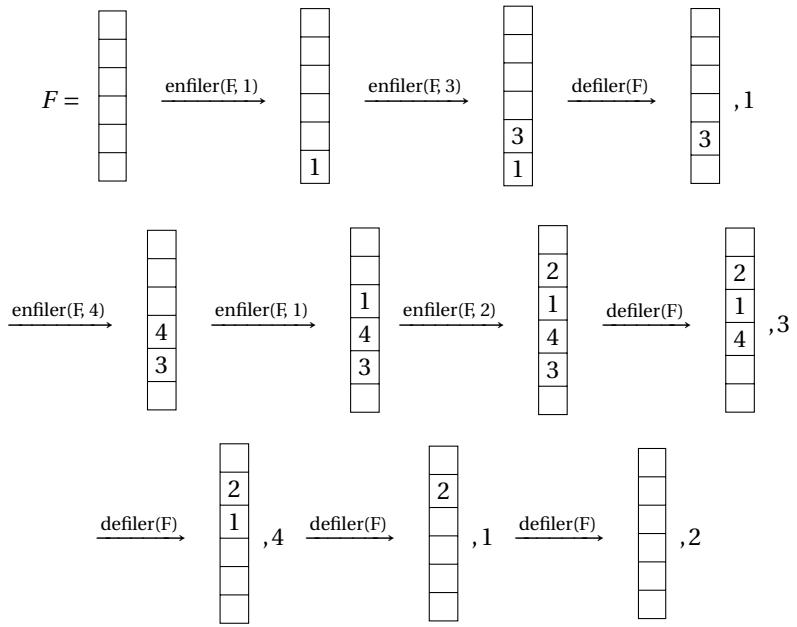


FIGURE 8 – Un exemple de manipulation en place des éléments d'une file

Une API possible pour les files est la suivante :

```

def creer_file():
    """
    Retourne une file vide
    """
    return NotImplemented

def enfiler( f, e ):
    """
    Ajoute l'élément `e` dans la file `f`.

    f: une file
    e : un element
    """
    raise NotImplemented

def defiler( f ):
    """
    Retire le dernier élément de la file `f` et le renvoie.

    f: une file
    e : un element
    """
    return NotImplemented

```

Voici une implémentation possible des files :

```

def creer_file():
    return []

```

```

def enfiler( f, e ):
    f.append( e )

def defiler( f ):
    return f.pop(0)

```

Nous avons vu dans la section précédente que l'utilisation de la méthode `pop()` n'est pas rapide en python (cf. la documentation <https://wiki.python.org/moin/TimeComplexity>).

Ainsi, si les exécutions de `creer_file()` et `enfiler(file, element)` se font en temps constants, ce n'est pas le cas de `defiler(file)` dont le temps d'exécution est proportionnel à la taille de la file.

Si on veut implémenter une file dont toutes les opérations sont garanties en temps constant, il faut utiliser le module `deque`:

```

import collections

def creer_file():
    return collections.deque()

def enfiler( f, e ):
    f.append( e )

def defiler( f ):
    return f.popleft()

```

Généralement, les API fournissent une fonction complémentaire qui permet d'obtenir la taille de la file, c'est à dire le nombre d'éléments contenus dans la file.

Voici un exemple, d'API complémentaire :

```

def taille_file( f ):
    """
    Retourne la taille de la file passée en paramètre.
    """
    return NotImplemented

```

Cette API s'implémente généralement ainsi :

```

def taille_file( f ):
    return len(f)

```

Cette fonction (bien que très utile et toujours présente dans les bibliothèques) n'est pas requise pour définir une file. Nous verrons, dans un des exercices proposés dans la feuille de TD, que l'on peut se passer de cette fonction.

## 6 La récursivité

### 6.1 La pile d'exécution

Dans un programme, à chaque exécution d'une fonction, le contenu des variables locales, le contenu des paramètres de la fonction, et la ligne d'exécution du code sont enregistrés dans une zone de la mémoire particulière. Cette zone de la mémoire est appelée la pile d'exécution.

La pile d'exécution est commune et unique à tout le programme.

Au début du programme, la ligne courante d'exécution ainsi que les variables du programmes sont empilés dans la pile.

Ensuite, au cours de l'exécution du programme, à chaque exécution d'une fonction  $f$ , les variables locales, la ligne courante d'exécution dans  $f$ , ainsi que les paramètres sont empilés dans la pile. L'exécution du programme continue donc à partir de la ligne courante de  $f$  qui a été initialisée à la première

ligne de  $f$ . Lorsque la fonction  $f$  se termine, toutes les données empilées par  $f$  sont dépilerées et perdues. Seule la valeur de retour est gardée en mémoire. Dans certains langages, cette valeur de retour est empilée dans la pile. L'exécution du programme continue alors à la ligne courante d'exécution de la fonction située en haut de la pile. Cela correspond à la dernière fonction appelée durant l'exécution du programme.

Par exemple, lorsque l'on exécute le programme suivant :

```

1 def g( a );
2     print("g(" + str(a) + ")")
3     return 1000
4
5 def h( a );
6     print("h(" + str(a) + ")")
7     return 2000
8
9 def f( a ):
10    print("f(" + str(a) + ")")
11    v = g(a+1)
12    print( v )
13    v = h(a+2)
14    print( v )
15
16 f( 1 )
17 print("fin")

```

on obtient sur le terminal, le résultat suivant :

```

f(1)
g(2)
1000
h(3)
2000
fin

```

Nous allons décrire pas à pas ce qui se passe dans la pile d'exécution.

Le programme commence à la ligne 1 et la pile d'exécution ressemble alors à :

/		ligne 1
---	--	---------

Lorsque le programme arrive à la ligne 16, la fonction  $f$  est exécutée : un espace mémoire est créé pour la fonction  $f$  et ces données sont empilées sur la pile d'exécution. La variable locale  $a$  est initialisée à l'aide de la valeur passée en paramètre, c'est à dire 1. L'entier 1 est alors enregistré dans le petit espace mémoire nommé  $a$  associé à l'espace mémoire de  $f$  dans la pile. A ce moment, la pile est alors égal à :


À ce stade, l'exécution du programme principal (symbolisé par /) est interrompu à la ligne 16 et attend, pour reprendre son activité, la fin d'exécution de toutes les fonctions empilées au dessus de lui. Reprenons le cours d'exécution du programme : la fonction  $f$  commence à s'exécuter à partir de la ligne 10.

La fonction  $f$  s'exécute jusqu'à la ligne 11. À ce moment là, son exécution est aussi interrompue pour exécuter, cette fois-ci, la fonction  $g$ . Un espace mémoire est créé pour  $g$  et cet espace est empilé sur la pile d'exécution. La pile devient alors égal à :

<b>g</b>	2 (a)
	ligne 2
<b>f</b>	? (v)
	1 (a)
	ligne 11
/	ligne 16

À ce stade, la variable  $v$  de l'espace mémoire associé à  $f$  contient une valeur inconnue. En effet, il faut attendre la valeur de retour de  $g$  pour modifier  $v$ .

La fonction  $g$  s'exécute ainsi jusqu'à ce qu'elle se termine. A la fin de son exécution, l'espace mémoire de  $g$  est défilé et perdue. Seule la valeur de retour, qui vaut 1000 est empilée sur le dessus de la pile.

On obtient la pile suivante :

<b>f</b>	1000 ( g(2) )
	? (v)
	1 (a)
	ligne 11
/	ligne 16

Cette valeur de retour est alors de suite enregistrée dans  $v$ . On obtient la pile suivante :

<b>f</b>	1000 (v)
	1 (a)
	ligne 11
/	ligne 16

L'exécution de  $f$  reprend donc à la ligne spécifiée dans la pile, c'est à dire à la ligne 11.  
Et ainsi de suite ...

La figure 9 contient l'évolution complète de la pile d'exécution pour tout le programme.

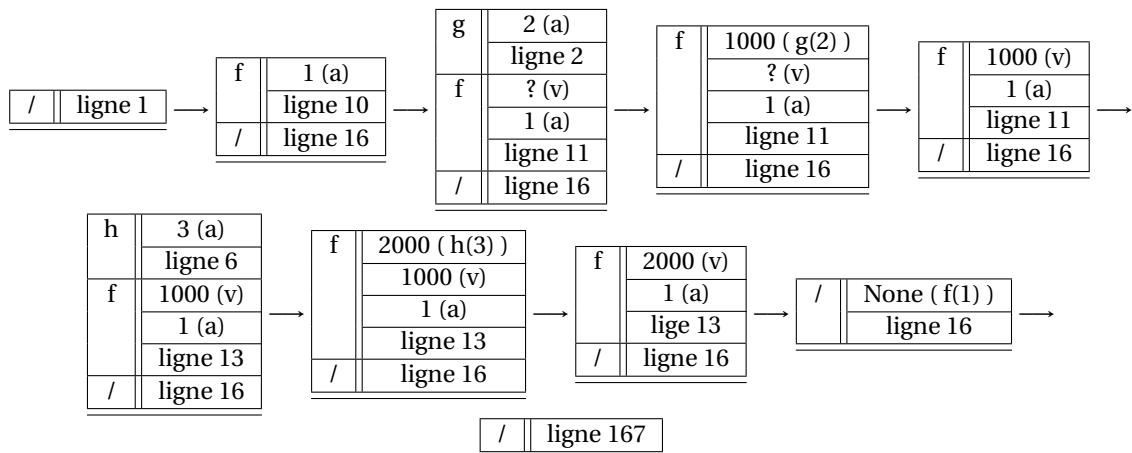


FIGURE 9 – Évolution de la pile d'exécution d'un programme

### Exercice 7

Dessiner l'évolution de la pile d'exécution du programme suivant :

```
1  def prog1(var):
2      g = var - 1
```

```

3   return g
4
5 def prog2(var):
6     g = prog1(2*var)
7     r = g + prog1(var+1)
8     return r
9
10 b = 5
11 prog2(b)

```

Sous python, il est possible d'inspecter la pile avec le module `inspect`. Voici un programme python :

```

1 import inspect
2
3 def f( a, b ):
4     g(a+1, b+1)
5
6 def g( c, d ):
7     print( "La pile est : " )
8     print( inspect.stack() )
9     print( "" )
10
11    print( "Les données de la fonction située en haut de la pile sont : " )
12    print( inspect.stack()[0] )
13    print( "" )
14
15    print( "Les variables de la fonction située en haut de pile sont : " )
16    print( inspect.getargvalues( inspect.stack()[0][0] ) )
17
18 f( 1, 2 )

```

A l'exécution de ce programme, on obtient le résultat suivant :

```

1 La pile est :
2 [
3     (<frame object at 0x7f59363a6938>, 'prog.py', 8, 'g', [' print(inspect.stack())\n'], 0),
4     (<frame object at 0x7f59363a93f0>, 'ptog.py', 4, 'f', [' g(a+1, b+1)\n'], 0),
5     (<frame object at 0x7f59364f6050>, 'porg.py', 18, '<module>', ['f( 1, 2 )\n'], 0)
6 ]
7
8 Les données de la fonction située en haut de la pile sont :
9 (<frame object at 0x7f59363a6938>, 'prog.py', 12, 'g', [' print(inspect.stack()[0])\n'], 0)
10
11 Les variables de la fonction située en haut de pile sont :
12 ArgInfo(args=['c', 'd'], varargs=None, keywords=None, locals={'c': 2, 'd': 3})

```

### Exercice 8

1. En analysant le texte écrit sur le terminal, repérer la ligne d'exécution courante du programme principal, de *f* et de *g*.
2. Sans regarder le code, quels sont les variables locales de *g* et leurs valeurs au moment où le texte a été affiché sur le terminal?

Généralement, on inspecte la pile pour débuguer les programmes. On utilise alors plutôt la bibliothèque `traceback` qui est plus simple à manipuler et contient des routines d'affichage. Par exemple, voici une petite fonction très utile pour débugger rapidement vos programmes. Vous pouvez dès à présent l'inclure systématiquement dans tous vos projets sous forme d'une bibliothèque `debug_tool.py` à importer :

```

1 import traceback, sys, os
2 debug_mode = True
3 output_print = sys.stderr
4 #output_print = sys.stdout
5 complete_filename_path = False
6
7 def dprint(object_to_print="", print_stack=False, file=output_print):
8     if not debug_mode:
9         return
10    text = str(object_to_print)
11    stack = traceback.extract_stack()
12    frame = stack [-2]
13    if complete_filename_path:
14        file_name = frame.filename
15    else:
16        file_name = os.path.basename(frame.filename)
17    print(f"D {text} -- line : {frame.lineno}, fct: {frame.name}, file : {file_name}", file=file)
18    if print_stack:
19        print(f"D Stack :", file=file)
20        print(f"=====", file=file)
21        traceback.print_stack(file=file)
22        print(f"=====", file=file)
23        print(f"D End of stack", file=file)

```

### Exercice 9

1. Analysez la fonction `dprint` présenté ci-dessus. Que fait-elle? Expliquez chacune de ses lignes.
2. Reprenez le programme de l'exercice 7 et utilisez la fonction `dprint` précédente pour afficher le contenu de `g` dans `prog1` et dans `prog2`. Vous le ferez sans afficher la pile d'exécution, puis en l'affichant.
3. Y-a-t-il un intérêt à utiliser `dprint` sans argument?

On rappelle que sous linux, en ligne de commande, il est possible de rediriger le flux standard de sortie (`stdout`) et le flux standard d'erreur (`stderr`) d'un programme ainsi :

```

python3 my_prog.py > stdout.log
python3 my_prog.py 2> stderr.log
python3 my_prog.py &> stdout_and_stderr.log
python3 my_prog.py > stdout.log 2> /dev/null
python3 my_prog.py > /dev/null 2> stderr.log
python3 my_prog.py &> /dev/null

```

où `\dev\null` est le fichier trou-noir qui est toujours vide quelque soit ce qui est mis dedans.

Pour finir, rappelez-vous que les listes, les chaînes de caractères et les instances d'objet, ne sont pas stockés dans la pile, mais ailleurs dans la mémoire. Ce qui est stocké dans la pile, ce sont les variables, c'est à dire des petits espaces mémoires qui contiennent des références vers ces gros objets.

Ainsi, quand une fonction termine son exécution, si les variables de son espace mémoire sont dépi-lés et détruites, ce n'est pas le cas de ces gros objets créés qui subsistent tant qu'une variable ou une structure de données garde une référence vers eux.

### Exercice 10

Qu'affiche le programme suivant? Dessiner l'évolution de sa pile d'exécution ainsi que de la mémoire du programme.

```

1 def prog1(v):
2     v[2] = [5,6]
3     return v[0]
4
5 def prog2(var):
6     var[0] = [4,5]
7     g = prog1(var)
8     var[1] = g
9
10 li = [1,2,3]
11 prog2(li)
12 print(li)

```

Les langages de programmation qui utilisent des fonctions utilisent généralement une pile d'exécution pour organiser la mémoire associée à l'exécution de ses fonctions. C'est le cas, par exemple, du langage C. La structure de la mémoire d'un langage en C est donnée à la figure 10.

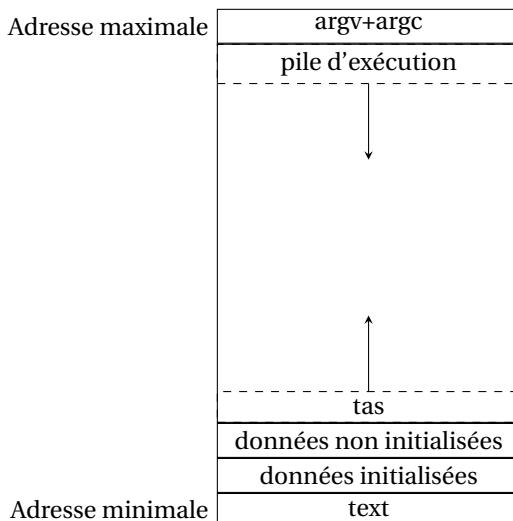


FIGURE 10 – Gestion de la mémoire en C.

On retrouve dans cette figure la pile d'exécution, mais aussi le tas. Le tas c'est la zone mémoire où les gros objets (listes, certains types de chaînes de caractères, etc...) sont stockés en mémoires.

## 6.2 La récursivité

On dit qu'une fonction  $f$  est récursive, si, durant l'exécution de  $f$ , la fonction  $f$  est de nouveau appelée.

Autrement dit, la fonction  $f$  est récursive, si au cours de l'exécution du programme, la fonction  $f$  apparaît au moins 2 fois en même temps dans la pile d'exécution.

Voici un exemple de programme récursif qui permet de calculer  $\text{factoriel}(n) = 1 \times 2 \times \dots \times n$ . Par exemple,  $\text{factoriel}(4) = 1 \times 2 \times 3 \times 4$ .

```

1 def factoriel( n ):
2     if n == 0:
3         return 1
4     return factoriel( n-1 ) * n
5
6 print( factoriel( 4 ) )

```

La pile d'exécution du programme précédent est représentée à la figure 11 :

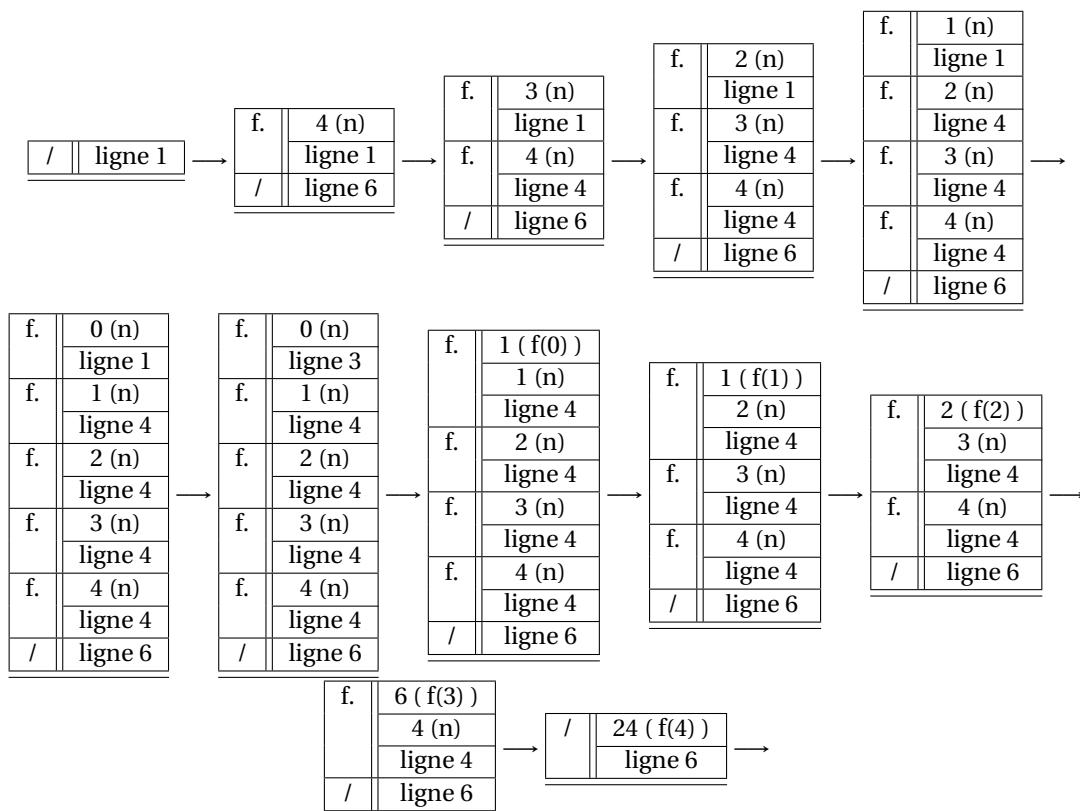


FIGURE 11 – Pile d'exécution de  $\text{factoriel}(4)$

### Exercice 11

- Pourquoi le programme précédent est récursif?
- Analyser l'exécution du programme précédent à l'aide de l'évolution de sa pile d'exécution et expliquez pourquoi le programme s'arrête.
- Expliquez pourquoi ce programme calcul correctement la factorielle de  $n$ .
- Modifiez une seule valeur du programme pour que le programme fasse une boucle infinie (ne s'arrête pas). Justifiez pourquoi le programme ne s'arrêtera pas.

Pour qu'un programme  $f$  récursif s'arrête, il faut que :

- une portion de code, ne contenant pas d'appel à  $f$ , et terminant l'exécution de  $f$ , s'exécute uniquement pour certaines valeurs de paramètres particuliers. On appelle condition d'arrêt, la condition logique qui active l'exécution de cette portion de code. Dans l'exemple précédent, la valeur d'arrêt est 0 et la condition d'arrêt est  $n == 0$ . La portion de code arrêtant  $f$  est située dans les lignes 1 et 2.
- A chaque fois que  $f$  appelle  $f$ , les valeurs passées en paramètres changent et se rapprochent des valeurs qui activent la condition d'arrêt. Dans l'exemple précédent, à la ligne 4,  $\text{factoriel}(n)$  appelle  $\text{factoriel}(n-1)$ . Les paramètres changent donc à chaque fois et la valeur passée en paramètre se rapproche toujours de la valeur qui active la condition d'arrêt, à savoir 0 .

Tout programme récursif doit donc impérativement contenir un code d'arrêt avec une condition d'arrêt clairement identifiée et facilement identifiable. De plus, l'appel récursif doit clairement montrer, à chaque appel, que les valeurs sont modifiés pour se rapprocher de la valeur d'arrêt.

## 7 Recherche d'un élément dans une tableau

Dans cette section nous allons nous intéresser à la recherche d'un élément dans un tableau. Pour cela, nous allons restreindre le problème aux tableaux d'entiers, et nous allons chercher à savoir si un entier  $e$  donné se trouve dans un tableau  $t$  contenant uniquement des entiers. Le tableau  $t$  peut éventuellement contenir plusieurs fois le même entier.

### 7.1 Recherche linéaire

En toute généralité, si le tableau  $t$  n'est pas ordonné, il est nécessaire de passer en revu tous les éléments du tableau pour savoir si l'entier  $e$  se trouve dans  $t$ . On réalise cela à l'aide du programme suivant, qui renvoie l'index du premier élément  $e$  dans  $t$  si  $e$  est dans  $t$  et `None` sinon.

```
def recherche_lineaire( t, e ):
    for i in range( len(t) ):
        if t[i] == e :
            return i
    return None
```

Le temps d'exécution de ce programme peut être évalué en comptant le nombre d'instructions réalisées. Si l'on considère que modifier la valeur de  $i$  dans la boucle `for` compte aussi pour 1 instruction, et que les opérations usuelles `=`, `==`, `+`, `-`, `*`, etc ... comptent pour une seule opération, alors l'algorithme précédent a réalisé, dans le pire des cas :  $2 \cdot n$  opérations, où  $n$  est le nombre d'éléments du tableau  $t$ .

### 7.2 Recherche dichotomique

Il est possible d'améliorer la recherche d'un élément d'un tableau si le tableau est trié par ordre croissant. On utilise, pour cela, une recherche dichotomique.

L'idée de la recherche dichotomique, consiste à comparer l'entier  $e$  à chercher avec l'entier situé au milieu du tableau. Si  $e$  est plus petit ou égal, alors on va chercher l'entier uniquement dans la partie gauche du tableau. Si  $e$  est strictement plus grand, alors on va chercher l'entier uniquement dans la partie droite. On s'arrête lorsqu'il ne reste plus qu'un seul élément à inspecter. Si ce dernier élément n'est pas égal à  $e$ , alors c'est que le tableau  $t$  ne contient pas  $e$ .

Cela nous donne ainsi l'algorithme suivant :

```
def recherche_dichotomique( t, e ):
    if len(t) == 0 :
        return None
    i = 0
    j = len(t) - 1
    while (i != j):
```

```

milieu = (i+j)//2
if t[milieu] < e:
    i = milieu + 1
else :
    j = milieu
if( t[i] == e):
    return i
else:
    return None

```

### Exercice 12

Proposer une version récursive de l'algorithme de recherche dichotomique.

### 7.3 Estimer le nombre d'instructions de l'algorithme de recherche dichotomique (optionnel-à regarder à la fin de la séance)

Nous allons maintenant estimer le nombre d'instructions  $C(t)$  nécessaires à cet algorithme pour chercher un élément dans un tableau  $t$  de taille  $n$ .

Si le tableau n'est pas vide, alors le programme réalise 5 opérations en dehors de la boucle. De même, le programme réalise entre 6 et 7 opérations à chaque tour de boucle. Ainsi, si le tableau n'est pas vide, le nombre d'instructions, réalisées par le programme, peut être encadré par

$$5 + 6.b(t) \leq C(t) \leq 5 + 7.b(t)$$

où  $b(t)$  est le nombre de fois que l'on a exécuté la boucle `while` de l'algorithme.

Soit  $a$  le plus grand entier tel que  $2^{a-1} < n \leq 2^a$ , où  $n$  est la taille du tableau. Soit  $u_k$  le nombre d'éléments situés entre  $i$  et  $j$  inclus à la fin de l'exécution de la  $k^{\text{ème}}$  boucle. On a alors

$$2^{a-k-1} < u_k \leq 2^{a-k}. \quad (1)$$

En effet, il suffit de faire une récurrence sur  $k$  pour le démontrer.

Le programme s'arrête au moment où  $i = j$ , c'est à dire lorsque  $u_k = 1$ . Cette condition se réalise quand  $k = a$  (voir Équation 1). Comme  $2^{a-1} < n \leq 2^a$  On en déduit que  $b(t) = a = \left\lceil \frac{\ln(n)}{\ln(2)} \right\rceil$ .

L'algorithme réalise donc entre  $5 + 6 \cdot \left\lceil \frac{\ln(n)}{\ln(2)} \right\rceil$  et  $5 + 7 \cdot \left\lceil \frac{\ln(n)}{\ln(2)} \right\rceil$  opérations.

Lorsque  $n$  est grand, ce nouvel algorithme est bien plus efficace que la recherche linéaire. Ceci peut être observé à l'aide de la figure 12.

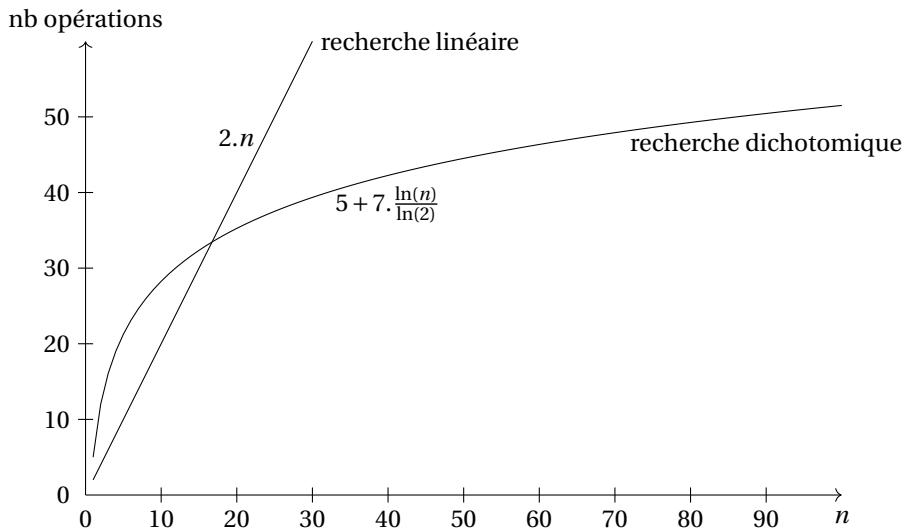


FIGURE 12 – Comparaison du nombre d'opérations réalisées par les différents algorithmes de recherche (n est la taille du tableau).

## 8 Listes

Les *listes* sont des structures de données qui contiennent une séquence d'éléments dont les éléments peuvent apparaître en plusieurs exemplaires. Chaque élément est encapsulé dans une structure de données appelée *cellule* qui permet de récupérer l'élément, et qui permet d'accéder à la structure encapsulant l'élément suivant dans la séquence. On parle alors de *liste chaînée*.

### 8.1 Listes chaînées ou listes simplement chaînées

Une *liste chaînée* (ou une *liste simplement chaînée*) est une structure de données  $l$  encodant une séquence d'éléments  $(l_1, l_2, \dots, l_n)$ , où les éléments peuvent apparaître avec répétition.

Dans une liste chaînée, chaque élément  $l_i$  est encapsulé dans une cellule  $c_i$ .

Chaque cellule  $c_i$  contient deux informations :

- la première, appelée *valeur*, est l'élément que contient la cellule; cette valeur vaut  $l_i$ ;
- la deuxième, appelée *successeur*, est une référence vers la cellule suivante  $c_{i+1}$  si  $i \leq n-1$  et la référence *None* sinon.

Par exemple, dans la figure 13, la cellule  $c_2$  contient la valeur  $l_2$  et la référence à la prochaine cellule qui est  $c_3$ .

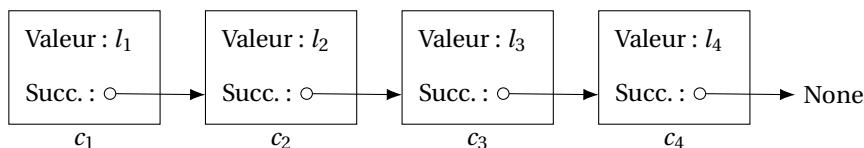


FIGURE 13 – Un liste simplement chaînée

Les cellules  $c_1, c_2, \dots, c_n$  sont toutes deux à deux distincts même si deux cellules peuvent encapsuler deux éléments identiques. Par exemple, dans la figure 14, la liste simplement chaînée est  $[2, 1, 4, 2]$ , qui contient 4 cellules  $c_1, c_2, c_3$  et  $c_4$  distinctes, mais deux valeurs identiques, celle de  $c_1$  et celle de  $c_4$ .

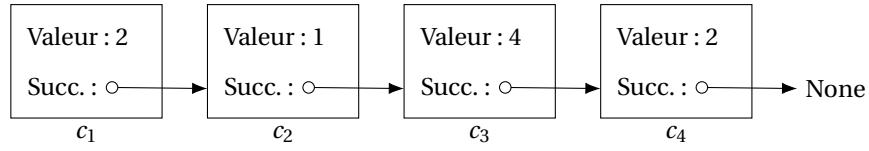


FIGURE 14 – La liste chaînée [2, 1, 4, 2].

On manipule les listes à l'aide de la référence à sa première cellule. Ainsi, si la référence à la première cellule est `None`, on dit que la liste est vide.

On peut implémenter les listes chaînées à l'aide d'une structure de données `l` munie de l'API suivante :

```

def create_list():
    """
    Crée et retourne une liste vide.
    """
    return NotImplemented

def create_cell(value, successeur):
    """
    Crée et retourne une cellule contenant la valeur
    `valeur` et le successeur `successeur`.
    """
    return NotImplemented

def change_cell(cell, valeur, successeur):
    """
    Change les attributs `valeur` et `successeur` de la cellule
    `cell` passée en paramètre.
    """
    raise NotImplementedError()

def push_front(l, e):
    """
    Ajoute l'élément `e` au début de la liste `l`. Cette fonction crée une nouvelle cellule et l'insère en début
    de liste.
    """
    return NotImplemented

def remove_front(l):
    """
    Retire le premier élément de la liste si il existe.
    """
    return NotImplemented

def first_cell(l):
    """
    Retourne la première cellule de la liste `l` et None si la liste est vide.
    """
    return NotImplemented

def next_cell( cell ):
    """
    Retourne le successeur de la cellule `cell`.
    """

```

```

    """
    return NotImplemented

def value_cell( cell ):
    """
    retourne la valeur de la cellule `cell`.
    """
    return NotImplemented

```

En python, on peut l'implémenter de la manière suivante :

```

def create_list():
    return {'first':None}

def create_cell(value, successeur):
    return {'value': value, 'next': successeur}

def push_front(l, e):
    l['first'] = create_cell(e, l['first'])

def remove_front(l):
    if not l['first'] is None :
        l['first'] = l['first']['next']

def first_cell(l):
    return l['first']

def next_cell(cell):
    return cell['next']

def value_cell(cell):
    return cell['value']

```

Cette implémentation s'utilise alors ainsi :

```

l = create_list()
push_front(l, 3)
push_front(l, 5)
push_front(l, 2)

it = first_cell(l)
while( it != None ):
    print( value_cell(it) )
    it = next_cell(it)

remove_front(l)
remove_front(l)
remove_front(l)

```

### Exercice 13

Testez le programme précédent et analysez la mémoire à l'aide de PythonTutor .

## 8.2 Listes doublement chaînées

Une *liste doublement chaînée* est une liste chaînée dont les cellules  $c_i$  contiennent une information supplémentaire appelée *prédécesseur* qui vaut `None` si  $i = 1$  et qui est une référence vers la cellule  $c_{i-1}$  lorsque  $2 \leq i \leq n$ .

Par exemple, la figure 15 montre la liste doublement chaînée associée à  $[1, 2, 4, 2]$ .

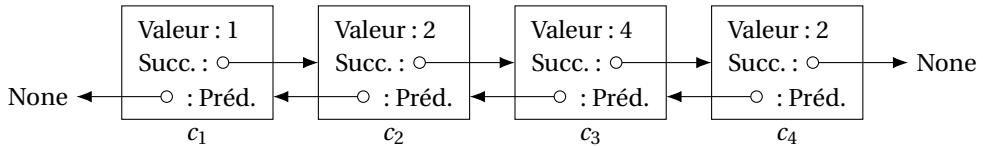


FIGURE 15 – La liste doublement chaînée  $[1, 2, 4, 2]$ .

L'API des listes doublement chaînées contient l'API des listes simplement chaînées à laquelle on ajoute les fonctions suivantes :

```

def push_back(l, e):
    """
    Ajoute l'élément `e` à la fin de la liste `l`.
    """
    return NotImplemented

def last_cell(l):
    """
    Renvoie la dernière cellule de la liste `l`.
    """
    return NotImplemented

def prev_cell( cell ):
    """
    Retourne la cellule prédécesseur à la cellule `cell`.
    """
    raise NotImplemented
    
```

### Exercice 14

En vous inspirant du code des listes simplement chaînées, implémentez les listes doublement chaînées.

Les listes doublement chaînées sont pratiques à utiliser car il est possible de retirer n'importe quelle cellule de la liste et de la remplacer ensuite, comme le montre la figure 16 avec la cellule  $c_2$ .

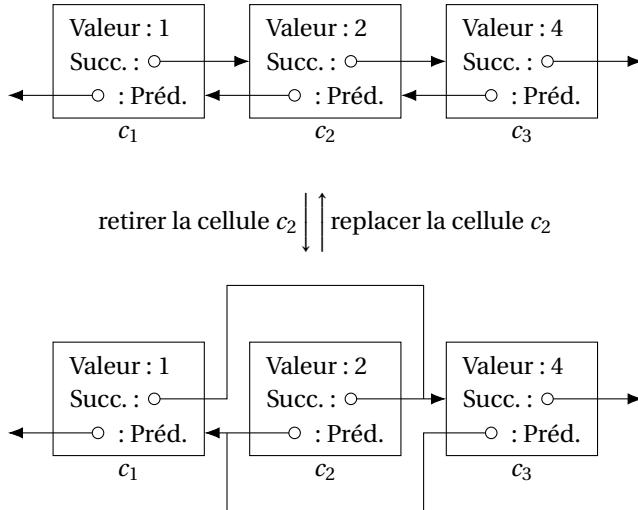


FIGURE 16 – Retirer et remplacer une cellule d'une liste doublement chaînée.

Cependant, avec l'implémentation proposée, la structure interne de la liste peut être détruite lorsque l'on décide de retirer la première (resp. la dernière) cellule de la liste. En effet, la structure de données de la liste qui contient la référence à la première et à la dernière cellule n'est pas mis à jour.

La solution à ce problème consiste à créer une liste doublement chaînée circulaire contenant une cellule dite *cellule de fin de liste*, notée  $c_{\text{fin}}$ . Ainsi, la structure de données  $l$  de la liste contient juste la référence à la cellule de fin de liste. Ensuite, la première cellule de la liste est le successeur de la cellule de fin de liste. Enfin, la dernière cellule de la liste doublement chaînée est la cellule prédécesseur de la cellule de fin de liste.

La figure 17 montre un exemple de liste doublement chaînée utilisant une cellule de fin de liste.

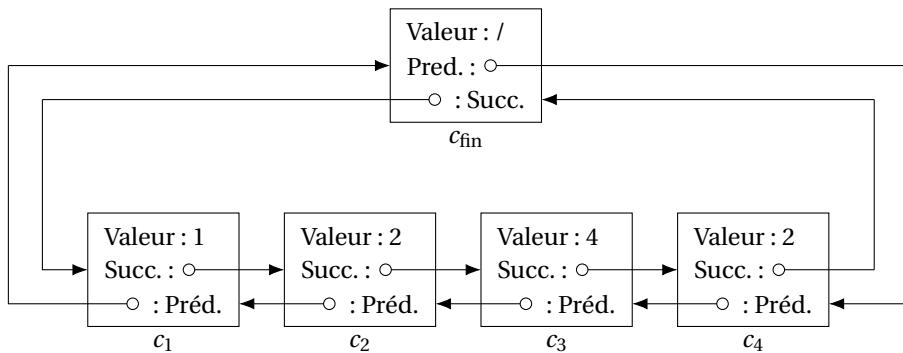


FIGURE 17 – La liste doublement chaînée  $1, 2, 4, 2]$  avec une cellule de fin de liste.

Lorsque l'on implémente des listes doublement chaînées avec une cellule de fin de liste, alors il est possible d'ajouter à l'API, en toute sécurité, les fonctions suivantes :

```
def end_cell(l):
    """
    Retourne la cellule de fin de liste de la liste `l`.
    """
    return NotImplemented

def remove_cell( cell ):
    """
```

```

Retire la cellule de la liste.
"""
raise NotImplementedError()

def replace_cell( cell ):
    """
Annulle l'action de remove_cell : replace la cellule dans la liste.
"""
    raise NotImplementedError()

def insert_cell_before( cell1, cell2 ):
    """
Insère la cellule `cell1` juste avant la cellule `cell2` dans la liste.
"""
    raise NotImplementedError()

def insert_cell_after( cell1, cell2 ):
    """
Insère la cellule `cell1` juste après la cellule `cell2` dans la liste.
"""
    raise NotImplementedError()

```

### Exercice 15

Implémentez les listes doublement chaînées en utilisant la technique de la cellule de fin de liste.

## 9 La Complexité

### 9.1 Présentation du problème

On cherche à évaluer le temps et l'espace mémoire que va utiliser un programme.

La complexité en temps d'exécution (resp. en mémoire) d'un programme, c'est une formule mathématique qui prends en paramètre les données initiales du programme et qui évalue le temps exécuté par le programme (resp. la taille de la mémoire utilisée par le programme).

Dans la pratique il est difficile de déterminer le temps d'exécution d'un programme car il est difficile de connaître le temps de chaque opération du langage. Les opération du langages sont : +, \*, -, /, ==, %,  $T[i]$ ,  $return$ , =, etc...

Nous allons donc supposé que chaque opération s'exécute en temps constant et nous allons compter à la place le nombre d'opération réalisés par un programme.

Soit  $fct$  un programme, on notera par  $\mathcal{C}(fct)$  la complexité de  $fct$ .

Par exemple, le programme suivant,

```

def fct( n ): # initialisation de n : 1 opération
    r = 0 # 1 opération
    for i in range(n): # n*( incrément + corps de boucle ) = n*( 1 + 2 )
        r = r + 1 # | 2 operations
    return r # 1 opération

```

réalise  $3 + 3n$  opération et a donc pour complexité :  $\mathcal{C}(fct) = 3 + 3n$ .

Analysons l'exemple suivant :

```

def max( T ): # init. : 1 opération

```

```

res = T[0] # 1 opération
for i in range(len(T)): # C1
    if res < T[i]: # | C2
        res = T[i] # || 2 operations
return res # 1 opération

```

Soit  $n$  la taille du tableau  $T$ . La complexité  $C_2$  du saut conditionnel `if` est de 3 opérations pour la condition auquel il faut ajouter les opérations du corps du `if`. Le corps du `if` ajoute 2 ou 0 opérations supplémentaires selon que la condition est vraie ou fausse. On obtient que  $3 \leq C_2 \leq 5$ . La complexité  $C_1$  de la boucle `for` est de  $n \times (\text{incrément} + \text{corps de boucle})$ . Ainsi,

$$C_1 = \begin{cases} n(1+3) & \text{si la condition est fausse;} \\ n(1+5) & \text{si la condition est vraie.} \end{cases}$$

La complexité du programme est donc :

$$3 + 4n \leq \mathcal{C}(\max) \leq 3 + 6n.$$

La borne inférieure est atteinte si le plus grand élément du tableau  $T$  se trouve en première position et la borne supérieure est atteinte si le tableau  $T$  contient des éléments tous distincts triés par ordre croissant.

Voici une autre implémentation (horrible et idiote) du même programme :

```

def max2(T): # init. : 1 opération -- on pose n= len(T)
    T = list(T) # = + Copie de tableau : 1+n opérations
    for i in range(len(T)): # C1
        for j in range(len(T)): # | C2
            if T[i] < T[j]: # || C3
                T[i] = T[j] # ||| 3 opérations
    return T[ len(T)-1 ] # 3 opérations

```

Par un raisonnement analogue au programme précédent, on a

$$\begin{aligned} 3 &\leq C_3 \leq 6, \\ n(1+3) &\leq C_2 \leq n(1+6), \\ n(1+4n) &\leq C_1 \leq n(1+7n). \end{aligned}$$

Ce qui donne la complexité suivante :

$$5 + 2n + 4n^2 \leq \mathcal{C}(\max2) \leq 5 + 2n + 7n^2.$$

## 9.2 La complexité en pire cas et en meilleur cas

Le but de l'algorithmique est de comparer ensemble différents algorithmes qui réalisent la même tâche.

Pour pouvoir comparer ces algorithmes, on compare le nombre d'opérations réalisées par les différents algorithmes en fonction de entrées que ces algorithmes peuvent traiter.

Pour faire cela, on commence par mesurer la taille des paramètres d'entrées en proposant une fonction qui prends en paramètre les paramètres de la fonction et qui renvoie un entier mesurant cette taille.

Par exemple, pour une fonction travaillant sur les liste, la taille qui mesurera les entrées de la fonction pourra être la taille de la liste.

Ensuite, pour chaque programme, on cherche, pour une taille donnée, les paramètres d'entrées qui nécessite le plus d'opérations de calcul. On compte ensuite ce nombre d'opérations, puis on détermine la fonction qui à une taille donnée, détermine le temps d'exécution (en nombre d'opération) dans le pire cas. cette fonction appelée *complexité dans le pire cas* de notre programme.

Pour déterminer quel programme est le plus adapté, on compare alors ces fonctions entre elles.

De la même manière on appelle *complexité dans le meilleur cas*, la fonction qui, à une taille donnée, détermine le temps d'exécution pour l'ensemble des paramètres le plus favorable.

Par exemple, étudions les deux programmes suivants qui prends en paramètre un tableau codé sous forme de liste chaînée, pour le premier programme et sous forme de tableau (type `list` en python) et déterminons le temps nécessaire au programme pour déterminer le nombre d'éléments contenus par le tableau.

```
def nb_element_1(l);
    res = 0
    cell = first(l)
    while( not cell is end(l) ):
        cell = next( l, cell )
        res += 1
    return res
```

```
def nb_element_2(l);
    return len(l)
```

Pour comparer ces deux fonctions, il faut définir une fonction *taille* qui nous servira à mesurer la taille des entrées. Dans notre cas, on utilisera le nombre d'éléments du tableau.

Pour chaque taille on détermine une jeu d'entrées qui maximise le temps de calcul. Ici, pour une taille  $n$  donnée, n'importe quel tableau comprenant  $n$  éléments maximise le temps d'exécution des deux programmes. On pourra prendre un tableau arbitraire pour déterminer la complexité des deux algorithmes.

Enfin, on détermine les fonctions  $f_1$  et  $f_2$  qui déterminent les complexités maximales de respectivement `nb_element_1` et `nb_element_2`:

$$f_1(n) = 4 + n \times 7$$

$$f_2(n) = 2$$

On se rends compte alors que quelque soit la taille de donnée  $n$ , le deuxième algorithme est plus rapide que le premier.

### 9.3 Comparer les algorithmes en utilisant des comparaisons asymptotiques

Nous avons vu comment comparer deux algorithmes ensemble, en comparant leurs complexités. Le calcul des complexités n'est pas toujours aisée.

En fait, connaître la valeur exacte du nombre d'opérations n'est pas une information pertinente : savoir qu'un programme réalise  $n+4$  opérations,  $n+2$  opérations ou bien  $2 \times n+1$  n'apporte pas beaucoup d'informations utiles. En fait, ce qui importe c'est que le programme réalise a peu près  $\alpha \times n$  opérations quand la taille de donné  $n$  devient grande.

En effet, les constantes 1, 4 et 2 deviennent négligeables devant la taille de donnée  $n$  grandissante. De même, il n'est pas utilise de connaître la constante  $\alpha$  quand on compare un programme dont la complexité est  $\alpha \times n$  à un programme de complexité  $\beta \times n^2$ . En effet, quand  $n$  grandira, le premier programme fera toujours moins d'opérations que le second.

Ainsi, quand on détermine la complexité d'un programme on réalise des calculs de complexité en ignorant les constantes et en ne gardant que le terme dominant, c'est à dire la fonction mathématique en  $n$  la plus grande dans une expression.

En mathématique on appelle cela le calcul asymptotique et des outils ont été créé pour réaliser avec rigueur ce calcul et pour déterminer les fonctions mathématiques les plus grande dans une expression. Il s'agit du  $O$  qui est défini comme suit.

Soit  $f$  et  $g$  deux fonctions (dits de complexité) de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{R}^+$ . On dit que  $g$  domine  $f$ , ou que  $f$  est un grand  $O$  de  $g$  si

$$\exists \alpha \in \mathbb{R}^+, \exists N \in \mathbb{N}^* \text{ tq. } \forall n \in \mathbb{N}, \text{ si } n \geq N \text{ alors } f(n) \leq \alpha \cdot g(n).$$

On note cette dernière relation par  $f = \mathcal{O}(g)$ .

Cette dernière phrase mathématique se lit ainsi : "Il existe un réel positif non nul  $\alpha$ , il existe un entier naturel  $N$  non nul, tel que pour tout entier  $n$ , si  $n$  est plus grand que  $N$  alors  $f(n)$  est plus petit que  $\alpha$  fois  $g(n)$ ."

On peut interpréter cette phrase avec un point de vue informaticien de la façon suivante :

- la fonction  $f$  est la complexité réelle du programme et  $g$  est son asymptotique.
- il existe une constante de temps  $\alpha$ , il existe une taille de donnée minimale  $N$  telle que lorsque les paramètres en entrée dépassent la taille  $N$ , alors la complexité du programme  $f(n)$  est majorée par  $\alpha$  fois  $g(n)$ .

## 9.4 Règles de calculs pour $\mathcal{O}$

Il existe de nombreuses règles de calculs qui se démontrent à partir de la définition précédente. Voici une liste non exhaustive :

- $\mathcal{O}(f + g) = \mathcal{O}(f) + \mathcal{O}(G)$ ;
- $\mathcal{O}(f) + \mathcal{O}(G) = \mathcal{O}(g + g)$ ;
- $\mathcal{O}(\alpha \times f) = O(f)$ ;
- $\mathcal{O}(f) = O(\alpha \times f)$ ;
- $\mathcal{O}(f) \times \mathcal{O}(g) = \mathcal{O}(f \times G)$ ;
- $\mathcal{O}(f \times G) = \mathcal{O}(f) \times \mathcal{O}(g)$ ;
- $\mathcal{O}(n^i) = \mathcal{O}(n^j)$  si  $i \leq j$ ;
- $\mathcal{O}(n^j) \neq \mathcal{O}(n^i)$  si  $i \leq j$ ;
- $\mathcal{O}(\ln(n)) = \mathcal{O}(n)$
- $\mathcal{O}(n) \neq \mathcal{O}(\ln(n))$
- $\mathcal{O}(n^i) = \mathcal{O}(n!)$ ;
- $\mathcal{O}(n!) \neq \mathcal{O}(n^i)$ .

Pour déterminer, dans un programme, les complexités de vos fonctions, vous pouvez utiliser les formules présentées dans l'annexe B.

## 9.5 Quelques exemples

## 9.6 Complexité en moyenne et complexité amortie

# 10 Algorithmes de Tri

Soit  $T$  un tableau non ordonné d'entiers, pouvant contenir plusieurs fois le même entier.  
Nous allons nous intéresser aux algorithmes qui permettent de trier ce tableau.

## 10.1 Tri à bulles

L'algorithme de tri à bulles consiste à répéter, jusqu'à ce que le tableau soit trié, une étape de tri qui consiste à parcourir les éléments du tableau et à échanger deux éléments successifs s'ils ne sont pas dans l'ordre croissant.

Le programme Python de tri est le suivant :

```

def echanger(t, i, j):
    tmp = t[i]
    t[i] = t[j]
    t[j] = tmp

def etape_tri_bulle( t ):
    est_trie = True
    for i in range( len(t)-1 ):
        if ( t[i]>t[i+1] ):
            echanger( t, i, i+1 )
            est_trie = False
    return est_trie

def tri_bulle( t ):
    est_trie = False
    while not( est_trie ):
        est_trie = etape_tri_bulle( t )

```

Si le tableau  $t$  est déjà trié, cet algorithme peut se terminer très rapidement, en réalisant juste une itération de `etape_tri_bulle(t)`.

Cependant, les performances chutent lorsque le tableau est quelconque. On peut évaluer le nombre d'opérations effectuées par cet algorithme, dans le pire cas. Soit  $n$  le nombre d'éléments contenus dans un tableau. Commençons par évaluer le nombre d'opérations effectuées par `etape_tri_bulle` : cette fonction réalise 1 opération en dehors de la boucle `for` et entre 3 et 8 opérations par boucle à l'intérieur de la boucle `for`. Le programme `etape_tri_bulle` réalise donc entre  $1 + 3(n - 1)$  et  $1 + 8(n - 1)$  opérations. Étudions maintenant la complexité de `tri_bulle`. À la fin du  $k^{\text{ème}}$  appel de `etape_tri_bulle(t)`, le tableau  $t$  contient les  $k$  plus grands éléments de  $t$  dans les  $k$  dernières cases, triées par ordre croissant. Ainsi, à la  $n-1^{\text{ème}}$  exécution de `etape_tri_bulle(t)` les  $n-1$  plus grands éléments sont triés et situés à la fin, donc le tableau est complètement trié. On en déduit que `etape_tri_bulle(t)` est exécuté, dans le pire cas,  $n-1$  fois. Ce pire cas est atteint pour le tableau  $[n, n-1, n-2, \dots, 1]$ . Ainsi, dans le pire cas, l'algorithme réalise entre  $1 + (n-1) \cdot (1 + 1 + 3 \cdot (n-1)) = 3 \cdot n^2 - 5 \cdot n + 3$  et  $1 + (n-1) \cdot (1 + 1 + 8 \cdot (n-1)) = 8 \cdot n^2 - 14 \cdot n + 7$  opérations.

Ce nombre d'opération est un polynôme de degrés 2 en  $n$ . On dit que cet algorithme est de complexité quadratique dans le pire cas.

Dans le meilleur cas, si le tableau est déjà trié, cet algorithme réalise  $1 + 3(n - 1)$  opérations qui est un polynôme de degrés 1 en  $n$ . On dit alors que ce programme est de complexité linéaire dans le meilleur des cas.

Quand on parle de complexité d'un programme, on parle généralement de sa complexité dans le pire des cas. Ainsi, l'algorithme de tri à bulle est de complexité quadratique.

## 10.2 Tri par insertion (tri du joueur de carte)

Le tri par insertion, appelé aussi tri du joueur de carte, est le tri réalisé généralement par les joueurs de cartes. Habituellement, les joueurs de cartes trient ses cartes au fur et à mesure qu'ils les obtiennent en insérant la nouvelle carte à la bonne position parmi les cartes déjà triées. Cet algorithme s'écrit en Python de la façon suivante :

```

def echanger(t, i, j):
    tmp = t[i]
    t[i] = t[j]
    t[j] = tmp

def inserer( t, i ):
    j = i

```

```

while j > 0 and t[j] < t[j-1] :
    echanger( t, j, j-1 )
    j = j - 1

def tri_insertion( t ):
    for i in range( len(t) ):
        inserer( t, i )

```

Nous allons étudier la complexité dans le pire cas de `tri_insertion`. Soit  $c(t, i)$  le nombre d'opérations réalisées par `inserer(t, i)`. Dans le pire cas, la boucle de `inserer(t, i)` est exécuté  $i$  fois. Ainsi, dans le pire cas,  $c(t, i) = 1 + 10i$ . Lors de l'exécution de `tri_insertion(t)`, ce pire cas est atteint pour toutes les exécutions de `inserer(t, i)` lorsque le tableau  $t$  initial vaut  $[n, n-1, n-2, \dots, 3, 2, 1]$ .

Ainsi, dans le pire cas, le programme `tri_insertion(t)` réalise :

$$\sum_{i=0}^{n-1} (1 + c(t, i)) = \sum_{i=0}^{n-1} (1 + 1 + 10i) = 2n + 10 \frac{n(n-1)}{2} = 5n^2 - 3n$$

opérations (voir propriété 2 pour le détail des calculs).

Cet algorithme est donc un algorithme quadratique.

### 10.3 Tri par sélection

Le tri par sélection est un tri qui consiste à itérer  $n$  étapes où la  $k^{\text{ème}}$  étape consiste à chercher le  $k^{\text{ème}}$  plus petit élément et à l'échanger avec l'élément situé en position  $k$  dans le tableau.

On obtient ainsi l'algorithme suivant :

```

def echanger(t, i, j):
    tmp = t[i]
    t[i] = t[j]
    t[j] = tmp

def recherche_min( t, i ):
    position_min = i
    for k in range( i+1, len(t) ):
        if ( t[ k ] < t[ position_min ] ):
            position_min = k
    return position_min

def tri_insertion( t ):
    for i in range( len(t) ):
        echanger( t, i, recherche_min( t, i ) )

```

Si l'on note par  $c(t, i)$  la complexité de `recherche_min(t, i)`, alors on obtient l'encadrement  $2 + 2(n-i-1) \leq c(t, i) \leq 2+3(n-i-1)$ . Le nombre d'opérations réalisées par le programme `tri_insertion` est donc compris entre  $\sum_{i=0}^{n-1} (6 + 2(n - i - 1)) = 6 + 2 \frac{n(n-1)}{2}$  et  $\sum_{i=0}^{n-1} (6n + 3(n - i - 1)) = 6n + 3 \frac{n(n-1)}{2}$ .

L'algorithme de tri par sélection est donc quadratique.

### 10.4 Tri rapide

Le principe du tri rapide consiste à choisir un élément  $p$  du tableau, appelé pivot, puis à trier le tableau en mettant les éléments plus petits que  $p$  à gauche de  $p$  et les éléments plus grands que  $p$  à droites de  $p$ , puis à recommencer le processus, jusqu'à ce que le tableau soit entièrement trié, sur le tableau de gauche d'une part et sur le tableau de droite d'autre part.

On obtient ainsi l'algorithme suivant :

```

def echanger(t, i, j):
    tmp = t[i]
    t[i] = t[j]
    t[j] = tmp

def partitioner( t, min, max ):
    pivot = max
    i = min
    j = max - 1
    while( i < j ):
        if t[i] < t[pivot] :
            i = i + 1
        else:
            echanger( t, i, j )
            j = j - 1
        if t[i] < t[pivot] :
            echanger( t, i+1, pivot )
            pivot = i+1
        else :
            echanger( t, i, pivot )
            pivot = i
    return pivot

def tri_rapide_recuratif( t, i, j ):
    if( i < j):
        pivot = partitioner( t, i, j )
        tri_rapide_recuratif( t, i, pivot-1 )
        tri_rapide_recuratif( t, pivot+1, j )

def tri_rapide( t ):
    tri_rapide_recuratif( t, 0, len(t)-1 )

```

La complexité de ce programme est quadratique dans le pire cas. Cet algorithme est tout de même très utilisé car il est rapide dans beaucoup de cas usuels.

## 10.5 Tri fusion

Le tri fusion consiste à couper le tableau en 2, à trier le tableau de gauche à l'aider d'un autre tri fusion, à trier le tableau de droite avec le même algorithme, puis à fusionner les deux tableaux.

On obtient ainsi l'algorithme suivant :

```

def fusion( t, min, milieu, max ):
    tmp = []
    i = min
    j = milieu + 1
    while i <= milieu or j <= max :
        if i > milieu :
            tmp.append( t[j] )
            j = j + 1
        elif j > max:
            tmp.append( t[i] )
            i = i + 1
        elif t[i] < t[j] :
            tmp.append( t[i] )

```

```

        i = i + 1
    else :
        tmp.append( t[j] )
        j = j + 1
for i in range( len(tmp) ):
    t[min+i] = tmp[i]

def tri_fusion_recuratif( t, i, j ):
    if( i < j ):
        milieu = (i+j)//2
        tri_fusion_recuratif( t, i, milieu )
        tri_fusion_recuratif( t, milieu+1, j )
        fusion( t, i, milieu, j )

def tri_fusion( t ):
    tri_fusion_recuratif( t, 0, len(t)-1 )

```

La complexité de ce programme est majoré par  $c.n.\ln(n)$ , où  $n$  est la taille du tableau et  $c$  un constante. Pour des tableaux contenant beaucoup d'éléments, cet algorithme est le plus rapide parmi les algorithmes précédemment présentés.

## 11 Arbres

### 11.1 Arbres

Un arbre est une structure de données particulière que nous allons décrire sur un exemple particulier, avant de donner une définition formelle.

Un arbre est une structure de données contenant des sommets, deux à deux distincts. Dans la figure 18, les sommets sont représentés par des cercles contenant des entiers : les entiers 1, 2, 3, 5, 7, 10 et 11.

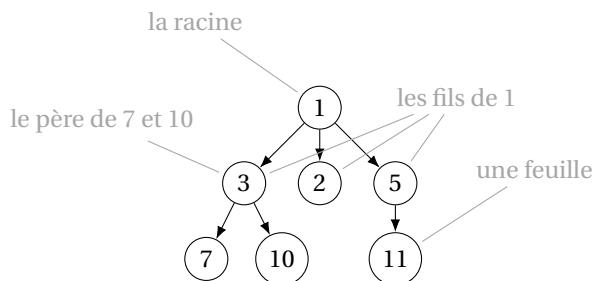


FIGURE 18 – Un exemple d’arbre

À l’exception d’un seul sommet, que l’on appelle *racine*, tous les sommets possèdent un unique *père* qui est un autre sommet de l’arbre.

Dans le dessin, la relation “père” est symbolisée par une flèche où, lorsqu’une flèche relie un sommet  $u$  à un sommet  $v$ , alors cela veut dire que le sommet  $u$  est le père de  $v$ . On dit aussi que  $v$  est le *fils* de  $u$ . Ainsi, toujours dans la figure 18, le sommet 1 est le père des sommets 2, 3 et 5. Le sommet 3, quand à lui, a pour fils les sommets 7 et 10.

Enfin, pour qu’une structure de données soit un arbre, il faut que, pour chaque sommet  $s$ , il existe toujours un chemin partant de la racine, terminant en  $s$  et empruntant les flèches de l’arbre.

Lorsque l’on dessine les arbres, la racine est le sommet qui n’est pointé par aucune flèche. Il est généralement dessiné tout en haut de la figure. Dans la figure, il s’agit du sommet 1.

Enfin, les sommets qui n'ont pas de fils sont appelés les *feuilles* de l'arbre. Dans la figure 18, les sommets 2, 7, 10 et 11 sont des feuilles.

### Exercice 16

Listez le père et les fils de chaque sommet de l'arbre  $A$  de la figure 19. Donnez la racine et les feuilles de cet arbre.

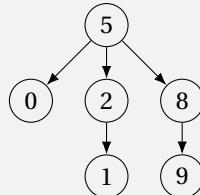


FIGURE 19 – L'arbre  $A$

Passons maintenant à la définition formelle d'un arbre.

Un *arbre* est une structure de données  $A$  contenant des éléments, deux à deux distincts, appelés *sommets* munis des fonctions suivantes :

- la fonction  $\text{fils}(A, p)$  qui prends en paramètre un arbre  $A$ , un sommet  $p$  et renvoie une liste, éventuellement vide, de sommets de  $A$ ; ces sommets sont appelés les fils de  $p$ ;
- la fonction  $\text{pere}(A, f)$  qui prends en paramètre un arbre  $A$ , un sommet  $f$  et renvoie un sommet de  $A$  ou  $\text{None}$ ; ce sommet est appelé le père de  $f$ ;
- la fonction  $\text{racine}(A)$  qui prends en paramètre un arbre  $A$  et renvoie un sommet de  $A$  appelé *racine* de l'arbre.

Ces opérations vérifient les propriétés suivantes :

**Règle 1.** Une racine n'a pas de père :

$$\text{pere}(A, \text{racine}(A)) = \text{None};$$

**Règle 2.** Tout sommet possède un père à l'exception de la racine :

$$\forall s \in A \setminus \{\text{racine}(A)\}, \quad \text{pere}(A, s) \in A;$$

Cette phrase mathématique se lit ainsi :

$\forall$ Pour tout élément	$s$ appartenant à l'ensemble	$\in$ privé des éléments de	$A$ l'ensemble constitué de $\text{racine}(A)$	,
		$\text{pere}(A, s)$ appartient à l'ensemble	$\in$ $A;$	

**Règle 3.** A partir de tout sommet, on peut accéder à la racine par la relation de paternité :

$$\forall s \in A, \exists k \in \mathbb{N}, \quad \text{pere}^k(A, s) = \text{None};$$

où  $\text{pere}^k$  se définit récursivement par :  $\text{pere}^0(A, s) = s$  et  $\text{pere}^{k+1}(A, s) = \text{pere}(A, \text{pere}^k(A, s))$  pour  $k \geq 1$ .

Cette phrase mathématique se lit ainsi :

$\forall$  Pour tout élément       $s \in A$ ,  
 $\exists k$  il existe un élément       $k \in \mathbb{N}$  l'ensemble des entiers naturel (positif ou nul)  
 $\text{pere}^k(A, s) = \text{None};$  tel que  
 est égal à

**Règle 4.** Le père d'un sommet  $f$  a pour fils  $f$  et réciproquement :

$$\forall p \in A, \forall f \in A, p = \text{pere}(A, f) \iff f \in \text{fils}(A, p).$$

Cette phrase mathématique se lit ainsi :

$\forall$  Pour tout élément       $p \in A$ ,  
 $\forall f$  pour tout élément       $f \in A$ ,  
 $p = \text{pere}(A, f) \iff f \in \text{fils}(A, p);$

On peut récrire cette dernière phrase, de manière équivalente, ainsi :

Pour tout sommet  $p$  de  $A$ , pour tout sommet  $f$  de  $A$ , dire que  $p$  est le père de  $f$  est équivalent à dire que  $f$  est un fils de  $p$ .

On appelle arbre étiqueté un arbre  $A$  muni de l'opération  $\text{etiquette}(A, s)$  qui à un sommet  $s$  renvoie un élément appelé étiquette de  $s$ .

On dessine les étiquettes avec des rectangles reliés à leurs sommets respectifs par un trait. La figure 20 montre le dessin d'un arbre étiqueté.

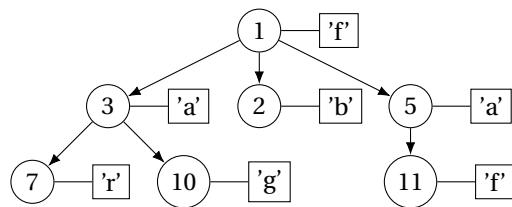


FIGURE 20 – Un exemple d'arbre étiqueté

Ainsi, dans la figure 20, le sommet 1 et le sommet 11 possèdent la même étiquette 'f' alors que le sommet 2 est étiqueté par 'b'.

Pour finir, voici la définition de l'arbre (que l'on notera  $A$ ) de la figure 20, donné à l'aide des fonctions  $\text{pere}()$ ,  $\text{fils}()$ ,  $\text{racine}()$  et  $\text{etiquette}()$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{racine}(A) = 1, \\ \text{pere}(A, \bullet) = \{1 : \text{None}, 2:1 \ 3:1 \ 5:1 \ 7:3 \ 10:3 \ 11:5\}, \\ \text{fils}(A, \bullet) = \{1 : [3, 2, 5], 2:[] \ 3:[7, 10] \ 5:[11] \ 7:[] \ 10:[] \ 11:[]\}, \\ \text{etiquette}(A, \bullet) = \{1 : 'f', 2 : 'b', 3 : 'a', 5 : 'a', 7 : 'r', 10 : 'g', 11 : 'f'\}. \end{array} \right.$$

### Exercice 17

Dessinez l'arbre correspondant à la définition mathématique suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{racine}(A) = 4, \\ \text{pere}(A, \bullet) = \{3 : 4, 4 : \text{None} \ 5:3 \ 8:3 \ 9:5 \ 10:5 \ 11:8 \ 12:11\}, \\ \text{fils}(A, \bullet) = \{3 : [5, 8], 4 : [3] \ 5 : [9, 10] \ 8 : [11] \ 9 : [] \ 10 : [] \ 11 : [12] \ 12 : []\}, \\ \text{etiquette}(A, \bullet) = \{3 : 'a', 4 : 'b', 5 : 'a', 8 : 'a', 9 : 'f', 10 : 'g', 11 : 'f', 12 : 'g'\}. \end{array} \right.$$

### Exercice 18

Donnez la définition mathématique de l'arbre  $B$  dessiné à la figure 21.

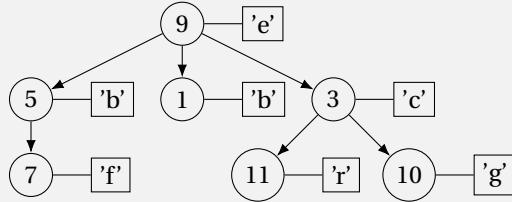


FIGURE 21 – L'arbre  $B$

### Exercice 19

1. Peut-on construire une structure de donnée, qui soit un arbre, et telle que la table des pères possède plusieurs fois la valeur None. Justifier votre réponse.
2. Peut-on construire une structure de données qui soit un arbre et telle qu'il existe deux chemins, partant de la racine, suivant les flèches et arrivant sur le même sommet? Justifier votre réponse.
3. Peut-on avoir deux sommets qui ne soient la fin d'aucune flèche? Justifier votre réponse.
4. Est-ce que la quatrième règle est équivalente à l'assertion suivante :

$$\forall s \in A, \ \forall f \in \text{fils}(A, s), \ \text{pere}(A, f) = s.$$

Justifiez votre réponse.

5. Même question pour :

$$\forall s \in A, \ \forall f \in A, \ s = \text{pere}(A, f) \implies f \in \text{fils}(A, s).$$

### Exercice 20

On a vu que la structure de données d'un arbre est définie à l'aide des fonctions racine(), pere(), fils() et etiquette().

Y-a-t-il une redondance d'informations? Dit autrement, peut-on se passer de certaines fonc-

tions, sans perdre d'information ?

Si oui, pourquoi et quelle jeu de fonctions faut-il garder, à minima, pour définir un arbre et pouvoir reconstruire les autres fonctions manquantes.

## 11.2 Exemples d'arbres en informatique

Les arbres sont utilisés très souvent en informatique.

Le système de fichiers est un exemple d'arbre. Les dossiers représentent des noeuds de l'arbre ou des feuilles quand ils sont vides. Les fichiers représentent des feuilles.

Voici, sous linux, un fragment de l'arborescence du système de fichier :

```
/  
└── bin  
    ├── bash  
    └── brltty  
└── boot  
    ├── config-5.4.0-60-generic  
    ├── grub  
    │   ├── fonts  
    │   └── gfxblacklist.txt  
    ├── initrd.img-5.4.0-60-generic  
    ├── memtest86+.bin  
    └── vmlinuz-5.4.0-60-generic  
└── cdrom  
└── core  
└── dev  
    ├── autofs  
    ├── block  
    │   ├── 259:0  
    │   └── 259:1  
    ├── bsg  
    │   └── 1:0:0:0  
    ├── btrfs-control  
    ├── bus  
    │   └── usb  
    ├── char  
    │   └── 10:1  
    └── etc  
        ├── a2ps.cfg  
        ├── a2ps-site.cfg  
        ├── acpi  
        │   ├── asus-keyboard-backlight.sh  
        │   └── asus-wireless.sh  
        ├── adduser.conf  
        ├── alternatives  
        └── aclocal
```

### Exercice 21

Dans l'arborescence de fichiers ci-dessus, donnez quelques exemples de noeuds et de feuilles.

**Exercice 22**

Dessinez ensuite l'arborescence de votre dossier personnel (home). Sous Linux, vous pouvez vous aider de la commande 'tree' pour faire cela.

Les arbres sont aussi très utilisés dans les formats de fichiers. Par exemple, le format des codes sources des pages HTML utilise une structure d'arbre. Le code HTML suivant :

```
<html>
  <head>
    <meta name="robots" content="all" />
  </head>
  <body>
    <p>Bonjour</p>
    <p>Du texte</p>
  </body>
</html>
```

peut être représenté par l'arbre de la figure 22.

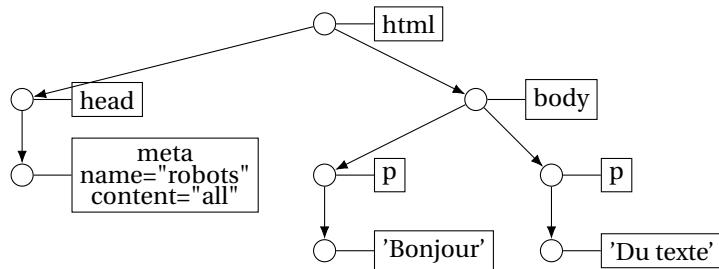


FIGURE 22 – L'arbre d'une page WEB en HTML.

Chaque balise HTML est alors converti en un noeud de l'arbre, muni d'une étiquette contenant les données de la balise..

Dans la figure 22 les numéros des sommets ne sont pas représentés. En effet, généralement, lorsque la page web est lue par l'ordinateur, puis chargée en mémoire, les sommets avec leurs étiquettes deviennent des objets alloués en mémoire. Les numéros des sommets sont alors implicites car il s'agit de l'adresse en mémoire où se trouve le sommet. En fait, on pourrait faire de même avec le code source de la page web et considérer, pour nous humain, que le numéro du sommet est le numéro de la ligne où commence la balise associée à ce même sommet. Dans les deux cas, cette numérotation n'apporte pas beaucoup d'information et est donc toujours omise.

**Exercice 23**

Dessinez (partiellement) l'arbre d'une page html. Par exemple, vous pouvez choisir la page web suivante, qui n'est pas trop compliquée : [https://www.labri.fr/perso/boussica/bibliotheque\\_graphique\\_fr.html](https://www.labri.fr/perso/boussica/bibliotheque_graphique_fr.html)

Pour récupérer le code source de la page, vous pouvez, sous firefox, faire un clique droit et cliquer sur "View Page Source". Vous pouvez aussi télécharger la page et l'ouvrir avec un éditeur de texte.

### 11.3 Une API pour les arbres

Voici une API possible pour créer des arbres :

```

def creer_arbre(racine=None, etiquette=None):
    # Crée un arbre contenant la racine `racine`.
    # si racine vaut None, on considère l'arbre vide.
def creer_sommet(A=None, numero=None):
    # Crée et retourne un sommet ayant pour numéro 'numero'
def inserer_racine(A, racine, etiquette=None):
    # ajoute la racine `racine` dans l'arbre et lui associe
    # l'étiquette `etiquette`.
def inserer_fils(A, pere, fils, etiquette=None):
    # Dans l'arbre `A`, ajoute le sommet `fils`
    # dans la liste des fils du sommet `pere`.
    # Le sommet `fils` aura pour étiquette `etiquette`.

```

Voici une API possible pour manipuler les arbres :

```

def fils(A, p)
    # renvoie la liste des fils du sommet p dans l'arbre A
def pere(A, f)
    # renvoie le père du sommet f dans l'arbre A, ou None
    # si f est la racine
def racine(A)
    # renvoie la racine de l'arbre A
def etiquette(A, f):
    # renvoie l'étiquette de f dans A

```

Et voici une implémentation possible de ces deux API :

```

def creer_arbre_vide():
    return {
        'racine': None,
        'etiquettes': {},
        'fils': {},
        'pere': {}
    }

def creer_sommet(A=None, numero=None):
    if numero is None:
        raise ValueError("Numéro manquant")
    return numero

def inserer_fils(A, pere, fils, etiquette=None):
    if not pere is None:
        A['fils'][pere].append(fils)
    A['pere'][fils] = pere
    A['fils'][fils] = []
    A['etiquettes'][fils] = etiquette

def inserer_racine(A, racine, etiquette=None):
    A['racine'] = racine
    if not racine is None:
        inserer_fils(A, None, racine, etiquette)

def creer_arbre(racine=None, etiquette=None):
    res = creer_arbre_vide()
    inserer_racine(res, racine, etiquette)

```

```

return res

def racine(A):
    return A['racine']

def fils(A, s):
    return A['fils'][s]

def pere(A, s):
    return A['pere'][s]

def etiquette(A,s):
    return A['etiquettes'][s]

```

#### Exercice 24

Testez la bibliothèque précédente en implémentant l'arbre *B* de la figure 21.

#### Exercice 25

L'implémentation proposée ci-dessus permet-elle de construire des structures de données mal formées, c'est à dire qui ne vérifient pas les 4 propriétés associées aux arbres ?

Si oui, modifiez le code pour interdire (en levant une erreur) toute modification de l'arbre qui produirait un arbre mal formé.

La plupart du temps, dans les bibliothèques, les arbres sont implementés différemment. Les sommets des arbres sont des structures de données. La table des pères et des fils sont codées directement dans les sommets de l'arbre à l'aide des attributs 'pere' et 'fils' qui contiennent des références respectivement au sommet père et aux sommets fils. Le numéro d'un sommet est alors implicite car il s'agit alors de l'adresse en mémoire (référence en python) où se trouve la structure de données représentant le sommet. La figure 23 donne la représentation mémoire de ce type d'arbre.

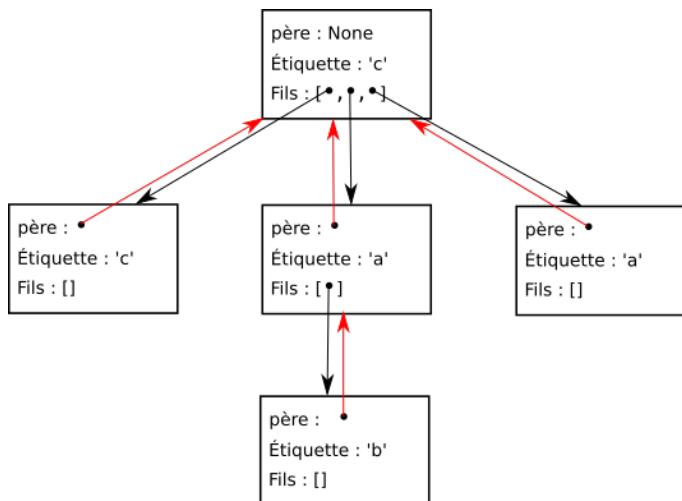


FIGURE 23 – Une structure de données classique d'arbre

Cette implémentation des arbres est préférée à la première car elle se prête mieux à l'ajout et à la suppression de noeuds. En effet, il n'est pas nécessaire de gérer les numéros des sommets. De plus, les

noeuds peuvent être ajoutés n'importe où en mémoire sans avoir à modifier profondément les tables existantes.

### Exercice 26

Proposer une implémentation de l'API précédente, où

- les relations père et fils sont implémentées directement dans les sommets de l'arbre
- la numérotation des sommets est omise car remplacée par l'adresse mémoire où se situe l'objet.

Vous testerez votre nouvelle bibliothèque d'arbre en implémentant l'arbre de la figure 23. Utilisez PythonTutor pour inspecter la mémoire, afficher l'arbre et vérifier que votre arbre est bien formé.

## 11.4 Arbres binaires

Tout comme à la section précédente, nous allons présenter les arbres binaires sur un exemple avant de donner une définition formelle.

Un arbre binaire est “un arbre” un peu particulier. Pour commencer, c'est un arbre où chaque sommet possède 0, 1 ou 2 fils, comme vous pouvez l'observer à la figure 24.

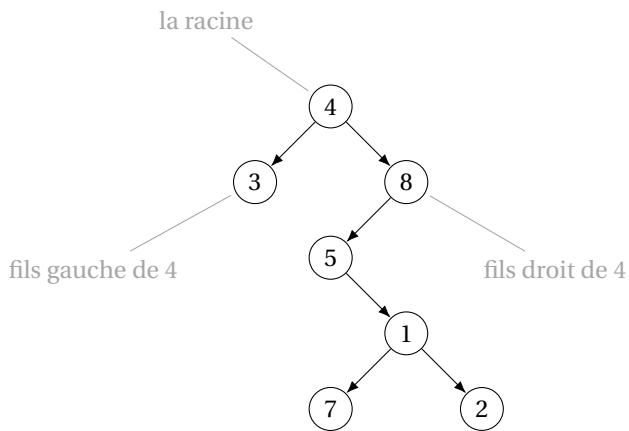


FIGURE 24 – Un arbre binaire

Cependant, contrairement aux arbres, les fils sont nommés. Ainsi, un fils peut être, soit un fils gauche et on le dessine à gauche de son père, soit un fils droit, et on le dessine à droite de son père. Ainsi, dans la figure 24, le sommet 4 possède un fils gauche qui est le sommet 3 et un fils droit qui est le sommet 8. De même, toujours à la figure 24, le sommet 5 ne possède pas de fils gauche. Par contre, il possède un fils droit qui est le sommet 1.

Il est important de remarquer que les arbres binaires ne sont pas des arbres particuliers. En effet nommer explicitement les fils change la structure de l'objet. Par exemple, si vous regardez les deux arbres binaires de la figure 25, alors les deux arbres binaires  $A_1$  et  $A_2$  sont différents car dans  $A_1$ , le sommet 2 est le fils gauche du sommet 1 alors que dans l'arbre  $A_2$ , le sommet 2 est fils droit. Cependant, si l'on interprète  $A_1$  et  $A_2$  comme des dessins d'arbres, alors  $A_1$  et  $A_2$  représentent le même arbre (où les fils se sont pas ordonnés).

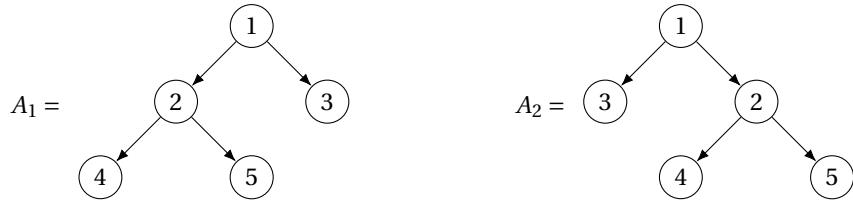


FIGURE 25 – Deux arbres binaires  $A_1$  et  $A_2$  différents

La figure 26 montre encore deux arbres binaires différents qui ont le même arbre (que les fils sont ordonnées ou pas ordonnées).

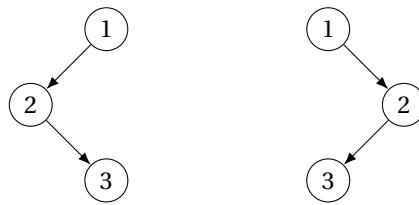


FIGURE 26 – Deux arbres binaires différents

Nous pouvons maintenant donner une définition formelle des arbres binaires.

Un arbre binaire est une structure de données  $A$  contenant des éléments, deux à deux distincts, appelés *sommets* et munie des fonctions suivantes :

- la fonction  $\text{fils\_gauche}(A, p)$  qui prends en paramètre un arbre  $A$ , un sommet  $p$  et renvoie un sommet de  $A$  appelé fils gauche de  $p$  ou *None* si  $p$  n'a pas de fils gauche.
- la fonction  $\text{fils\_droit}(A, p)$  qui prends en paramètre un arbre  $A$ , un sommet  $p$  et renvoie un sommet de  $A$  appelé fils droit de  $p$  ou *None* si  $p$  n'a pas de fils droit.
- la fonction  $\text{pere}(A, f)$  qui prends en paramètre un arbre  $A$ , un sommet  $f$  et renvoie un sommet de  $A$  ou *None*; ce sommet est appelé le père de  $f$ ;
- la fonction  $\text{racine}(A)$  qui prends en paramètre un arbre  $A$  et renvoie un sommet de  $A$  appelé racine de l'arbre.

Ces opérations vérifient les propriétés suivantes :

- Une racine n'a pas de père :

$$\text{pere}(A, \text{racine}(A)) = \text{None};$$

- Tout sommet possède un père à l'exception de la racine :

$$\forall s \in A \setminus \{\text{racine}(A)\}, \text{pere}(A, s) \in A;$$

- A partir de tout sommet, on peut accéder à la racine par la relation de paternité :

$$\forall s \in A, \exists k \in \mathbb{N}, \text{racine}(\text{pere}^k(A, s));$$

où  $\text{pere}^k$  se définit récursivement par :  $\text{pere}^0(A, s) = s$  et  $\text{pere}^{k+1}(A, s) = \text{pere}(A, \text{pere}^k(A, s))$  pour  $k \geq 1$ .

- Les fils gauches d'un sommet  $s$  ont pour père  $s$  :

$$\forall s \in A, \quad \text{si } \text{fils\_gauche}(A, s) \neq \text{None} \quad \text{alors } \text{pere}(A, \text{fils\_gauche}(A, s)) = s;$$

— Les fils droits d'un sommet  $s$  ont pour père  $s$  :

$$\forall s \in A, \quad \text{si } \text{fils_droit}(A, s) \neq \text{None} \quad \text{alors} \quad \text{pere}(A, \text{fils_droit}(A, s)) = s.$$

On appelle arbre binaire étiqueté un arbre binaire  $A$  muni de l'opération  $\text{etiquette}(A, s)$  qui à un sommet  $s$  renvoie un élément appelé étiquette de  $s$ .

Sans grande nouveauté, on dessine les étiquettes des arbres binaires comme on les dessine pour les arbres. La figure 27 montre un exemple d'arbre binaire étiqueté.

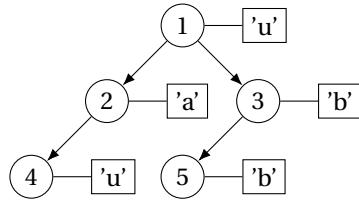


FIGURE 27 – Un arbre binaire étiqueté.

Enfin, pour finir, voici la définition de l'arbre étiqueté (que l'on notera  $B$ ) de la figure 27 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{racine}(B) = 1; \\ \text{pere}(B, \bullet) = \{1: \text{None}, 2: 1, 3: 1, 4: 2, 5: 3\}; \\ \text{fils_gauche}(B, \bullet) = \{1: 2, 2: 4, 3: 5, 4: \text{None}, 5: \text{None}\}; \\ \text{fils_droit}(B, \bullet) = \{1: 3, 2: \text{None}, 3: \text{None}, 4: \text{None}, 5: \text{None}\}; \\ \text{etiquette}(B, \bullet) = \{1: 'u', 2: 'a', 3: 'b', 4: 'u', 5: 'b'\}; \end{array} \right.$$

### Exercice 27

Voici la définition d'un arbre binaire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{racine}(A) = 1; \\ \text{pere}(A, \bullet) = \{1: \text{None}, 4: 1, 5: 4, 8: 5, 9: 5\}; \\ \text{fils_gauche}(A, \bullet) = \{1: 4, 4: \text{None}, 5: 8, 8: \text{None}, 9: \text{None}\}; \\ \text{fils_droit}(A, \bullet) = \{1: \text{None}, 4: 5, 5: 9, 8: \text{None}, 9: \text{None}\}; \\ \text{etiquette}(A, \bullet) = \{1: 'u', 4: 'a', 5: 'b', 8: 'g', 9: 'a'\}. \end{array} \right.$$

Dessiner l'arbre binaire associé.

### Exercice 28

Donnez la définition mathématique de l'arbre binaire de la figure 28.

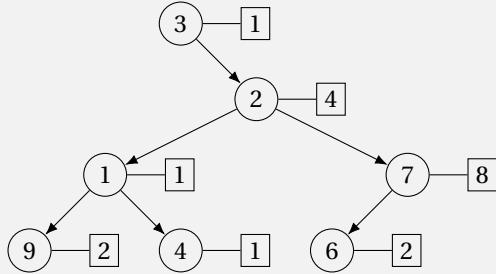


FIGURE 28 – L’arbre binaire  $C$ .

### Exercice 29

Un arbre binaire saturé  $A$  est un arbre dont tous les sommets possèdent 0 ou 2 fils et telle que les feuilles de l’arbre sont toujours à la même distances de la racine, c’est à dire qu’il existe un entier  $h$ , appelé hauteur de l’arbre, telle que, pour toute feuille  $f$ ,  $\text{pere}^h(A, f) = \text{racine}(A)$ .

1. Dessinez des exemples d’arbre binaires saturés ayant, pour hauteurs respectifs,  $h = 0$ ,  $h = 1$ ,  $h = 2$  et  $h = 3$ .
2. En connaissant la valeur de  $h$ , pouvez-vous donner une formule, qui dépend de  $h$ , qui permet de déterminer le nombre de sommets que possède l’arbre  $A$ ?

Généralement, la numérotation des sommets des arbres ne nous intéresse pas beaucoup. Elle est utilisée uniquement pour pouvoir désigner un sommet particulier. Ainsi, il n’est pas rare de représenter les arbres binaires sans le numéro de leurs sommets. Par exemple, la figure 29, montre un arbre binaire où les sommets ne sont pas numérotés.

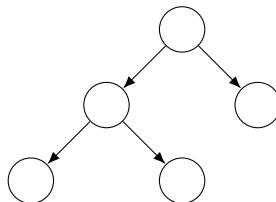


FIGURE 29 – Un exemple d’arbre binaire où les sommets ne sont pas numérotés.

Ainsi, on dit que deux arbres sont équivalents, ou homéomorphe, si ils sont identiques, à renumérotation des sommets prêt. Quand on s’intéresse aux arbres à renumérotation des sommets prêts, alors on ne numérote pas les sommets de l’arbre. La figure 30 montre deux exemples d’arbres binaires équivalents à renumérotation des sommets prêts, ainsi que sa représentation sans numéro de sommet.

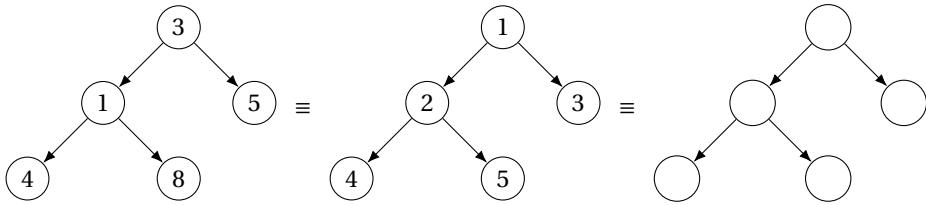


FIGURE 30 – Ces arbres binaires sont équivalents à renumérotation des sommets prêts.

### Exercice 30

1. Combien y-a-t-il d'arbres binaires à renumérotation des sommets prêt, contenant respectivement 0, 1, 2, 3 et 4 sommets? Dessinez ces arbres binaires.
2. (très TRÈS TRÈS DIFFICILE – à ne faire que par passion) Donnez une formule, en fonction du nombre de sommets, qui donne le nombre d'arbres binaires obtenus à renumérotation des sommets prêts (indication pour obtenir la solution : consultez le site <https://oeis.org>).
3. Que dire d'un algorithme, qui, pour trouver une solution, passerait en revue tous les arbres binaires à  $n$  sommets?

## 11.5 Une API pour les arbres binaires

Voici une API possible pour créer les arbres binaires :

```
def creer_arbre_binaire(racine=None, etiquette=None):
    # Crée un arbre binaire contenant la racine `racine`.
    # si racine vaut None, on considère l'arbre vide.
def inserer_racine(A, racine, etiquette=None):
    # ajoute la racine `racine` dans l'arbre et muni la
    # racine de l'étiquette `etiquette`.
def inserer_fils_gauche(A, pere, fils, etiquette=None):
    # Dans l'arbre `A`, ajoute le sommet `fils`
    # comme fils gauche de `pere`.
    # Le sommet `fils` aura pour étiquette `etiquette`.
def inserer_fils_droit(A, pere, fils_droit, etiquette=None):
    # Dans l'arbre `A`, ajoute le sommet `fils`
    # comme fils droit de `pere`.
    # Le sommet `fils` aura pour étiquette `etiquette`.
```

Voici une API possible pour les manipuler :

```
def fils_droit(A, p)
    # renvoie le fils droit du sommet p dans l'arbre A
def fils_gauche(A, p)
    # renvoie le fils gauche du sommet p dans l'arbre A
def pere(A, f)
    # renvoie le père du sommet f dans l'arbre A, ou None
    # si f est la racine
def racine(A)
    # renvoie la racine de l'arbre A
def etiquette(A, f):
```

```
# renvoie l'étiquette de f dans A
```

Et voici une implémentation possible de ces deux API :

```
def creer_arbre_vide():
    return {
        'racine' : None,
        'etiquettes' : {},
        'fils_droit' : {},
        'fils_gauche' : {},
        'pere' : {}
    }

def inserer_ab(A, pere, fils, etiquette=None, type_fils=None):
    if fils is None:
        return
    if not pere is None:
        A[type_fils][pere] = fils
    A['pere'][fils] = pere
    A['fils_gauche'][fils] = None
    A['fils_droit'][fils] = None
    A['etiquettes'][fils] = etiquette

def inserer_fils_gauche(A, pere, fils, etiquette=None):
    inserer_ab(A, pere, fils, etiquette=etiquette, type_fils='fils_gauche')

def inserer_fils_droit(A, pere, fils, etiquette=None):
    inserer_ab(A, pere, fils, etiquette=etiquette, type_fils='fils_droit')

def inserer_racine(A, racine, etiquette=None):
    A['racine'] = racine
    inserer_ab(A, None, racine, etiquette, type_fils=None)

def creer_arbre(racine=None, etiquette=None):
    res = creer_arbre_vide()
    inserer_racine(res, racine, etiquette)
    return res

def racine(A):
    return A['racine']

def fils_gauche(A, s):
    return A['fils_gauche'][s]

def fils_droit(A, s):
    return A['fils_droit'][s]

def pere(A, s):
    return A['pere'][s]

def etiquette(A,s):
    return A['etiquettes'][s]
```

**Exercice 31**

Testez la bibliothèque précédente en implémentant l'arbre binaire étiqueté de la figure 27.

**Exercice 32**

Reprenez l'exercice 26 en l'adaptant pour les arbres binaires. Proposez une figure (comme celle de la figure 23) pour illustrer votre propos et votre implémentation.

## 11.6 Quelques définitions pour les arbres et les arbres binaires

On appelle *taille d'un arbre* le nombre de sommets de l'arbre. Par exemple, la taille de l'arbre de la figure 31 est 7.

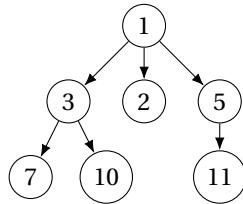


FIGURE 31 – Un exemple d'arbre de taille 7 et de hauteur 2

Dans un arbre  $A$ , la *hauteur d'un sommet*  $s$  est l'entier  $h$  tel que  $pere^h(A, s) = \text{racine}(A)$ . On dit aussi que la *hauteur d'un sommet* est la distance (le nombre d'arête) entre sa racine et lui. Par exemple, dans la figure 31, la hauteur du sommet 3 est 1, la hauteur du sommet 10 est 2 et la hauteur de la racine 1 est 0.

On appelle *hauteur de l'arbre*, la hauteur maximale de ses sommets. Ainsi, la hauteur de l'arbre de la figure 31 est 2.

On dit qu'un sommet  $s$  est un *ancêtre* de  $t$  ou bien que  $t$  est un *descendant* de  $s$  si il existe un entier  $k \geq 0$  tel que :  $pere^k(A, t) = s$ .

Par exemple, toujours dans la figure 31, le sommet 7 est le descendant de 1 et le sommet 1 est l'ancêtre de 7. De même, le sommet 3 est le descendant et l'ancêtre de lui-même. Attention, selon les définitions (et donc selon les livres et articles), un sommet ne peut pas être le descendant (resp. l'ancêtre) de lui-même. Dans ce cours, le choix qui a été fait, est de considérer qu'un sommet est toujours le descendant (resp. ancêtre) de lui-même.

On appelle *sous-arbre* de  $A$  de sommet  $s$  l'arbre  $A'$  constitué uniquement des descendants de  $s$  dans  $A$ , en restreignant la fonction fils aux descendant  $s$  de  $A$  et en définissant  $s$  comme étant la nouvelle racine de ce sous-arbre.

Par exemple, dans la figure 32, l'arbre  $A'$ , qui est à gauche, est un sous-arbre de sommet 3 de l'arbre  $A$ , qui est à droite.

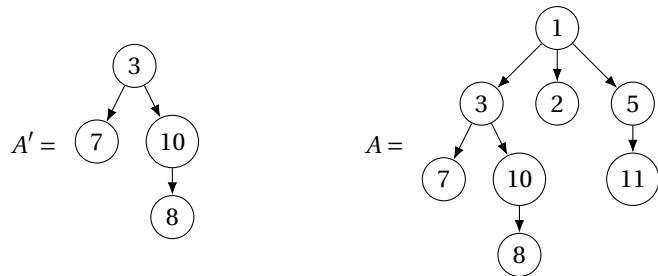


FIGURE 32 – L’arbre  $A'$  est un sous-arbre de sommet 3 de l’arbre  $A$ .

### Exercice 33

Dans cet exercice on considère l’arbre de la figure 33.

1. Donnez la hauteur de cette arbre ainsi que la hauteur de chacun de ses sommets.
2. Pour chacun de ses sommets, donnez leurs ancêtres ainsi que leurs descendants.
3. Pour chacun des ses sommets  $s$  donnez les sous-arbres de racine  $s$ .

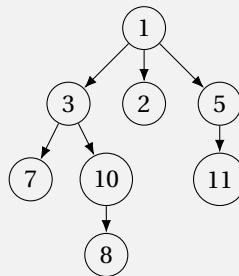


FIGURE 33 – Un arbre.

**Exercice 33.1** Écrivez un programme, qui utilise uniquement l’API des arbres et qui renvoie la taille d’un arbre.

**Exercice 33.2** Écrivez un programme, qui utilise uniquement l’API des arbres et qui renvoie la hauteur d’un sommet d’un arbre.

**Exercice 33.3** Écrivez un programme, qui utilise uniquement l’API des arbres et qui renvoie la hauteur d’un arbre.

## 11.7 Parcours d’un arbre

Il existe plusieurs façons de parcourir les sommets d’un arbre. Dans ce cours, nous allons voir

- 3 parcours pour les arbres et les arbres binaires : le parcours en largeur, le parcours préfixe et le parcours postfixe ;
- 1 parcours pour les arbres binaires uniquement : le parcours infixé.

Un parcours est une façon de passer en revue une et une seule fois tous les sommets de l’arbre. Un parcours est donc représenté par une liste des sommets du graphe.

Commençons par le parcours en largeur.

Le *parcours en largeur* est une liste de sommets ordonnée selon la hauteur des sommets.  
Par exemple, un parcours en largeur possible de l'arbre de la figure 34 est [1,3,2,5,7,10,11,8].

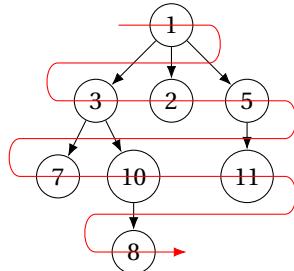


FIGURE 34 – Un parcours en largeur possible d'un arbre.

### Exercice 34

Donnez le parcours en largeur de l'arbre de la figure 35.

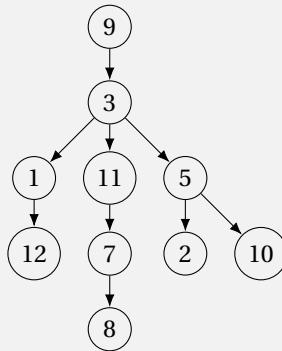


FIGURE 35 – Un arbre.

Dans les arbres binaires il existe trois parcours supplémentaires : le parcours préfixe, infixe et postfixe.

Le parcours préfixe d'un arbre se définit récursivement par

$$\begin{aligned} \text{prefixe}(A) &= \text{prefixe}(A, \text{racine}(s)) \\ \text{prefixe}(A, s) &= [s] + \text{prefixe}(\text{fils_gauche}(A, s)) + \text{prefixe}(\text{fils_droit}(A, s)) \\ \text{prefixe}(A, \text{None}) &= []. \end{aligned}$$

Le parcours infixe d'un arbre se définit récursivement par

$$\begin{aligned} \text{infixe}(A) &= \text{infixe}(A, \text{racine}(s)) \\ \text{infixe}(A, s) &= \text{infixe}(\text{fils_gauche}(A, s)) + [s] + \text{infixe}(\text{fils_droit}(A, s)) \\ \text{infixe}(A, \text{None}) &= []. \end{aligned}$$

Le parcours postfixe d'un arbre se définit récursivement par

$$\begin{aligned} \text{postfixe}(A) &= \text{postfixe}(A, \text{racine}(s)) \\ \text{postfixe}(A, s) &= \text{postfixe}(\text{fils_gauche}(A, s)) + \text{postfixe}(\text{fils_droit}(A, s)) + [s] \\ \text{postfixe}(A, \text{None}) &= []. \end{aligned}$$

Comme l'illustre la figure 36, il est possible de représenter graphiquement ces trois parcours en traçant un chemin qui fait le tour de l'arbre en partant de la racine et en tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ensuite, on dessine

- pour le parcours préfixe, un trait juste à gauche de chaque sommet (cf. le dessin de gauche de la figure 36);
- pour le parcours infixé, un trait juste en dessous de chaque sommet (cf. le dessin du milieu de la figure 36);
- pour le parcours postfixé, un trait juste à droite de chaque sommet (cf. le dessin de droite de la figure 36).

Enfin, les parcours préfixe, resp. infixé et resp. postfixé sont obtenus en faisant le tour de l'arbre et en notant les sommets associés aux traits croisés durant le tour.

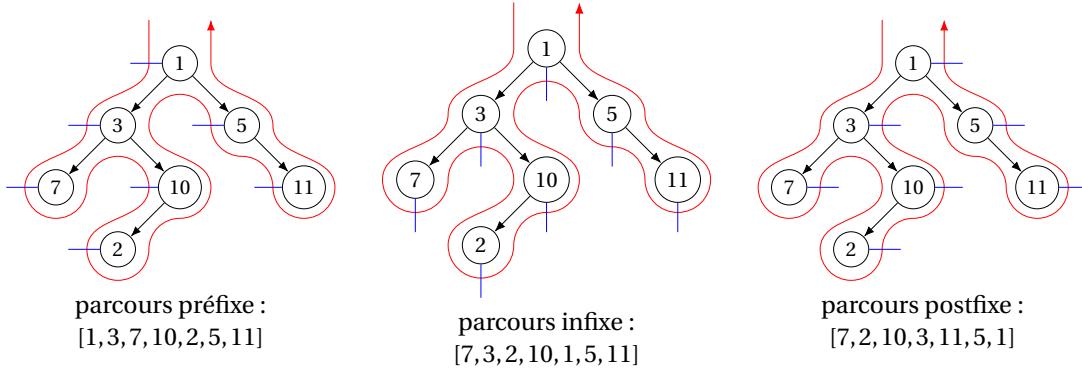


FIGURE 36 – Les parcours préfixe, infixé et postfixé d'un arbre binaire.

### Exercice 35

Donnez et dessinez les parcours préfixe, infixé et postfixé de l'arbre binaire dessiné à la figure 37.

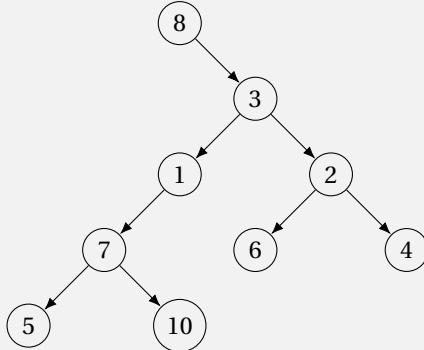


FIGURE 37 – Un arbre binaire.

Les parcours préfixe et postfixé peuvent aussi être définis pour les arbres si les fils sont ordonnés.  
Le parcours préfixe d'un arbre se définit récursivement par :

$$\begin{aligned}
 \text{prefixe}(A) &= \text{prefixe}(A, \text{racine}(s)) \\
 \text{prefixe}(A, s) &= [s] + \sum_{f \in \text{fils}(s)} \text{prefixe}(A, f) \\
 \text{prefixe}(A, \text{None}) &= [].
 \end{aligned}$$

où  $\sum$  est l'opérateur de sommation que l'on définira sur les listes par  $\sum_{f \in [2,5,3,8]} \text{fct}(f) = \text{fct}(2) + \text{fct}(5) + \text{fct}(3) + \text{fct}(8)$ .

De même, le parcours postfixe d'un arbre se définit récursivement par :

$$\begin{aligned}\text{postfixe}(A) &= \text{postfixe}(A, \text{racine}(s)) \\ \text{postfixe}(A, s) &= \left( \sum_{f \in \text{fils}(s)} \text{postfixe}(A, f) \right) + [s] \\ \text{postfixe}(A, \text{None}) &= [].\end{aligned}$$

La figure 38 montre les parcours préfixe et infixe d'un arbre.

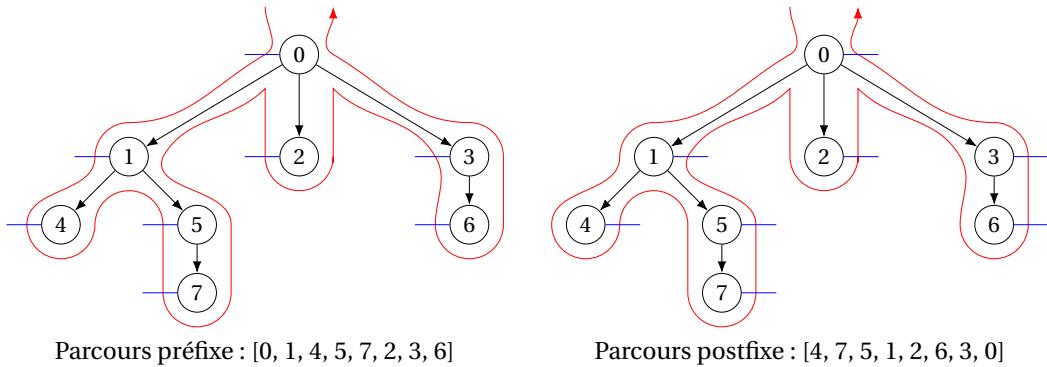


FIGURE 38 – Les parcours préfixe et infixe d'un arbre.

### Exercice 36

1. Donnez les parcours préfixe et postfixe de l'arbre de la figure 35.
2. Peut-on obtenir un parcours infixe pour cette arbre ? Justifiez votre réponse.

Ces parcours jouent un rôle important en informatique. En effet, l'ordre d'exécution des appels de fonctions d'un programme est donné par le parcours préfixe de l'arbre d'exécution (cet ordre est le même que l'ordre des temps de début d'exécution des fonctions d'un programme). De même, l'ordre des temps de fins d'exécution des fonctions d'un programme est donné par le parcours postfixe de ce même arbre. Ces deux parcours jouent donc un rôle important lorsque l'on veut démontrer le fonctionnement d'un algorithme récursif où étudier la complexité d'un algorithme récursif.

Par exemple, étudions le programme `f` qui calcule récursivement la suite de Fibonacci de la manière suivante :

```
def f(n):
    if n == 0 or n == 1:
        return 1
    return f(n-1) + f(n-2)
```

L'arbre des appels récursifs de `fib(4)` est dessiné à la figure 39. Dans cet arbre, lorsqu'une flèche relie un sommet  $s$  à un sommet  $t$ , cela signifie que l'exécution de la fonction présent dans l'étiquette de  $s$  a fait appel à la fonction présent dans l'étiquette de  $t$ . De plus, les fils d'une même fratrie sont ordonnés (de gauche à droite dans le dessin) selon leurs ordres d'exécution dans le temps.

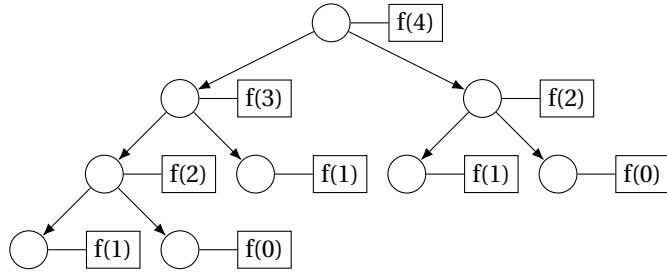


FIGURE 39 – L’arbre des appels récursifs de  $f(4)$ .

Grâce à cet arbre, il est facile maintenant d’évaluer la complexité du programme qui calcule le nombre de Fibonacci. Il s’agit du nombre de sommets de l’arbre multiplié par un constante  $C$  où  $C$  est le nombre d’opérations, hors appels de fonctions, réalisées par  $f$ . Ainsi, comme l’arbre de  $f(4)$  contient 9 sommets, le programme  $f(4)$  réalise  $9 \times C$  opérations, où  $C$  est une constante que l’on peut évaluer à environ une dizaine d’opérations.

Pour finir, nous verrons, à la section sur les arbres binaires de recherche (cf. section 11.8), que l’ordre infixe peut être utilisé pour trier un ensemble d’éléments par ordre croissant.

### Exercice 37

Proposez trois programmes qui prennent en paramètre un arbre binaire et renvoie une liste de sommets ordonnés dans l’ordre des parcours préfixe, infixé et postfixé.

### Exercice 38

Proposez deux programmes qui prennent en paramètre un arbre et renvoie une liste de sommets ordonnés dans l’ordre des parcours préfixe et postfixé.

### Exercice 39

Proposez un programme qui prends en paramètre un arbre et renvoie une liste de sommets ordonnés dans l’ordre du parcours en largeur.

## 11.8 Arbres binaires de recherche

Un arbre binaire de recherche est un arbre étiqueté par des réels où, pour tout sommet  $s$  de l’arbre, on a les propriétés suivantes :

- les étiquettes des sommets du sous-arbre gauche de  $s$  sont toutes plus petites ou égales que l’étiquette de  $s$ ;
- les étiquettes des sommets du sous-arbre droit de  $s$  sont toutes strictement plus grandes que l’étiquette de  $s$ .

Par exemple, l’arbre de la figure 40 est un arbre binaire de recherche.

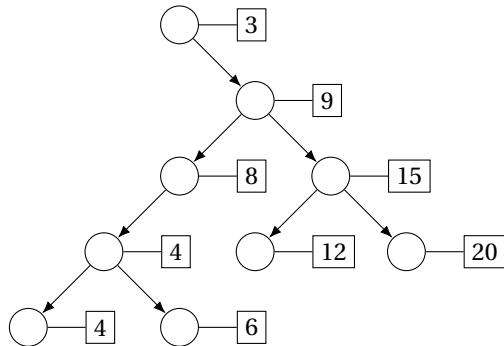


FIGURE 40 – Un arbre binaire de recherche.

A contrario, l’arbre de la figure 41 n’est pas un arbre binaire de recherche. En effet, le sommet  $s$  qui est dans le sous-arbre gauche de  $t$  possède une étiquette plus grande que celle de  $t$ .

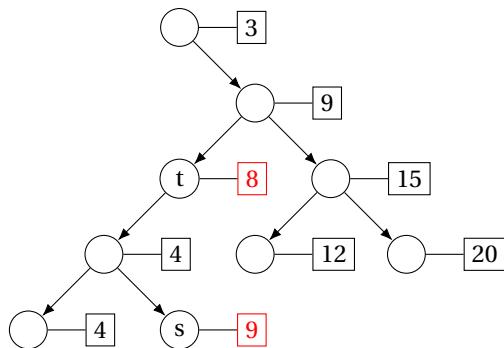


FIGURE 41 – Cet arbre n’est pas un arbre binaire de recherche.

#### Exercice 40

1. Donnez des exemples d’arbres binaires de recherche ;
2. Pour chacun des ces arbres, ainsi que pour l’arbre de la figure 40, ordonnez les étiquettes dans l’ordre du parcours infixe de leurs sommets. Que remarquez-vous ? Pourquoi ?
3. Donnez des exemples d’arbres binaires qui ne sont pas des arbres binaires de recherches.
4. Que se passe-t-il, cette fois-ci, lorsque vous ordonnez les étiquettes dans l’ordre du parcours infixe de leurs sommets ?

Les arbres binaires de recherche permettent de faire une recherche dichotomique dans un ensemble d’éléments avec répétition que l’on appelle généralement *multiensemble*.

L’idée est d’utiliser les étiquettes d’un arbre binaire de recherche pour coder un multiensemble.

Par exemple, l’arbre de la figure 40 encode le multiensemble  $\{\{3, 4, 4, 6, 8, 9, 12, 15, 20\}\}$ .

Il faut noter que plusieurs arbres binaires de recherche peuvent partager le même multiensemble. Par exemple, l’arbre de la figure 42 possède le même multiensemble que celui de la figure 40.

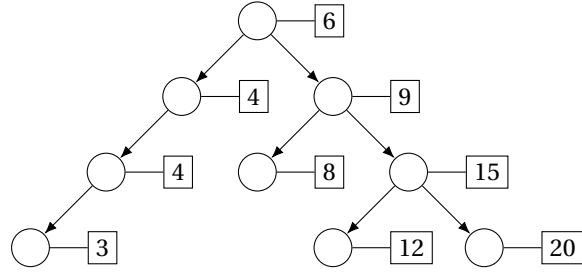


FIGURE 42 – Les étiquettes de cet arbre forme le même multiensemble que celui de la figure 40.

Pour chercher un élément dans un multiensemble codé par un arbre binaire de recherche, il suffit de parcourir les sommets de l'arbre, en partant de la racine, et à chaque sommet, on se déplace (si c'est possible) sur le sommet de gauche si l'élément recherché est strictement plus petit que l'étiquette du sommet courant et sur le fils droit si l'élément est strictement plus grand. Le parcours s'arrête quand on trouve l'élément cherché dans l'étiquette du sommet courant ou qu'il n'est plus possible de se déplacer dans l'arbre. A la fin du parcours, le multiensemble contient l'élément cherché  $e$  si et seulement si le parcours se termine sur un sommet d'étiquette  $e$ .

Par exemple, l'arbre de la figure 43 code le multiensemble  $\{2, 2, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 14, 16\}$  et la recherche dichotomique de 10 dans ce multiensemble est symbolisée par un chemin en rouge et gras dans l'arbre binaire de recherche. Comme le parcours associé se termine sur un sommet étiqueté 10, on en déduit que le multiensemble contient l'élément 10. Maintenant, si on cherche l'élément 11, on obtient le parcours symbolisé par un chemin en rouge et gras dans l'arbre de la figure 44. Comme le parcours se termine sur une feuille qui n'est pas étiquetée par 11, mais par 12, alors le multiensemble ne contient pas l'élément 11. Enfin, si on cherche l'élément 9, on obtient le parcours symbolisé par un chemin en rouge et gras dans l'arbre de la figure 44. Comme le parcours se termine sur un sommet qui n'est pas étiqueté par 9, mais par 10, alors le multiensemble ne contient pas l'élément 9.

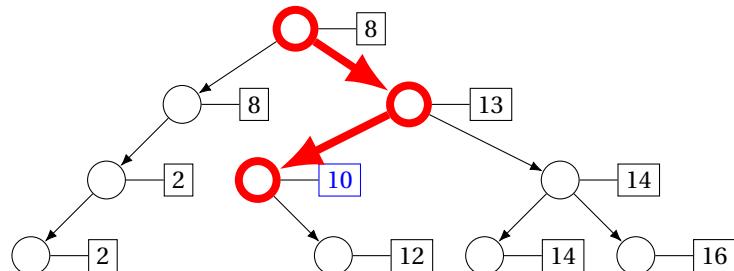


FIGURE 43 – La recherche fructueuse de l'élément 10 dans un arbre binaire de recherche.

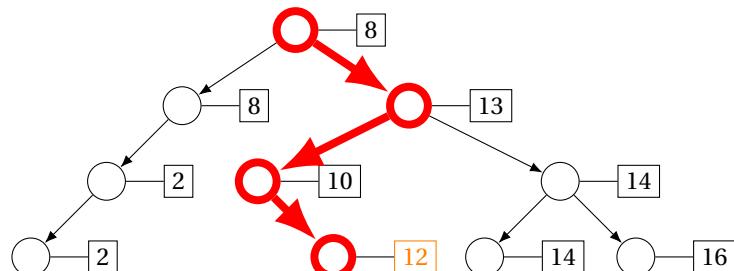


FIGURE 44 – La recherche infructueuse de l'élément 11 dans un arbre binaire de recherche.

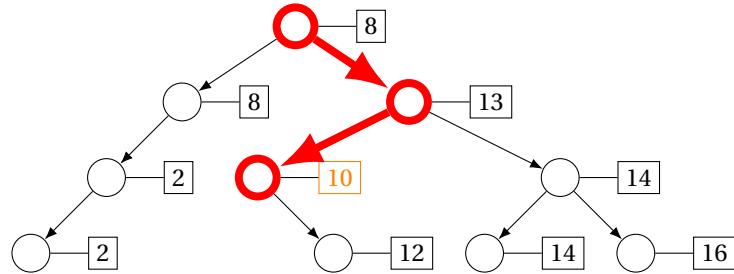


FIGURE 45 – La recherche infructueuse de l’élément 9 dans un arbre binaire de recherche.

#### Exercice 41

Appliquez l’algorithme de recherche dichotomique pour trouver l’élément 4 dans l’arbre de la figure 40. Vous dessinerez le parcours de la recherche sur l’arbre.  
Faites de même pour l’élément 6 et l’élément 11.

#### Exercice 42

Combien d’opérations est-il nécessaire, dans le pire cas, pour trouver un élément dans un arbre binaire de recherches ? Est-ce beaucoup ?

#### Exercice 43

Donnez une implémentation de la recherche dichotomique dans un arbre binaire de recherche.

A partir d’un arbre binaire de recherche, on peut insérer une nouveau sommet d’étiquette  $e$  en utilisant l’algorithme d’insertion.

L’algorithme d’insertion se réalise en deux étapes :

1. La première étape consiste à exécuter une variante de l’algorithme de recherche d’un élément, où, au lieu de s’arrêter au moment où l’on trouve un sommet d’étiquette  $e$ , on continue le parcours en se déplaçant sur le fils gauche du sommet courant (si il existe).  
On note  $t$  le sommet obtenu par ce parcours.
2. la deuxième étape consiste à insérer le nouveau sommet  $s$ 
  - en tant que fils droit de  $t$  si  $e$  est strictement plus grand que l’étiquette de  $t$ , et
  - en tant que fils gauche de  $t$  sinon.

L’arbre obtenu est un arbre binaire de recherche.

Par exemple, la figure 46 illustre l’insertion d’un nouveau sommet d’étiquette 9 dans un arbre binaire de recherche.

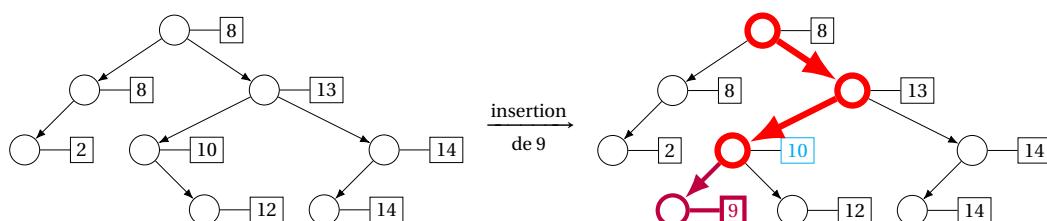


FIGURE 46 – Insertion du sommet d’étiquette 9 dans un arbre binaire de recherche.

La figure 47, quand à elle, montre l'insertion d'un sommet d'étiquette 12 dans le même arbre binaire de recherche.

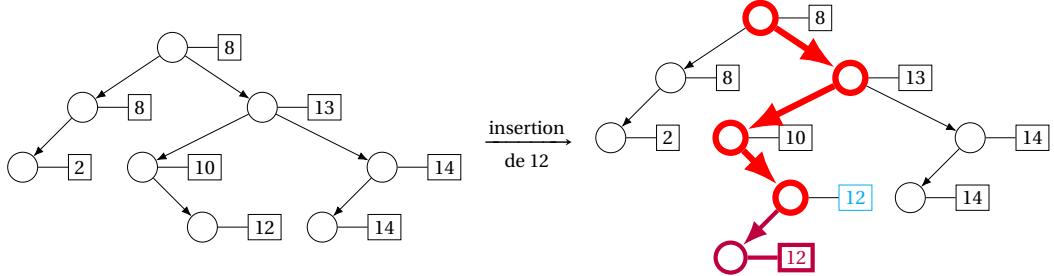


FIGURE 47 – Insertion du sommet d'étiquette 12 dans un arbre binaire de recherche.

Enfin, la figure 48, présente le cas de l'insertion d'un sommet d'étiquette 13.

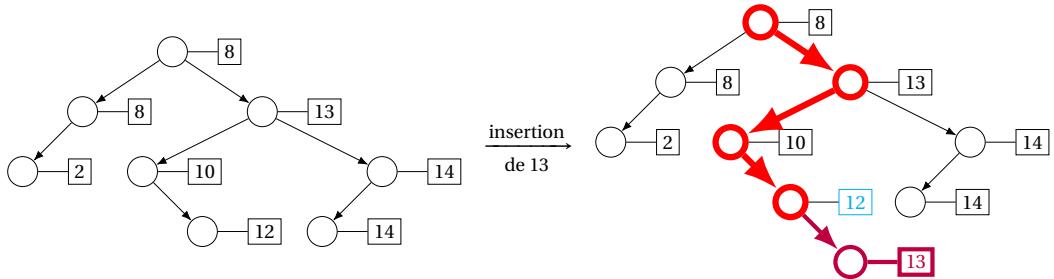


FIGURE 48 – Insertion du sommet d'étiquette 13 dans un arbre binaire de recherche.

Ainsi, pour construire un arbre binaire de recherche associé à une liste, il suffit de mettre le premier élément de la liste à la racine, puis d'insérer dans l'arbre tous les autres éléments, un à un, à l'aide de l'algorithme d'insertion.

Par exemple, l'arbre binaire de recherche obtenu à partir de la liste  $l = [5, 8, 1, 2, 2, 5, 9]$  est donné à la figure 49.

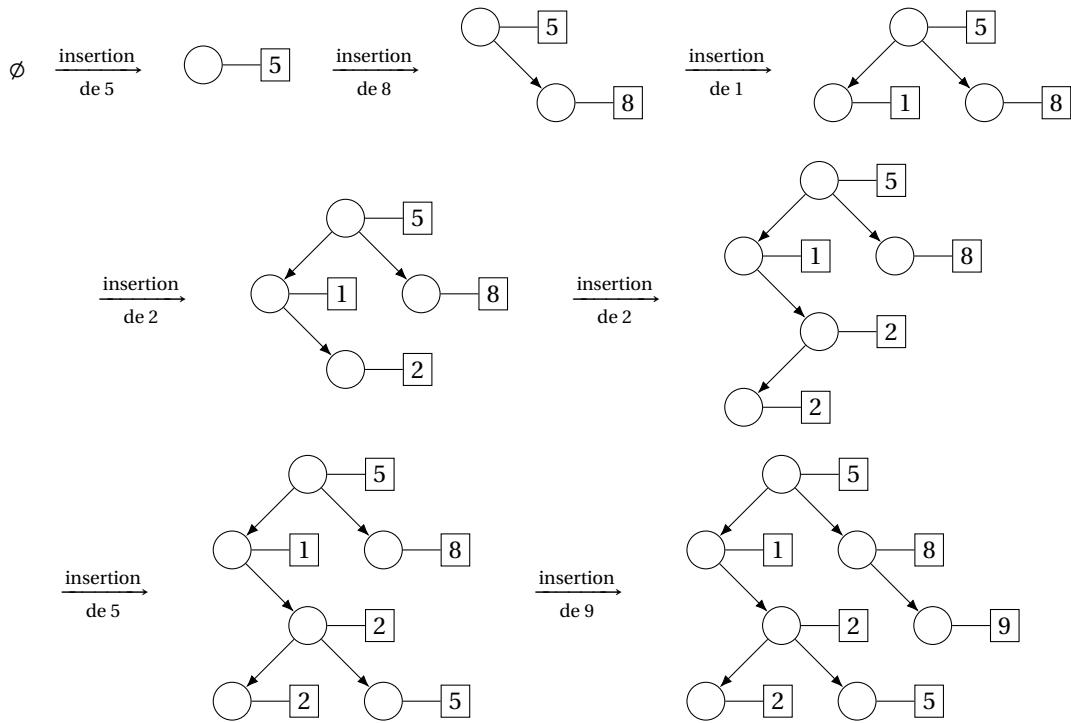


FIGURE 49 – Construction de l'arbre binaire de recherche associé à l'insertion des éléments de la liste [5, 8, 1, 2, 2, 5, 9].

#### Exercice 44

Donnez l'arbre binaire de recherche obtenu en insérant les éléments de  $l = [4, 3, 5, 5, 1, 1, 2, 8, 3]$  dans un arbre initialement vide, à l'aide de l'algorithme d'insertion. Que se passe-t-il si on change l'ordre de la liste? Que se passe-t-il si on tri la liste, par ordre croissant, puis par ordre décroissant?

#### Exercice 45

Écrivez un programme qui à partir d'une liste d'entiers construit un arbre binaire de recherche contenant les éléments de cette liste en utilisant l'algorithme d'insertion dans les arbres binaires de recherche.

Lorsque l'on ordonne les étiquettes selon l'ordre du parcours infixé des arbres binaires de recherche, on obtient une liste triée contenant toutes les étiquettes de l'arbre.

Par exemple, le parcours infixé de l'arbre 50 donne :  $[s_1, s_5, s_3, s_6, s_0, s_2, s_4]$ . Si l'on remplace les sommets par leurs étiquettes, on obtient la liste triée [1, 2, 2, 5, 5, 8, 9] de toutes les étiquettes de l'arbre.

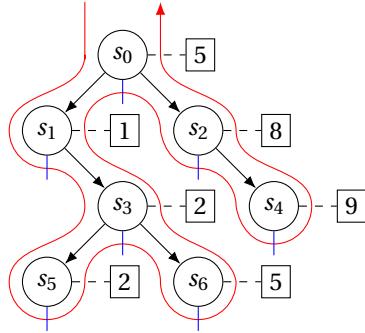


FIGURE 50 – Trier les étiquettes d'un arbre binaire de recherche à l'aide du parcours infixé.

Il est donc maintenant possible de proposer un nouvel algorithme de tri qui consiste à :

1. construire l'arbre binaire de recherche associé à la liste à triée,
2. calculer le parcours infixé de l'arbre,
3. remplacer les sommets du parcours précédent par leurs étiquettes.

#### Exercice 46

Appliquez l'algorithme précédent pour trier la liste  $l = [3, 1, 2, 5, 4, 6, 2, 2, 8]$  dans l'ordre croissant.

#### Exercice 47

Écrivez en python, l'algorithme de tri utilisant les arbres binaires de recherche.

## 12 Les graphes

Ce cours a été écrit en utilisant le livre [2] intitulé *Graph Theory* de Diestel et le livre [1] intitulé *Introduction to Algorithms*, de Cormen et al.

### 12.1 Ensembles, multiensembles, listes et mots

Dans cette section nous allons rappeler les définitions d'ensemble, de multiensemble, de liste et de mot. Nous donnerons leurs notations mathématiques, ainsi que leurs implémentations en python.

#### Les ensembles

Un *ensemble* est une collection non ordonnée d'éléments sans répétitions. On note les ensembles en écrivant leurs éléments séparés par des virgules et entourés pas des accolades.

Par exemple, l'ensemble  $E$  constitué des éléments 1, 4 et 5 est noté par :

$$E = \{1, 4, 5\} = \{4, 1, 5\}.$$

Dans la notation, l'ordre des éléments n'est pas important car un ensemble n'est pas ordonné.

De même comme, les ensembles sont des collections sans répétition, alors on considère que :

$$\{1, 4, 5, 1, 5\} = \{1, 4, 5\}.$$

## Les multiensembles

Un multiensemble est une collection non ordonnée d'éléments avec répétition. On note les multiensemble en écrivant leurs éléments séparés par des virgules et entourés pas des doubles accolades.

Par exemple, le multiensemble  $M$  constitué de deux 1, un seul 4, trois 5 est noté par :

$$M = \{\{4, 1, 5, 1, 5, 5\}\} = \{\{1, 4, 5, 5, 1, 5\}\}.$$

Dans la notation, l'ordre des éléments n'est pas important car un multiensemble n'est pas ordonnée.

Ainsi, contrairement aux ensembles, on a :

$$\{\{1, 4, 5, 1, 5\}\} \neq \{\{1, 4, 5\}\} \quad \text{et aussi} \quad \{\{1, 1\}\} \neq \{\{1\}\}.$$

## Les mots ou les uplets

Un mot (appelé aussi uplet) est une collection ordonnée d'éléments avec répétition. On note les mots en écrivant leurs éléments, séparés par des virgules, dans l'ordre et que l'on entoure par de parenthèses.

Par exemple, le mot (ou uplet)  $W$  constitué, dans l'ordre, des éléments 4, 5, 1, 5, 5, 1 est noté par :

$$W = (4, 5, 1, 5, 5, 1).$$

Dans la notation, l'ordre des éléments est important, ainsi,  $(4, 5, 1, 5, 5, 1) \neq (1, 1, 4, 5, 5, 5)$ .

Les uplets à deux éléments sont appelés des *paires*. Par exemple, le uplet  $(2, 1)$  est une paire. On dit qu'un mot est sans répétition si le mot ne contient pas deux fois le même élément. Par exemple,  $(1, 5, 4)$  est un mot sans répétition. Enfin, on appelle *permutation* un mot sans répétition dont les éléments sont en correspondance deux à deux avec  $\{1, 2, \dots, n\}$ . Par exemple,  $(1, 4, 3, 2)$  et  $(1, 2, 4, 3)$  sont deux permutations différentes, alors que  $(1, 5, 3, 2)$  n'est pas une permutation.

## Les dictionnaires ou les associations

On appelle *dictionnaire* un ensemble de paires  $(k, v)$  où  $(k, v)$ . Les paires des dictionnaires sont appelés des *associations* où  $k$  est appelé la clef et  $v$  la valeur de l'association. Un dictionnaire  $D$  vérifie la propriété que deux associations distinctes ont toujours deux clefs distinctes :

$$\forall (k_1, v_1) \in D, \quad \forall (k_2, v_2) \in D, \quad (k_1, v_1) \neq (k_2, v_2) \implies k_1 \neq k_2.$$

## Implémentation des uplets, paires, ensembles, multiensembles et permutations en python

Dans le tableau ci-dessous vous trouverez comment il est possible d'implémenter chacune des ces collections en python.

collection	Notation mathématique	structure de donnée python	code python	remarques
un uplet ou un mot	$(4, 1, 4, 5, 1)$	list	$l = [4, 1, 4, 5, 1]$	modifiable
		tuple	$l = (4, 1, 4, 5, 1)$	non modifiable
une paire	$(2, 1)$	list/tuple	$l = [2, 1]$	/
un ensemble	$\{4, 1, 5\}$	list/tuple trié	$l = [1, 4, 5]$	/
un multiensemble	$\{\{4, 1, 4, 5, 1\}\}$	list/tuple trié	$l = [1, 1, 4, 4, 5]$	/
une permutation	$(1, 4, 3, 2)$	list/tuple	$l = [1, 4, 3, 2]$	/
un dictionnaire	$\{\{1, 3\}, \{2, 3\}, \{5, 4\}\}$ ou bien $\{1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 3, 5 \rightarrow 4\}$	dict	$d = \{1 : 3, 2 : 3, 5 : 4\}$	/

**Exercice 48**

Donnez des exemples de mots, de paires, d'ensembles, de multiensembles, de permutations et de dictionnaires.

Pour chacun de vos exemples, donnez le code python équivalent.

## 12.2 Définition des graphes

### 12.2.1 Les graphes non orientés

Un graphe non orienté est une structure de données particulière que nous allons décrire sur un exemple particulier, avant de donner une définition formelle.

Un graphe non orienté est une structure constitué de sommets et d'arêtes.

Les sommets sont des éléments représentés dans la figure 51 par des numéros entourés d'un cercle. Dans le cas de la figure 51, les sommets sont  $v_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$ .

Les arêtes, quand à elles, sont représentées dans la figure par des traits reliant les sommets. Les arêtes sont codées par un ensemble  $E$  d'éléments muni d'une *fonction d'incidence*, notée  $\Gamma$ , qui à toute arête  $e$ , permet d'obtenir les sommets incidents à  $e$ , c'est à dire les sommets situés aux extrémités du trait associé à l'arête  $e$  dans son dessin. Par exemple, dans la figure 51, l'arête  $e_2$  relie les sommets  $V_0$  et  $V_1$ .

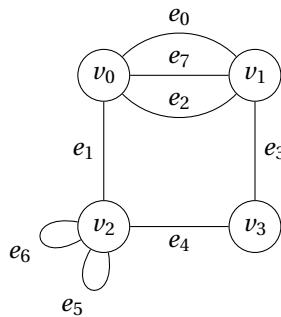


FIGURE 51 – Un graphe  $G$  non orienté.

Voici maintenant la définition formelle des graphes non orientés.

Un graphe non orienté est un 3-uplet  $(V, E, \Gamma)$  constitué d'un ensemble  $V$  d'éléments appelés sommets, d'un ensemble  $E$  d'éléments appelés arêtes et d'une fonction d'incidence, notée  $\Gamma$  qui à toute arête de  $E$  renvoie un multiensemble d'exactement 2 sommets de  $V$ .

Voici un exemple de graphe  $G$  à 4 sommets et 8 arêtes :

$$\begin{aligned} G &= (V, E, \Gamma), \\ V &= \{v_0, v_1, v_2, v_3\}, \\ E &= \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}, \\ \Gamma &= \left\{ \begin{array}{l} e_0 : \{\{v_0, v_1\}\}, \quad e_1 : \{\{v_0, v_2\}\}, \quad e_2 : \{\{v_0, v_1\}\}, \quad e_3 : \{\{v_1, v_3\}\}, \\ e_4 : \{\{v_2, v_3\}\}, \quad e_5 : \{\{v_2, v_2\}\}, \quad e_6 : \{\{v_2, v_2\}\}, \quad e_7 : \{\{v_0, v_1\}\} \end{array} \right\}. \end{aligned}$$

Ce graphe est représentée à la figure 51.

On appelle sommet incident à une arête  $e \in E$  les sommets de  $\Gamma(G, e)$ .

Ainsi, dans le graphe de la figure 51, les sommets incidents de  $e_4$  sont  $v_2$  et  $v_3$  car  $\Gamma(G, e_4) = \{\{v_2, v_3\}\}$ .

On appelle *boucle* toute arête dont les sommets incidents sont identiques. Par exemple, dans le précédent graphe, les arêtes  $e_5$  et  $e_6$  sont des boucles car les multiensembles de  $\Gamma(G, e_5)$  et  $\Gamma(G, e_6)$  contiennent à chaque fois deux fois le même sommet.

**Exercice 49**

Donnez la définition mathématique du graphe  $G_1$  de la figure 52.

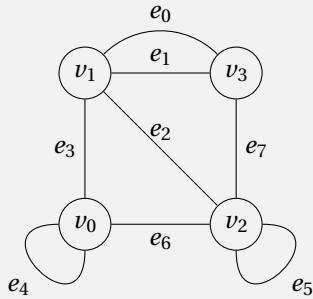


FIGURE 52 – Le graphe  $G_1$ .

**Exercice 50**

Dessinez le graphe  $G_2$  défini mathématiquement par :

$$G_2 = (V_2, E_2, \Gamma_2)$$

$$V_2 = \{v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$$

$$E_2 = \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$$

$$\Gamma_2 = \left\{ \begin{array}{l} e_0 : \{\{v_0, v_2\}\}, \quad e_1 : \{\{v_1, v_2\}\}, \quad e_2 : \{\{v_0, v_1\}\}, \quad e_3 : \{\{v_4, v_5\}\}, \\ e_4 : \{\{v_4, v_5\}\}, \quad e_5 : \{\{v_1, v_1\}\}, \quad e_6 : \{\{v_1, v_1\}\}, \quad e_7 : \{\{v_4, v_4\}\} \end{array} \right\}$$

### 12.2.2 Les graphes orientés

Comme pour les graphes non orientés nous allons décrire les graphes orientés sur un exemple particulier avant de donner une définition formelle.

Un graphe orienté est une structure constituée de sommets et d'arcs.

Les sommets sont des éléments représentés dans la figure 53 par des numéros entourés d'un cercle. Dans le cas de la figure 53, les sommets sont  $v_0$ ,  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$ .

Les arcs, eux, sont représentés dans la figure par des flèches reliant un sommet origine à un sommet fin. Les arcs sont codés par un ensemble  $E$  d'éléments muni d'une *fonction d'incidence*, notée  $\vec{\Gamma}$ , qui à toute arc  $e$ , permet d'obtenir une paire de sommets, dont le premier représente l'origine de l'arc et le second la fin. Il s'agit des sommets situés aux extrémités de la flèche associée à l'arc  $e$  dans la représentation graphique du graphe. Par exemple, dans la figure 53, l'arc  $e_2$  relie le sommet  $V_1$  au sommet  $V_0$  de sorte que  $V_1$  est l'origine de  $e_2$  et  $V_0$  sa fin.

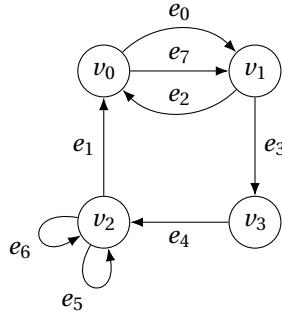


FIGURE 53 – Un graphe  $G$  orienté.

Voici maintenant la définition formelle des graphes orientés.

Un graphe orienté est un 3-uplet  $(V, E, \vec{\Gamma})$  constitué d'un ensemble  $V$  d'éléments appelés sommets, d'un ensemble  $E$  d'éléments appelés arcs et d'une fonction d'incidence, notée  $\vec{\Gamma}$  qui à tout arc de  $E$  renvoie une paire de 2 sommets de  $V$ .

Voici un exemple de graphe orienté  $G$  à 4 sommets et 8 arcs :

$$\begin{aligned} G &= (V, E, \vec{\Gamma}), \\ V &= \{v_0, v_1, v_2, v_3\}, \\ E &= \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}, \\ \vec{\Gamma} &= \left\{ \begin{array}{l} e_0 : (v_0, v_1), \quad e_1 : (v_2, v_0), \quad e_2 : (v_1, v_0), \quad e_3 : (v_1, v_3), \\ e_4 : (v_3, v_2), \quad e_5 : (v_2, v_2), \quad e_6 : (v_2, v_2), \quad e_7 : (v_0, v_1) \end{array} \right\}. \end{aligned}$$

Ce graphe est représentée à la figure 53.

Dans la suite de ce document on appellera *taille du graphe* le nombre de sommet de ce graphe. Ainsi, pour un graphe  $G$  donné, on le notera  $N$  ou bien  $|G|$ . Par exemple, la taille du graphe de la figure 53 est 4.

On appelle sommet incident à un arc  $e \in E$  les sommets de  $\vec{\Gamma}(G, e)$ . On appelle origine d'un arc  $e$  le sommet  $\vec{\Gamma}(G, e)[0]$ . On appelle fin d'un arc  $e$  le sommet  $\vec{\Gamma}(G, e)[1]$ .

Ainsi, dans le graphe de la figure 53, les sommets incidents de  $e_4$  sont  $v_2$  et  $v_3$  car  $\vec{\Gamma}(G, e_4) = (v_3, v_2)$ . De surcroît,  $v_3$  est l'origine de  $e_4$  et  $v_2$  est sa fin.

On appelle *boucle* tout arc dont les sommets incidents sont identiques. Par exemple, dans le précédent graphe, les arcs  $e_5$  et  $e_6$  sont des boucles car les sommets de  $\vec{\Gamma}(G, e_5)$  sont identiques. Idem pour  $\vec{\Gamma}(G, e_6)$ .

### Exercice 51

Donnez la définition mathématique du graphe  $G_1$  de la figure 54.

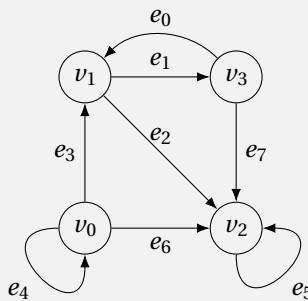


FIGURE 54 – Le graphe de l'exercice 51.

**Exercice 52**

Dessinez le graphe  $G_2$  défini mathématiquement par :

$$\begin{aligned} G_2 &= (V_2, E_2, \vec{\Gamma}_2) \\ V_2 &= \{v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\} \\ E_2 &= \{e_0, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, v_7\} \\ \vec{\Gamma}_2 &= \left\{ \begin{array}{l} e_0 : (v_0, v_2), \quad e_1 : (v_2, v_0), \quad e_2 : (v_0, v_1), \quad e_3 : (v_4, v_5), \\ e_4 : (v_4, v_5), \quad e_5 : (v_1, v_1), \quad e_6 : (v_1, v_1), \quad e_7 : (v_4, v_4) \end{array} \right\} \end{aligned}$$

**12.2.3 Les graphes étiquetés (orientés et non orienté)**

On munit les sommets et les arêtes (respectivement les arcs) d'étiquettes, c'est à dire d'une fonction qui associe à chaque sommet et à chaque arête (resp. arc) un élément appelé étiquette.

Les graphes non orientés (resp. orienté) sont alors notés par un quintuplet :  $(V, E, \Gamma, W^V, W^E)$  (resp.  $(V, E, \vec{\Gamma}, W^V, W^E)$ ) où  $W^V$  et  $W^E$  sont les fonctions étiquetant respectivement les sommets et les arêtes/arcs.

**12.2.4 Arêtes et arcs multiples, cas particuliers et notations abusives**

Deux arêtes (resp. arcs)  $e_1$  et  $e_2$  sont des arêtes (resp. arcs) multiples si ils partagent la même incidences :  $\Gamma(e_1) = \Gamma(e_2)$  (resp.  $\vec{\Gamma}(e_1) = \vec{\Gamma}(e_2)$ ).

Par exemple, dans le graphe non orienté de la figure 51, les arêtes  $e_0, e_7$  et  $e_2$  sont des arêtes multiples car  $\Gamma(e_0) = \Gamma(e_2) = \Gamma(e_7) = \{\{v_0, v_1\}\}$ . De même, toujours dans ce même graphe,  $e_6$  et  $e_5$  sont des arêtes multiples car  $\Gamma(e_6) = \Gamma(e_5) = \{\{v_2, v_2\}\}$ .

De même, dans le graphe orienté de la figure 53, les arcs  $e_0, e_7$  sont des arcs multiples car :  $\vec{\Gamma}(e_0) = \vec{\Gamma}(e_7) = (v_0, v_1)$ . Par contre, l'arc  $e_2$  n'est pas un arc multiple car c'est le seul arc à avoir comme incidence  $\vec{\Gamma}(e_2) = (v_1, v_0)$ .

Lorsque le graphe n'a pas d'arêtes (resp. arcs) multiples, les tables  $\Gamma$  (resp.  $\vec{\Gamma}$ ) et  $E$  sont abusivement fusionnés. Par exemple, la définition mathématique du graphe de la figure 55 peut, abusivement, être donnée par :

$$G = (V, E), \quad V = \{v_0, v_1, v_2\} \quad \text{et} \quad E = \{ \{\{v_0, v_1\}\}, \{\{v_1, v_1\}\}, \{\{v_1, v_2\}\}, \{\{v_0, v_2\}\} \}.$$

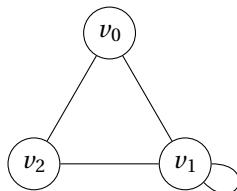


FIGURE 55 – Le graphe  $G$ .

Dans ce cas, ou quand aucune confusion ne peut être faite, les arêtes (resp. arcs)  $e$  sont alors désignées à l'aide de leur incidences  $\Gamma(e)$  (resp.  $\vec{\Gamma}(e)$ ).

**Exercice 53**

Donnez un exemple de graphe orienté qui possède des arcs multiples et un autre qui n'en possède pas.

**Exercice 54**

Donnez un exemple de graphe non orienté qui possède des arêtes multiples et un autre qui n'en possède pas.

**Exercice 55**

Donnez un exemple de graphe orienté qui ne possède pas d'arcs multiples, mais qui, si on retire les orientations de ses arcs, donne un graphe non orienté avec des arêtes multiples.

**12.2.5 Chemins et chaînes**

Dans un graphe orienté, un *chemin* de taille  $l$  est une séquence

$$s_0, a_1, s_1, a_2, s_2, \dots, a_l, s_l$$

où  $s_0, s_1, \dots, s_l$  sont des sommets et  $a_0, a_1, \dots, a_l$  sont des arcs tels que, pour tout entier  $i \in \llbracket 1, l \rrbracket$ , on ait

$$\vec{\Gamma}(a_i) = (s_{i-1}, s_i),$$

c'est à dire,

$$\begin{cases} \text{origine}(a_i) &= s_{i-1}, \\ \text{fin}(a_i) &= s_i. \end{cases}$$

Par exemple, dans le graphe de la figure 56, la séquence :

$$v_3, e_0, v_1, e_1, v_3, e_7, v_2, e_5, v_2, e_5, v_2$$

est un chemin dans le graphe qui part du sommets  $v_3$ , passe par les sommets  $v_1$  et  $v_3$  puis traverse le sommet  $v_2$  deux fois avant de terminer sa course de nouveau en  $v_2$ .

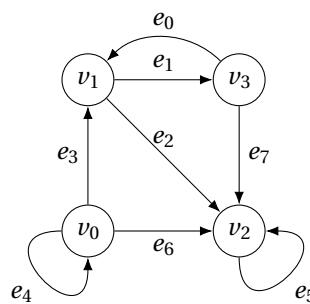


FIGURE 56 – Le graphe  $G_1$ .

Par contre, la séquence  $v_1, e_2, v_2, e_6, v_0, e_4, v_0$  n'est pas un chemin du graphe car l'arc  $e_6$  est dans le mauvais sens :  $\vec{\Gamma}(e_6) \neq (v_2, v_0)$ .

Dans la définition de chemin, il n'est pas possible de prendre un arc à l'envers. On souhaite donc pouvoir construire des "chemins" qui s'affranchisse de cette contrainte. C'est la définition de la chaîne.

Dans un graphe non orienté, une *chaîne* de taille  $l$  est une séquence

$$s_0, a_1, s_1, a_2, s_2, \dots, a_l, s_l$$

où  $s_0, s_1, \dots, s_l$  sont des sommets et  $a_0, a_1, \dots, a_l$  sont des arcs tels que, pour tout entier  $i \in \llbracket 1, l \rrbracket$ , on ait

$$\Gamma(a_i) = (s_{i-1}, s_i) \quad \text{ou bien} \quad \Gamma(a_i) = (s_i, s_{i-1}).$$

Par exemple, dans le graphe de la figure 56, la séquence :

$$v_3, e_0, v_1, e_1, v_3, e_7, v_2, e_5, v_2, e_5, v_2$$

est bien sur une chaîne dans le graphe, mais aussi la séquence  $v_1, e_2, v_2, e_6, v_0, e_4, v_0$  car cette fois-ci, l'une des deux assertions suivantes est vraie :  $\vec{\Gamma}(e_6) = (v_2, v_0)$  ou  $\vec{\Gamma}(e_6) = (v_0, v_2)$ .

Évidemment, on peut étendre la définition des chaînes pour les graphes non orientés comme il suit. Dans un graphe non orienté, une *chaîne* est une séquence

$$s_0, a_1, s_1, a_2, s_2, \dots, a_l, s_l$$

où  $s_0, s_1, \dots, s_l$  sont des sommets et  $a_0, a_1, \dots, a_l$  sont des arêtes telles que, pour tout entier  $i$ , on ait

$$\vec{\Gamma}(a_i) = \{s_{i-1}, s_i\}.$$

Par exemple, dans le graphe non orienté de la figure 57, la séquence :

$$v_3, e_0, v_1, e_1, v_3, e_7, v_2, e_5, v_2, e_5, v_2$$

est une chaîne dans le graphe.

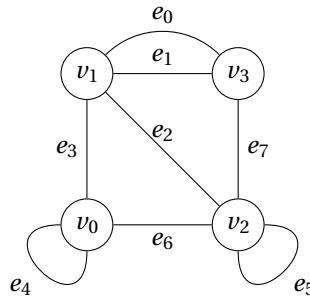


FIGURE 57 – Le graphe  $G_1$ .

De même, la séquence  $v_1, e_2, v_2, e_6, v_0, e_4, v_0$  est une chaîne du graphe car, entre autres,  $\vec{\Gamma}(e_6) = \{\{v_2, v_0\}\} = \{\{v_0, v_2\}\}$ .

### Exercice 56

- Donnez des exemples de chemins et de chaînes dans le graphe de la figure 58.
- Proposez, des exemples de séquences qui ne sont, ni des chemins, ni des chaînes.
- Donnez des exemples de chaînes qui ne sont pas des chemins.
- Peut-on trouver des chemins qui ne sont pas des chaînes? Justifier votre réponse.

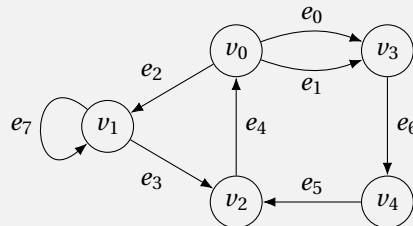


FIGURE 58 – Le graphe de l'exercice 56.

### 12.2.6 Accessibilité, connexité, forte connexité, composantes connexes et composantes fortement connexes

On dit que le sommet  $s_1$  est *accessible* depuis le sommet  $s_0$  s'il existe un chemin (resp. une chaîne) qui relie  $s_0$  à  $s_1$  dans le graphe orienté (resp. non orienté).

Par exemple, dans le graphe orienté de la figure 59, le sommet  $v_2$  est accessible depuis le sommet  $v_0$ . Par contre, les sommets  $v_3$  et  $v_4$  ne sont pas accessibles depuis  $v_0$ .

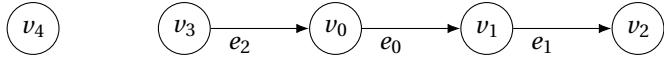


FIGURE 59 – Le sommet  $v_2$  est accessible depuis  $v_0$ . Les sommets  $v_3$  et  $v_4$  ne sont pas accessibles depuis  $v_0$ .

Deux sommets  $s_0$  et  $s_1$  sont *connexes* s'il existe une chaîne qui relie le sommet  $s_0$  à  $s_1$ .

Par exemple, dans le graphe de la figure 60, les sommets  $v_4$  et  $v_6$  sont connexes car la chaîne

$$v_4, e_0, v_3, e_5, v_5, e_6, v_6$$

relie le sommet  $v_4$  au sommet  $v_6$ . Par contre, les sommets  $v_0$  et  $v_4$  ne sont pas connexes.

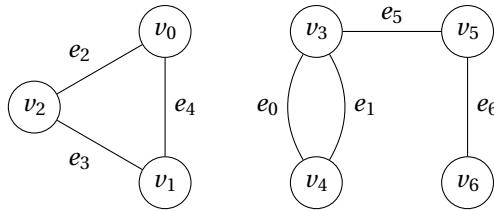


FIGURE 60 – Les sommets  $v_4$  et  $v_6$  sont connexes.

En fait, la notion de connexité ne dépend pas des arcs, ainsi, si l'on ajoute des orientations au graphe de la figure 60 pour obtenir celui de la figure 61, alors, les sommets  $v_4$  et  $v_6$  restent toujours connexes car la chaîne  $v_4, e_0, v_3, e_5, v_5, e_6, v_6$  relie toujours le sommet  $v_4$  au sommet  $v_6$ . On rappelle que les chaînes, contrairement aux chemins, ne prennent pas en compte les orientations des arcs.

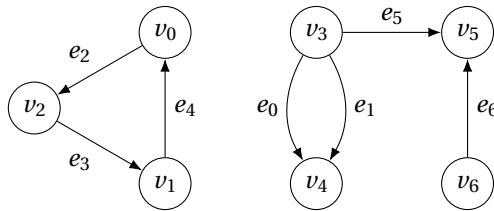


FIGURE 61 – Les sommets  $v_4$  et  $v_6$  sont connexes.

Un ensemble  $E$  est une *composante connexe* de  $G$  s'il vérifie les deux propriétés suivantes :

1. tous les éléments de  $E$  sont connexes deux à deux dans  $G$ ,
2.  $E$  est un ensemble maximal, c'est à dire que, pour tout sommet  $s_0 \notin E$  et pour tout sommet  $s_1 \in E$  les sommets  $s_0$  et  $s_1$  ne sont pas connexes dans  $G$ .

Ainsi, toujours dans le graphe de la figure 61, l'ensemble  $E = \{v_3, v_4, v_5\}$  n'est pas une composante connexe car  $E$  n'est pas maximal, alors que l'ensemble  $F = \{v_3, v_4, v_5, v_6\}$  est une composante connexe du graphe car il est connexe et maximal. Ainsi, dans ce même graphe, il y a deux composantes connexes qui sont  $\{v_0, v_1, v_2\}$  et  $\{v_3, v_4, v_5, v_6\}$ .

**Exercice 57**

Dans le graphe de la figure 62, donnez deux sommets connexes et deux sommets qui ne sont pas connexes.

Enfin, donnez toutes les composantes connexes du graphe.

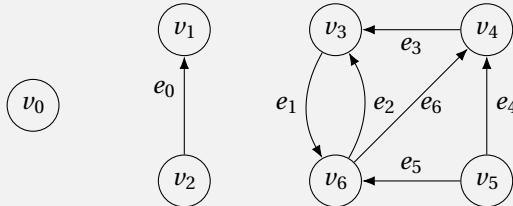


FIGURE 62 – Le graphe des exercices 57 et 59.

On dit qu'un graphe est *connexe* s'il ne contient qu'une seule composante connexe.

**Exercice 58**

Donnez un exemple de graphe connexe et un exemple de graphe qui n'est pas connexe.

Dans un graphe orienté, deux sommets  $s_0$  et  $s_1$  sont *fortement connexes* s'il existe à la fois un chemin reliant  $s_0$  à  $s_1$ , mais aussi un chemin reliant  $s_1$  à  $s_0$ .

Par exemple, dans la figure 61, les sommets  $v_4$  et  $v_6$  ne sont pas fortement connexes car il n'existe pas de chemin reliant  $v_4$  à  $v_6$ . Par contre les sommets  $v_1$  et  $v_2$  sont fortement connexes car il existe un chemin reliant  $v_2$  à  $v_1$  qui est  $v_2, e_3, v_1$  et il existe aussi un chemin qui relie  $v_1$  à  $v_2$  qui est  $v_1, e_4, v_0, e_2, v_2$ .

Un ensemble  $E$  est une *composante fortement connexe* de  $G$  si il vérifie les deux propriétés suivantes :

1. tous les éléments de  $E$  sont fortement connexes deux à deux dans  $G$ ,
2.  $E$  est un ensemble maximal, c'est à dire que, pour tout sommet  $s_0 \notin E$  et tout sommet  $s_1 \in E$   $s_0$  et  $s_1$  ne sont pas fortement connexes.

Dans le graphe de la figure 61, il y a 5 composantes fortement connexes qui sont :  $\{v_0, v_1, v_2\}$ ,  $\{v_3\}$ ,  $\{v_4\}$ ,  $\{v_5\}$  et  $\{v_6\}$ .

**Exercice 59**

Reprenez le graphe de l'exercice 57 et donnez deux sommets fortement connexes et deux sommets qui ne sont pas fortement connexes, mais tout de même connexes.

Enfin, donnez toutes les composantes fortement connexes du graphe.

On dit qu'un graphe est *fortement connexe* si il ne contient qu'une seule composante fortement connexe.

**Exercice 60**

1. Donnez un exemple de graphe fortement connexe et un exemple de graphe qui n'est pas fortement connexe.
2. Donnez un exemple de graphe connexe qui n'est pas fortement connexe.

### 12.2.7 Cycles, circuits et arbres

Un cycle élémentaire est une chaîne de taille  $l \geq 1$  qui commence et termine par le même sommet et qui ne passe (à l'exception de ce dernier) qu'une et une fois par sommet et qu'un et une fois par arête.

Par exemple, dans le graphe de la figure 63, la chaîne  $v_0, e_3, v_1, e_4, v_2, e_1, v_3, e_0, v_0$  est un cycle élémentaire.

Par contre, la chaîne  $v_0, e_3, v_1, e_3, v_0$  n'est pas un cycle élémentaire car il passe deux fois par  $e_3$ . De même, la chaîne  $v_1, e_3, v_0, e_0, v_3, e_2, v_1, e_5, v_4, e_6, v_2, e_4, v_1$  n'est pas un cycle élémentaire car il passe deux fois par le sommet  $v_1$ .

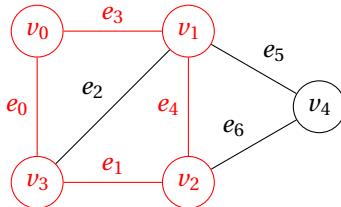


FIGURE 63 – La chaîne  $v_0, e_3, v_1, e_4, v_2, e_1, v_3, e_0, v_0$  est un cycle élémentaire.

#### Exercice 61

Donnez tous les cycles élémentaires du graphe de la figure 63.

Un circuit élémentaire est une chemin de taille  $l \geq 1$  qui commence et termine par le même sommet et qui ne passe (à l'exception de ce dernier) qu'une et une fois par sommet qui compose le chemin (et donc qu'une et une fois par arcs).

Par exemple, dans le graphe de la figure 64, le circuit  $v_0, e_3, v_1, e_4, v_2, e_1, v_3, e_0, v_0$  est un circuit élémentaire.

Par contre, le circuit  $v_1, e_2, v_3, e_0, v_0, e_3, v_1, e_4, v_2, e_6, v_4, e_5, v_1$  n'est pas un cycle élémentaire car il passe deux fois par le sommet  $v_1$ .

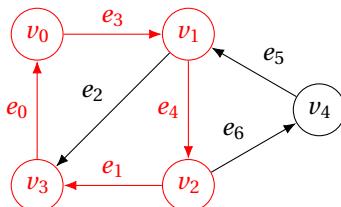


FIGURE 64 – Le circuit  $v_0, e_3, v_1, e_4, v_2, e_1, v_3, e_0, v_0$  est un chemin élémentaire.

#### Exercice 62

Donnez tous les circuit élémentaires du graphe de la figure 64.

Un *arbre* est un graphe connexe sans cycle.

Par exemple, le graphe de la figure 65 est un arbre car il est connexe et sans cycle.

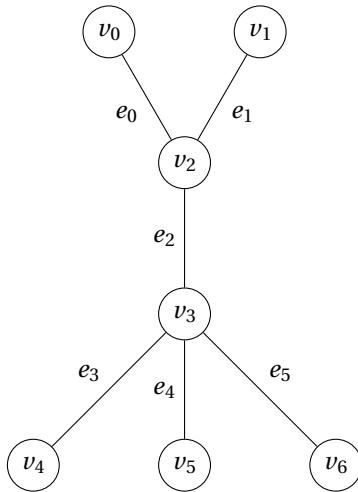


FIGURE 65 – Un exemple d’arbre.

A contrario, les graphes de la figure 63 et 64 ne sont pas des arbres car ils possèdent tous les deux des cycles élémentaires.

De même, le graphe de la figure 66 n’est pas un arbre car il n’est pas connexe.

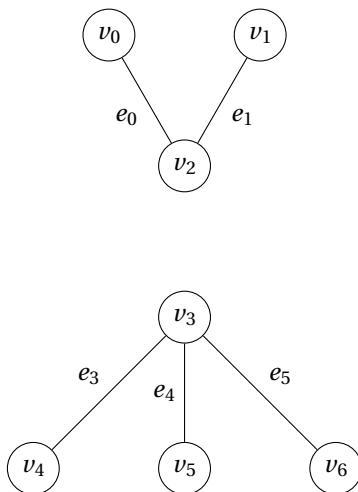


FIGURE 66 – Un graphe qui n’est pas un arbre car il a deux composantes connexes.

### Exercice 63

Construez des exemples de graphes qui sont des arbres et d’autres qui n’en sont pas.

### Exercice 64: (difficile)

Si on note par  $n$  le nombre de sommets d’un graphe, montrez que dans un arbre il y a toujours  $n - 1$  arêtes.

### 12.2.8 Degré d'un sommet et degré total d'un graphe

Le *degré* d'un sommet est le nombre d'arêtes (resp. arcs) incidentes à ce sommet où les boucles comptent doubles. On notera par  $d(s)$  le degré du sommet  $s$ .

Le *degré total* d'un graphe, que l'on note  $d(G)$ , est la somme des degrés de tout les sommets du graphe :

$$d(G) = \sum_{s \in V} d(s).$$

Par exemple, dans la figure 67, le sommet  $v_0$  a pour degré 0, le sommet  $v_2$  a pour degrés 3, le sommet  $v_3$  a pour degré 4 et le sommet  $v_4$  a pour degré 2.

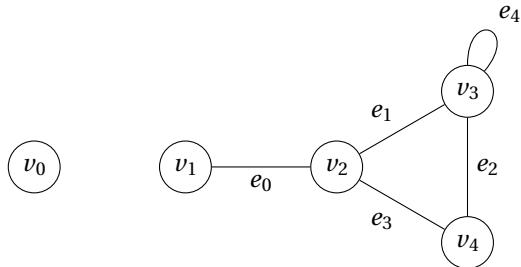


FIGURE 67 – Un graphe non orienté dont le bilan des degrés du graphe est  $\{4, 3, 2, 1, 0\}$ .

Dans un graphe orienté, le *degré entrant* d'un sommet  $s$  est le nombre d'arcs ayant  $s$  pour origine. On notera par  $d^+(s)$  le degré entrant du sommet  $s$ .

Le *degré sortant* d'un sommet  $s$  est le nombre d'arcs ayant  $s$  pour fin. On notera par  $d^-(s)$  le degré sortant du sommet  $s$ .

Par exemple, dans la figure 68, les degrés entrants et sortants et les degrés sont :

$d^-(v_0) = 0$	$d^+(v_0) = 0$	$d(v_0) = 0$
$d^-(v_1) = 1$	$d^+(v_1) = 0$	$d(v_1) = 1$
$d^-(v_2) = 2$	$d^+(v_2) = 1$	$d(v_2) = 3$
$d^-(v_3) = 2$	$d^+(v_3) = 2$	$d(v_3) = 4$
$d^-(v_4) = 0$	$d^+(v_3) = 2$	$d(v_4) = 2$

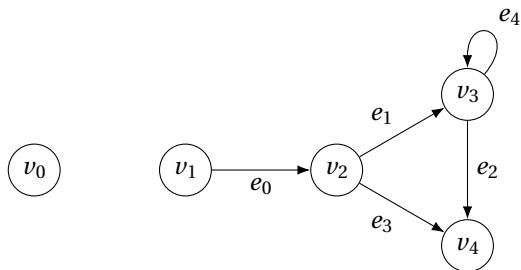


FIGURE 68 – Un graphe orienté dont la table des degrés est  $[4, 3, 2, 1, 0]$ .

Évidemment, dans un graphe orienté, le degré d'un sommet est égal à son degré entrant plus son degré sortant :

$$d(s) = d^-(s) + d^+(s).$$

**Lemme 1.** *Le degré total d'un graphe est égal à deux fois son nombre d'arêtes (resp. arcs) :*

$$d(G) = 2 \times |E|$$

*Démonstration.* Chaque arête (resp. arc) compte pour deux dans le degrés total du graphe. □

Par exemple, dans le graphe de la figure 68 il y a 5 arcs, et donc, le degré total du graphe est de  $2 \times 5 = 10$ .

**Exercice 65**

Un graphe simple  $G$  a 15 arêtes, 3 sommets de degré 4, les autres étant de degré 3. Quel est le nombre de sommets du graphe  $G$ ?

**Exercice 66**

Est-il possible qu'un groupe de 9 personnes soit tel que chacun soit l'ami de 5 personnes exactement du groupe?

**Exercice 67**

Montrer que dans tout graphe, il y a un nombre pair de sommets de degré impair.

**Exercice 68: (difficile)**

Dans un graphe connexe un isthme est une arête dont la suppression augmente le nombre de composantes connexes. Montrer qu'un graphe dont tous les sommets sont de degré pair ne possède pas d'isthme.

## 12.3 Implémentation des graphes

Il existe plusieurs façons d'implémenter les graphes dans un programme. Dans cette section, nous allons présenter 4 structures de données usuelles : les matrices d'adjacence, les listes d'arcs ou arêtes adjacents, les listes d'adjacence (de sommets adjacents) et les matrices d'incidence.

Chacune des ces structures possèdent des avantages et des inconvénients. Lorsque l'on souhaite construire des algorithmes en parcourant les graphes de sommet en sommet, les listes d'incidences (pour les graphes à arêtes multiples) et les listes d'adjacence (pour les graphes sans arêtes multiples) sont préférées.

Lorsque l'on souhaite obtenir des propriétés algébriques sur les graphes, on préfère utiliser les matrices d'adjacences et les matrices d'incidence.

Nous allons maintenant présenter ces 4 structures de données avant de résumer leurs avantages et inconvénients.

### 12.3.1 Matrice d'adjacence

On peut implémenter les graphes orientés à l'aide d'un tableau  $A$  d'entiers appelé *matrice d'adjacence* où l'entrée  $A[i][j]$  du tableau (entrée située à la ligne  $i$  et à la colonne  $j$ ) correspond au nombre d'arcs reliant le sommet  $i$  au sommet  $j$ .

Par exemple, le graphe orienté de la figure 69 est implémenté à l'aide de la matrice d'adjacence  $A$

suivante :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Dans cette matrice, l'entrée  $T[3][1]$  contient l'entier 2 ce qui signifie qu'il y a 2 arcs reliant le sommet 3 au sommet 1 comme on peut l'observer dans la figure 69. Par contre, comme  $T[1][6] = 0$ , il n'y a pas d'arc qui relie le sommet 1 au sommet 6.

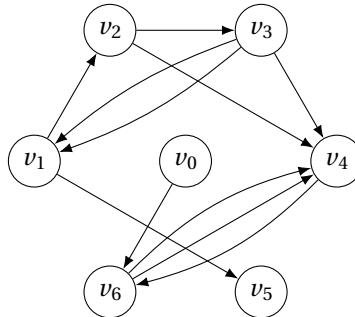


FIGURE 69 – Le graphe orienté associé à la matrice  $A$  de l'équation 2.

Cette implémentation, très compacte, ne permet pas de différencier deux arcs ayant les mêmes incidences, c'est pourquoi les arcs ne sont pas numérotés.

On peut implémenter les graphes non orientés de la même manière. On obtient alors une matrice qui admet un axe de symétrie qui est l'axe Nord-ouest/Sud-est. Par exemple, la matrice :

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

peut représenter aussi bien le graphe orienté de la figure 70 (situé à gauche) que le graphe non orienté de cette même figure (situé à droite). Dans cette matrice, on peut observer l'axe de symétrie Nord-ouest/Sud-est qui sépare les entrées écrites à l'encre noire de leurs symétries écrites à l'encre grise.

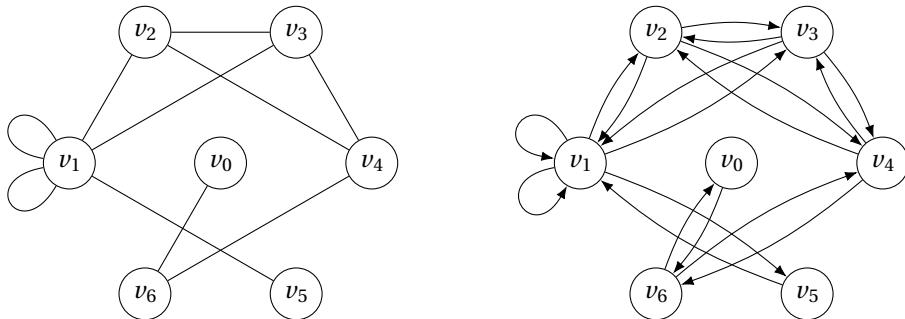


FIGURE 70 – Deux graphes (orienté et non orienté) ayant la même matrice d'adjacence qui est définie à l'équation 3.

**Exercice 69**

Soit la matrice  $C$  suivante :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Est-ce la matrice d'adjacence d'un graphe orienté ou d'un graphe non orienté? Dessinez les graphes orientés et éventuellement non orientés qui lui sont associés.

**Exercice 70**

Soit la matrice  $D$  suivante :

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Est-ce la matrice d'adjacence d'un graphe orienté ou d'un graphe non orienté? Dessinez le graphe orienté et éventuellement non orienté qui lui sont associés.

**Exercice 71**

Donnez la matrice d'adjacence associée au graphe orienté de la figure 71.

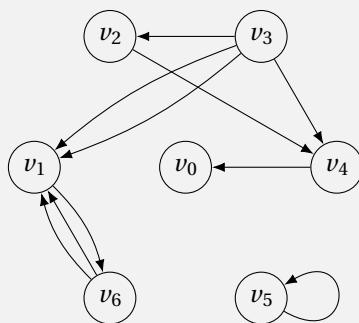


FIGURE 71 – Le graphe orienté de l'exercice 71.

**Exercice 72**

Donnez la matrice d'adjacence associée au graphe orienté de la figure 72.

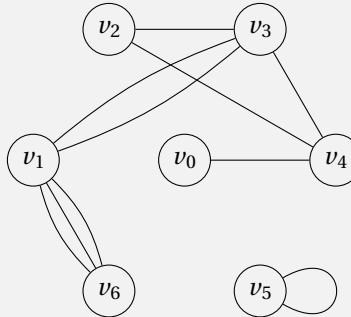


FIGURE 72 – Le graphe orienté de l'exercice 72.

Enfin, lorsque le graphe ne contient pas d'arêtes (ou d'arcs) multiples, alors les réels présents sont utilisés pour coder les étiquettes du graphe. Dans ce cas, les arcs d'étiquettes 0 ne sont pas représentés dans le graphe.

Ainsi, si l'on interprète la matrice suivante :

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 0.3 & 0 & 0 \\ 4.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

comme un graphe étiqueté à arcs simples, alors on obtient le graphe de la figure 73.

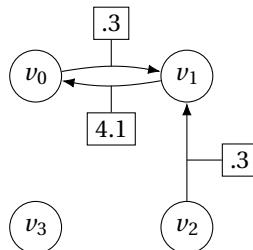


FIGURE 73 – Le graphe étiqueté à arcs simples associé à la matrice d'adjacence  $E$  de l'équation 4.

### Exercice 73

Donnez la matrice d'adjacence du graphe étiqueté de la figure 74.

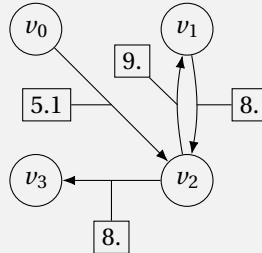


FIGURE 74 – Le graphe de l'exercice 73.

### Exercice 74

Dessinez le graphe non orienté simple et étiqueté défini par la matrice d'adjacence suivante :

$$F = \begin{pmatrix} 2.1 & 0 & 1.2 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.1 \\ 2.1 & 0 & 4 & 0 \end{pmatrix}.$$

#### 12.3.2 Liste d'arcs adjacents et liste d'arêtes adjacentes

La liste d'arcs (resp. arêtes) adjacents est un dictionnaire  $D_I$  dont les clefs sont les sommets du graphe et les valeurs des listes d'arcs (resp. arêtes) telles que, pour tout sommet  $s$  du graphe,  $D_I[s]$  est la liste des arcs (resp. arêtes) sortantes de  $s$  :

$$D_I[s] = [e \in E \mid \text{origine}(e) = s].$$

. La liste d'arcs (resp. arêtes) adjacents est toujours accompagné de la table  $\vec{\Gamma}$  (resp.  $\Gamma$ ) qui permet de connaître les sommets incidents d'un arc (resp. d'une arête).

Par exemple, la liste d'arcs adjacents et la fonction d'incidence suivante,

$$\left\{ \begin{array}{l} D_I = \{ v_0 : [e_0], v_1 : [e_1, e_2], v_2 : [e_5, e_6], v_3 : [e_3, e_4, e_7], v_4 : [e_{10}], v_5 : [], v_6 : [e_8, e_9] \}, \\ \vec{\Gamma} = \{ e_0 : (v_0, v_6), e_1 : (v_1, v_2), e_2 : (v_1, v_5), e_3 : (v_1, v_2), e_4 : (v_3, v_1), e_5 : (v_2, v_3), \\ e_6 : (v_2, v_4), e_7 : (v_3, v_4), e_8 : (v_6, v_4), e_9 : (v_6, v_4), e_{10} : (v_4, v_6) \} \end{array} \right\} \quad (5)$$

sont représentées par le graphe de la figure 75. Dans ce graphe, comme  $D_I[v_1] = [e_1, e_2]$ , le sommet  $v_1$  est l'origine des arcs  $e_1$  et  $e_2$ . De même, comme  $D_I[v_1] = []$ , le sommet  $v_5$  n'est l'origine d'aucun arc.

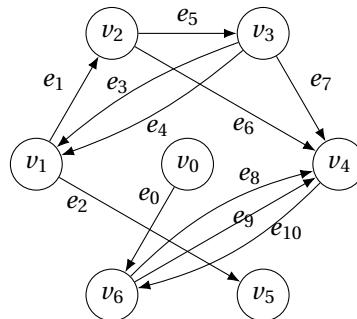


FIGURE 75 – Le graphe orienté associé à la liste d'arcs adjacents  $D_I$  de l'équation 5.

La version non orienté de ce graphe donne lieu à la liste d'arêtes adjacentes suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_I = \{ v_0 : [e_0], v_1 : [e_1, e_2, e_3, e_4], v_2 : [e_1, e_5, e_6], v_3 : [e_3, e_4, e_5, e_7], \\ v_4 : [e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10}], v_5 : [e_2], v_6 : [e_0, e_8, e_9, e_{10}] \}, \\ \vec{\Gamma} = \{ e_0 : \{(v_0, v_6)\}, e_1 : \{(v_1, v_2)\}, e_2 : \{(v_1, v_5)\}, e_3 : \{(v_3, v_1)\}, e_4 : \{(v_3, v_1)\}, e_5 : \{(v_2, v_3)\}, \\ e_6 : \{(v_2, v_4)\}, e_7 : \{(v_3, v_4)\}, e_8 : \{(v_6, v_4)\}, e_9 : \{(v_6, v_4)\}, e_{10} : \{(v_4, v_6)\} \} \end{array} \right\} \quad (6)$$

qui est représentée par le graphe de la figure 76.

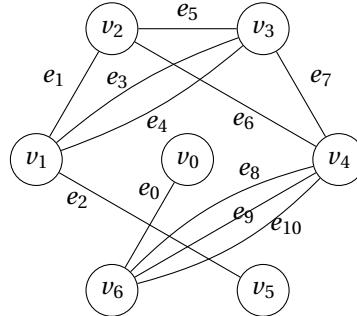


FIGURE 76 – Le graphe non orienté associé à la liste d’arêtes adjacentes  $D_I$  de l’équation 6.

### 12.3.3 Liste d’adjacence (liste de sommets adjacents)

La liste d’adjacence est similaire à la liste d’arcs/arêtes adjacents. Elle est utilisée quand le graphe n’a pas d’arc (resp. arête) multiple et qu’il n’est donc pas nécessaire de les numérotter.

La *liste d’adjacence* ou *liste de sommets adjacents* est un dictionnaire  $\text{Adj}$  dont les clefs sont les sommets du graphes et les valeurs des listes d’arcs (resp. arêtes) telles que, pour tout sommet  $s$  du graphe,  $\text{Adj}[s]$  est

- pour un graphe orienté la liste des fins des arcs du graphe ayant pour origine  $s$  :

$$\text{Adj}[s] = [t \in V \mid \exists e \in E, \vec{\Gamma}(e) = (s, t)].$$

- pour un graphe non orienté la liste des sommets  $t$  des arêtes ayant pour extrémités  $\{s, t\}$  :

$$\text{Adj}[s] = [t \in V \mid \exists e \in E, \Gamma(e) = \{s, t\}].$$

Contrairement aux listes d’arcs/arêtes adjacents, cette structure n’est pas accompagnée de la table  $\vec{\Gamma}$  (resp.  $\Gamma$ ) car les arcs et arêtes ne sont pas numérotés.

Par exemple, la liste d’adjacence suivante :

$$\text{Adj} = \{ v_0 : [v_6], v_1 : [v_2, v_5], v_2 : [v_3, v_4], v_3 : [v_1, v_4], v_4 : [v_6], v_5 : [], v_6 : [v_4] \} \quad (7)$$

est représentée par le graphe orienté de la figure 77. Dans ce graphe, comme  $\text{Adj}[v_1] = [v_2, v_5]$  alors  $v_1$  est l’origine des arcs  $(v_1, v_2)$  et  $(v_1, v_5)$ .

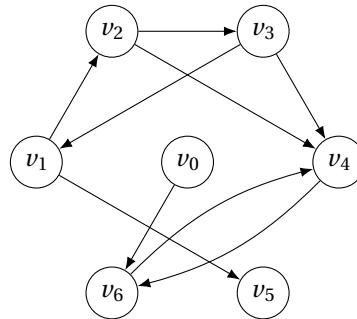


FIGURE 77 – Le graphe orienté associé à la liste d’adjacence  $\text{Adj}$  de l’équation 7.

La version non orienté de ce graphe donne lieu à la liste d’incidence suivante :

$$\text{Adj} = \{ v_0 : [v_6], v_1 : [v_2, v_3, v_5], v_2 : [v_1, v_3, v_4], v_3 : [v_1, v_2, v_4], v_4 : [v_2, v_3, v_6], v_5 : [v_1], v_6 : [v_0, v_4] \} \quad (8)$$

qui est représentée par le graphe de la figure 78.

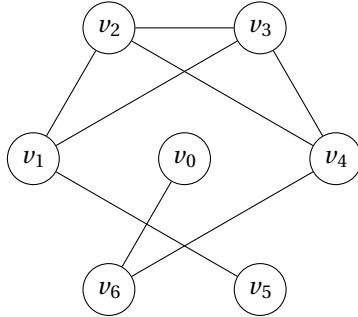


FIGURE 78 – Le graphe orienté associé à la liste d'adjacence  $\text{Adj}$  de l'équation 8.

#### 12.3.4 Matrice d'incidence

On peut implémenter les graphes orientés sans boucle à l'aide d'un tableau  $M$  d'entiers appelé *matrice d'incidence* de hauteur  $n$  et de largeur  $m$  où  $n$  et  $m$  sont respectivement le nombre de sommets et le nombre d'arcs (resp. arête) du graphe.

Dans cette matrice, l'entrée  $M[i][j]$  du tableau (entrée située à la ligne  $i$  et à la colonne  $j$ ) vaut :

$$M[i][j] = \begin{cases} -1 & \text{si } v_i \text{ est l'origine de l'arc } e_j; \\ +1 & \text{si } v_i \text{ est la fin de l'arc } e_j. \end{cases}$$

Par exemple, le graphe orienté de la figure 79 est implémenté à l'aide de la matrice d'incidence  $M$  suivante :

$$M = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & +1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Dans cette matrice, l'entrée  $M[1][2]$  contient l'entier  $-1$  ce qui signifie que le sommet  $v_1$  est l'origine de l'arc  $e_2$ . Comme l'entrée  $M[5][2]$  vaut  $+1$ , le sommet  $v_5$  est la fin de l'arc  $e_2$ . Par contre, comme  $M[0][2] = 0$  le sommet  $v_0$  n'est pas incident à l'arc  $e_2$ . On peut observer tout cela dans la figure 79.

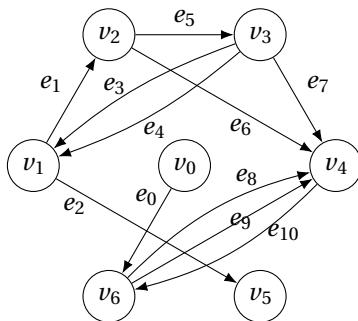


FIGURE 79 – Le graphe orienté associé à la matrice d'incidence  $M$  de l'équation 9.

Généralement, on n'utilise pas les matrice d'incidence pour implémenter des graphes avec des boucles ou des graphes non orientés, car on perd certaines propriétés algébriques de la matrice d'incidence.

Cependant, on peut toujours adapter cette structure pour implémenter un graphe quelconque. Pour un graphe non orienté, il suffit que de remplacer les valeurs  $-1$  par  $1$ . De même, pour une boucle  $e_j$  de sommet  $v_i$ , il suffit d'imposer la valeur  $2$  à l'entrée  $M[i][j]$ .

**Exercice 75**

Dessinez le graphe orienté associé à la matrice d'incidence suivante :

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & +1 & -1 \end{pmatrix}.$$

**Exercice 76**

Donnez la matrice d'incidence du graphe de la figure 80.

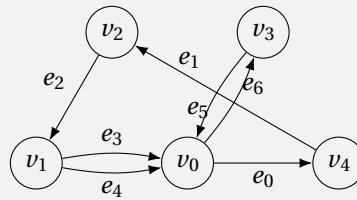


FIGURE 80 – Le graphe orienté de l'exercice 76.

### 12.3.5 Avantages et inconvénients des différentes structures de données de graphe

## 12.4 Parcours en Largeur et parcours en profondeur

### 12.4.1 Parcours en Largeur

```

PL(G,s)
pour chaque sommet u de V[G] \ {s} faire
  couleur[u] <- BLANC
  d[u] <- infini
  pere[u] <- nil
couleur[s] <- GRIS
d[s] <- 0
pere[s] <- nil
Enfiler(F, s)
tant que non vide(F) faire
  u <- tete(F)
  pour chaque v de Adj(u) faire
    si couleur[v] = BLANC
      alors couleur[v] <- GRIS
      d[v] <- d[u] + 1
      pere[v] <- u
      Enfiler(F, v)
Defiler(F)
couleur[u] <- NOIR
  
```

### 12.4.2 Parcours en profondeur

```

Visiter_PP(u)
couleur[u] <- GRIS
d[u] <- temps <- temps + 1
pour chaque v de Adj[u] faire
    si couleur[v] = BLANC
        alors pere[v] <- u
        Visiter_PP(v)
couleur[u] <- NOIR
f[u] <- temps <- temps + 1

PP(G)
pour chaque sommet u de V faire
    couleur[u] <- BLANC
    pere[u] <- nil
    temps <- 0
pour chaque sommet u de V faire
    si couleur[u] = BLANC
        alors Visiter_PP(u)

```

## 12.5 Tri topologique et calcul de composantes fortement connexes

### 12.5.1 Tri topologique

```

TRI_TOPOLOGIQUE(G)
1/ appeler PP(G) pour calculer les temps de fin de traitement f[v]
    pour chaque sommet v
2/ chaque fois que le traitement d'un sommet s'achève, l'insérer
    au début d'une liste chaînée
3/ retourner la liste chaînée des sommets

```

### 12.5.2 Composantes fortement connexes

```

CFC(G)
Exécuter PP(G) et trier les sommets selon un ordre décroissant de f[]
Calculer t(G), le graphe transposé de G, en renversant chaque arc de G
Exécuter PP(t(G)) en respectant l'ordre obtenu en 1
Retourner les arborescences obtenues comme composantes fortement connexes de G

```

## 12.6 Algorithmes de plus court chemin

### 12.6.1 Dijkstra

Ne fonctionne que pour des graphes avec des poids positifs ou nuls.

```

Dijkstra(G,w,s)
pour chaque sommet v de V(G) faire
    d[v] <- infini
    pere[v] <- nil
    couleur[v] <- BLANC
d[s] <- 0
F <- FILE_PRIORITE(V(G), d)

```

```

tant que F non vide faire
    pivot <- EXTRAIRE_MIN(F)
    couleur[pivot] <- GRIS
    pour tout arc e = (pivot, v) arc sortant de pivot faire
        si couleur(v) = BLANC et d[v] > d[pivot] + w(e)
            alors d[v] <- d[pivot] + w(e)
            pere[v] <- pivot
        couleur[pivot] <- NOIR

```

### 12.6.2 Bellman

L'algorithme de Bellman fonctionne pour des graphes avec des poids quelconques.

La version courte :

```

Bellman-court(G, w)
TriTopologique(G)
Soit v_1, ..., v_n l'ordre topologique calculé avec l'algo de tri topologique.
pour i de 1 à n - 1 faire
    d[v_i] <- infini
    pere[v_i] <- nil
    d[v_1] <- 0
pour i de 1 à n - 1 faire
    pour u de Adj(i) faire
        si d[u] > d[v_i] + w(v_i, u) alors
            d[u] <- d[v_i] + w(v_i, u)
            pere[u] <- v_i

```

La version longue :

```

Bellman-long(G, w, s)
pour tout v de V (G) faire
    d[v] <- infini
    pere[v] <- Nil
    npred[v] <- deg-[v]

    d[s] <- 0
    INSERER FILE(F, s)
tant que F non vide faire
    u <- TETE_FILE(F)
    DEFILER(F)
    pour v de Adj(u) faire
        si d[v] > d[u] + w(u, v) alors
            d[v] <- d[u] + w(u, v)
            pere[v] <- u
            npred[v] <- npred[v] - 1
            si npred[v] = 0 alors
                INSERER FILE(F, v)

```

## 13 Références

- [1] Thomas H. CORMEN et al. *Introduction to Algorithms*. 3nd. The MIT Press, 2009.
- [2] Reinhard DIESTEL. *Graph Theory*. 5nd. T. 173. Graduate Texts in Mathematics. Springer-Verlag, Heidelberg, 2010.
- [3] Aurélien GÉRON. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. 3nd. O'Reilly, 2022.
- [4] Pierre WOLPER. *Introduction à la calculabilité*. 3nd. Dunod, 2006.

## A Le langage de programmation Python

### A.1 Écrire et exécuter un programme écrit en Python

Un programme écrit en python est un texte contenant des instructions écrite de haut en bas. Chaque ligne du texte correspond à une instruction. Sauf cas particulier, les instructions DOIVENT être alignées verticalement à gauche.

Voici un exemple de code écrit en python :

```
a = 5 #<-- Première instruction  
a = a / 2 #<-- Deuxième instruction  
print( a ) #<-- Troisième instruction
```

Voici un exemple de code écrit en python qui n'est pas valide car les instructions ne sont pas alignée verticalement à gauche :

```
a = 5 #<-- Première instruction  
a = a / 2 #<-- Deuxième instruction  
print( a ) #<-- Troisième instruction
```

Sauf cas particulier, l'ordinateur exécute les instructions d'un programme de haut en bas et de gauche à droite.

Même si les instructions ressemblent à des formules mathématiques, ils n'ont pas la même signification!

Lorsque une instruction est exécutée, l'ordinateur n'affiche généralement rien à l'écran. L'absence d'affichage ne veux pas dire que l'ordinateur ne fait rien.

Ainsi, si vous exécutez les instructions suivantes :

```
3 + 2  
5 / 7  
2 - 6
```

L'ordinateur réalise les toutes les instructions écrites (ici ce sont des calculs arithmétiques) mais n'affiche rien à l'écran.

Si vous voulez afficher le résultat d'une instruction, il faut écrire

```
print( INSTRUCTION )
```

Par exemple, le programme

```
3 + 2  
print( 5 - 7 )  
2 / 6
```

affichera -2.

### A.2 Les variables et les affectations

#### A.2.1 Les variables

Nous avons vu que le rôle de l'ordinateur était de manipuler la mémoire. En python, la manipulation de la mémoire se fait à l'aide des variables.

Une *variable* est le nom que l'on donne à un petit espace mémoire. Nous rappelons qu'en python un petit espace mémoire représente 32 ou 64 bits seulement.

On peut créer autant de variable que l'on souhaite et leur donner le nom que l'on veut à condition qu'il ne comporte que des caractères alphanumérique.

Pour créer une variable de nom NOM\_DE\_LA\_VARIABLE, il faut écrire l'instruction suivante :

```
NOM_DE_LA_VARIABLE = INSTRUCTION
```

où INSTRUCTION est une autre instruction python.

Lorsque l'on écrit ce code, l'ordinateur alloue un petit espace mémoire (32 ou 64 bits), le réserve pour le programme et lui donne comme nom NOM\_DE\_LA\_VARIABLE. Ensuite, il exécute l'instruction INSTRUCTION et le résultat de cette instruction est enregistré dans l'espace mémoire associé à NOM\_DE\_LA\_VARIABLE.

Par exemple, le programme

```
tmp = 5
```

alloue un petit espace mémoire et lui donne le nom tmp. Ensuite, il évalue 5, le résultat est la valeur 5 et il l'enregistre dans la mémoire associée à tmp.

Attention, l'affectation n'a pas le même sens que le signe = en mathématique. Ainsi,

```
5 = a
```

n'est pas une instruction valide! Et n'a aucune signification en python!

Une fois la variable NOM\_DE\_LA\_VARIABLE créée, l'instruction

```
NOM_DE_LA_VARIABLE = INSTRUCTION
```

modifie le contenu de NOM\_DE\_LA\_VARIABLE en le remplaçant par le résultat de l'instruction INSTRUCTION.

Ainsi, le programme

```
a = 3  
a = 5
```

alloue un espace mémoire pour a et stock dans cet espace la valeur 5, puis remplace cette valeur par 3.

### A.2.2 Afficher le contenu d'une variable

En python il est possible d'afficher le contenu d'une variable sur le terminal. Il suffit d'utiliser l'instruction :

```
print( NOM_DE_LA_VARIABLE )
```

Par exemple, le programme :

```
a = 4  
print( a )
```

alloue un petit espace mémoire et l'appelle a, met ensuite 4 dans l'espace associé à a et enfin, affiche sur le terminal le contenu de la variable a. Il apparaît alors à l'écran le chiffre 4.

### A.2.3 Copier le contenu de la mémoire

A chaque fois que l'on utilise une variable, l'ordinateur l'évalue en récupérant le contenu de l'espace mémoire qui lui est associé. Ainsi, pour copier le contenu de l'espace mémoire, il suffit d'utiliser l'affectation vu précédemment de la façon suivante :

```
NOM_DE_LA_VARIABLE_DE_DESTINATION = NOM_DE_LA_VARIABLE_A_COPIER
```

Par exemple, dans le programme suivant :

```
b = 5  
a = 1  
b = a  
print( b )
```

lorsque l'ordinateur exécute la troisième instruction, l'ordinateur alloue un espace mémoire pour la variable b et rempli cette espace avec le contenu de l'espace mémoire associé à a. Le programme finit son exécution en affichant la valeur 1.

### A.3 Les commentaires

Toute chaîne de caractères précédée par # dans une ligne est ignorée. Il est donc possible de commenter son code à l'aide de ce mécanisme.

Par exemple, le programme

```
i = 5 # Création d'un variable i  
i = i / 2 # Mis a jour de la variable,  
           # on voulait en fait une valeur 2 fois plus petite  
  
print(i) #Affichage de i
```

est équivalent au programme suivant :

```
i = 5  
i = i / 2  
print(i)
```

### A.4 Les entiers, les réels, les booléens et les opérations arithmétiques

Les booléens sont représentés pas les mots clé True (pour Vrai) et False (pour Faux). Les opérations possibles sont

```
not( BOOLEEN )  
BOOLEEN and BOOLEEN  
BOOLEEN or BOOLEEN  
BOOLEEN == BOOLEEN
```

qui sont respectivement le *non*, le *et*, le *ou* et l'égalité (ou l'équivalence) booléene mathématique.

Nous rappelons que le *non*, le *et*, le *ou* et l'équivalence mathématiques sont définis par :

	True	False	and	True	False	or	True	False	$\Leftrightarrow (==)$	True	False
not	False	True	True	True	False	True	True	True	True	True	False
			False	False	False	False	True	False	False	False	True

Par exemple,

```
bool = False  
print(True and bool)
```

affiche False

En python, les nombres écrits sans virgule sont des entiers.

De même, les nombres écrits avec une virgule sont des réels. La virgule en python est le ". ".

Par exemple,

```
a = 4  
b = 4.0
```

la mémoire associée à a contient l'entier 4 et la mémoire associée à b contient le réel 4.0. Les contenus des espaces mémoires de a et de b sont complètement différents.

Voici les différentes opérations qui existent sur les entiers et les réels.

- L'addition : +
- La soustraction : -
- La multiplication : \*
- La division réelle ou euclidienne : /
- l'égalité : ==

- la non égalité : !=

Pour toutes ces opérations, le résultat est un entier si tous les termes sont des entiers. Le résultat est un réel si un des deux termes est un réel.

Enfin, pour la division, si les deux termes sont réels, alors le résultat est le quotient de la division euclidienne des 2 termes. Si l'un des deux termes est un réel, alors le résultat est la division dans le réel des deux termes.

Par exemple, le programme

```
print( 1 + 2 )
print( 1.0 + 2 )
print( 3 / 2 )
print( 3.0 / 2 )
```

affiche respectivement 3, 3.0, 1 et 1.5.

## A.5 Les fonctions

Une fonction est une portion de code représentant un sous-programme qui effectue une tâche relativement indépendamment du reste du programme.

Une fonction possède une entrée (les arguments, ou les paramètres) qui constitue les données que l'on donne au départ à la fonction. La fonction exécute ensuite un travail sur ces données, puis retourne éventuellement une valeur appelée sortie du programme.

Toutes les variables définies dans une fonction sont créées dans une espace mémoire indépendant du reste du programme qui est propre à la fonction. L'espace mémoire associée à ces variables est libéré à la fin de l'exécution de la fonction. Les fonctions ne peuvent pas faire appelle à des variables situées en dehors de la définition de la fonction. Le nom des variables définies à l'intérieur de la fonction peut être identique au nom d'autres variables du programme sans affecter leurs états.

En python, on définit les fonctions de la manière suivante :

```
def NOM_FONCTION( PARAMETRE1, PARAMETRE2, ... ):
    INSTRUCTIONS_DE_LA_FONCTION
```

C'est l'indentation qui permet de déterminer les blocs INSTRUCTIONS\_DE\_LA\_FONCTION. Toutes les lignes qui à la fois

- commencent avec strictement plus d'espace et de stabulation que la ligne  
`def NOM_FONCTION( PARAMETRE1, PARAMETRE2, ... ):`
- sont situées juste après `def NOM_FONCTION( PARAMETRE1, PARAMETRE2, ... )`

sont dans INSTRUCTIONS\_DE\_LA\_FONCTION.

Pour exécuter le code d'une fonction, il suffit d'écrire dans le programme :

```
NOM_FONCTION( VALEUR1, VALEUR2, ... )
```

Par exemple, le programme ;

```
1 def afficher_somme( val1, val2 ):
2     resultat = val1 + val2
3     print( resultat )
4
5 afficher_somme( 3,5 )
6 afficher_somme( 2,1 )
```

afficher 8 puis 3.

Voici le détail de l'exécution de ce programme :

- ligne 1 - 3 : Le programme définit la fonction `afficher_somme`.
- ligne 5 : le programme exécuté `afficher_somme(3,5)` :

- ligne 1 : Le programme crée un nouvel espace mémoire pour la fonction `afficher_somme`, il alloue dans cet espace mémoire deux petits espaces mémoires et les nomme `val1` et `val2`. Il remplit ensuite le contenu de l'espace mémoire associé à `val1` par le premier entier donnée en paramètre : 3. Puis, il remplit le contenu de l'espace mémoire associé à `val2` par le second entier donné en paramètre : 5.
- ligne 2 : Le programme alloue dans son espace mémoire personnel un petit espace mémoire, le nomme `resultat`. Il évalue ensuite `val1 + val2`, le contenu de `val1` dans la mémoire de `afficher_somme` vaut 3, celui de `val2` vaut 5, l'évaluation de `val1 + val2` vaut donc 8. Le programme remplit enfin la mémoire de `resultat` par 8.
- ligne 3 : Le programme affiche le contenu de la mémoire associée à `resultat`, il affiche donc 8.
- fin de la fonction : la fonction libère son espace mémoire, les données qui y sont contenues sont perdues.
- ligne 6 : le programme exécuté `afficher_somme(1, 2)` :
  - ligne 1 : Le programme crée un nouvel espace mémoire pour la fonction `afficher_somme`, il alloue dans cet espace mémoire deux petits espaces mémoires et les nomme `val1` et `val2`. Il remplit ensuite le contenu de l'espace mémoire associé à `val1` par le premier entier donnée en paramètre : 1. Puis, il remplit le contenu de l'espace mémoire associé à `val2` par le second entier donné en paramètre : 2.
  - ligne 2 : Le programme alloue dans son espace mémoire personnel un petit espace mémoire, le nomme `resultat`. Il évalue ensuite `val1 + val2`, le contenu de `val1` dans la mémoire de `afficher_somme` vaut 1, celui de `val2` vaut 2, l'évaluation de `val1 + val2` vaut donc 3. Le programme remplit enfin la mémoire de `resultat` par 3.
  - ligne 3 : Le programme affiche le contenu de la mémoire associée à `resultat`, il affiche donc 3.
  - fin de la fonction : la fonction libère son espace mémoire, les données qui y sont contenues sont perdues.

Il est possible à tout moment, dans la fonction, d'interrompre l'exécution de fonction et de faire retourner une valeur par la fonction. Il suffit d'utiliser l'instruction :

```
return VALEUR_SORTIE
```

Cette instruction arrête l'exécution de la fonction et renvoie la valeur `VALEUR_SORTIE`. Ainsi, lors de l'exécution de `NOM_FONCTION( VALEUR1, VALEUR2, ... )`, l'ordinateur substitue `NOM_FONCTION( VALEUR1, VALEUR2, ... )` par l'évaluation de `VALEUR_SORTIE`.

Par exemple, le programme,

```
def f(x):
    a = 4
    return a*x

a = 100
b = f(3)
print( a )
print( b )
```

affiche 100, puis 3.

Voici le détail de l'exécution de ce programme :

- ligne 1 - 3 : Le programme définit la fonction `f`.
- ligne 5 : le programme alloue une petit espace mémoire, le nomme `a` et le remplit avec 100.
- ligne 6 :
  - le programme alloue une petit espace mémoire, le nomme `b`

- le programme exécute `f(3)` :
- ligne 1 : Le programme créé un nouvel espace mémoire pour la fonction `f`, il alloue dans cet espace mémoire un petite espace mémoire et le nomme `x`. Il rempli ensuite cet espace avec la valeur donnée en paramètre : 3.
- ligne 2 : Le programme alloue dans son espace mémoire personnel un petit espace mémoire, le nomme `a` et le rempli par 4.
- ligne 3 : Le programme évalue `a*x`, le contenu de `a` dans l'espace mémoire de `f` vaut 4, celui de `x` vaut 3. L'évaluation vaut donc 12. L'instruction `return` interrompt l'exécution de la fonction, renvoie 12 et libère l'espace mémoire de la fonction. Les données qui y étaient stockées sont définitivement perdues.
- le programme récupère la valeur de retour : 12
- le programme met 12 dans l'espace mémoire associée à `b`
- ligne 7 : Le programme affiche sur le terminal le contenu de `a` dans la mémoire du programme : il affiche donc 100.
- ligne 8 : Le programme affiche sur le terminal le contenu de `b` dans la mémoire du programme : il affiche donc 12.

### Exercice 77

Prévoyez l'exécution du programme suivant :

```
def mystere( a, b ):
    a = a + 2
    b = b + 3
    tmp = a * b
    return tmp
    print( "Calcul de la soustraction" )
    tmp = a - b

a = 3
b = 5
tmp = mystere(a,b)
print( a )
print( b )
print( tmp )
```

## A.6 Les saut conditionnels

Les sauts conditionnels permettent à l'ordinateur de choisir entre deux jeux d'instructions, les instructions qu'il va exécuter en fonction d'un test préalable.

```
if TEST :
    LISTE_D_INSTRUCTIONS_1
else :
    LISTE_D_INSTRUCTIONS_2
```

Dans ce code, l'ordinateur évalue l'expression TEST. Si cette expression est vraie, alors il exécute les instructions de LISTE\_D\_INSTRUCTIONS\_1, sinon il exécute les instructions de LISTE\_D\_INSTRUCTION\_2. C'est l'indentation qui permet de déterminer les blocs LISTE\_D\_INSTRUCTION\_1 et LISTE\_D\_INSTRUCTION\_2. Toutes les lignes qui à la fois

- commencent avec strictement plus d'espace et de tabulation que la ligne `if TEST`;

- sont situées juste après `if TEST`
- sont dans `LISTE_D_INSTRUCTIONS_1`. Toutes les lignes qui à la fois

  - commencent avec strictement plus d'espace et de tabulation que la ligne `else`;
  - sont situées juste après `else` :

- sont dans `LISTE_D_INSTRUCTIONS_1`. Enfin, les lignes `if` et `else` doivent avoir le même niveau d'indentation.

Par exemple, le programme

```
a = 2
b = 2
if a == b:
    print("a est égal à b")
    print("Comme prévu !")
else:
    print("a est différent de b")
    print("Ce code ne devrait pas s'exécuter")
print("Fin du programme")
```

affiche

```
a es égal à b
Comme prévu !
Fin du programme
```

Il est possible d'avoir plusieurs sauts conditionnels imbriqués les un dans les autres. Par exemple, le programme

```
if 1 != 2:
    print( "1 est différent de 2" )
    if 2 == 4:
        print( "Ne devrait pas s'afficher" )
    else:
        print( "2 est différents de 4" )
    print( "Fin du bloc d'instruction" )
else:
    print( "Ne devrait pas s'afficher" )
print( "Fin du programme" )
```

affiche

```
1 est différent de 2
2 est différent de 4
Fin du bloc d'instruction
Fin du programme
```

Lorsque `LISTE_D_INSTRUCTIONS_2` ne contient pas d'instruction, on écrit l'instruction `pass` à la place.

On obtient ainsi :

```
if TEST:
    LISTE_D_INSTRUCTIONS_1
else:
    pass
```

On peut aussi ne pas écrire la partie avec le `else`. Ainsi, le précédent code est équivalent à

```
if TEST :  
    LISTE_D_INSTRUCTIONS_1
```

## A.7 Les boucles

En programmation, il est utile de pouvoir écrire des programmes qui répètent un certain nombre de fois le même code.

Dans les langages de programmation impératif, ce sont les boucles "for" et les boucles "while" qui permettent de faire exécuter plusieurs fois le même code.

La syntaxe d'une boucle "for" est la suivante :

```
for VARIABLE in range( NOMBRE_DE_REPEATITION ):  
    LISTE_D_INSTRUCTIONS
```

Il faut savoir qu'en python, `range( NOMBRE_DE_REPEATITION )` code la liste `[0, 1, 2, 3, ..., NOMBRE_DE_REPEATITION - 1]`. Dans les lignes de codes précédentes, l'ordinateur commence par allouer un petit espace mémoire ayant pour nom VARIABLE. Ensuite, pour chaque élément *e* de cette liste, dans l'ordre de la liste, le programme réalise les tâches suivantes :

- il affecte à la variable VARIABLE l'élément *e*;
- il exécute les instructions de LISTE\_D\_INSTRUCTIONS.

À la fin, le programme aura exécuté NOMBRE\_DE\_REPEATITION fois les instructions de LISTE\_D\_INSTRUCTION.

Par exemple, le programme suivant compte de 0 à 999 :

```
for compteur in range(1000):  
    print compteur
```

La syntaxe d'une boucle while est la suivante :

```
while CONDITION :  
    LISTE_D_INSTRUCTIONS
```

Lorsque l'interpréteur python rencontre ces instructions, il commence par évaluer l'expression CONDITION. Si le résultat est Vrai, alors il exécute LISTE\_D\_INSTRUCTIONS puis recommence tout au début, à l'évaluation de l'expression CONDITION. Si le résultat est Faux, le programme n'exécute pas LISTE\_D\_INSTRUCTIONS et l'exécution du while se termine.

Par exemple, le programme suivant compte de 0 à 999 :

```
compteur = 0  
while compteur < 1000 :  
    print compteur  
    compteur = compteur + 1
```

## A.8 Les listes et les tableaux

Une liste d'élément est une suite ordonnée d'éléments. En python, il est possible de coder une liste contenant *N* éléments à l'aide de l'instruction :

```
[ ELEMENT_1, ELEMENT_2, ..., ELEMENT_N ]
```

Lors de l'exécution de cette instruction, l'interpréteur python alloue *N* petit espace mémoire successif dans lequel il place les éléments, ELEMENT1, ..., ELEMENT2. Puis, l'interpréteur python, substitue [ELEMENT1, ..., ELEMENTN] par une référence à la liste créée. Une référence à la liste est l'adresse mémoire où se trouve la liste. Une adresse est une donnée de la taille d'un petit espace mémoire. Elle peut donc être stockée dans un petit espace mémoire associée à une variable.

Ainsi, si l'on écrit le programme

```
l = [1,3,2]
```

alors python alloue 3 petits espaces mémoires consécutifs dans la mémoire. Ensuite il substitue [1 , 3 , 2] par l'adresse mémoire où se trouve la liste créée. L'interpréteur alloue alors un petit espace mémoire et l'appelle l. Enfin, il enregistre dans le petit espace mémoire l'adresse où se trouve la liste précédemment créée.

En python, l'espace mémoire allouée pour les listes ne dépend pas du contexte des fonctions. Ainsi, même si la création de la liste est faite à l'intérieur d'une fonction, la mémoire créée par une liste ne dépend pas de la fonction. Elle n'est donc pas détruite quand la fonction se termine.

La mémoire est détruite automatiquement si elle n'est plus utilisée, c'est à dire si il n'existe plus de référence vers la liste en question.

Par exemple,

```
def creer_tableau( a, b, c ):  
    res = [ a,b,c ]  
    return res  
a = 10  
v = creer_tableau( 1,5,6 )
```

Il est possible d'accéder au contenu d'un élément de la liste à l'aide de la commande :

```
LISTE[K]
```

où LISTE est le nom de la variable contenant un référence vers une liste et K un entier.

Ici, LISTE [K] est l'espace mémoire numéro K de la liste qui est située à l'adresse écrite dans le petit espace mémoire associé à LISTE. En python les espace mémoire sont numérotés de 0 à la taille de la liste moins 1.

Autrement dit, LISTE [K] veut dire :

Dans le petit espace mémoire associé à LISTE, vous trouverez une adresse. À cette adresse se trouve une succession de petit espace mémoire. LISTE [K] est l'espace mémoire numéro K.

Par exemple,

```
l = [-1,20,3]  
print( l[0] )  
print( l[2] )
```

affiche -1 puis 3 sur le terminal.

Il est possible d'affecter des valeurs à LISTE [k] avec l'opérateur d'affectation = en écrivant :

```
LISTE[K] = VALEUR
```

Par exemple,

```
l = [1,3,10]  
print(l)  
l[1] = 50  
print(l)
```

affichera successivement [1 , 3 , 10] puis [1 , 50 , 10]

En python il est possible de connaître la taille d'une liste en utilisant la commande ;

```
len( LISTE )
```

où LISTE est une variable contenant une référence vers une liste.

Par exemple,

```
l = [1,5,2]  
print(l)
```

affichera 3 à l'exécution.

Il est possible de concaténer deux listes à l'aide de l'addition.

Ainsi, la variable b du programme suivant

```
B = [1,2,3] + [4,5,6]
```

contiendra une référence vers la nouvelle liste [1,2,3,4,5,6].

Il est possible d'ajouter une nouvelle valeur à la fin de la liste en écrivant :

```
LISTE.append( VALEUR )
```

où LISTE est une variable contenant une référence vers une liste et VALEUR la valeur que l'on souhaite ajouter à la fin de la liste.

Il est possible de créer une liste à n éléments à l'aide de la commande :

```
[ EXPRESSION(i) for i in range(n)]
```

où EXPRESSION(i) est une fonction qui dépend de i. La liste ainsi obtenue est une liste à n éléments dont l'élément numéro i est l'évaluation de l'expression EXPRESSION(i).

Par exemple,

```
n = 5  
l = [ 0 for i in range(5)]  
print(l)
```

affiche [0,0,0,0,0]

De même,

```
n = 5  
l = [ 2*i for i in range(5)]  
print(l)
```

affiche [0,2,4,6,8].

## A.9 Les tuples

Les tuples sont identiques aux listes sauf que

- l'on utilise des parenthèses au lieu des crochets;
- les tuples sont immuables, c'est à dire qu'ils ne sont pas modifiables.

Par exemple,

```
b = (1,4,3)  
print( b )  
print( b[1] )
```

affiche (1,4,3) puis 4.

## A.10 Le texte et les chaînes de caractères

En python, il est possible de travailler avec des chaînes de caractères. Pour utiliser une chaîne de caractères, il suffit d'écrire :

```
"LA CHAINE DE CARACTERES"
```

Si l'on veut garder un référence vers une chaîne de caractère, il suffit d'écrire :

```
I = "LA CHAINE DE CARACTERE"
```

Dans ce cas, python alloue un petit espace mémoire pour la variable `l`. Ensuite il alloue une espace mémoire plus grand pour enregistrer la chaîne de caractères "LA CHAINE DE CARACTERES", enfin il enregistre dans l'espace mémoire de `l` une référence vers l'espace mémoire de la chaîne de caractères.

#### EXEMPLE

En python les chaînes de caractères sont immuables et uniques! Le caractère immuable veut dire que l'on ne peut pas modifier une chaîne de caractères une fois qu'elle a été créée. Le caractère unique veux dire que si deux chaînes de caractères sont identiques, alors elles auront le même espace mémoire. Par exemple, à la fin du programme,

```
c1 = "Bonjour"
c2 = "Bonjour"
```

`c1` et `c2` contiendront la même référence vers un espace mémoire qui contient la chaîne de caractères "Bonjour".

À contrario, les listes et les tuples ne sont pas uniques. Ainsi le programme suivant

```
c1 = [1,2,3]
c2 = [1,2,3]
```

créera deux variables `c1` et `c2` contenant des références différentes vers des espaces mémoires différents ayant un contenu identique.

## B Quelques calculs pour la complexité

### B.1 Quelques symboles classiques

On définit les symboles  $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{R}, \mathbb{R}_+, \mathbb{R}_-, \mathbb{C}$  par :

- $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$  est l'ensemble des entiers positifs;
- $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$  est l'ensemble des entiers relatifs;
- $\mathbb{R}$  est l'ensemble des réels;
- $\mathbb{R}_+$  est l'ensemble des réels positifs;
- $\mathbb{R}_-$  est l'ensemble des réels négatifs;
- $\mathbb{C}$  est l'ensemble des nombres complexes.

Soit  $A$  un sous-ensemble de  $\mathbb{C}$ , alors  $A^*$  est l'ensemble  $A$  privé de l'élément neutre 0. Par exemple,  $\mathbb{R}_+^*$  est l'ensemble des réels strictement positifs.

### B.2 Les sommes et les produits

Soit  $m$  et  $n$  deux entiers et  $f$  une fonction de  $\mathbb{N}$  dans  $\mathbb{R}$ . On note par  $\sum_{i=m}^n f(i)$  la somme définie par :

$$\sum_{i=m}^n f(i) = f(m) + f(m+1) + f(m+2) + \dots + f(n-1) + f(n).$$

La somme  $\sum_{i=m}^n f(i)$  vaut 0 si  $n < m$ .

Par exemple,

$$\sum_{i=3}^6 i^2 + 2 \times i = (3^2 + 2 \times 3) + (4^2 + 2 \times 4) + (5^2 + 2 \times 5) + (6^2 + 2 \times 6).$$

On note par  $\prod_{i=m}^n f(i)$  le produit défini par :

$$\prod_{i=m}^n f(i) = f(m) \times f(m+1) \times f(m+2) \times \dots \times f(n-1) \times f(n).$$

Le produit  $\prod_{i=m}^n f(i)$  vaut 1 si  $n < m$ .

Par exemple,

$$\prod_{i=3}^6 i^2 + 2 \times i = (3^2 + 2 \times 3) \times (4^2 + 2 \times 4) \times (5^2 + 2 \times 5) \times (6^2 + 2 \times 6).$$

Pour tout entier  $n \geq 0$ , on définit la factorielle de  $n$  par :

$$n! = \prod_{i=1}^n i = 1 \times 2 \times \dots \times n$$

Par exemple  $5! = 1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 = 120$  et  $0! = 1$ .

### B.3 Les binomiaux

Soit  $m$  et  $n$  deux entiers tels que  $m \leq n$ . Les binomiaux  $C_n^m$  sont des entiers définis par :

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Les binomiaux vérifient la propriété suivante :

$$C_n^m = C_{n-1}^{m-1} + C_{n-1}^m. \quad (10)$$

En effet,

$$C_{n-1}^{m-1} + C_{n-1}^m = \frac{(n-1)!}{(m-1)!(n-m)!} + \frac{(n-1)!}{m!(n-1-m)!} = \frac{(n-1)!m + (n-1)!(n-m)}{m!(n-m)!} = \frac{n!}{m!(n-m)!} = C_n^m.$$

On aime bien généralement représenter cette propriété sous la forme d'un triangle appelé triangle de Pascal qui est présenté à la figure 81.

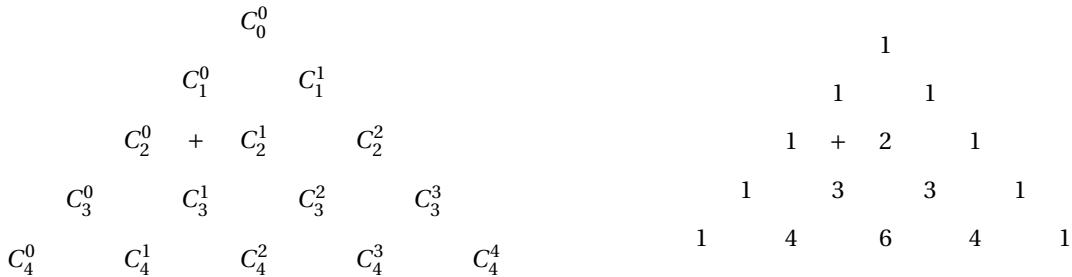


FIGURE 81 – Le triangle de Pascal

Les binomiaux jouent un rôle important en mathématiques car ils apparaissent dans le développement de

$$(a+b)^n = \sum_{k=0}^n C_n^k a^k b^{n-k} \quad (11)$$

Cette formule se démontre par récurrence sur  $n$  de la façon suivante :

- Si  $n = 0$ , alors,  $(a+b)^0 = 1$  et  $C_0^0 a^0 b^0 = 1$ , donc la formule est vrai;

— Soit  $M > 0$  un entier. Supposons que la formule soit vraie pour  $n \leq M$ , est-elle vrai pour  $n = M + 1$ ? Développons  $(a + b)^{M+1}$ :

$$\begin{aligned}(a + b)^{M+1} &= (a + b).(a + b)^M = (a + b) \sum_{k=0}^M C_M^k a^k b^{M-k} \\ &= \sum_{k=0}^M C_M^k a^{k+1} b^{M-k} + \sum_{k=0}^M C_M^k a^k b^{M+1-k} \\ &= a^{M+1} + \sum_{k=1}^M (C_M^{k-1} + C_M^k) \cdot a^k b^{M+1-k} + b^{M+1}\end{aligned}$$

D'après l'équation 10, on sait que  $C_{M+1}^k = C_M^{k-1} + C_M^k$ , on a alors :

$$\begin{aligned}(a + b)^{M+1} &= a^{M+1} + \sum_{k=1}^M C_{M+1}^k \cdot a^k b^{M+1-k} + b^{M+1} \\ &= \sum_{k=0}^{M+1} C_{M+1}^k a^k b^{M+1-k}.\end{aligned}$$

Ce qui finit de démontrer par récurrence la formule 11.

#### B.4 Calcul de sommes classiques

**Proposition 1.** Soit  $n$  un entier et  $r$  un réel différent de 1, alors

$$\boxed{\sum_{k=0}^n r^k = \frac{1 - r^{n+1}}{1 - r}}$$

*Démonstration.*

$$\begin{aligned}(1 - r) \cdot \sum_{k=0}^n r^k &= (1 + r + r^2 + \dots + r^n) - (r + r^2 + \dots + r^n + r^{n+1}) \\ &= 1 - r^{n+1}\end{aligned}$$

□

**Proposition 2.** Soit  $n$  un entier, alors

$$\boxed{\sum_{k=0}^n k = \frac{n(n+1)}{2} \quad \sum_{k=0}^n k^2 = \frac{(2n+1)(n+1)n}{6} \quad \sum_{k=0}^n k^3 = \frac{n^2(n+1)}{4}}$$

*Démonstration.* La formule  $S_n = \sum_{k=0}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$  est célèbre. Elle a été démontré par Carl Friedrich Gauss de la façon suivante :

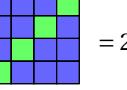
$$\begin{array}{rcl} S_n &=& 1 + 2 + \dots + n-1 + n \\ S_n &=& n + n-1 + \dots + 2 + 1 \\ \hline 2.S_n &=& n+1 + n+1 + \dots + n+1 + n+1 \end{array}$$

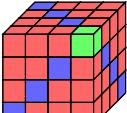
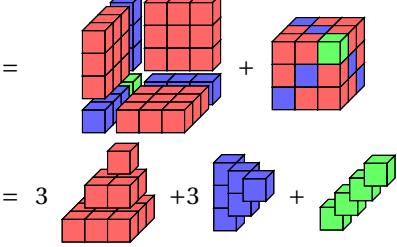
$$2.S_n = n(n+1)$$

□

Cependant, cette preuve ne se généralise pas pour le calcul des sommes  $\sum_k k^d$  où  $d$  est un entier quelconque.

En fait, cette identité remarquable est un cas particulier d'une identité géométrique qui est la suivante :

dimension 1	dimension 2
	
$n+1 = \sum_{k=0}^n k^0$	$(n+1)^2 = 2 \sum_{k=0}^n k^1 + \sum_{k=0}^n k^0$

dimension 3	dimension 4
 $=$ 	$?$
$(n+1)^3 = 3 \sum_{k=0}^n k^2 + 3 \sum_{k=0}^n k^1 + \sum_{k=0}^n k^0$	$(n+1)^4 = 4 \sum_{k=0}^n k^3 + 6 \sum_{k=0}^n k^2 + 4 \sum_{k=0}^n k^1 + \sum_{k=0}^n k^0$

En regardant les formules des tableaux précédents, on reconnaît les premières lignes du triangle de Pascal, présenté à la figure 81. On peut donc facilement en déduire une formule conjecturale pour la dimension 4, (voir tableau précédent), et on peut traduire ces observations mathématiquement par, pour tout entier  $n$  et toute dimension  $d$ ,

$$(n+1)^d = \sum_{i=0}^{d-1} C_d^i \sum_{k=0}^n k^i. \quad (12)$$

Il ne reste plus qu'à démontrer cette dernière identité en procédant de la façon suivante : On sait que  $(k+1)^d = \sum_{i=0}^d C_d^i k^i$ . Ainsi, si l'on somme cette dernière identité pour  $k$  allant de 0 à  $n$ , on obtient que :

$$\sum_{k=0}^n (k+1)^d = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^d C_d^i k^i = \sum_{i=0}^d \sum_{k=0}^n C_d^i k^i = \sum_{i=0}^d C_d^i \sum_{k=0}^n k^i.$$

Si l'on extrait le terme  $i = d$  de la somme du dernier terme, on obtient :

$$\sum_{k=0}^n (k+1)^d = \sum_{k=0}^n k^d + \sum_{i=0}^{d-1} C_d^i \sum_{k=0}^n k^i$$

qui se simplifie de part et d'autre de l'égalité pour donner :

$$(n+1)^d = \sum_{i=0}^{d-1} C_d^i \sum_{k=0}^n k^i.$$

On peut maintenant utiliser l'équation 12 pour déterminer récursivement les sommes cherchées :

$$\begin{aligned}
 (n+1) &= \sum_{k=0}^n k^0 & \Rightarrow & \sum_{k=0}^n k^0 = n+1 \\
 (n+1)^2 &= 2 \cdot \sum_{k=0}^n k + \sum_{k=0}^n k^0 & \Rightarrow & \sum_{k=0}^n k = \frac{(n+1)^2 - (n+1)}{2} \\
 (n+1)^3 &= 3 \cdot \sum_{k=0}^n k^2 + 3 \cdot \sum_{k=0}^n k + \sum_{k=0}^n k^0 & \Rightarrow & \sum_{k=0}^n k^2 = \frac{1}{3} \left( (n+1)^3 - 3 \cdot \frac{n(n+1)}{2} - (n+1) \right) \\
 (n+1)^4 &= 4 \cdot \sum_{k=0}^n k^3 + 6 \cdot \sum_{k=0}^n k^2 + 4 \cdot \sum_{k=0}^n k + \sum_{k=0}^n k^0 & \Rightarrow & \sum_{k=0}^n k^3 = \frac{(n+1)^4 - 6 \cdot \frac{(2n+1)(n+1)n}{6} - 4 \cdot \frac{n(n+1)}{2} - (n+1)}{4}.
 \end{aligned}$$

**Trouver une formule close (difficile, pour les curieux) :**

Commençons par poser la matrice  $M = (m_{i,j})$  définie par :

$$M = \begin{cases} C_i^{j-1} & \text{si } i \geq j \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Si on note par  $\vec{s}$  et  $\vec{n}$  les vecteurs :

$$\vec{s} = \left( \sum_{k=0}^n k^i \right)_{0 \leq i \leq d} \quad \vec{n} = \left( (n+1)^i \right)_{1 \leq i \leq d+1}$$

alors le problème consistant à chercher une formule pour  $\sum_{l=0}^n l^i$  se réécrit par :

$$M \cdot \vec{s} = \vec{n}$$

Par exemple, pour  $d = 4$ , on a :

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 0 \\ 1 & 5 & 10 & 10 & 5 \end{pmatrix} \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} \sum_{k=0}^n k^0 \\ \sum_{k=0}^n k^1 \\ \sum_{k=0}^n k^2 \\ \sum_{k=0}^n k^3 \\ \sum_{k=0}^n k^4 \end{pmatrix} \quad \vec{n} = \begin{pmatrix} (n+1)^0 \\ (n+1)^1 \\ (n+1)^2 \\ (n+1)^3 \\ (n+1)^4 \\ (n+1)^5 \end{pmatrix}$$

et l'on a donc la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 0 \\ 1 & 5 & 10 & 10 & 5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sum_{k=0}^n k^0 \\ \sum_{k=0}^n k^1 \\ \sum_{k=0}^n k^2 \\ \sum_{k=0}^n k^3 \\ \sum_{k=0}^n k^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (n+1)^0 \\ (n+1)^1 \\ (n+1)^2 \\ (n+1)^3 \\ (n+1)^4 \\ (n+1)^5 \end{pmatrix}.$$

La matrice  $M$  étant triangulaire, elle s'inverse donc.

Soit  $T = (t_{i,j})$  une matrice triangulaire dont la diagonale est constituée uniquement de 1 ( $t_{i,i} = 1$ ). L'inverse  $S = (s_{i,j})$  d'une telle matrice se calcule facilement en utilisant la formule de la comatrice et donne :

$$s_{i,j} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{i-j} \sum_{\substack{u_1+u_2+\dots+u_k=i-j \\ 1 \leq u_1, \dots, u_k \leq i-j}} (-1)^k \prod_{l=1}^k t_{j+\sum_{l=1}^i u_l, j+\sum_{l=1}^{i-1} u_l} & \text{si } i > j \\ 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Si on applique cette dernière formule à notre matrice  $M$ , on obtient alors que l'inverse  $M^{-1}$  de  $M$  est donné par :

$$(M^{-1})_{i,j} = \frac{1}{C_i^1} \begin{cases} \sum_{k=1}^{i-j} \sum_{\substack{u_1+u_2+\dots+u_k=i-j \\ 1 \leq u_1, \dots, u_k \leq i-j}} (-1)^k \frac{C_{j+u_1}^{j-1}}{C_j^1} \frac{C_{j+u_1+u_2}^{j-1+u_1}}{C_{j+u_1}^1} \dots \frac{C_{j+u_1+\dots+u_{k-1}}^{j-1+u_1+\dots+u_{k-1}}}{C_{j+u_1+\dots+u_{k-1}}^1} & \text{si } i > j \\ 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

En remarquant que  $j + u_1 + \dots + u_k = i$  et que

$$\frac{C_{j+u_1}^{j-1}}{C_j^1} \frac{C_{j+u_1+u_2}^{j-1+u_1}}{C_{j+u_1}^1} \dots \frac{C_{j+u_1+\dots+u_{k-1}}^{j-1+u_1+\dots+u_{k-1}}}{C_{j+u_1+\dots+u_{k-1}}^1} = \frac{i!}{(u_1+1)!.(u_2+1)!. \dots .(u_k+1)!}$$

On obtient finalement la formule suivante :

$$(M^{-1})_{i,j} = \begin{cases} \frac{(i-1)!}{j!} \sum_{k=1}^{i-j} (-1)^k \sum_{\substack{u_1+u_2+\dots+u_k=i-j \\ 1 \leq u_1, \dots, u_k \leq i-j}} \frac{1}{(u_1+1)!(u_2+1)!\dots(u_k+1)!} & \text{si } i = j \\ 1/i & \text{sinon} \\ 0 & \end{cases}$$

Il ne reste plus qu'à développer la dernière ligne de  $\vec{s} = M^{-1} \cdot \vec{n}$  pour obtenir une formule close pour  $\sum k^d$  :

$$\sum_{k=0}^n k^d = \frac{1}{d+1} (n+1)^{d+1} + \sum_{j=1}^d \left( \frac{d!}{j!} \sum_{k=1}^{d+1-j} (-1)^k \sum_{\substack{u_1+u_2+\dots+u_k=d+1-j \\ 1 \leq u_1, \dots, u_k \leq d+1-j}} \frac{1}{(u_1+1)!(u_2+1)!\dots(u_k+1)!} \right) (n+1)^j$$

**Tout faire en 2 lignes avec l'exponentielle :**

**Proposition 3.** Soit  $n$  et  $d$  deux entiers positifs, alors,

$$\sum_{k=0}^n k^d = \left( \frac{\partial^d}{\partial x^d} \frac{e^{(n+1)x} - 1}{e^x - 1} \right) (0).$$

où  $\frac{\partial^d}{\partial x^d} f$  est la dérivée  $d$ ème de  $f$ .

*Démonstration.* On reconnaît dans  $\frac{e^{(n+1)x} - 1}{e^x - 1}$  le calcul d'une somme géométrique de raison  $e^x$ . Ainsi,

$$\frac{\partial^d}{\partial x^d} \frac{e^{(n+1)x} - 1}{e^x - 1} = \frac{\partial^d}{\partial x^d} \sum_{k=0}^n e^{k.x} = \sum_{k=0}^n k^d e^{k.x}.$$

Si l'on évalue l'expression précédente en 0, on obtient,

$$\frac{\partial^d}{\partial x^d} \frac{e^{(n+1)x} - 1}{e^x - 1} (0) = \sum_{k=0}^n k^d.$$

□

**Proposition 4.** La somme  $\sum_{k=0}^n k^d$  est un polynôme de degrés  $d+1$  en  $n$  et vaut :

$$\sum_{k=0}^n k^d = \frac{1}{d+1} \sum_{j=1}^{d+1} \left( C_{d+1}^j \cdot \left( \frac{\partial^{d+1-j}}{\partial x^{d+1-j}} \frac{1}{1-g(x)} \right) (0) \right) \cdot (n+1)^j$$

où  $g(x) = (1+x-e^x).x^{-1}$ .

*Démonstration.* Soit  $f \in \mathcal{C}^{d+1}$ , alors

$$\frac{\partial^{d+1}}{\partial x^{d+1}} (xf) = \sum_{j=0}^{d+1} C_{d+1}^j \frac{\partial^j}{\partial x^j} x \frac{\partial^{d+1-j}}{\partial x^{d+1-j}} f = x \frac{\partial^{d+1}}{\partial x^{d+1}} f + (d+1) \frac{\partial^d}{\partial x^d} f.$$

Ainsi,

$$\frac{\partial^{d+1}}{\partial x^{d+1}} (xf) (0) = (d+1) \frac{\partial^d}{\partial x^d} f (0).$$

Comme

$$\frac{e^{(n+1)x} - 1}{e^x - 1} = \sum_{k=0}^n e^{k.x}$$

est  $\mathcal{C}^{d+1}$  sur  $\mathbb{R}$ , on peut utiliser la formule précédente en posant  $f = \frac{e^{(n+1)x}-1}{e^x-1}$  pour obtenir :

$$\frac{\partial^d}{\partial x^d} \frac{e^{(n+1)x}-1}{e^x-1}(0) = \frac{1}{d+1} \frac{\partial^{d+1}}{\partial x^{d+1}} \frac{x(e^{(n+1)x}-1)}{e^x-1}(0) = \frac{1}{d+1} \frac{\partial^{d+1}}{\partial x^{d+1}} \frac{e^{(n+1)x}-1}{1-g(x)}(0)$$

Si l'on développe cette dernière expression, la somme  $\sum_{k=0}^n k^d$  devient

$$\frac{1}{d+1} \sum_{j=0}^{d+1} C_{d+1}^j \frac{\partial^j}{\partial x^j} (e^{(n+1)x}-1) \frac{\partial^{d+1-j}}{\partial x^{d+1-j}} \frac{1}{1-g(x)}(0)$$

L'évaluation en 0 de  $\frac{\partial^j}{\partial x^j} (e^{(n+1)x}-1)$  vaut 0 si  $j=0$  et  $(n+1)^j$  sinon. Ainsi, la somme  $\sum_{k=0}^n k^d$  est égale à

$$\frac{1}{d+1} \sum_{j=1}^{d+1} C_{d+1}^j \frac{\partial^{d+1-j}}{\partial x^{d+1-j}} \frac{1}{1-g(x)}(0) (n+1)^j.$$

□