

BSB 2017

**Exercice 1 –**

1. Je calcule  $P^2$  puis  $P^3$  :

$$P^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et

$$P^3 = P^2 \times P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I.$$

J'obtiens finalement que  $P^3 = I$ , i.e.  $P \times P^2 = I$ .

J'en déduis alors que  $P$  est inversible et que  $P^{-1} = P^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ .

2. Je calcule  $P^{-1}A$  puis multiplie le résultat par  $P$  :

$$P^{-1}A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et

$$P^{-1}AP = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = L.$$

Ainsi j'ai bien montré que  $P^{-1}AP = L$ .

3. a) Je raisonne par récurrence sur  $n \in \mathbb{N}$ .

**  nonc   :** Je note  $\mathcal{P}_n$  la propriété :  $P^{-1}A^nP = L^n$ .

**Initialisation :** Pour  $n = 0$ ,

$$P^{-1}A^0P = P^{-1}IP = P^{-1}P = I \quad \text{et} \quad L^0 = I.$$

Ainsi  $\mathcal{P}_0$  est vraie.

**Hérédité :** Soit  $n \geq 0$ . Je suppose que  $\mathcal{P}_n$  vraie et je montre que  $\mathcal{P}_{n+1}$  l'est aussi.

Par hypothèse de récurrence,  $P^{-1}A^nP = L^n$ . Alors

$$L^{n+1} = L^n \times L = P^{-1}A^nP \times P^{-1}AP = P^{-1}A^nIAP = P^{-1}A^{n+1}P.$$

Donc  $P^{-1}A^{n+1}P = L^{n+1}$ . Finalement  $\mathcal{P}_{n+1}$  est vraie et la propriété est héréditaire.

**Conclusion :** Comme la propriété est héréditaire et vraie pour  $n = 0$ , alors par principe de récurrence, la propriété  $\mathcal{P}_n$  est vraie pour tout  $n \geq 0$ , i.e.

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad P^{-1}A^nP = L^n.$$

b) Je détermine  $J$  puis calcule ses puissances successives :

$$J = L - I = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Ainsi

$$J^2 = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

et

$$J^3 = J^2 \times J = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = 0_3.$$

c) D'après la question précédente, pour tout  $n \geq 3$ ,  $J^n = J^3 \times J^{n-3} = 0_3 \times J^{n-3} = 0_3$ .

Par ailleurs, les matrices  $I$  et  $J$  commutent donc je peux appliquer la formule du binôme de Newton à la matrice  $L = I + J$ . J'obtiens alors

$$L^n = (I + J)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} I^{n-k} J^k.$$

Comme tous les termes de cette somme sont nuls dès lors que  $k \geq 3$ , j'obtiens que

$$L^n = \binom{n}{0} I^{n-0} J^0 + \binom{n}{1} I^{n-1} J^1 + \binom{n}{2} I^{n-2} J^2 = I + nJ + \frac{n(n-1)}{2} J^2.$$

d) D'après les résultats obtenus aux questions précédentes, pour  $n \geq 2$ ,

$$L^n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 2n & 0 \\ 0 & 0 & 2n \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2n(n-1) \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2n & 2n(n-1) \\ 0 & 1 & 2n \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Pour  $n = 0$  et  $n = 1$ , cette formule me donne les matrices

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \times 0 & 2 \times 0 \times (-1) \\ 0 & 1 & 2 \times 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = I \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} 1 & 2 \times 1 & 2 \times 1 \times 0 \\ 0 & 1 & 2 \times 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = L.$$

Donc cette formule est bien valable pour tous les entiers naturels  $n \in \mathbb{N}$ .

e) Je sais désormais que  $P^{-1} A^n P = L^n$ , donc que  $PL^n P^{-1} = PP^{-1} A^n PP^{-1} = I A^n I = A^n$ .

Ainsi  $A^n = PL^n P^{-1}$  et il ne me reste plus qu'à calculer les produits :

$$PL^n = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 2n & 2n(n-1) \\ 0 & 1 & 2n \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2n & 2n(n-1) \\ 0 & 1 & 2n \end{pmatrix}$$

et

$$A^n = PL^n P^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2n & 2n(n-1) \\ 0 & 1 & 2n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2n(n-1) & 1 & 2n \\ 2n & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

4. a) La suite  $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite constante égale à  $u_1 = 1$ . Alors pour tout  $n \in \mathbb{N}^*$ ,

$$u_n = 1.$$

b) Pour  $n \geq 1$ , je calcule le produit  $AX_n$  :

$$AX_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ v_n \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ v_n + 2w_n \\ 2 + w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ v_{n+1} \\ w_{n+1} \end{pmatrix} = X_{n+1}.$$

Ainsi j'ai bien montré que  $X_{n+1} = AX_n$ .

c) Je raisonne par récurrence sur  $n \in \mathbb{N}^*$ .

**  nonc   :** Je note  $\mathcal{P}_n$  la propriété :  $X_n = A^{n-1}X_1$ .

**Initialisation :** Pour  $n = 1$ ,  $A^0X_1 = IX_1 = X_1$ . Ainsi  $\mathcal{P}_1$  est vraie.

**Hérédité :** Soit  $n \geq 1$ . Je suppose que  $\mathcal{P}_n$  est vraie et je montre que  $\mathcal{P}_{n+1}$  l'est aussi.

Par hypothèse de récurrence,  $X_n = A^{n-1}X_1$ . Alors

$$X_{n+1} = AX_n = A \times A^{n-1}X_1 = A^nX_1.$$

Donc  $X_{n+1} = A^{n+1-1}X_1$ . Finalement  $\mathcal{P}_{n+1}$  est vraie et la propriété est héréditaire.

**Conclusion :** Comme la propriété est héréditaire et vraie pour  $n = 1$ , alors par principe de récurrence, la propriété  $\mathcal{P}_n$  est vraie pour tout  $n \geq 1$ , *i.e.*

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \quad X_n = A^{n-1}X_1.$$

d) Par définition, je sais que  $X_n = \begin{pmatrix} 1 \\ v_n \\ w_n \end{pmatrix}$ . Or j'ai montré que  $X_n = A^{n-1}X_1$ .

Donc il me suffit de calculer  $X_n = A^{n-1}X_1$  pour déduire les formules de  $v_n$  et  $w_n$ .

$$A^{n-1}X_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 2(n-1)(n-2) & 1 & 2(n-1) \\ 2(n-1) & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2(n-1)(n-2) + 4(n-1) \\ 2(n-1) + 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2n(n-1) \\ 2n \end{pmatrix}$$

Ainsi j'en déduis bien que pour tout  $n \geq 1$ ,

$$v_n = 2n(n-1) \quad \text{et} \quad w_n = 2n.$$

5. a) La ligne 1 doit être complétée de la façon suivante : 1.  $A = [1, 0, 0; 0, 1, 2; 2, 0, 1]$ .

b) Il faut, pour chaque  $i$ , mémoriser le deuxième coefficient de la matrice colonne  $X$ .

D'où la réponse C :  $v(i) = X(2)$ .

c) De la même manière, pour mémoriser les termes de la suite  $(w_n)_{n \geq 1}$ , il faut cette fois considérer le troisième coefficient de la matrice colonne  $X$ . D'où  $w(i) = X(3)$ .

Finalement, voici le programme complété :

```
1. A=[1,0,0;0,1,2;2,0,1].
2. u=zeros(1,10)
3. v=zeros(1,10)
4. w=zeros(1,10)
5. u(1)=1,v(1)=0,w(1)=2
6. X=[1;0;2]
7. for i=2:10
8.     X=A*X
9.     u(i)=1
10.    v(i)=X(2)
11.    w(i)=X(3)
12. end
```

**Exercice 2 –**

1. a) Je calcule la limite de la fonction  $g$  en  $+\infty$  :

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow +\infty} x = +\infty \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} e^x = +\infty \end{array} \right\} \text{Par produit, } \lim_{x \rightarrow +\infty} x e^x = +\infty.$$

Donc par somme,

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x e^x - 1 = +\infty.$$

- b) La fonction  $g$  est donnée sous la forme d'une somme. Plus particulièrement,  $g$  est de la forme  $g(x) = u(x) \times v(x) - 1$  avec  $u(x) = x$  et  $v(x) = e^x$ . Comme  $u'(x) = 1$  et  $v'(x) = e^x$ , alors

$$g'(x) = 1 \times e^x + x \times e^x + 0 = (x+1)e^x.$$

Pour obtenir les variations de  $g$ , il me faut étudier le signe de  $g'(x)$  : pour tout  $x \geq 0$ ,  $x+1 > 0$  et  $e^x > 0$  donc  $g'(x) > 0$ . Ainsi la fonction  $g$  est strictement croissante sur  $\mathbb{R}_+$ . De plus,  $g(0) = -1$ , ce qui me permet de déduire le tableau des variations suivant pour la fonction  $g$  sur  $\mathbb{R}_+ = [0, +\infty[$  :

$x$	0	$\alpha$	$+\infty$
$g'(x)$		+	
$g$	-1	0	+

Remarque : J'anticipe la question suivante en plaçant le réel  $\alpha$ .

- c) Sur l'intervalle  $[0, +\infty[$ , la fonction  $g$  est dérivable donc continue. Elle y est aussi strictement croissante d'après le tableau de variation pr  c  dent. Aussi, comme  $g(0) = -1$  et que  $\lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = +\infty$ , alors d'après le théorème des valeurs int  rmediaires, il existe un unique antécédent de 0 dans l'intervalle  $[0, +\infty[$  (l'unicité provenant de la stricte monotonie). Donc l'équation  $g(x) = 0$  admet une unique solution  $\alpha$  dans  $[0, +\infty[$ . Plus précisément, puisque  $g(0) = -1 < 0$  et  $g(1) = e - 1 \approx 1.7 > 0$ , alors j'en déduis que  $0 < \alpha < 1$ , i.e.

$$\alpha \in [0, 1].$$

- d) Je sais désormais que la fonction  $g$  est strictement croissante sur  $[0, +\infty[$  et qu'elle s'annule en  $\alpha$ . Alors le signe de  $g(x)$  est directement donné par le tableau suivant :

$x$	0	$\alpha$	$+\infty$
$g'(x)$		0	+

2. a) Je calcule les limites de la fonction  $f$  en  $0^+$  et en  $+\infty$  :

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow 0^+} e^x = 1 \\ \lim_{x \rightarrow 0^+} -\ln(x) = +\infty \end{array} \right\} \text{Par somme, } \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} e^x - \ln(x) = +\infty.$$

Lorsque  $x$  tend vers  $+\infty$ , les formules habituelles me donnent une forme indéterminée. Je réécris donc la fonction  $f$  sous une forme plus adaptée aux croissances comparées :

$$\forall x > 0, \quad f(x) = x \left( \frac{e^x}{x} - \frac{\ln(x)}{x} \right).$$

Alors par croissances comparées,

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x}{x} = +\infty \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} -\frac{\ln(x)}{x} = 0 \end{array} \right\} \text{Par somme, } \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x}{x} - \frac{\ln(x)}{x} = +\infty.$$

Puis

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x}{x} - \frac{\ln(x)}{x} = +\infty \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} x = +\infty \end{array} \right\} \text{Par produit, } \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} x \left( \frac{e^x}{x} - \frac{\ln(x)}{x} \right) = +\infty.$$

b) La fonction  $f$  est donnée sous la forme d'une somme donc je dérive terme à terme :

$$f'(x) = e^x - \frac{1}{x} = \frac{xe^x}{x} - \frac{1}{x} = \frac{xe^x - 1}{x} = \frac{g(x)}{x}.$$

Ainsi j'ai bien montré que  $\forall x > 0, \quad f'(x) = \frac{g(x)}{x}$ .

Pour obtenir les variations de  $f$ , il me faut étudier le signe de  $f'(x)$  : sur  $]0, +\infty[$ ,  $x > 0$  et j'ai déjà étudié le signe de  $g(x)$ . J'en déduis donc le tableau de variation de  $f$  :

$x$	0	$\alpha$	$+\infty$
$f'(x)$		-      0      +	
$f$	$+\infty$	$f(\alpha)$	$+\infty$

c) Par définition,  $\alpha$  est l'unique solution de l'équation  $g(\alpha) = 0$ . Donc  $\alpha \times e^\alpha - 1 = 0$ . Par suite,  $\alpha \times e^\alpha = 1$  et puisque  $\alpha$  est non nul (je sais que  $g(0) = -1$ ), je peux en conclure que le réel  $\alpha$  vérifie

$$\frac{1}{\alpha} = e^\alpha.$$

Par conséquent, en utilisant cette identité dans les deux sens, j'obtiens que

$$f(\alpha) = e^\alpha - \ln(\alpha) = \frac{1}{\alpha} + \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) = \frac{1}{\alpha} + \ln(e^\alpha) = \frac{1}{\alpha} + \alpha.$$

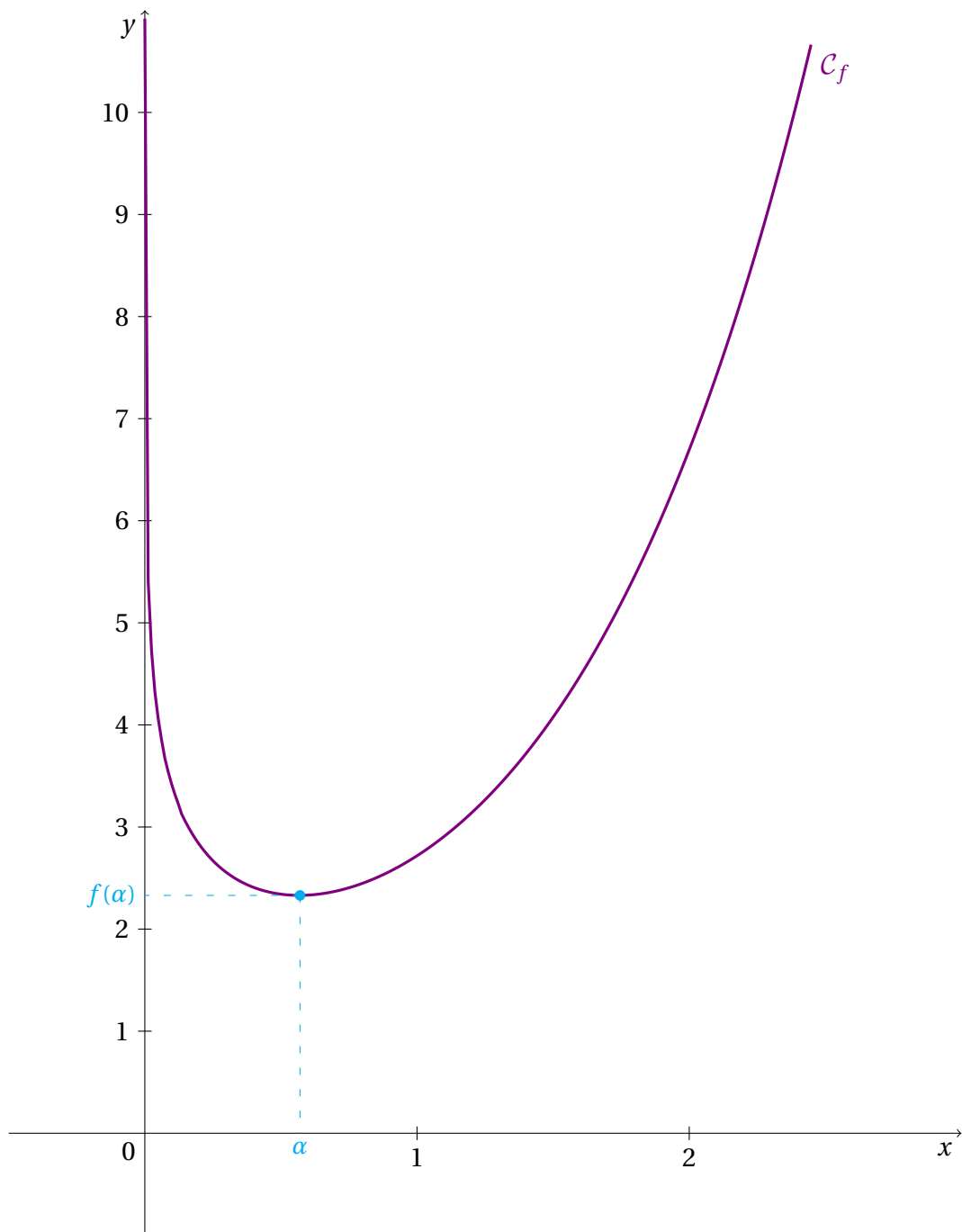
Ainsi j'ai bien montré que  $f(\alpha) = \alpha + \frac{1}{\alpha}$ .

3. a) D'après la question **2.b)**, pour tout  $x > 0$ ,  $f'(x) = e^x - \frac{1}{x}$ . Ainsi  $f'$  est donnée sous la forme d'une somme, donc je dérive terme à terme :

$$f''(x) = e^x - \left(-\frac{1}{x^2}\right) = e^x + \frac{1}{x^2}.$$

b) Pour tout  $x > 0$ ,  $e^x > 0$  et  $\frac{1}{x^2} > 0$  donc  $f''(x) > 0$  ce qui démontre que la fonction  $f$  est convexe sur l'intervalle  $]0, +\infty[$ .

4. Voici l'allure de la courbe représentative de la fonction  $f$ .



**Exercice 3 –**

1. Selon l'énoncé, à l'instant 0, l'enfant se trouve au niveau  $A$ . Alors à l'instant 1, il sera toujours au niveau  $A$  avec probabilité  $\frac{1}{3}$  et il passera au niveau  $B$  avec probabilité  $\frac{2}{3}$ . Donc

$$a_1 = \frac{1}{3}, \quad b_1 = \frac{2}{3} \quad \text{et} \quad c_1 = 0.$$

2.    l'instant  $n$ , l'enfant se trouve au niveau  $A$ ,  $B$  ou  $C$ . Donc  $\{A_n, B_n, C_n\}$  forme un système complet d'  v  nements. Alors par la formule des probabilités totales,

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= P(A_{n+1}) = P(A_n \cap A_{n+1}) + P(B_n \cap A_{n+1}) + P(C_n \cap A_{n+1}) \\ &= P(A_n) \times P_{A_n}(A_{n+1}) + P(B_n) \times P_{B_n}(A_{n+1}) + P(C_n) \times P_{C_n}(A_{n+1}) \\ &= a_n \times \frac{1}{3} + b_n \times 0 + c_n \times 0 = \frac{1}{3} a_n \end{aligned}$$

De la m  me mani  re,

$$\begin{aligned} b_{n+1} &= P(B_{n+1}) = P(A_n \cap B_{n+1}) + P(B_n \cap B_{n+1}) + P(C_n \cap B_{n+1}) \\ &= P(A_n) \times P_{A_n}(B_{n+1}) + P(B_n) \times P_{B_n}(B_{n+1}) + P(C_n) \times P_{C_n}(B_{n+1}) \\ &= a_n \times \frac{2}{3} + b_n \times \frac{1}{3} + c_n \times 0 = \frac{2}{3} a_n + \frac{1}{3} b_n \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} c_{n+1} &= P(C_{n+1}) = P(A_n \cap C_{n+1}) + P(B_n \cap C_{n+1}) + P(C_n \cap C_{n+1}) \\ &= P(A_n) \times P_{A_n}(C_{n+1}) + P(B_n) \times P_{B_n}(C_{n+1}) + P(C_n) \times P_{C_n}(C_{n+1}) \\ &= a_n \times 0 + b_n \times \frac{2}{3} + c_n \times 1 = \frac{2}{3} b_n + c_n \end{aligned}$$

Finalement j'ai bien montré que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$a_{n+1} = \frac{1}{3} a_n, \quad b_{n+1} = \frac{2}{3} a_n + \frac{1}{3} b_n \quad \text{et} \quad c_{n+1} = \frac{2}{3} b_n + c_n.$$

3. Je sais que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,  $a_{n+1} = \frac{1}{3} a_n$ . Donc la suite  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est une suite géométrique de raison  $q = \frac{1}{3}$ . Comme l'enfant débute au niveau  $A$ , le premier terme est  $a_0 = 1$ .

Je peux alors donner la forme explicite de la suite  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  : pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$a_n = a_0 \times q^n = 1 \times \left(\frac{1}{3}\right)^n = \frac{1}{3^n}.$$

J'ai bien montré que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad a_n = \frac{1}{3^n}.$$

4. a) Pour montrer que la suite  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est arithmétique, j'exprime  $v_{n+1}$  en fonction de  $v_n$  pour un  $n \in \mathbb{N}$  quelconque :

$$\begin{aligned} v_{n+1} &= 3^{n+1} b_{n+1} = 3^{n+1} \left( \frac{2}{3} a_n + \frac{1}{3} b_n \right) = 3^n (2 a_n + b_n) \\ &= 2 \times 3^n a_n + 3^n b_n = 2 \times 3^n \times \frac{1}{3^n} + v_n = 2 + v_n \end{aligned}$$

Finalement j'ai montré que pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,  $v_{n+1} = v_n + 2$ .

Donc la suite  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est bien une suite arithmétique de raison  $r = 2$ .

- b) Comme la suite  $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$  est arithmétique de raison  $r = 2$  et de premier terme  $v_0 = 3^0 b_0 = 1 \times 0 = 0$ , je peux alors donner sa forme explicite : pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,

$$v_n = v_0 + n \times r = 0 + n \times 2 = 2n.$$

Et puisque pour tout  $n \in \mathbb{N}$ ,  $v_n = 3^n b_n$ , alors j'en déduis que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad b_n = \frac{v_n}{3^n} = \frac{2n}{3^n}.$$

5. Pour tout entier naturel  $n$ , la somme des probabilités  $a_n + b_n + c_n$  correspond à la probabilité que l'enfant soit au niveau  $A$ , au niveau  $B$  ou au niveau  $C$ . Ainsi

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad a_n + b_n + c_n = 1.$$

Je peux alors en déduire une expression de  $c_n$  en fonction de  $n$  grâce aux expressions désormais connues pour  $a_n$  et  $b_n$  :

$$c_n = 1 - a_n - b_n = 1 - \frac{1}{3^n} - \frac{2n}{3^n} = 1 - \frac{2n+1}{3^n}.$$

Comme par croissances comparées  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{2n+1}{3^n} = 0$ , alors

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} c_n = 1.$$

Cela signifie que l'enfant terminera par arriver au niveau  $C$  avec une probabilité 1.

6. a) Les valeurs prises par la variable aléatoire  $X$  sont entières. En outre, il faut au moins deux étapes pour arriver du niveau  $A$  au niveau  $C$ . Ainsi  $X$  peut prendre n'importe quelle valeur entière supérieure ou égale à 2.
- b) Soit  $n \geq 2$ . L'  v  nement  $[X = n]$  correspond au fait que l'enfant atteint le sommet à l'instant  $n$ , donc qu'il se trouve au niveau  $C$  à l'instant  $n$  mais est encore au niveau  $B$  à l'instant  $n-1$ . Cela justifie bien l'égalité ensembliste  $[X = n] = B_{n-1} \cap C_n$ .
- c) D'après la question précédente et en me servant des formules déjà connues, pour  $n \geq 2$ , en appliquant la formules des probabilités composées, j'obtiens que

$$P(X = n) = P(B_{n-1} \cap C_n) = P(B_{n-1}) \times P_{B_{n-1}}(C_n) = \frac{2(n-1)}{3^{n-1}} \times \frac{2}{3} = \frac{4(n-1)}{3^n}.$$

7. a) La variable aléatoire  $X_1$  suit une loi géométrique de paramètre  $p = \frac{2}{3}$ .  
En effet,  $X_1$  est le rang du premier succès "monter au niveau  $B$ " lors de répétitions identiques et indépendantes d'expériences de Bernoulli (montera ou ne montera pas) de probabilité de succès  $p = \frac{2}{3}$ .  
Le support de  $X_1$  est donné par  $X_1(\Omega) = \mathbb{N}^*$  et pour tout  $k \in \mathbb{N}^*$ ,

$$P(X_1 = k) = p(1-p)^{k-1} = \frac{2}{3} \times \left(\frac{1}{3}\right)^{k-1} = \frac{2}{3^k}.$$

L'espérance de  $X_1$  est donnée par  $E(X_1) = \frac{1}{p} = \frac{1}{\frac{2}{3}} = \frac{3}{2}$ .

- b) Il s'agit exactement de la même situation sauf que l'enfant se trouve cette fois au niveau  $B$  et le succès devient "monter au niveau  $C$ ", avec la même probabilité  $p = \frac{2}{3}$ .  
Donc  $X_2$  suit aussi une loi géométrique de paramètre  $p = \frac{2}{3}$ .



- c) Le nombre d'étapes nécessaires pour rejoindre le niveau  $C$  depuis le niveau  $A$  est égal à la somme du nombre d'étapes pour passer de  $A$      $B$  et de celui pour passer de  $B$      $C$ . Ainsi

$$X = X_1 + X_2.$$

Comme  $X_1$  admet une espérance et que  $X_2$  suit la même loi que  $X_1$ , alors  $X_2$  admet une espérance et  $E(X_2) = E(X_1) = \frac{3}{2}$ .

Puis par linéarité, la variable aléatoire  $X$  admet aussi une espérance et

$$E(X) = E(X_1 + X_2) = E(X_1) + E(X_2) = \frac{3}{2} + \frac{3}{2} = 3.$$

**Exercice 4 –**

1. a) Soit  $A \geq 1$ . Je cherche à calculer  $I(A) = \int_1^A \frac{\alpha}{t^{\alpha+1}} dt$ . Je commence par chercher une primitive à  $f(t) = \frac{\alpha}{t^{\alpha+1}} = \alpha \times t^{-(\alpha+1)}$ . Une primitive de  $f$  est donnée par

$$F(t) = \alpha \times \frac{t^{-(\alpha+1)+1}}{-(\alpha+1)+1} = \alpha \times \frac{t^{-\alpha}}{-\alpha} = -t^{-\alpha} = -\frac{1}{t^{\alpha}}.$$

Finalement

$$I(A) = \int_1^A \frac{\alpha}{t^{\alpha+1}} dt = \left[ -\frac{1}{t^{\alpha}} \right]_1^A = -\frac{1}{A^{\alpha}} + \frac{1}{1^{\alpha}} = 1 - \frac{1}{A^{\alpha}}.$$

- b) • Pour  $t < 1$ ,  $f(t) = 0 \geq 0$  et pour  $t \geq 1$ ,  $f(t) = \frac{\alpha}{t^{\alpha+1}} \geq 0$ , car  $\alpha > 1$  et  $t \geq 1$ .  
Donc  $f$  est positive sur  $\mathbb{R}$ .
- La fonction  $f$  est continue sur  $] -\infty, 1[$  car constante et elle est continue sur  $[1, +\infty[$  comme fraction rationnelle. Donc  $f$  admet au plus un point de discontinuité.
- Il reste à montrer que l'intégrale  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt$  converge et vaut 1.

Or  $\int_{-\infty}^1 f(t) dt = \int_{-\infty}^1 0 dt$  converge et vaut 0 et d'après la question précédente,  $\int_1^{+\infty} f(t) dt$  est la limite de  $I(A)$  lorsque  $A$  tend vers  $+\infty$ . Comme  $\lim_{A \rightarrow +\infty} \frac{1}{A^{\alpha}} = 0$ , alors l'intégrale généralisée  $\int_1^{+\infty} f(t) dt$  converge et vaut  $\lim_{A \rightarrow +\infty} I(A) = 1 - 0 = 1$ .

Alors par la relation de Chasles, l'intégrale  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt$  converge et vaut

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt = \int_{-\infty}^1 f(t) dt + \int_1^{+\infty} f(t) dt = 0 + 1 = 1.$$

Selon les trois points précédents,  $f$  décrit bien une densité de probabilité.

2. a) Soit  $A \geq 1$ . Je cherche à calculer  $J(A) = \int_1^A \frac{\alpha}{t^{\alpha}} dt$ . Je commence par chercher une primitive à  $f(t) = \frac{\alpha}{t^{\alpha}} = \alpha \times t^{-\alpha}$ . Une primitive de  $f$  est donnée par

$$F(t) = \alpha \times \frac{t^{-\alpha+1}}{-\alpha+1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times t^{-(\alpha-1)} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times \frac{1}{t^{\alpha-1}}.$$

Finalement

$$J(A) = \int_1^A \frac{\alpha}{t^{\alpha}} dt = \left[ \frac{\alpha}{1-\alpha} \times \frac{1}{t^{\alpha-1}} \right]_1^A = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times \left( \frac{1}{A^{\alpha-1}} - \frac{1}{1^{\alpha-1}} \right) = \frac{\alpha}{1-\alpha} \left( \frac{1}{A^{\alpha-1}} - 1 \right).$$

- b) La variable aléatoire  $X$  admet une espérance si et seulement si l'intégrale généralisée  $\int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt$  converge. Or  $\int_{-\infty}^1 t f(t) dt = \int_{-\infty}^1 0 dt$  converge et vaut 0 et d'après la question précédente,  $\int_1^{+\infty} t f(t) dt$  est la limite de  $J(A)$  lorsque  $A$  tend vers  $+\infty$ .

Comme  $\lim_{A \rightarrow +\infty} \frac{1}{A^{\alpha-1}} = 0$ , alors l'intégrale généralisée  $\int_1^{+\infty} t f(t) dt$  converge et vaut

$$\lim_{A \rightarrow +\infty} J(A) = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times (0 - 1) = -\frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha-1}.$$

Alors par la relation de Chasles, l'intégrale  $\int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt$  converge,  
i.e. la variable aléatoire  $X$  admet une espérance et

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt = \int_{-\infty}^1 t f(t) dt + \int_1^{+\infty} t f(t) dt = 0 + \frac{\alpha}{\alpha-1} = \frac{\alpha}{\alpha-1}.$$

Ainsi j'ai bien montré que  $E(X) = \frac{\alpha}{\alpha-1}$ .

3. La fonction de répartition  $F$  de  $X$  est donnée par  $F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$ .

Je raisonne par disjonction de cas :

- Si  $x < 1$ , alors  $F(x) = \int_{-\infty}^x 0 dt = 0$ .
- Si  $x \geq 1$ , alors  $F(x) = \int_{-\infty}^1 0 dt + \int_1^x \frac{\alpha}{t^{\alpha+1}} dt = I(x) = 1 - \frac{1}{x^\alpha}$ .

Ainsi j'ai montré que pour tout  $x \in \mathbb{R}$ ,

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 1, \\ 1 - \frac{1}{x^\alpha} & \text{si } x \geq 1. \end{cases}$$

4. a) Je cherche  $P(X > 2)$ , pour un paramètre  $\alpha$  égal à 2 :

$$P(X > 2) = 1 - P(X \leq 2) = 1 - F(2) = 1 - \left(1 - \frac{1}{2^\alpha}\right) = \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}.$$

La probabilité que la bougie reste allumée plus de deux heures est  $\frac{1}{4}$ .

De même, la probabilité pour que la bougie reste allumée entre deux et trois heures est

$$P(2 < X < 3) = F(3) - F(2) = \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) - \left(1 - \frac{1}{2^2}\right) = 1 - \frac{1}{9} - 1 + \frac{1}{4} = \frac{1}{4} - \frac{1}{9} = \frac{5}{36}.$$

b) Il s'agit là d'une probabilité conditionnelle : je suppose que l'  v  nement  $[X > 2]$  est vérifié et j'étudie la probabilité que l'  v  nement  $[X > 3]$  se réalise.

D'après la formule des probabilités conditionnelles,

$$P_{[X>2]}(X > 3) = \frac{P([X > 2] \cap [X > 3])}{P(X > 2)} = \frac{P(X > 3)}{P(X > 2)} = \frac{1 - F(3)}{\frac{1}{4}} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{3^2}\right)\right) \times 4 = \frac{4}{9}.$$

5. a) Par définition de la fonction de répartition, pour tout réel  $x \in \mathbb{R}$ ,

$$G(x) = P(Y \leq x) = P(\ln(X) \leq x) = P(X \leq e^x) = F(e^x).$$

b) Grâce au résultat de la question 3.,

- Si  $x \geq 1$ , alors  $e^x \geq 1$  et  $G(x) = F(e^x) = 1 - \frac{1}{(e^x)^\alpha} = 1 - \frac{1}{e^{\alpha x}} = 1 - e^{-\alpha x}$ .
- Si  $x < 0$ , alors  $e^x < 1$  et  $G(x) = F(e^x) = 0$ .

Ainsi j'ai montré que pour tout  $x \in \mathbb{R}$ ,

$$G(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0, \\ 1 - e^{-\alpha x} & \text{si } x \geq 0. \end{cases}$$

- c) Je reconnais en  $G$  la fonction de répartition d'une loi exponentielle de paramètre  $\alpha$ .  
Donc  $Y$  suit une loi exponentielle de paramètre  $\alpha$ , i.e.  $Y \hookrightarrow \mathcal{E}(\alpha)$ . En particulier,

$$E(X) = \frac{1}{\alpha} \quad \text{et} \quad V(X) = \frac{1}{\alpha^2}.$$

6. a) Les  $X_i$  représentent les durées de vie des bougies, donc elles suivent la même loi que  $X$ . Alors les  $\ln(X_i)$  suivent la même loi que  $Y = \ln(X)$ . Donc pour tout  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ ,  
 $E(\ln(X_i)) = E(Y) = \frac{1}{\alpha}$  et par linéarité de l'espérance,

$$E(Z_n) = E\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(X_i)\right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(\ln(X_i)) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{n} \times n \times \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha}.$$

Comme  $E(Z_n) = \frac{1}{\alpha}$ , alors  $Z_n$  est bien un estimateur sans biais de  $\frac{1}{\alpha}$ .

- b) De la même manière qu'à la question précédente, je sais que pour tout  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ ,  
 $V(\ln(X_i)) = V(Y) = \frac{1}{\alpha^2}$ . Dès lors, comme les  $X_i$  sont indépendantes,

$$V(Z_n) = V\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(X_i)\right) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n V(\ln(X_i)) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha^2} = \frac{1}{n^2} \times n \times \frac{1}{\alpha^2} = \frac{1}{n\alpha^2}.$$

Et comme  $Z_n$  est un estimateur sans biais, alors le risque quadratique est donné directement par la variance. Donc

$$r(Z_n) = \frac{1}{n\alpha^2}.$$

7. L'instruction `mean(log(X))` donne la moyenne des logarithmes des valeurs contenues dans la matrice  $X$  : il s'agit exactement de  $Z_{100}$ . Comme  $Z_n$  est un estimateur sans biais de  $\frac{1}{\alpha}$ , une estimation de  $\alpha$  est donnée par

$$\frac{1}{Z_{100}} \approx \frac{1}{0.33} \approx 3.$$

La durée de vie moyenne d'une bougie est d'environ trois heures selon cette estimation.