

MATRICES ET VECTEURS ALÉATOIRES (CENTRALE PSI 2022)

Durée : 4 heures

Notations et rappels

Pour n et p deux entiers naturels non nuls, on désigne par $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$ l'ensemble des matrices à n lignes et p colonnes à coefficients dans \mathbb{R} et $\mathcal{V}_{n,p}$ l'ensemble des matrices à n lignes et p colonnes à coefficients dans $\{-1, 1\}$.

Si M est une matrice de $\mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$, on note M^T sa transposée.

Une matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est antisymétrique si $M^T = -M$.

On désigne par $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ l'ensemble des matrices carrées d'ordre n à coefficients réels, I_n la matrice identité d'ordre n et 0_n la matrice nulle d'ordre n .

Si $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, on note $\text{tr}(M)$ sa trace.

On note $\mathcal{GL}_n(\mathbb{R})$ le sous-ensemble de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ formé des matrices inversibles.

On définit la suite des puissances de M par

$$\begin{cases} M^0 = I_n \\ \forall k \in \mathbb{N}, \quad M^{k+1} = MM^k \end{cases}$$

Une matrice $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est dite nilpotente s'il existe un entier naturel $k \geq 1$ tel que $M^k = 0_n$.

On note \mathcal{N}_n le sous-ensemble de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ formé des matrices nilpotentes.

Si U est une partie d'un espace vectoriel E , on note $\text{Vect}(U)$ le sous-espace vectoriel de E engendré par U .

Toutes les variables aléatoires considérées dans les parties II et III sont définies sur un même espace probabilisé discret $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$.

Étant donné une variable aléatoire réelle Z , on note, sous réserve d'existence, $\mathbb{E}(Z)$ son espérance et $\mathbb{V}(Z)$ sa variance.

Dans la partie III, l'espace vectoriel $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ est muni de sa structure euclidienne canonique. Son produit scalaire est noté $\langle \cdot | \cdot \rangle$.

On note ch la fonction cosinus hyperbolique.

Objectifs du problème et articulations entre les différentes parties

Ce problème porte sur l'étude de certains sous-ensembles de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, où n est un entier naturel non nul.

Dans la partie I, on étudie quelques propriétés de l'ensemble \mathcal{N}_n . Dans la partie II, on s'intéresse à des variables aléatoires réelles et matricielles à coefficients dans $\{-1, 1\}$. Dans la partie III, on établit, à l'aide d'outils d'analyse et de probabilités, l'existence d'une famille de vecteurs unitaires de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ vérifiant certaines propriétés de nature euclidienne.

Les trois parties du problème sont largement indépendantes les unes des autres. Cependant, le résultat de la question 9 est utilisé dans la sous-partie II.C, ceux des questions 14 et 16 sont utilisés dans la sous-partie II.D et celui de la question 19 dans la partie III.

I Partie I

I.A – Quelques résultats préliminaires

Q 1. Démontrer que l'application

$$\begin{cases} \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) & \rightarrow \mathbb{R} \\ M & \mapsto \text{tr}(M) \end{cases}$$

est une forme linéaire et que

$$\forall (A, B) \in (\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))^2, \quad \text{tr}(AB) = \text{tr}(BA).$$

Q 2. Montrer que l'application

$$\begin{cases} (\mathcal{M}_n(\mathbb{R}))^2 & \rightarrow \mathbb{R} \\ (A, B) & \mapsto \text{tr}(A^T B) \end{cases}$$

est un produit scalaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

Q 3. En déduire que si A est une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ vérifiant $A^T A = 0_n$ alors $A = 0_n$.

I.B – Quelques propriétés de \mathcal{N}_n

- Q 4. Montrer que, si $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est nilpotente, alors 0 est une valeur propre de A et que c'est la seule valeur propre complexe de A.
- Q 5. Déterminer la trace et le déterminant d'une matrice nilpotente de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
- Q 6. Montrer que, si $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est nilpotente, alors M^2 est nilpotente.
- Q 7. On suppose que M et N sont deux matrices nilpotentes qui commutent. Montrer que MN et M + N sont nilpotentes.
- Q 8. On suppose que M, N et M + N sont nilpotentes. En calculant $(M + N)^2 - M^2 - N^2$, montrer que $\text{tr}(MN) = 0$.
- Q 9. Démontrer qu'une matrice M de $\mathcal{M}_2(\mathbb{R})$ est nilpotente si et seulement si $\det(M) = \text{tr}(M) = 0$.
- Q 10. Montrer que la seule matrice réelle nilpotente et symétrique est la matrice nulle.
- Q 11. Soit A une matrice antisymétrique réelle et nilpotente. Montrer que $A^T A = 0_n$, puis que $A = 0_n$.
- Q 12. On suppose $n \geq 3$. Donner un exemple de matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ de trace nulle et de déterminant nul, mais non nilpotente.

II Matrices aléatoires à coefficients dans $\{-1, 1\}$

II.A – Quelques résultats algébriques

Soit (E_1, \dots, E_n) la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. On note $V = \sum_{k=1}^n E_k$.

Q 13. Pour $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, exprimer E_i en fonction de V et de $V - 2E_i$. En déduire que $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) = \text{Vect}(\mathcal{V}_{n,1})$. (L'ensemble $\mathcal{V}_{n,p}$ a été défini dans les notations présentées au début du problème.)

Soient C_1, \dots, C_n , n matrices colonnes de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, avec C_1 non nulle.

Q 14. Démontrer que, si la famille (C_1, \dots, C_n) est liée, alors il existe un unique $j \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$ tel que

$$\begin{cases} (C_1, \dots, C_j) \text{ est libre} \\ C_{j+1} \in \text{Vect}(C_1, \dots, C_j) \end{cases}$$

Soit $d \in \llbracket 1, n \rrbracket$, (U_1, \dots, U_d) une famille libre de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ et $H = \text{Vect}(U_1, \dots, U_d)$.

Q 15. Démontrer qu'il existe des entiers i_1, \dots, i_d vérifiant $1 \leq i_1 < \dots < i_d \leq n$ tels que l'application

$$\begin{cases} H & \rightarrow & \mathcal{M}_{d,1}(\mathbb{R}) \\ \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} & \mapsto & \begin{pmatrix} x_{i_1} \\ \vdots \\ x_{i_d} \end{pmatrix} \end{cases}$$

soit bijective. On pourra s'intéresser au rang de la matrice de $\mathcal{M}_{n,d}(\mathbb{R})$ dont les colonnes sont U_1, \dots, U_d .

Q 16. Soit \mathcal{W} un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ de dimension d . Démontrer que

$$\text{card}(\mathcal{W} \cap \mathcal{V}_{n,1}) \leq 2^d.$$

II.B – Une loi de probabilité

On dit qu'une variable réelle X suit la loi \mathcal{R} si

$$X(\Omega) = \{-1, 1\}, \quad \mathbb{P}(X = -1) = \mathbb{P}(X = 1) = \frac{1}{2}$$

Q 17. Si X suit la loi \mathcal{R} , préciser la loi de la variable aléatoire $\frac{1}{2}(X + 1)$.

Q 18. Calculer l'espérance et la variance d'une variable suivant la loi \mathcal{R} .

Q 19. Soient X et Y deux variables aléatoires réelles indépendantes, suivant chacune la loi \mathcal{R} . Déterminer la loi de leur produit XY.

II. C – Un procédé de génération de matrices aléatoires à coefficients dans $\{-1, 1\}$

Jusqu'à la fin de la partie II, n est un entier naturel non nul et $m_{i,j}$ ($1 \leq i, j \leq n$) sont n^2 variables aléatoires réelles mutuellement indépendantes suivant toutes la loi \mathcal{R} . La variable aléatoire matricielle $M_n = (m_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$ est alors à valeurs dans $\mathcal{V}_{n,n}$.

On pose $\tau_n = \text{tr}(M_n)$ et $\delta_n = \det(M_n)$.

Q 20. Calculer l'espérance et la variance de la variable τ_n .

Q 21. Calculer l'espérance de la variable δ_n .

Q 22. Démontrer que la variance de la variable δ_n est égale à $n!$. On pourra développer δ_n selon une rangée et raisonner par récurrence.

Dans le cas particulier $n = 2$, m_{11} , m_{12} , m_{21} et m_{22} sont quatre variables aléatoires réelles, mutuellement indépendantes, suivant toutes la loi \mathcal{R} et $M_2 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}$.

Q 23. Calculer la probabilité de l'événement $M_2 \in \mathcal{N}_2$.

Q 24. Calculer la probabilité de l'événement $M_2 \in \mathcal{GL}_2(\mathbb{R})$.

II. D – Une généralisation

L'objectif de cette sous-partie est de prolonger le dernier résultat de la partie précédente, en trouvant, dans le cas général où n est un entier naturel supérieur ou égal à 2, un minorant de la probabilité de l'événement $M_n \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{R})$.

II. D.1) On considère $2n$ variables aléatoires réelles c_1, c_2, \dots, c_n et c'_1, c'_2, \dots, c'_n mutuellement indépendantes, suivant toutes la loi \mathcal{R} .

Q 25. Soit $(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) \in \{-1, 1\}^n$. Calculer $\mathbb{P}((c_1 = \varepsilon_1) \cap \dots \cap (c_n = \varepsilon_n))$.

On considère les matrices colonnes aléatoires $C = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}$ et $C' = \begin{pmatrix} c'_1 \\ \vdots \\ c'_n \end{pmatrix}$.

Q 26. Démontrer que, pour tout $\omega \in \Omega$, la famille $(C(\omega), C'(\omega))$ est liée si et seulement s'il existe $\varepsilon \in \{-1, 1\}$ tel que $C'(\omega) = \varepsilon C(\omega)$.

Q 27. En déduire $\mathbb{P}((C, C') \text{ est liée})$.

II. D.2) On rappelle que $m_{i,j}$ ($1 \leq i, j \leq n$) sont n^2 variables aléatoires réelles mutuellement indépendantes suivant toutes la loi \mathcal{R} , que $M_n = (m_{i,j})_{1 \leq i, j \leq n}$ est la matrice aléatoire à valeurs dans $\mathcal{V}_{n,n}$ dont, pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$, le coefficient situé à la ligne i et la colonne j est égal à $m_{i,j}$.

On note

$$C_1 = \begin{pmatrix} m_{1,1} \\ \vdots \\ m_{n,1} \end{pmatrix}, \dots, C_n = \begin{pmatrix} m_{1,n} \\ \vdots \\ m_{n,n} \end{pmatrix}$$

les variables aléatoires à valeurs dans $\mathcal{V}_{n,1}$ constituées par les colonnes de la matrice M_n .

Pour tout $j \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$, on note R_j l'événement

$$(C_1, \dots, C_j) \text{ est libre et } C_{j+1} \in \text{Vect}(C_1, \dots, C_j)$$

et R_n l'événement

$$(C_1, \dots, C_n) \text{ est libre.}$$

Q 28. Montrer que (R_1, \dots, R_n) est un système complet d'événements.

II. D.3)

Q 29. Montrer que

$$\mathbb{P}(M \notin \mathcal{GL}_n(\mathbb{R})) \leq \sum_{j=1}^{n-1} \mathbb{P}(C_{j+1} \in \text{Vect}(C_1, \dots, C_j)).$$

Q 30. Justifier que, pour tout $j \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$,

$$\mathbb{P}(C_{j+1} \in \text{Vect}(C_1, \dots, C_j)) = \sum_{(v_1, \dots, v_j) \in \mathcal{V}_{n,1}^j} \mathbb{P}(C_{j+1} \in \text{Vect}(v_1, \dots, v_j)) \mathbb{P}((C_1 = v_1) \cap \dots \cap (C_j = v_j)).$$

Q 31. En déduire que, pour tout $j \in \llbracket 1, n-1 \rrbracket$,

$$\mathbb{P}(C_{j+1} \in \text{Vect}(C_1, \dots, C_j)) \leq 2^{j-n}.$$

Q 32. En déduire que

$$\mathbb{P}(M \in \mathcal{GL}_n(\mathbb{R})) \geq \frac{1}{2^{n-1}}.$$

III Vecteurs aléatoires unitaires

On suppose que n est un entier naturel supérieur ou égal à 1.

On désigne par I un sous-ensemble de \mathbb{N} ayant au moins deux éléments et par $u = (u_i)_{i \in I}$ une suite de vecteurs unitaires de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$.

Q 33. Démontrer que le nombre réel

$$C(u) = \sup\{|\langle u_i | u_j \rangle| \mid (i, j) \in I^2, i \neq j\}$$

existe et appartient à l'intervalle $[0, 1]$.

$C(u)$ s'appelle paramètre de cohérence de la suite $(u_i)_{i \in I}$.

Q 34. Montrer que si $C(u) = 0$, alors l'ensemble $\{u_i \mid i \in I\}$ est fini et donner un majorant de son cardinal.

On se propose de démontrer que, pour tout entier naturel N inférieur ou égal à $\exp\left(\frac{\varepsilon^2 n}{4}\right)$, il existe une famille u de N vecteurs unitaires de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ vérifiant $C(u) \leq \varepsilon$ où ε est un nombre réel de l'intervalle $[0, 1]$. On dit alors que u est une famille « presque orthogonale ».

Q 35. Démontrer que, pour tout nombre réel t , $\text{ch}(t) \leq \exp\left(\frac{t^2}{2}\right)$.

Soient $X_1, \dots, X_n, Y_1, \dots, Y_n$ des variables aléatoires mutuellement indépendantes de même loi \mathcal{R} (définie dans la sous-partie II.B). On définit les vecteurs aléatoires, $X = \frac{1}{\sqrt{n}}(X_1, \dots, X_n)^T$ et $Y = \frac{1}{\sqrt{n}}(Y_1, \dots, Y_n)^T$ à valeurs dans $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$.

Q 36. Démontrer que, pour tout nombre réel t ,

$$\mathbb{E}(\exp(t\langle X | Y \rangle)) = \left(\text{ch}\left(\frac{t}{n}\right)\right)^n$$

Q 37. En déduire que, pour tout nombre réel t ,

$$\mathbb{E}(\exp(t\langle X | Y \rangle)) \leq \exp\left(\frac{t^2}{2n}\right)$$

Soient σ et λ deux nombres réels strictement positifs et Z une variable aléatoire réelle telle que $\exp(tZ)$ est d'espérance finie et vérifie

$$\forall t \in \mathbb{R}, \quad \mathbb{E}(\exp(tZ)) \leq \exp\left(\frac{\sigma^2 t^2}{2}\right)$$

Q 38. En appliquant l'inégalité de Markov à une variable aléatoire bien choisie, démontrer que

$$\forall t \in \mathbb{R}^+, \quad \mathbb{P}(Z \geq \lambda) \leq \exp\left(\frac{\sigma^2 t^2}{2} - \lambda t\right)$$

Q 39. En déduire que

$$\mathbb{P}(|Z| \geq \lambda) \leq 2 \exp\left(-\frac{\lambda^2}{2\sigma^2}\right)$$

Q 40. Avec les notations et les hypothèses de la question 36, démontrer que

$$\mathbb{P}(|\langle X | Y \rangle| \geq \varepsilon) \leq 2 \exp\left(-\frac{\varepsilon^2 n}{2}\right)$$

N étant un entier naturel non nul, $(X_j^i)_{1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n}$ est une famille de $n \times N$ variables aléatoires réelles mutuellement indépendantes de même loi \mathcal{R} . Pour tout $i \in \llbracket 1, N \rrbracket$, on pose $X^i = \frac{1}{\sqrt{n}}(X_1^i, \dots, X_n^i)^T$.

Q 41. Dédurre des questions précédentes que

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{1 \leq i < j \leq N} |\langle X^i | X^j \rangle| \geq \varepsilon\right) \leq N(N-1) \exp\left(-\frac{\varepsilon^2 n}{2}\right)$$

Q 42. On suppose que $n \geq 4 \frac{\ln N}{\varepsilon^2}$. Démontrer que

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{1 \leq i < j \leq N} |\langle X^i | X^j \rangle| \geq \varepsilon\right) < 1$$

Q 43. En déduire que, pour tout entier naturel N inférieur ou égal à $\exp\left(\frac{\varepsilon^2 n}{4}\right)$, il existe une famille de N vecteurs unitaires de \mathbb{R}^n dont le paramètre de cohérence est majoré par ε .

