

DEVOIR MAISON N° 15 BIS

À RENDRE LE 23 FÉVRIER 2026

Sujet ENS

Le sujet est composé de trois parties. Les deux premières parties sont largement indépendantes. Elles traitent de l'étude d'un problème de minimisation, dans un cadre discret dans la première partie, et dans un cadre continu dans la deuxième partie. On pourra admettre les résultats des deux premières parties pour aborder la troisième.

Partie 1

Soit n un entier naturel supérieur ou égal à 2 fixé, et soit $\llbracket 1; n \rrbracket$ l'ensemble des entiers naturels compris entre 1 et n .

On appelle permutation de $\llbracket 1; n \rrbracket$ toute bijection de $\llbracket 1; n \rrbracket$ sur $\llbracket 1; n \rrbracket$, et on définit la matrice d'une permutation p de $\llbracket 1; n \rrbracket$ comme la matrice M à n lignes et n colonnes de coefficients M_{ij} tels que $M_{ij} = 1$ si $j = p(i)$ et $M_{ij} = 0$ sinon, où $i \in \llbracket 1; n \rrbracket$ est l'indice de ligne et $j \in \llbracket 1; n \rrbracket$ est l'indice de colonne.

On appelle matrice bistochastique de taille (n, n) une matrice à n lignes et n colonnes de coefficients M_{ij} positifs tels que $\sum_{j=1}^n M_{ij} = 1$ pour tout i et $\sum_{i=1}^n M_{ij} = 1$ pour tout j .

Soit alors les $2n$ nombres réels $x_1 \leq \dots \leq x_n$ et $y_1 \leq \dots \leq y_n$. Dans cette partie on se propose de minimiser la quantité

$$C(M) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_j - x_i)^2 M_{ij}$$

parmi les matrices bistochastiques M de taille (n, n) et de coefficients M_{ij} .

1.1. (Question préliminaire) Montrer qu'une matrice de permutation est une matrice bistochastique.

1.2. (Question préliminaire) Soit les $2n$ nombres réels $b_1, \dots, b_n, c_1, \dots, c_n$. Montrer que

$$\sum_{i=1}^n b_i c_i = b_1 \sum_{j=1}^n c_j + \sum_{i=2}^n (b_i - b_{i-1}) \sum_{j=i}^n c_j.$$

1.3. (Exemple) Dans cette question uniquement n est égal à 3.

1.3.1. Déterminer toutes les permutations de $\llbracket 1; 3 \rrbracket$ et écrire leurs matrices.

1.3.2. Soit les nombres $x_1 = 0, x_2 = 1, x_3 = 2, y_1 = 0, y_2 = 1$ et $y_3 = 4$. Calculer la quantité

$$\sum_{i=1}^3 (y_{p(i)} - x_i)^2$$

pour chaque permutation p de $\llbracket 1; 3 \rrbracket$ et déterminer la ou les permutations rendant minimale cette quantité.

1.4. (Exemple) Dans cette question uniquement n est égal à 2, et on considère les nombres $x_1 = 0, x_2 = 1, y_1 = 1$ et $y_2 = 4$.

1.4.1. Étant donné un réel $r \in [0; 1]$, calculer $C(M)$ pour la matrice bistochastique

$$M = \begin{pmatrix} 1-r & r \\ r & 1-r \end{pmatrix}.$$

1.4.2. Montrer que, parmi les matrices bistochastiques M de taille $(2, 2)$, la matrice identité est l'unique matrice rendant minimale la quantité $C(M)$.

1.5. (Matrices de permutation)

1.5.1. Soit p une permutation de $\llbracket 1; n \rrbracket$. Montre que

$$\sum_{j=i}^n y_{p(j)} \leq \sum_{j=i}^n y_j$$

pour tout $i = 1, \dots, n$ avec de plus égalité pour $i = 1$. En déduire que

$$\sum_{i=1}^n (y_{p(i)} - x_i)^2 \geq \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2.$$

On pourra développer les carrés et utiliser la question 1.2.

1.5.2. Montrer que, parmi les matrices M de permutation, la matrice identité rend minimale la quantité $C(M)$.

1.6. (Matrices bistochastiques symétriques)

1.6.1. Montrer que

$$x_i y_i + x_j y_j \geq x_i y_j + x_j y_i$$

pour tous $i, j = 1, \dots, n$.

1.6.2. En déduire que

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_j - x_i)^2 M_{ij} \geq \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2$$

pour toute matrice bistochastique symétrique M de taille (n, n) .

1.6.3. Montrer que, parmi les matrices bistochastiques symétriques M de taille (n, n) , la matrice identité rend minimale $C(M)$.

1.7. (Cas général)

1.7.1. Soit M une matrice bistochastique de taille (n, n) . Montrer que

$$\sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^n M_{jk} y_k \leq \sum_{j=i}^n y_j$$

pour tout $i = 1, \dots, n$.

Indication : Pour $i \geq 2$, on pourra montrer que

$$\sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^{i-1} M_{jk} y_k \leq \sum_{j=i}^n \sum_{k=1}^{i-1} M_{kj} y_j.$$

En déduire que

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (y_j - x_i)^2 M_{ij} \geq \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2.$$

1.7.2. Montrer que, parmi les matrices bistochastiques M de taille (n, n) , la matrice identité rend minimale la quantité $C(M)$.

1.7.3. Si de plus $x_1 < \dots < x_n$ et $y_1 < \dots < y_n$, montrer que, parmi les matrices bistochastiques M de taille (n, n) , la matrice identité est l'unique matrice rendant minimale la quantité $C(M)$.

Partie 2

Soit $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ un espace probabilisé, et notons $E[W]$ l'espérance d'une variable aléatoire W sur Ω .

Soit U une variable aléatoire suivant la loi uniforme sur $[0; 1]$.

Soit de plus f une fonction nulle sur $] -\infty; 1[\cup]2; +\infty[$ et continue strictement positive sur $[1; 2]$ et telle que $\int_1^2 f(x) dx = 1$.

Soit enfin $\mathcal{S}$ l'ensemble des fonctions S continues de $[0; 1]$ dans $[1; 2]$ et telles que la variable aléatoire $S(U)$ admette f comme densité de probabilité.

Dans cette partie on se propose de minimiser la quantité $E[(S(U) - U)^2]$ parmi les fonctions S de $\mathcal{S}$.

2.1. (Exemple) Dans cette question uniquement f est constante égale à 1 sur $[1; 2]$.

2.1.1. Montrer que $(E[g(U)])^2 \leq E[g(U)^2]$ pour toute fonction g continue sur $[0; 1]$.

On pourra considérer la quantité $E[(g(U) - E[g(U)])^2]$.

Montrer qu'il y a égalité si, et seulement si, la fonction g est de plus constante.

2.1.2. Montrer que la fonction S_0 sur $[0; 1]$ définie par $S_0(x) = x + 1$ est l'unique fonction rendant minimale la quantité $E[(S(U) - U)^2]$ parmi les fonctions S de $\mathcal{S}$.

Soit V une variable aléatoire admettant la densité de probabilité f .

2.2. Montrer que la restriction à $[1; 2]$ de la fonction de répartition F_V de la variable V réalise une bijection de $[1; 2]$ sur $[0; 1]$ et que sa fonction réciproque F_V^{-1} sur $[0; 1]$ appartient à $\mathcal{S}$.

Montrer de plus que F_V^{-1} est l'unique fonction de $\mathcal{S}$ qui soit strictement croissante.

2.3. Soit S une fonction de $\mathcal{S}$ fixée et soit s la fonction définie sur $[0; 1]$ par $s(u) = \int_u^1 S(x) dx$.

2.3.1. Montrer que

$$\int_0^1 xS(x) dx = \int_0^1 s(u) du.$$

2.3.2. Si E est un sous-ensemble de $\mathbb{R}^2$ on note $\mathbb{1}_E$ la fonction de $\mathbb{R}^2$ dans $\mathbb{R}$ telle que $\mathbb{1}_E(x, y) = 1$ si $(x, y) \in E$ et $\mathbb{1}_E(x, y) = 0$ si $(x, y) \notin E$.

Pour $u \in [0; 1]$ montre que

$$s(u) = \int_0^2 \left[\int_0^1 \mathbb{1}_A(x, y) dx \right] dy$$

où A est l'ensemble $\{(x, y) \in [0; 1] \times [0; 2] ; x \geq u \text{ et } S(x) \geq y\}$.

On pourra admettre et utiliser le théorème de Fubini sous la forme suivante : si g et h sont deux fonctions continues de $[0; 1] \times [0; 2]$ dans $\mathbb{R}$ et E est l'ensemble $\{(x, y) \in [0; 1] \times [0; 2] ; g(x, y) \geq 0 \text{ et } h(x, y) \geq 0\}$ alors

$$\int_0^1 \left[\int_0^2 \mathbb{1}_E(x, y) dy \right] dx = \int_0^2 \left[\int_0^1 \mathbb{1}_E(x, y) dx \right] dy.$$

2.3.3. Pour $u \in [0; 1]$ et $y \in [0; 2]$ montrer que

$$P[U \geq u, S(U) \geq y] \leq P[U \geq u, F_V^{-1}(U) \geq y].$$

2.4. Montrer que, parmi les fonctions S de $\mathcal{S}$, la fonction F_V^{-1} rend minimale la quantité $E[(S(U) - U)^2]$.

Comparer ce résultat au résultat obtenu pour l'exemple de la question 2.1.

Partie 3

Comparer les résultats énoncés et les méthodes proposées dans les parties 1 et 2.