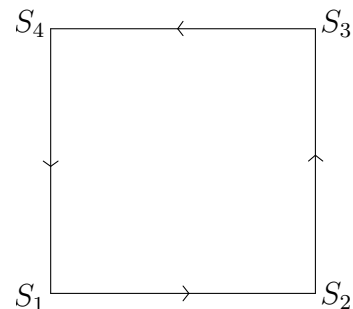


◆ TP11 – Un exemple de marche aléatoire

I. — Présentation du problème

On considère le jeu suivant. On dispose de deux urnes U_1 et U_2 . L'urne U_1 contient 9 boules noires et 1 boule blanche et l'urne U_2 contient 2 boules noires et 3 boules blanches. Initialement, on dispose un pion sur le sommet S_1 d'un carré. On tire une boule dans l'urne U_1 . Si cette boule est blanche, on déplace le pion au sommet suivant dans le sens des flèches : il se retrouve donc sur S_2 . Sinon, on laisse le pion dans sa position : il reste donc sur S_1 . Ensuite, on répète le processus de la manière suivante. Lorsqu'on est sur un sommet S_i , on tire une boule dans l'urne U_1 si $i = 1$ ou $i = 4$ et dans l'urne U_2 si $i = 2$ ou $i = 3$. Si cette boule est blanche, on déplace le pion sur le sommet suivant dans le sens des flèches et, sinon, on laisse le pion sur le sommet S_i .



Cette situation où on étudie le mouvement d'un objet qui évolue de façon aléatoire s'appelle une **marche aléatoire**.

Pour tout entier $n \in \mathbb{N}$, on note A_n l'évènement : « après le n -ième lancer, le pion se trouve sur le sommet S_1 ». On définit de même les évènements B_n , C_n et D_n respectivement pour les sommets S_2 , S_3 et S_4 .

On note, pour tout $n \in \mathbb{N}$, a_n , b_n , c_n et d_n les probabilités respectives des évènements A_n , B_n , C_n et D_n .

Question 1. Déterminer les valeurs de a_0 , b_0 , c_0 et d_0 .

Solution. Initialement, le pion est sur le sommet S_1 donc $a_0 = 1$ et $b_0 = c_0 = d_0 = 0$.

Question 2. Déterminer a_1 , b_1 , c_1 et d_1 puis utiliser la formule de probabilités totales pour calculer a_2 , b_2 , c_2 et d_2 .

Solution. Comme A_0 est un évènement certain, pour tout évènement B , $B = B \cap A_0$ donc $\mathbf{P}(B) = \mathbf{P}(A_0)\mathbf{P}(B | A_0) = \mathbf{P}(B | A_0)$. Ainsi, $\mathbf{P}(A_1) = \mathbf{P}(A_1 | A_0) = \frac{9}{10}$, $\mathbf{P}(B_1) = \mathbf{P}(B_1 | A_0) = \frac{1}{10}$, $\mathbf{P}(C_1) = \mathbf{P}(C_1 | A_0) = 0$ et $\mathbf{P}(D_1) = \mathbf{P}(D_1 | A_0) = 0$. Autrement dit, $a_1 = \frac{9}{10}$, $b_1 = \frac{1}{10}$ et $c_1 = d_1 = 0$.

Les évènements A_1 , B_1 , C_1 et D_1 forment un système complet d'évènements donc, d'après la formule de probabilités totales,

$$\begin{aligned} a_2 &= \mathbf{P}(A_2) = \mathbf{P}(A_1)\mathbf{P}(A_2 | A_1) + \mathbf{P}(B_1)\mathbf{P}(A_2 | B_1) + \mathbf{P}(C_1)\mathbf{P}(A_2 | C_1) + \mathbf{P}(D_1)\mathbf{P}(A_2 | D_1) \\ &= \frac{9}{10} \times \frac{9}{10} + \frac{1}{10} \times 0 + 0 \times 0 + 0 \times 0 \end{aligned}$$

donc $a_2 = \frac{81}{100}$.

De même,

$$\begin{aligned} b_2 &= \mathbf{P}(B_2) = \mathbf{P}(A_1)\mathbf{P}(B_2 | A_1) + \mathbf{P}(B_1)\mathbf{P}(B_2 | B_1) + \mathbf{P}(C_1)\mathbf{P}(B_2 | C_1) + \mathbf{P}(D_1)\mathbf{P}(B_2 | D_1) \\ &= \frac{9}{10} \times \frac{1}{10} + \frac{1}{10} \times \frac{2}{5} + 0 \times \frac{3}{5} + 0 \times 0 \end{aligned}$$

donc $b_2 = \frac{13}{100}$,

$$\begin{aligned}c_2 &= \mathbf{P}(C_2) = \mathbf{P}(A_1)\mathbf{P}(C_2 | A_1) + \mathbf{P}(B_1)\mathbf{P}(C_2 | B_1) + \mathbf{P}(C_1)\mathbf{P}(C_2 | C_1) + \mathbf{P}(D_1)\mathbf{P}(C_2 | D_1) \\ &= \frac{9}{10} \times 0 + \frac{1}{10} \times \frac{3}{5} + 0 \times \frac{2}{5} + 0 \times 0\end{aligned}$$

donc $c_2 = \frac{3}{50}$ et

$$\begin{aligned}d_2 &= \mathbf{P}(D_2) = \mathbf{P}(A_1)\mathbf{P}(D_2 | A_1) + \mathbf{P}(B_1)\mathbf{P}(D_2 | B_1) + \mathbf{P}(C_1)\mathbf{P}(D_2 | C_1) + \mathbf{P}(D_1)\mathbf{P}(D_2 | D_1) \\ &= \frac{9}{10} \times 0 + \frac{1}{10} \times 0 + 0 \times \frac{3}{5} + 0 \times \frac{9}{10}\end{aligned}$$

donc $d_2 = 0$,

Le but de ce qui suit est de déterminer, lorsque n devient grand, la probabilité de chacun des évènements A_n , B_n , C_n et D_n i.e. de déterminer, si elles existent, les limites des suites (a_n) , (b_n) , (c_n) et (d_n) .

II. — Simulation

Question 3. Écrire une fonction `urne1` sans paramètre qui simule un tirage dans l'urne U_1 et qui renvoie 1 si on tire une boule blanche et 0 sinon. On utilisera la fonction `randint` du module `random`.

Solution.

```
from random import *

def urne1():
    if randint(1,10) == 10:
        return 1
    return 0
```

Question 4. Écrire une fonction `urne2` sans paramètre qui simule un tirage dans l'urne U_2 et qui renvoie 1 si on tire une boule blanche et 0 sinon.

Solution.

```
def urne2():
    if randint(1,5) >= 3:
        return 1
    return 0
```

Question 5. Écrire une fonction `marche` qui prend en argument un entier naturel n non nul, qui simule n déplacements du pion et qui renvoie le numéro du sommet où se trouve le pion à l'issue des n déplacements.

Solution.

```
def marche(n):
    S = 1
    for i in range(n):
        if S == 1 or S == 4:
            T = S + urne1()
            if T <= 4:
                S = T
            else:
                S = 1
        else:
            S += urne2()
    return S
```

Question 6. Écrire une fonction `simulation` qui prend en arguments un entier naturel n non nul et un entier naturel N non nul, qui simule N marches aléatoires de n déplacements à l'aide de la fonction `marche` et qui renvoie, sous forme de liste, les fréquences de réalisation des évènements A_n , B_n et C_n et D_n .

Par exemple, si en appelant `simulation(100,1000)`, la fonction `marche(1000)` a renvoyé 40 fois 1, 6 fois 2, 5 fois 3 et 49 fois 4 alors la fonction `simulation` doit renvoyer la liste

[0.4, 0.06, 0.05, 0.49].

Solution.

```
def simulation(n,N):
    L = [0, 0, 0, 0]
    for i in range(N):
        L[marche(n)-1] += 1
    return [L[i]/N for i in range(4)]
```

Question 7. En prenant différentes valeurs de n et de N , conjecturer le comportement asymptotique des suites (a_n) , (b_n) , (c_n) et (d_n) .

Solution. Pour les appels suivants :

```
print(simulation(1000,100))
print(simulation(1000,1000))
print(simulation(100,10000))
print(simulation(500,10000))
print(simulation(1000,10000))
print(simulation(1000,100000))
```

on obtient

```
[0.404, 0.078, 0.081, 0.437]
[0.404, 0.078, 0.081, 0.437]
[0.4318, 0.0679, 0.0723, 0.428]
[0.4194, 0.074, 0.0724, 0.4342]
[0.4299, 0.068, 0.0694, 0.4327]
[0.428, 0.06946, 0.07239, 0.43015]
```

On peut conjecturer que (a_n) et (d_n) convergent vers une limite proche de 0,43, que (b_n) et (c_n) convergent vers une limite proche de 0,07.

III. — Étude mathématique à l'aide de matrices

Question 8. Soit $n \in \mathbb{N}$. Déterminer la probabilité de A_{n+1} sachant A_n , la probabilité de B_{n+1} sachant A_n , la probabilité de C_{n+1} sachant A_n et la probabilité de D_{n+1} sachant A_n .

Solution. D'après l'énoncé, on a

$$\begin{array}{llll} \mathbf{P}(A_{n+1} | A_n) = \frac{9}{10} & \mathbf{P}(B_{n+1} | A_n) = \frac{1}{10} & \mathbf{P}(C_{n+1} | A_n) = 0 & \mathbf{P}(D_{n+1} | A_n) = 0 \\ \mathbf{P}(A_{n+1} | B_n) = 0 & \mathbf{P}(B_{n+1} | B_n) = \frac{2}{5} & \mathbf{P}(C_{n+1} | B_n) = \frac{3}{5} & \mathbf{P}(D_{n+1} | B_n) = 0 \\ \mathbf{P}(A_{n+1} | C_n) = 0 & \mathbf{P}(B_{n+1} | C_n) = 0 & \mathbf{P}(C_{n+1} | C_n) = \frac{2}{5} & \mathbf{P}(D_{n+1} | C_n) = \frac{3}{5} \\ \mathbf{P}(A_{n+1} | D_n) = \frac{1}{10} & \mathbf{P}(B_{n+1} | D_n) = 0 & \mathbf{P}(C_{n+1} | D_n) = 0 & \mathbf{P}(D_{n+1} | D_n) = \frac{9}{10} \end{array}$$

Ces probabilités s'appellent les **probabilités de transition** de l'état A_n aux états A_{n+1} , B_{n+1} , C_{n+1} et D_{n+1} . On remarque que ces probabilités ne dépendent pas de n . On les appellera aussi les probabilités de transition d'un sommet à un autre.

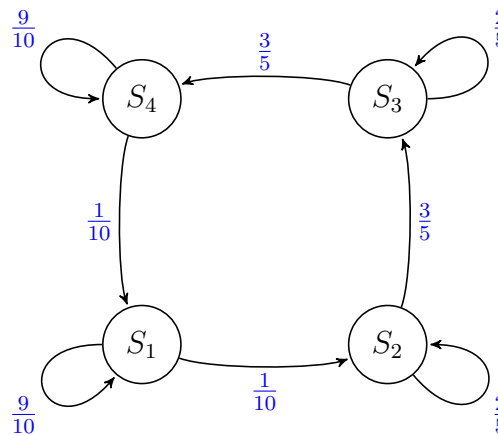
Question 9. Sur le graphe ci-contre, indiquer à côté des arcs les probabilités de transition entre les différents sommets. Ce graphe pondéré s'appelle un **graphe probabiliste**.

Solution. Voir ci-contre.

Question 10. On note M la matrice d'adjacence de ce graphe pondéré. Déterminer M . La matrice M s'appelle la **matrice de transition** associée à la marche aléatoire.

Solution. La matrice de transition est

$$M = \begin{pmatrix} \frac{9}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{5} & \frac{3}{5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{5} & \frac{3}{5} \\ \frac{1}{10} & 0 & 0 & \frac{9}{10} \end{pmatrix}$$



On définit, pour tout $n \in \mathbb{N}$, la matrice ligne $X_n = (a_n \ b_n \ c_n \ d_n)$. La matrice X_n s'appelle l'**état probabiliste** après n lancers.

Question 11. Déterminer la matrice X_0 et justifier que, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $X_{n+1} = X_n \times M$.

Solution. Par définition, $X_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$.

Soit $n \in \mathbb{N}$. Comme A_n , B_n , C_n et D_n forment un système complet d'évènements, d'après la formule des probabilités totales,

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= \mathbf{P}(A_{n+1}) = \mathbf{P}(A_n)\mathbf{P}_{A_n}(A_{n+1}) + \mathbf{P}(B_n)\mathbf{P}_{B_n}(A_{n+1}) + \mathbf{P}(C_n)\mathbf{P}_{C_n}(A_{n+1}) + \mathbf{P}(D_n)\mathbf{P}_{D_n}(A_{n+1}) \\ &= a_n \times \frac{9}{10} + b_n \times 0 + c_n \times 0 + d_n \times \frac{1}{10} = \frac{9}{10}a_n + \frac{1}{10}d_n \end{aligned}$$

De la même façon, $b_{n+1} = \frac{1}{10}a_n + \frac{2}{5}b_n$, $c_{n+1} = \frac{3}{5}b_n + \frac{2}{5}c_n$ et $d_{n+1} = \frac{3}{5}c_n + \frac{9}{10}d_n$. Dès lors,

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= \begin{pmatrix} a_{n+1} & b_{n+1} & c_{n+1} & d_{n+1} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{9}{10}a_n + \frac{1}{10}b_n & \frac{1}{10}a_n + \frac{2}{5}b_n & \frac{3}{5}b_n + \frac{2}{5}c_n & \frac{3}{5}c_n + \frac{9}{10}d_n \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} a_n & b_n & c_n & d_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{9}{10} & \frac{1}{10} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{5} & \frac{3}{5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{5} & \frac{3}{5} \\ \frac{1}{10} & 0 & 0 & \frac{9}{10} \end{pmatrix} \\ &= X_n M \end{aligned}$$

Question 12. Démontrer par récurrence que, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $X_n = X_0 M^n$.

Solution. Considérons, pour tout $n \in \mathbb{N}$, la proposition H_n : « $X_n = X_0 M^n$ ».

Initialisation. $X_0 M^0 = X_0 I_4 = X_0$ donc H_0 est vraie.

Hérédité. Soit $n \in \mathbb{N}$. Supposons que H_n est vraie. Alors, grâce à la question précédente,

$$X_{n+1} = X_n M = (X_0 M^n) M = X_0 (M^n M) = X_0 M^{n+1}$$

donc H_{n+1} est vraie.

Conclusion. Par le principe de récurrence, on conclut que, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $X_n = X_0 M^n$.

IV. — Détermination du comportement asymptotique à l'aide de Python

1) Conjecture à l'aide du calcul matriciel

On a vu dans le TP4 sur le pivot de Gauss qu'on peut représenter une matrice en Python par une liste de listes. Cette représentation, qui se prête bien à la programmation de l'algorithme du pivot, n'est en revanche pas adaptée lorsqu'on veut effectuer des calculs sur les matrices.

Dans la suite, on va utiliser le module `numpy` qui permet d'effectuer simplement des calculs sur les matrices. Pour cela, on commence par importer ce module en le renommant `np` à l'aide de l'instruction

```
import numpy as np
```

Une fois le module importé, on peut :

- définir une matrice à l'aide de la fonction `array`
- additionner et soustraire des matrices à l'aide des opérateurs `+` et `-`
- multiplier des matrices à l'aide de l'opérateur `@` (attention, l'opérateur `*` ne correspond pas au produit matriciel)
- calculer une puissance d'une matrice carrée à l'aide de la méthode `linalg.matrix_power()`
- calculer l'inverse d'une matrice carrée inversible à l'aide de la méthode `linalg.inv()`

Par exemple, pour définir les matrices $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 5 \\ 6 \end{pmatrix}$ et $C = \begin{pmatrix} 7 & 8 \end{pmatrix}$ puis calculer $D = AB$, $E = CA$ et $F = A^4$ et $G = A^{-1}$, on écrit

```
A=np.array([[1,2],[3,4]])
B=np.array([[5],[6]])
C=np.array([[7,8]])
D=A@B
E=C@A
F=np.linalg.matrix_power(A,4)
G=np.linalg.inv(A)
```

Question 13. Avec les notations de la partie III, définir les matrices X_0 (qu'on appellera simplement X) et M .

Solution.

```
X=np.array([[1,0,0,0]])
M=np.array([[9/10, 1/10, 0, 0],[0, 2/5, 3/5, 0],
           [0, 0, 2/5, 3/5], [1/10, 0, 0, 9/10]])
```

Question 14. Déterminer des valeurs approchées de a_{10} , b_{10} , c_{10} et d_{10} .

Solution. D'après la question 14, $X_{10} = X_0 M^{10}$. Or,

```
print(X@np.linalg.matrix_power(M,10))
```

renvoie

```
[[0.46489652 0.0825286 0.0906087 0.36196618]]
```

donc $a_{10} \approx 0,46489652$, $b_{10} \approx 0,0825286$, $c_{10} \approx 0,0906087$ et $d_{10} \approx 0,36196618$.

Question 15. Calculer a_n , b_n , c_n et d_n pour de « grandes valeurs » de n et conjecturer la limite de chacune de ces suites. Ces conjectures sont-elles en accord avec celles de la question 7 ?

Solution. En exécutant

```
print(X@np.linalg.matrix_power(M,20))
print(X@np.linalg.matrix_power(M,50))
print(X@np.linalg.matrix_power(M,100))
print(X@np.linalg.matrix_power(M,200))
```

on obtient

```
[[0.42973175 0.07180925 0.07217165 0.42628735]]
[[0.42857146 0.07142858 0.07142859 0.42857137]]
[[0.42857143 0.07142857 0.07142857 0.42857143]]
[[0.42857143 0.07142857 0.07142857 0.42857143]]
```

donc on voit que (a_n) et (d_n) semblent converger vers une même limite égale à environ 0,42857143 et (b_n) et (c_n) semblent converger vers une même limite égale à environ 0,07142857.

Ces conjectures sont globalement en accord avec celles de la question 7.

2) Démonstration des conjectures

Le but de cette partie est de démontrer les conjectures précédentes. Pour cela, on va diagonaliser la matrice M en utilisant les possibilités du module `numpy` qui permet de déterminer les valeurs propres d'une matrice, ainsi que des vecteurs propres associés, à l'aide de la méthode `linalg.eig()`. On ajoutera le code suivant pour obtenir les valeurs exactes des coefficients sous forme de fractions.

```
import fractions
np.set_printoptions(formatter={'all':lambda x:
    str(fractions.Fraction(x).limit_denominator()
    )})
```

Question 16. Déterminer, à l'aide de `numpy`, les valeurs propres de la matrice M et des vecteurs propres associés à chacune de ces valeurs propres. Pourquoi peut-on affirmer que M est diagonalisable ?

Solution. L'instruction

```
print(np.linalg.eig(M))
```

affiche

```
(array([1, 7/10, 3/5, 3/10]), array([[1/2, 2/5,
    -3/10, 6/37],
    [1/2, -4/5, 9/10, -36/37],
    [1/2, -2/5, 3/10, 6/37],
    [1/2, -1/5, 1/10, -1/37]]))
```

donc les valeurs propres de M sont $1, \frac{7}{10}, \frac{3}{5}$ et $\frac{3}{10}$ et des vecteurs propres respectivement associés

sont $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \\ 4 \\ -3 \\ 5 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -3 \\ 10 \\ 3 \\ 10 \\ 1 \\ 10 \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} 6 \\ 37 \\ -36 \\ 6 \\ 37 \\ -1 \end{pmatrix}$. On en déduit donc que $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ -4 \\ -2 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -3 \\ 9 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} 6 \\ -36 \\ 6 \\ -1 \end{pmatrix}$ sont également des vecteurs respectivement associés à $1, \frac{7}{10}, \frac{3}{5}$ et $\frac{3}{10}$.

Comme M est une matrice carrée d'ordre 4 qui admet 4 valeurs propres distinctes, M est diagonalisable.

Question 17. En déduire une matrice diagonale D et une matrice inversible P telles que $M = PDP^{-1}$.

Solution. En posant $D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{7}{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3}{10} \end{pmatrix}$ et $P = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 6 \\ 1 & -4 & 9 & -36 \\ 1 & -2 & 3 & 6 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$, on a $M = PDP^{-1}$.

Question 18. À l'aide de `numpy`, déterminer P^{-1} .

Solution. L'instruction

```
P=np.array([[1, 2, -3, 6],
    [1, -4, 9, -36],
    [1, -2, 3, 6],
    [1, -1, 1, -1]])
print(np.linalg.inv(P))
```

affiche

```
[[3/7 1/14 1/14 3/7]
 [3/4 1/4 1/2 -3/2]
 [1/3 1/6 1/2 -1]
 [1/84 -1/84 1/14 -1/14]]
```

donc $P^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{3}{7} & \frac{1}{14} & \frac{1}{14} & \frac{3}{7} \\ \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{1}{84} & -\frac{1}{84} & \frac{1}{14} & -\frac{1}{14} \end{pmatrix}$.

Question 19. Utiliser la question 14 pour calculer, à la main, pour tout $n \in \mathbb{N}$, la matrice X_n .

Solution. Soit $n \in \mathbb{N}$. Alors, par théorème, $M^n = PD^nP^{-1}$. Or, comme D est diagonale,

$D^n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\frac{7}{10})^n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\frac{3}{5})^n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\frac{3}{10})^n \end{pmatrix}$ donc

$$\begin{aligned} X_n &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 6 \\ 1 & -4 & 9 & -36 \\ 1 & -2 & 3 & 6 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\frac{7}{10})^n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\frac{3}{5})^n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\frac{3}{10})^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{3}{7} & \frac{1}{14} & \frac{1}{14} & \frac{3}{7} \\ \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{1}{84} & -\frac{1}{84} & \frac{1}{14} & -\frac{1}{14} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & -3 & 6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\frac{7}{10})^n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\frac{3}{5})^n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\frac{3}{10})^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{3}{7} & \frac{1}{14} & \frac{1}{14} & \frac{3}{7} \\ \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{1}{84} & -\frac{1}{84} & \frac{1}{14} & -\frac{1}{14} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{3}{7} & \frac{1}{14} & \frac{1}{14} & \frac{3}{7} \\ \frac{3}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & -1 \\ \frac{1}{84} & -\frac{1}{84} & \frac{1}{14} & -\frac{1}{14} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2(\frac{7}{10})^n & -3(\frac{3}{5})^n & 6(\frac{3}{10})^n \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{3}{7} + \frac{3}{2}(\frac{7}{10})^n - (\frac{3}{5})^n + \frac{1}{14}(\frac{3}{10})^n & \frac{1}{14} + \frac{1}{2}(\frac{7}{10})^n - \frac{1}{2}(\frac{3}{5})^n - \frac{1}{14}(\frac{3}{10})^n \\ \frac{1}{4} + (\frac{7}{10})^n - \frac{3}{2}(\frac{3}{5})^n + \frac{3}{7}(\frac{3}{10})^n & \frac{3}{7} - 3(\frac{7}{10})^n + 3(\frac{3}{5})^n - \frac{3}{7}(\frac{3}{10})^n \\ \frac{1}{3} + \frac{1}{6}(\frac{7}{10})^n - \frac{1}{2}(\frac{3}{5})^n + \frac{1}{2}(\frac{3}{10})^n & \frac{1}{3} - \frac{1}{6}(\frac{7}{10})^n + \frac{1}{2}(\frac{3}{5})^n - \frac{1}{2}(\frac{3}{10})^n \\ \frac{1}{84} - \frac{1}{84}(\frac{7}{10})^n + \frac{1}{14}(\frac{3}{5})^n - \frac{1}{14}(\frac{3}{10})^n & \frac{1}{84} - \frac{1}{84}(\frac{7}{10})^n + \frac{1}{14}(\frac{3}{5})^n - \frac{1}{14}(\frac{3}{10})^n \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Question 20. Démontrer les conjectures précédentes.

Solution. Ainsi, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\begin{cases} a_n &= \frac{3}{7} + \frac{3}{2} \left(\frac{7}{10}\right)^n - \left(\frac{3}{5}\right)^n + \frac{1}{14} \left(\frac{3}{10}\right)^n \\ b_n &= \frac{1}{14} + \frac{1}{2} \left(\frac{7}{10}\right)^n - \frac{1}{2} \left(\frac{3}{5}\right)^n - \frac{1}{14} \left(\frac{3}{10}\right)^n \\ c_n &= \frac{1}{14} + \left(\frac{7}{10}\right)^n - \frac{3}{2} \left(\frac{3}{5}\right)^n + \frac{3}{7} \left(\frac{3}{10}\right)^n \\ d_n &= \frac{3}{7} - 3 \left(\frac{7}{10}\right)^n + 3 \left(\frac{3}{5}\right)^n - \frac{3}{7} \left(\frac{3}{10}\right)^n \end{cases}$$

Comme $0 < \frac{7}{10} < 1$, $0 < \frac{3}{5} < 1$ et $0 < \frac{3}{10} < 1$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{7}{10}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{3}{5}\right)^n = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\frac{3}{10}\right)^n = 0$ donc, par somme, $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} d_n = \frac{3}{7}$ et $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} c_n = \frac{1}{14}$.

Enfin, étant donné que $\frac{1}{14} \approx 0,07142857143$ et $\frac{3}{7} \approx 0,4285714286$, cela valide les conjectures précédentes.