



## ENTRAÎNEMENT HEC 1

SUJET FAIT MAISON.

Le but du problème est d'étudier le renouvellement d'un des composants d'un système complexe (une machine, un réseau de distribution d'énergie,...) formé d'un assemblage de différentes pièces susceptibles de tomber en panne. On s'intéresse donc à une de ces pièces susceptibles de se casser ou de tomber en panne et on se place dans la situation idéale où, dès que la pièce est défectueuse, elle est immédiatement remplacée. Dans une première partie, on étudie quelques propriétés fondamentales des variables aléatoires discrètes. Puis, dans une 2ème partie, on étudie la probabilité de devoir changer la pièce un certain jour donné. Enfin, dans une troisième partie, on cherche à estimer le temps de fonctionnement du système avec un certain nombre de pièces de rechange à disposition.

Dans tout le problème, on considère un espace probabilisé  $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ . Pour toute variable aléatoire réelle  $X$  définie sur  $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ , on note, sous réserve d'existence,  $\mathbb{E}(X)$  son espérance et  $\mathbb{V}(X)$  sa variance.

La 2ème partie peut être traitée en admettant si besoin les résultats de la première partie.

**Première Partie.** Dans cette première partie, on étudie les propriétés asymptotiques d'une variable aléatoire  $X$  à valeurs dans  $\mathbb{N}^*$ .

1. a. Montrer que pour tout entier naturel  $j$  non nul,

$$\mathbb{P}([X = j]) = \mathbb{P}([X > j - 1]) - \mathbb{P}([X > j]).$$

- b. Soit  $p$  un entier naturel non nul. Montrer que

$$\sum_{j=1}^p j \mathbb{P}([X = j]) = \sum_{j=0}^{p-1} \mathbb{P}([X > j]) - p \mathbb{P}([X > p]).$$

2. a. On suppose que  $X$  admet une espérance  $\mathbb{E}(X) = \mu$ .

(i) Justifier la convergence de la série de terme général  $k \mathbb{P}([X = k])$ .

(ii) Montrer que

$$\lim_{p \rightarrow +\infty} \sum_{k=p+1}^{+\infty} k \mathbb{P}([X = k]) = 0.$$

(iii) En déduire

$$\lim_{p \rightarrow +\infty} p \mathbb{P}([X > p]) = 0.$$

(iv) Montrer que la série de terme général  $\mathbb{P}([X > j])$  converge.

$$(v) \text{ Montrer que } \mu = \sum_{j=0}^{+\infty} \mathbb{P}([X > j]).$$

- b. On suppose que  $\sum_{j=0}^{+\infty} \mathbb{P}([X > j])$  converge.

(i) Déterminer le sens de variation de la suite  $(v_p)_{p \in \mathbb{N}^*}$  définie par

$$v_p = \sum_{j=0}^{p-1} \mathbb{P}([X > j]).$$

(ii) Comparer  $\sum_{j=1}^p j \mathbb{P}([X = j])$  et  $\sum_{j=0}^{+\infty} \mathbb{P}([X > j])$ .

(iii) En déduire que  $X$  admet une espérance.

c. Conclure des questions précédentes que  $X$  admet une espérance si et seulement si la série de terme général  $\mathbb{P}([X > j])$  converge.

3. On suppose dans cette question qu'il existe un réel  $\alpha$  strictement positif tel que, pour tout entier naturel  $j$ , on ait

$$\mathbb{P}([X > j]) = \frac{1}{(j+1)^\alpha} \quad (\star).$$

a. Légitimer que  $(\star)$  définit bien une loi de probabilité d'une variable aléatoire à valeurs dans  $\mathbb{N}^*$ .

b. Montrer que  $X$  admet une espérance si et seulement si  $\alpha$  est strictement supérieur à 1.

c. Montrer que pour tout entier naturel  $j$  non nul,

$$\mathbb{P}([X = j]) = \frac{1}{j^\alpha} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{j}\right)^\alpha}\right).$$

d. (i) Étudier les variations de  $f : x \mapsto 1 - (1+x)^{-\alpha} - \alpha x$  sur  $[0, 1]$ .

(ii) Montrer que pour tout entier naturel  $j$  non nul,

$$\mathbb{P}([X = j]) \leq \frac{\alpha}{j^{1+\alpha}}.$$

e. Montrer en utilisant le résultat de 3.c, que

$$\lim_{j \rightarrow +\infty} j^{\alpha+1} \mathbb{P}([X = j]) = \alpha.$$

f. Montrer que  $X$  admet une variance si et seulement si  $\alpha > 2$ .

**Deuxième partie : Étude de la probabilité de panne un jour donné.** Dans cette deuxième partie, on suppose donnée une suite de variable aléatoires  $(X_i)_{i \in \mathbb{N}^*}$  mutuellement indépendantes et de même loi à valeur dans  $\mathbb{N}^*$ .

Pour tout entier  $i$  non nul,  $X_i$  représente la durée de vie en jours du  $i$ -ème composant en fonctionnement.

Soit  $k$  un entier naturel non nul. On note  $T_k = X_1 + \dots + X_k$ . La variable  $T_k$  représente donc le jour où le  $k$ -ème composant tombe en panne. On fixe un entier naturel  $n$  non nul représentant un jour donné et on considère l'événement  $A_n$  : "le composant en place le jour  $n$  tombe en panne", c'est-à-dire "il existe un entier naturel non nul  $k$  tel que  $T_k = n$ " et on se propose d'étudier  $\mathbb{P}(A_n)$ .

4. Pour tout entier naturel  $j$ , on note  $p_j = \mathbb{P}([X_1 = j])$  et  $u_j = \mathbb{P}(A_j)$ . On suppose que pour tout entier naturel non nul  $j$ , on a  $p_j \neq 0$ . On pose de plus par convention  $u_0 = 1$ .

a. Montrer que  $u_1 = p_1$ .

b. (i) Montrer que  $A_2 = [X_1 = 2] \cup ([X_1 = 1] \cap [X_2 = 1])$ .

(ii) En déduire  $u_2$  en fonction de  $p_1$  et  $p_2$ .

c. Pour tout entier naturel  $i$ , on pose  $\tilde{X}_i = X_{i+1}$ .

(i) Montrer que les variables  $\tilde{X}_i$  sont mutuellement indépendantes, indépendantes de  $X_1$  et de même loi que  $X_1$ .

- (ii) Soit  $k$  un entier naturel non nul strictement inférieur à  $n$ . Montrer que

$$A_n \cap [X_1 = k] = [X_1 = k] \cap \left( \bigcup_{j \geq 1} [\tilde{X}_1 + \tilde{X}_2 + \cdots + \tilde{X}_j = n - k] \right).$$

- (iii) En déduire que pour tout entier naturel  $k$  non nul strictement inférieur à  $n$

$$\mathbb{P}_{[X_1=k]}(A_n) = \mathbb{P}(A_{n-k}).$$

- d. Montrer que

$$u_n = u_{n-1}p_1 + \cdots + u_0p_n.$$

- e. En Python, soit  $P = [p_1, p_2, \dots, p_n]$  le vecteur ligne tel que  $P[j] = p_{j+1}$  pour tout  $j$  dans  $\llbracket 0, n-1 \rrbracket$ .

Écrire un programme Python qui calcule  $u_n$  à partir de  $P$ .

5. Soit  $\lambda$  un réel appartenant à  $\llbracket 0, 1 \rrbracket$ .

**Dans cette question**, on suppose que  $X$  suit la loi géométrique de paramètre  $\lambda$ . Pour tout entier naturel non nul, on a donc  $\mathbb{P}([X_1 = j]) = \lambda(1 - \lambda)^{j-1}$ .

- a. Calculer  $\mathbb{P}([X_1 > k])$  pour tout entier naturel  $k$  non nul.

- b. Calculer  $\mathbb{P}_{[X_1 > k]}([X_1 = k+1])$ .

- c. Montrer que pour tout entier naturel  $n$  non nul,  $P(A_n) = \lambda$ .

6. On suppose dans cette question que  $p_1$  vérifie  $0 < p_1 < 1$  et que  $p_2 = 1 - p_1$ .

Pour simplifier, on posera  $p = p_1 = 1 - p_2$ .

- a. Que vaut  $p_i$  pour  $i$  supérieur à 3 ?

- b. Soit la matrice  $M = \begin{pmatrix} p & 1-p \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ .

Montrer que pour tout entier naturel  $n$  supérieur ou égal à 2,  $\begin{pmatrix} u_n \\ u_{n-1} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} u_{n-1} \\ u_{n-2} \end{pmatrix}$ .

- c. (i) Diagonaliser la matrice  $M$ .

- (ii) Montrer que

$$M^{n-1} = \frac{1}{2-p} \begin{pmatrix} 1 & 1-p \\ 1 & 1-p \end{pmatrix} + \frac{(p-1)^{n-1}}{2-p} \begin{pmatrix} 1-p & p-1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

- d. (i) Exprimer  $u_n$  en fonction de  $p$  et de  $n$ .

- (ii) Déterminer  $\lim_{n \rightarrow +\infty} u_n$ .

**Troisième partie : Étude de la durée de fonctionnement.** Comme dans la partie précédente, on suppose donnée une suite de variables aléatoires  $(X_i)_{i \in \mathbb{N}^*}$  indépendantes et de même loi, telle que, pour tout entier  $i$  non nul,  $X_i$  représente la durée de vie en jours du  $i$ -ème composant en fonctionnement.

Soit  $k$  un entier naturel non nul. On étudie dans cette partie la durée de fonctionnement prévisible du système si on a  $k$  composants à disposition (y compris celui installé au départ).

On notera toujours  $T_k = X_1 + \cdots + X_k$ .

On suppose dans cette partie qu'il existe un réel  $\alpha > 1$  tel que, pour tout entier naturel  $j$ , on ait :

$$\mathbb{P}([X_1 > j]) = \frac{1}{(j+1)^\alpha}.$$

En particulier dans toute cette partie,  $X_1$  admet une espérance et on notera  $\mu = \mathbb{E}(X_1)$ .

7. Que vaut  $\mathbb{E}(T_k)$  ?

8. On suppose **dans cette question** que  $\alpha$  est strictement supérieur à 2. La variable aléatoire admet donc une variance  $\sigma^2$ .

- a. Calculer  $\mathbb{V}(T_k)$ .

- b. Montrer que pour tout réel  $\varepsilon$  strictement positif,

$$\mathbb{P}(|T_k - k\mu| \geq k\varepsilon) \leq \frac{\sigma^2}{k\varepsilon^2}.$$

- c. Déduire que, pour tout réel strictement positif  $\varepsilon$ , on a :

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \mathbb{P}\left(\left[\frac{T_k}{k} \in ]\mu - \varepsilon, \mu + \varepsilon[\right]\right) = 1.$$

9. On suppose maintenant uniquement que  $\alpha > 1$  et donc que  $X_1$  n'a pas nécessairement de variance d'où l'impossibilité d'appliquer la méthode précédente. On va mettre en oeuvre ce qu'on appelle une méthode de troncation.

On fixe un entier naturel  $m$  strictement positif. Pour tout entier naturel non nul  $i$ , on définit deux variables aléatoires  $Y_i^{(m)}$  et  $Z_i^{(m)}$  de la façon suivante :

$$Y_i^{(m)} = \begin{cases} X_i & \text{si } X_i \leq m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{et} \quad Z_i^{(m)} = \begin{cases} X_i & \text{si } X_i > m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

- a. Montrer que  $X_i = Y_i^{(m)} + Z_i^{(m)}$ .

- b. (i) En utilisant 3.d.(ii), montrer que

$$\mathbb{E}(Z_1^{(m)}) \leq \sum_{i=m+1}^{+\infty} \frac{\alpha}{i^\alpha}.$$

- (ii) Montrer que

$$\mathbb{E}(Z_1^{(m)}) \leq \int_m^{+\infty} \frac{\alpha}{x^\alpha} dx.$$

- (iii) Calculer  $\int_m^{+\infty} \frac{\alpha}{x^\alpha} dx$ .

- (iv) En déduire que  $\lim_{m \rightarrow +\infty} \mathbb{E}(Z_1^{(m)}) = 0$ .

- (v) Montrer que  $\lim_{m \rightarrow +\infty} \mathbb{E}(Y_1^{(m)}) = \mu$ .

- c. (i) Montrer que  $(Y_1^{(m)})^2 \leq mX_1$ .

- (ii) En déduire que  $\mathbb{V}(Y_1^{(m)}) \leq m\mu$

- d. Soit  $\varepsilon$  un réel strictement positif. Montrer qu'il existe un entier naturel  $m_0$  non nul tel que pour tout entier naturel  $m$  supérieur ou égal à  $m_0$ ,

$$\frac{\alpha}{\alpha - 1} m^{1-\alpha} \leq .$$

**Jusqu'à la fin du problème,  $m$  désigne un entier supérieur ou égal à  $m_0$ .**

- e. On note, pour tout entier naturel  $k$  non nul,

$$U_k^{(m)} = \sum_{i=1}^k Y_i^{(m)} \quad \text{et} \quad V_k^{(m)} = \sum_{i=1}^k Z_i^{(m)}.$$

Vérifier que

$$T_k = U_k^{(m)} + V_k^{(m)}.$$

- f. (i) Montrer que  $\mathbb{E}(V_k^{(m)}) \leq k \frac{\alpha}{\alpha - 1} m^{1-\alpha}$ .

- (ii) En déduire que  $\mathbb{P}([V_k^{(m)} \geq k\varepsilon]) \leq \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{m^{1-\alpha}}{\varepsilon}$ .

g. (i) Montrer que  $\mathbb{E}(U_k^{(m)}) \geq k\mu - k\frac{\alpha}{\alpha-1}m^{1-\alpha}$ .

(ii) En déduire que  $|\mathbb{E}(U_k^{(m)}) - k\mu| \leq k\varepsilon$ .

(iii) Montrer que

$$\mathbb{P}(\left|U_k^{(m)} - k\mu\right| \geq 2k\varepsilon) \leq \mathbb{P}(\left|U_k^{(m)} - \mathbb{E}(U_k^{(m)})\right| \geq k\varepsilon).$$

(iv) Montrer que  $\mathbb{V}(U_k^{(m)}) \leq km\mu$ .

(v) En déduire que

$$\mathbb{P}(\left|U_k^{(m)} - k\mu\right|) \leq \frac{m\mu}{k\varepsilon^2}.$$

(i) Montrer que pour tout couple d'événements  $A$  et  $B$  dans  $\mathcal{A}$ , on a

$$\mathbb{P}(A \cap B) \geq \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B) - 1.$$

(ii) En appliquant l'inégalité précédente aux événements

$$A = [V_k^{(m)} < k\varepsilon] \quad \text{et} \quad B = [U_k^{(m)} \in ]k(\mu - 2\varepsilon, k(\mu + 2\varepsilon)[],$$

montrer que

$$\mathbb{P}([T_k \in ]k(\mu - 3\varepsilon, k(\mu + 3\varepsilon)[]) \geq \mathbb{P}(\left[V_k^{(m)} < k\varepsilon\right]) + \mathbb{P}(\left[U_k^{(m)} \in ]k(\mu - 2\varepsilon, k(\mu + 2\varepsilon)[\right]) - 1.$$

(iii) Déduire des questions précédentes que pour tout réel  $\varepsilon > 0$  et pour tout entier  $m \geq m_0$ , on a, pour tout entier  $k$  non nul,

$$\mathbb{P}([T_k \in ]k(\mu - 3\varepsilon, k(\mu + 3\varepsilon)[]) \geq 1 - \frac{\alpha m^{1-\alpha}}{\varepsilon(\alpha-1)} - \frac{m\mu}{k\varepsilon^2}.$$

(iv) Pour  $k$  assez grand, appliquer l'inégalité précédente à un entier  $m_k \in [\sqrt{k}, 2\sqrt{k}]$  et conclure que

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \mathbb{P}\left(\left[\frac{T_k}{k} \in ]\mu - 3\varepsilon, \mu + 3\varepsilon[\right]\right) = 1.$$