



UNIVERSITÉ
CÔTE D'AZUR

Bases de l'informatique 1

Cours 2. Itérations et récursions

Olivier Baldellon

Courriel : prénom.nom@univ-cotedazur.fr

Page professionnelle : <https://upinfo.univ-cotedazur.fr/~obaldellon/>

LICENCE I — FACULTÉ DES SCIENCES ET INGÉNIERIE DE NICE — UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

- 🍃 Partie I. Remarques générales
- 🍃 Partie II. Itérations
- 🍃 Partie III. Boucles while
- 🍃 Partie IV. Les nombres premiers
- 🍃 Partie V. Les nombres flottants
- 🍃 Partie VI. Exemples
- 🍃 Partie VII. Table des matières

- ▶ Le partiel sera le 13/11 à 13h15
- ▶ Le lieu vous sera communiqué plus tard sur Moodle.
- ▶ Il n'y aura ni CM, ni TD, ni TP pendant cette semaine là :(

- ▶ Beaucoup connaissent des choses qu'ils ont vu avant :
 - ▶ les listes,
 - ▶ les boucles `for`,
 - ▶ les f-string : `f"blabla"`
- ▶ Un outil python est interdit tant que l'on ne l'a pas vu en cours !
 - ▶ Le but est-il vraiment de connaître plein d'astuces en Python ?
 - ▶ Le but est d'apprendre à programmer.
- ▶ Nous prenons les notions dans l'ordre.
 - ▶ Il faut comprendre les méthodes générales et pénibles avant de prendre les raccourcis.
 - ▶ Ces contraintes sont normales et ont un intérêt pédagogique.
 - ▶ Comment faire sans ?
- ▶ Une fois l'UE terminée, faite ce que vous voulez !

- ▶ Je lis souvent des comparaisons de la forme :

```
if 0 < x < 1:  
    bla bla
```

SCRIPT

- ▶ Une telle expression a-t-elle un sens ?

- $1 + 2 + 3 \rightarrow (1 + 2) + 3 \rightarrow 3 + 3 \rightarrow 6$

- $0 < x < 1 \rightarrow (0 < x) < 1 \rightarrow \text{True} < 1 \rightarrow ?$

- ▶ Bon... pour être honnête Python y arrive très bien.

- ▶ Mais ça ne marche pas avec les autres langages.
- ▶ Mauvais habitude que je vous interdis (pour cette UE)

- ▶ La bonne méthode :

```
if 0 < x and x < 1:  
    bla bla
```

SCRIPT

- 🍃 Partie I. Remarques générales
- 🍃 **Partie II. Itérations**
- 🍃 Partie III. Boucles while
- 🍃 Partie IV. Les nombres premiers
- 🍃 Partie V. Les nombres flottants
- 🍃 Partie VI. Exemples
- 🍃 Partie VII. Table des matières

- ▶ **Problème** : on souhaite calculer la somme $S(n)$ des entiers de 1 à n avec $n \geq 1$ entier.

$$S(n) = \sum_{k=1}^n k = 1 + 2 + \dots + n$$

- ▶ Il s'agit de construire un **algorithme** de calcul de $S(n)$: une méthode mécanique, étape par étape qui trouve le résultat correct.
- ▶ À partir de cet algorithme, on va coder la fonction S dans le langage choisi, ici Python.
- ▶ Ainsi, on obtient un **programme**, dont l'exécution sur ordinateur permet de calculer la fonction S .

- ▶ On veut calculer $S(1000)$. Calculer « à la main » sans utiliser d'astuce est facile, mais laborieux : $1 + 2 + 3 + \dots + 1000 = \dots$

- ▶ On veut donc le faire faire par un ordinateur.
 - ▶ la méthode doit détailler chaque étape du calcul (pas d'improvisation)
 - ▶ la méthode doit marcher pour tous les entiers n positif.

- ▶ Trois manières classiques pour calculer $S(n)$:
 - ▶ le calcul direct,
 - ▶ la récurrence,
 - ▶ la boucle ou itération.

C'est la solution idéale, mais rarement possible.

- ▶ Nécessite une idée (un peu) astucieuse.
- ▶ Ici on a la formule :

$$S(n) = \frac{n(n+1)}{2}$$

```
def S(n):  
    return n*(n+1)//2
```

SCRIPT

```
>>> S(1000)  
500500
```

SHELL

- ▶ Ce programme fonctionne pour toutes les valeurs de n.
- ▶ Il est de plus très rapide ; il ne nécessite que 3 opérations.

- ▶ Comme la récurrence mathématique, on résout un problème en le supposant résolu pour des cas plus simples.
- ▶ On veut calculer $S(n)$, on s'autorise à utiliser $S(k)$ pour $k < n$.

Cas typiques :

▶ $k = n - 1$

▶ $k = n // 2$

- ▶ On a :

$$S(n) = 1 + 2 + \cdots + \underbrace{(n-1)}_{=S(n-1)} + n = S(n-1) + n$$

- ▶ Pour calculer $S(n)$, il suffit donc de calculer $S(n-1)$.
- ▶ Et comment calculer $S(n-1)$? À partir de $S(n-2)$
- ▶ Mais il faut s'arrêter : on peut calculer $S(1)$ directement.

$$S(5) = 15$$

On remplace successivement, les valeurs $S(n)$

- ▶ $S(5) = S(4) + 5$
 - ▶ $S(4) = S(3) + 4$
 - ▶ $S(3) = S(2) + 3$
 - ▶ $S(2) = S(1) + 2$
 - ▶ Ici on peut s'arrêter car on a directement $S(1) = 1$
- ▶ On obtient alors $S(5) = (((S(1) + 2) + 3) + 4) + 5$

$$S(5) = S(5)$$

$$S(5) = S(4) + 5$$

$$S(5) = S(4) + 5$$

$$S(5) = (S(3) + 4) + 5$$

$$S(5) = (S(3) + 4) + 5$$

$$S(5) = ((S(2) + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = ((S(2) + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = (((S(1) + 2) + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = (((S(1) + 2) + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = (((1 + 2) + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = (((1 + 2) + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = ((3 + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = ((3 + 3) + 4) + 5$$

$$S(5) = (6 + 4) + 5$$

$$S(5) = (6 + 4) + 5$$

$$S(5) = 10 + 5$$

$$S(5) = 10 + 5$$

$$S(5) = 15$$

SCRIPT

```
def S(n):  
    if n == 1: # Cas d'arrêt  
        return 1  
    else:  
        return S(n-1) + n # Formule de récurrence
```

Dans un programme récursif **il faut** :

- ▶ Le cas d'arrêt
- ▶ La formule de récurrence

$$\begin{cases} S(1) &= 1 \\ S(n) &= S(n-1) + n \end{cases}$$

- ▶ Un simple **if else** suffit alors.
- ▶ Python est mauvais pour la récursion : à éviter quand il y a trop d'appels récursifs...

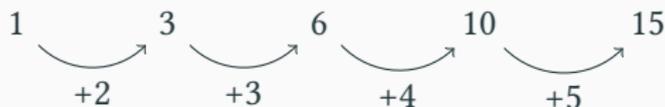
On considère la suite u_n arithmético-géométrique définie par récurrence :

$$\begin{cases} u_0 & = 234 \\ u_{n+1} & = -\frac{8}{10}u_n + 3 \end{cases}$$

- ▶ Écrire une fonction récursive pour calculer u_n .
- ▶ Quelle semble être sa limite ? L'écrire sous forme de fraction.

- 🍃 Partie I. Remarques générales
- 🍃 Partie II. Itérations
- 🍃 **Partie III. Boucles while**
- 🍃 Partie IV. Les nombres premiers
- 🍃 Partie V. Les nombres flottants
- 🍃 Partie VI. Exemples
- 🍃 Partie VII. Table des matières

- ▶ Les boucles forment un mécanisme bien plus répandu pour le calcul.
- ▶ Pour calculer de tête $1 + 2 + \dots + 5$ on passe par les résultats intermédiaires suivants :



Variable somme

Variable i

- ▶ Il suffit de deux variables pour faire le calcul
 - ▶ Celle correspondant à la somme partielle :
 - ▶ Celle correspondant à ce qu'on ajoute :

```
somme = somme+i  
i = i+1
```

SCRIPT

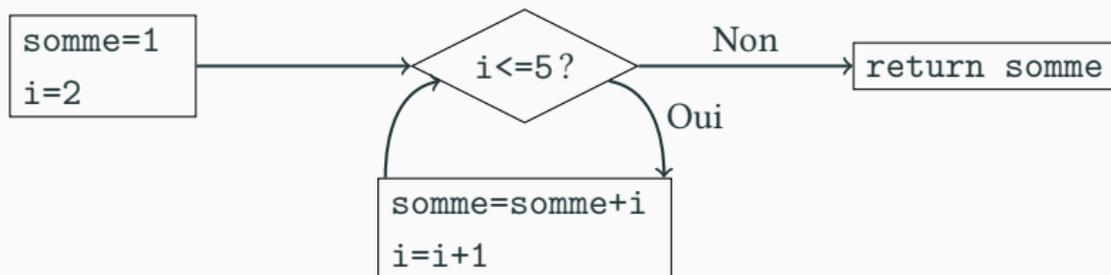
Variable somme

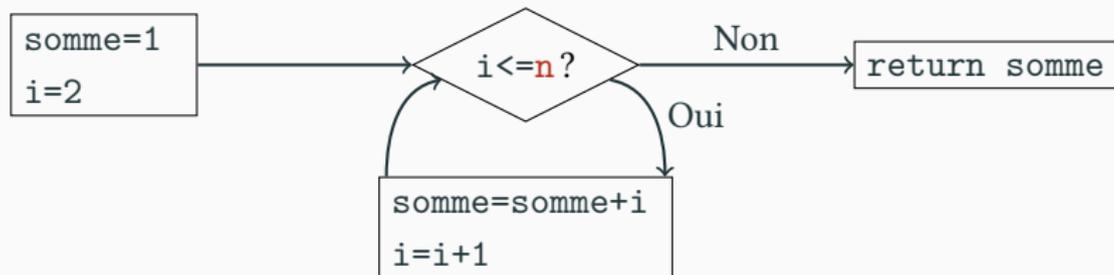


Variable i

somme	1	3	6	10	15
i	2	3	4	5	6

- ▶ Il faut créer les variables : **Initialisation**
- ▶ Préciser le calcul que l'on répétera : **Corps de boucle**
- ▶ Tester si l'on doit répéter le calcul ou non : **Test**





- Pour cela on utilise une boucle while (tant que)

```
def S(n):  
    somme=1           # initialisation  
    i=2              # initialisation  
    while i<=n:      # condition  
        somme=somme+i # corps de boucle  
        i=i+1        # corps de boucle  
    return somme
```

SCRIPT

- ▶ L'ordre des instructions compte ! On commence avec $i=2$ et $somme=1$.

```
somme = somme+i  
i = i+1
```

SCRIPT

- ▶ $i==2$ et $somme==3$
- ▶ $i==3$ et $somme==3$

```
i = i+1  
somme = somme+i
```

SCRIPT

- ▶ $i==3$ et $somme==1$
- ▶ $i==3$ et $somme==4$

- ▶ Pour comprendre ce que fait une boucle, on peut utiliser des `print`.

```
def S(n):  
    somme=1  
    i=2  
    while i<=n:  
        i=i+1  
        somme=somme+i  
        print('i =',i, 'et somme =',somme)  
    return somme
```

SCRIPT

```
>>> S(5)  
i = 3 et somme = 4  
i = 4 et somme = 8  
i = 5 et somme = 13  
i = 6 et somme = 19  
19
```

SHELL

- ▶ La condition est fondamentale ! C'est une grande source de bogue.
- ▶ Si la condition est toujours vérifiée, on ne sort jamais de la boucle.

```
i=3
while i<=5:
    i=i-1
```

SCRIPT

- ▶ Une seule solution : ~~la manifestation~~ ! le raccourci **Ctrl** + **C**

Synthèse

```
initialisation # Initialisation des
initialisation # variables de boucle
while conditions:
    instruction # Corps de boucle exécuté
    instruction # tant que le Test est valide
instruction # Lignes exécutées
instruction # dans tous les cas
```

SCRIPT

Écrire une fonction `table_multiplication(n)` qui affiche la table de `n`.

```
>>> table_multiplication(11)
0 * 11 = 0
1 * 11 = 11
2 * 11 = 22
3 * 11 = 33
4 * 11 = 44
5 * 11 = 55
6 * 11 = 66
7 * 11 = 77
8 * 11 = 88
9 * 11 = 99
10 * 11 = 110
```

SHELL

- 🍃 Partie I. Remarques générales
- 🍃 Partie II. Itérations
- 🍃 Partie III. Boucles while
- 🍃 **Partie IV. Les nombres premiers**
- 🍃 Partie V. Les nombres flottants
- 🍃 Partie VI. Exemples
- 🍃 Partie VII. Table des matières

- ▶ On dit qu'un entier naturel n est premier s'il a exactement deux diviseurs positifs : 1 et n .
 - Exemples : 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, ...
- ▶ Il y a une infinité de nombres premiers (*cf.* Euclide).
- ▶ Si n n'est pas premier,
 - alors n admet une diviseur d , avec $1 < d < n$.
 - dans ce cas, puisque d divise n on a $n \% d == 0$ ($d \neq 0$).
- ▶ Exemple : 2021027 n'est pas premier. En effet,

```
>>> 2021027 % 1009  
0
```

SHELL

- ▶ Tester si un nombre d divise n pour $1 < d < n$.

SCRIPT

```
def est_premier(n):  
    if n < 2:  
        return False  
    d = 2  
    while n % d != 0:  
        d = d + 1  
    # on est sorti de la boucle, si c'est pour d == n,  
    # alors n est premier  
    return d == n
```

- ▶ Problème : lent car pas malin (on teste trop de diviseurs d).

- ▶ (1) Si n est pair, il est premier seulement si $n = 2$
- ▶ (2) Si n est impair, ses seuls diviseurs sont impairs.
- ▶ si n n'est pas premier,
 - ▶ il possède un plus petit diviseur premier d
 - ▶ n s'écrit alors $n = d \cdot m$ avec $d \leq m$.
 - ▶ $d \cdot d \leq d \cdot m = n$

```
def est_premier(n):  
    if n < 2:  
        return False  
    elif n%2 == 0:  
        return n == 2 # Astuce (1)  
    else:  
        d = 3 # on test seulement les d impairs (2)  
        while d*d <= n and n%d != 0:  
            d = d+2 # si d est impair, d+2 est le suivant (2)  
  
        # on est sorti de la boucle, si d*d > n,  
        # alors n est premier  
        return d*d > n
```

SCRIPT

- ▶ Mieux mais loin d'être optimal. Il existe des tests probabilistes ou déterministes efficaces. Le module sympy fournit la fonction `isprime`.

- ▶ Pour un entier $n > 1$, on cherche le plus petit $d > 1$ tel que d divise n .

```
def plus_petit_facteur(n):  
    d = 2  
    while n%d != 0:  
        d = d + 1  
    return d
```

SCRIPT

- ▶ Remarque `plus_petit_facteur(n)` renvoie un nombre premier.
- ▶ Comme pour tester si n est premier, cet algorithme est naïf. On peut l'améliorer avec les mêmes techniques que précédemment.

- Partie I. Remarques générales
- Partie II. Itérations
- Partie III. Boucles while
- Partie IV. Les nombres premiers
- Partie V. Les nombres flottants
- Partie VI. Exemples
- Partie VII. Table des matières

- ▶ On code les décimaux avec la notation à virgule flottante :
 - ▶ Il est impossible de représenter de façon exacte tous les nombres réels.
 - ▶ On parle de flottants (pour nombre à virgule flottante). En anglais : *float*.

```
>>> 5/2
2.5
>>> 2/3
0.6666666666666666
>>> 2.5 * 10**50 # Les puissances de 10 sont notées avec e+
2.5e+50
```

SHELL

- ▶ On utilise un point au lieu d'une virgule
- ▶ Les flottants n'ont qu'un nombre limité de chiffres après la virgule.
- ▶ On n'aura qu'une approximation de π et $\sqrt{2}$. Ce qui largement suffisant pour des calculs pratiques.

```
>>> import math
>>> math.pi
3.141592653589793
>>> math.sqrt(2)
1.4142135623730951
```

SHELL

- ▶ Le calcul sur les nombres flottants est inexact, on évitera de tester l'égalité de tels nombres.

```
>>> 0.1 + 0.1 + 0.1 + 0.1 == 0.4
True
>>> 0.1 + 0.1 + 0.1 == 0.3
False
```

SHELL

- ▶ On peut prédire le nombre de décimales exactes, mais c'est difficile (voire très difficile) en général.
- ▶ Que faire ? Remplacer l'égalité par une précision h

```
# a et b flottant
a==b # Déconseillé car dangereux

h=.0001
abs(a-b) < h # Oui
abs(a) < h # signifie a est presque nul
```

SCRIPT

- ▶ Quels sont les nombres avec une quantité de chiffres finie après la virgule?
 - ▶ Nombre décimal : nombre ayant un nombre fini de chiffre en base 10.
 - ▶ Nombre dyadique : nombre ayant un nombre fini de chiffre en base 2.
- ▶ Les flottants sont des nombres dyadiques (un nombre rond pour nous n'est pas forcément rond pour la machine).

$$0,1 = 0,000110011001100110011\dots_2$$

- ▶ Python n'affiche qu'une valeur approchée de la valeur interne.

```
>>> 0.1
0.1
>>> from decimal import Decimal
>>> Decimal(0.1)
Decimal('0.10000000000000000055511151231257827021181583404541015625')
```

SHELL

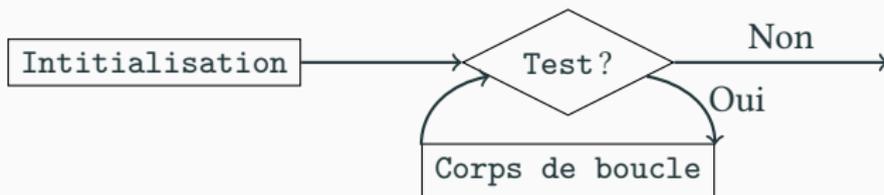
- Partie I. Remarques générales
- Partie II. Itérations
- Partie III. Boucles while
- Partie IV. Les nombres premiers
- Partie V. Les nombres flottants
- Partie VI. Exemples
- Partie VII. Table des matières

- ▶ On veut calculer la racine carrée approchée d'un nombre réel quelconque, par exemple calculer $\sqrt{2} = 1,4142\dots$ sans utiliser `math.sqrt`.
- ▶ Méthode de Newton (1669) :

$$b = \frac{1}{2} \left(a + \frac{r}{a} \right)$$

Si a est une approximation de \sqrt{r} alors b est une meilleure approximation. (cf explications en TP).

- ▶ **Trois questions pour coder l'algorithme :**



- ▶ Comment améliorer l'approximation courante ? (corps de boucle)
- ▶ Mon approximation est-elle suffisante ? (test)
- ▶ Quelle première approximation choisir ? (initialisation)

► Comment améliorer l'approximation courante? (corps de boucle)

- Il suffit d'utiliser la formule de Newton (en remplaçant b par a)

```
a = 0.5 * (a + r/a)
```

```
SCRIPT
```

► Mon approximation est-elle suffisante? (test)

- On s'arrête lorsque l'écart avec \sqrt{r} est suffisamment petit (on prend h petit)

$$a \approx \sqrt{r} \Leftrightarrow a^2 \approx r \Leftrightarrow |a^2 - r| < h$$

- Cela veut dire que l'on doit continuer tant que :

```
abs(a*a - r) >= h
```

```
SCRIPT
```

► Quelle première approximation choisir? (initialisation)

- On peut prouver que n'importe quelle valeur **strictement positive** convient.

```
a=1
```

```
SCRIPT
```

```
def racine(r,h): # on suppose r>0 et h>0 petit
    a = 1
    while abs(a*a - r) >= h:
        print('a = ', a) # juste pour voir !
        a = 0.5 * (a + r / a)
    return a
```

SCRIPT

- ▶ Testons notre programme. (Quatre itérations seulement ont suffi)

```
>>> h=10**-10 # h = 0.00000 00000 1
>>> r2 = racine(2,h)
a = 1
a = 1.5
a = 1.4166666666666665
a = 1.4142156862745097
>>> from math import sqrt
>>> sqrt(2) # La version Python plus précise
1.4142135623730951
>>> r2
1.4142135623746899
>>> abs(sqrt(2)-r2)
1.5947243525715749e-12
```

SHELL

- ▶ On s'intéresse au PGCD (Plus Grand Commun Diviseur) de deux entiers naturels.

$$\text{PGCD}(4,6) = 2 \quad \text{car} \quad 4 = 2 \times 2 \quad \text{et} \quad 6 = 2 \times 3$$

$$\text{PGCD}(10,15) = 5 \quad \text{car} \quad 10 = 5 \times 2 \quad \text{et} \quad 15 = 5 \times 3$$

$$\text{PGCD}(0,8) = 8 \quad \text{car} \quad 0 = 8 \times 0 \quad \text{et} \quad 8 = 8 \times 1$$

- ▶ L'algorithme d'Euclide calcule le PGCD de deux entiers naturels a et b .
 - ▶ (d divise à la fois a et b) \Leftrightarrow (d divise à la fois b et $a \% b$)
 - ▶ En particulier, $\text{PGCD}(a, b) = \text{PGCD}(b, a \% b)$

- ▶ Calculons le PGCD de 135 et 72.

```
>>> 135%72
```

```
63
```

```
>>> 72%63
```

```
9
```

```
>>> 63%9
```

```
0
```

SHELL

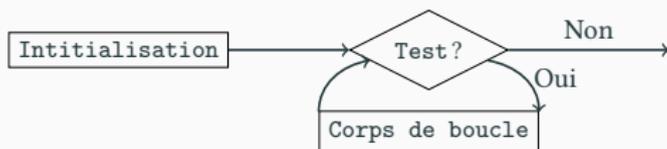
$$\text{PGCD}(135,72) = \text{PGCD}(72,63)$$

$$= \text{PGCD}(63,9)$$

$$= \text{PGCD}(9,0)$$

$$= 9$$

$$\text{PGCD}(135,72) = \text{PGCD}(72,63) = \text{PGCD}(63,9) = \text{PGCD}(9,0) = 9$$



De quelles variables a-t-on besoin ?

a	135	72	63	9
b	72	63	9	0

► Initialisation : a et b sont des données du problèmes

► Corps de boucle :

```

a = b   # Faux !
b = a%b # Pourquoi ?
    
```

SCRIPT

```

temp=a%b
a = b
b = temp
    
```

SCRIPT

► Test : on continue tant que $b \neq 0$

- b est un entier naturel qui décroît strictement
- b finira toujours par être égale à 0 : **le programme s'arrêtera !**

```
def PGCD(a,b): # on suppose a,b entiers >= 0
    while b != 0:
        temp = a%b
        a = b
        b = temp
        print('a =',a, 'b =', b) # Pour voir !
    return a
```

SCRIPT

```
>>> PGCD(38160,33000)
a = 33000 b = 5160
a = 5160 b = 2040
a = 2040 b = 1080
a = 1080 b = 960
a = 960 b = 120
a = 120 b = 0
120
```

SHELL

- ▶ Problème récréatif de Leonardo Fibonacci (1202)

Un homme met un couple de lapins dans un lieu isolé de tous les côtés par un mur. Combien de couples obtient-on en un an si chaque couple engendre tous les mois un nouveau couple à compter du troisième mois de son existence ?

- ▶ On note $F(n)$ le nombre de lapins au début du mois n .
- ▶ Pour tout $n > 1$, on a $F(n+1) = F(n) + F(n-1)$

Nouvelle génération = anciens adultes + nouveaux adultes

- ▶ On voit de manière assez évidente que :

$$F(n) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2} \right)^n \right)$$

- ▶ Mais on souhaite éviter les flottants.

```
def F(n): # Version récursive
    print('Je calcule F(n) pour n =', n) #Voyons...
    if n==1 or n==2:
        return 1
    else:
        return F(n-1) + F(n-2)
```

SCRIPT

>>> F(6)

SHELL

```
Je calcule F(n) pour n = 6
Je calcule F(n) pour n = 5
Je calcule F(n) pour n = 4
Je calcule F(n) pour n = 3
Je calcule F(n) pour n = 2
Je calcule F(n) pour n = 1
Je calcule F(n) pour n = 2
Je calcule F(n) pour n = 3
Je calcule F(n) pour n = 2
Je calcule F(n) pour n = 1
Je calcule F(n) pour n = 4
Je calcule F(n) pour n = 3
Je calcule F(n) pour n = 2
Je calcule F(n) pour n = 1
Je calcule F(n) pour n = 2
8
```

Peu efficace

- ▶ On calcule de nombreuses fois la même chose.
- ▶ Solution possible : voir cours 7 (mémoïsation)

On souhaite calculer $F(N)$.

L'astuce est d'utiliser deux variables

a et b.

$F(n)$	a	1	2	3	5	8
$F(n-1)$	b	1	1	2	3	5
n	n	2	3	4	5	6

► Initialisation

```
a = 1
b = 1
n = 2
```

SCRIPT

► Corps de boucle. On utilise un invariant de boucle $a = F(n)$ et $b = F(n-1)$

```
# a==F(n) et b==F(n-1)
temp = a+b           # temp == F(n+1)
b = a                # b == F(n)
a = temp             # a == F(n+1)
# a==F(n+1) et b==F(n)
n = n+1
# a==F(n) et b==F(n-1)
```

SCRIPT

► On continue tant que $n < N$.

- ▶ Il suffit d'écrire le code...

```
def F(N):  
    a = 1  
    b = 1  
    n = 2  
    while n < N:  
        temp = a+b  
        b = a  
        a = temp  
        n = n+1  
    return a
```

SCRIPT

- ▶ ...et apprécier la vitesse et l'efficacité de cette méthode !

```
>>> F(8)  
21  
>>> F(378)  
444470572323423749883397351998290851993343081863640916635139  
7897095281987215864
```

SHELL

On considère la suite u_n arithmético-géométrique définie par récurrence :

$$\begin{cases} u_0 & = 234 \\ u_{n+1} & = -\frac{8}{10}u_n + 3 \end{cases}$$

- ▶ Écrire une fonction avec une boucle while pour calculer u_n .
- ▶ Sa limite est $\ell = \frac{5}{3}$. Faire une boucle qui s'arrête lorsque $|u_n - \ell| < 10^{-5}$

Merci pour votre attention

Questions



Cours 2 — Itérations et récursions

Partie I. Remarques générales

Partiel

Pour ceux qui ont déjà fait du Python

Comparer des nombres

Partie II. Itérations

Du problème au programme

Différentes approches

Formule astucieuse

La récurrence

La récurrence : comment calculer?

Détail du calcul

Programme récursif

 Exercice récursion

Partie III. Boucles while

Les boucles

Début, corps de boucle et fin

Boucle While

Corps de boucle : se tromper et comprendre

Vers l'infini ou au delà!

 Exercice boucle while

Partie IV. Les nombres premiers

Définition

Un algorithme naïf

Un algorithme moins naïf

 Trouver le plus petit facteur

Partie V. Les nombres flottants

Les flottants

De l'inexactitude du calcul flottant

Approximation des nombres décimaux

Partie VI. Exemples

Méthode de Newton : principe

Méthode de Newton : analyse

Méthode de Newton : programme

Algorithme d'Euclide : principe

Algorithme d'Euclide : analyse

Algorithme d'Euclide : programme

Fibonacci : la suite de Fibonacci

Fibonacci : méthode récursive et naïve

Fibonacci : analyse

Fibonacci : méthode itérative et efficace

 Exercice suite convergente

Partie VII. Table des matières

- ▶ © 2024 — Olivier Baldellon
- ▶ Ce document est publié sous licence **CC-BY Attribution 4.0** 
 - Vous êtes autorisé à :
 - ▶ **Partager** — copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats pour toute utilisation, y compris commerciale.
 - ▶ **Adapter** — remixer, transformer et créer à partir du matériel pour toute utilisation, y compris commerciale.
 - Selon les conditions suivantes :
 - ▶ **Attribution** — Vous devez créditer l'œuvre, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été effectuées à l'œuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'Offrant vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son œuvre.
- ▶ <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>