

EPREUVE SPECIFIQUE – FILIERE MP

MATHEMATIQUES 2

Durée : 4 heures

Les calculatrices sont interdites.

* * *

NB : Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Calculs de distances entre une matrice et certaines parties de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ **Notations**

Dans ce sujet, n est un entier naturel non nul et on note :

$\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$: la \mathbb{R} -algèbre des matrices carrées réelles d'ordre n .

$\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$: le \mathbb{R} -espace vectoriel des matrices à n lignes et à une colonne.

Pour une matrice A de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, ${}^t A$ est sa matrice transposée, $\text{rang}(A)$ son rang et $\text{Tr}(A)$ sa trace.

I_n : la matrice unité de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

$\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$: le sous-espace vectoriel des matrices symétriques de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

$\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$: le sous-espace vectoriel des matrices antisymétriques de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

$\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$: l'ensemble des matrices positives de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ c'est-à-dire des matrices A de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ vérifiant : pour toute matrice $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, ${}^t X A X \geq 0$.

$\text{GL}_n(\mathbb{R})$: le groupe des matrices inversibles de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

$\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$: le groupe des matrices réelles orthogonales c'est-à-dire des matrices M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ vérifiant : ${}^t M M = I_n$.

Pour p entier naturel, Δ_p est l'ensemble des matrices de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ de rang supérieur ou égal à p et ∇_p est l'ensemble des matrices de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ de rang inférieur ou égal à p .

Tournez la page S.V.P.

Objectifs

Le but du sujet est de calculer la distance (par la norme de Schur définie à la question II.3.) d'une matrice à :

dans la partie II., $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ par le théorème de projection orthogonale,

dans la partie III., $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ par le théorème de décomposition polaire,

dans la partie IV., Δ_p par des notions de densité,

dans la partie V., ∇_p par le théorème de Courant et Fischer.

La partie I. traite un exemple qui sera utilisé dans les différentes parties.

Remarque : dans le texte, le mot « positif » signifie « supérieur ou égal à 0 ».

I. Exercice préliminaire

1. Soit la matrice $\Gamma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -2 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -2 \end{pmatrix}$ de $\mathcal{M}_3(\mathbb{R})$, on pose $H = {}^t\Gamma \Gamma$.

Diagonaliser la matrice H et déterminer une matrice P de $\mathcal{O}_3(\mathbb{R})$ et une matrice diagonale D à termes tous positifs telles que $D^2 = P^{-1} H P$.

2. On pose $S = P D P^{-1} \in \mathcal{S}_3^+(\mathbb{R})$, montrer que la relation $\Gamma = U S$ définit une matrice $U \in \mathcal{O}_3(\mathbb{R})$ et calculer cette matrice.

II. Calcul de la distance de A à $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et à $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$

3. Soit A et B deux matrices de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, on pose $(A | B) = \text{Tr}({}^tA B)$.

Montrer que l'on définit ainsi un produit scalaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

La norme associée à ce produit scalaire (norme de Schur) est notée : $\|A\| = ((A | A))^{\frac{1}{2}}$.

Dans tout le sujet, si Π est une partie non vide de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, la distance d'une matrice A de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ à la partie Π est le réel $d(A, \Pi) = \inf_{M \in \Pi} \|A - M\|$.

4. Montrer que $\mathcal{M}_n(\mathbb{R}) = \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \oplus \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ et que cette somme directe est orthogonale.
5. Si A est une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, montrer que $d(A, \mathcal{S}_n(\mathbb{R})) = \left\| \frac{1}{2}(A - {}^tA) \right\|$ et déterminer de même $d(A, \mathcal{A}_n(\mathbb{R}))$.
6. Calculer $d(\Gamma, \mathcal{A}_3(\mathbb{R}))$ où Γ est la matrice exemple de la partie I.

III. Calcul de la distance de A à $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$

A. Théorème de la décomposition polaire

7. Montrer qu'une matrice S de $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ appartient à $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ si et seulement si toutes les valeurs propres de S sont positives ou nulles.
8. Si A est une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ montrer que la matrice ${}^t A A \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.
9. Soit A une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, on suppose qu'il existe une matrice diagonale $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$ à termes positifs telle que ${}^t A A = D^2$.
On note A_1, A_2, \dots, A_n les matrices de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ qui forment les colonnes de la matrice A .
 - a. Pour tout couple (i, j) d'entiers naturels compris entre 1 et n , évaluer ${}^t A_i A_j$.
En particulier, si i est un entier pour lequel $d_i = 0$, que vaut A_i ?
 - b. Montrer que l'on peut trouver une base orthonormée (E_1, E_2, \dots, E_n) de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ (par rapport au produit scalaire canonique $\langle X, Y \rangle = {}^t X Y$ de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$) telle que, pour tout entier naturel i entre 1 et n , $A_i = d_i E_i$.
 - c. En déduire qu'il existe une matrice E de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ telle que $A = E D$.
10. Soit A et B deux matrices de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ vérifiant ${}^t A A = {}^t B B$.
 - a. Montrer qu'il existe une matrice diagonale D à termes positifs et une matrice orthogonale P telles que : $P^{-1} {}^t A A P = P^{-1} {}^t B B P = D^2$.
 - b. Montrer qu'il existe une matrice U de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ telle que $A = U B$.
11. Déduire des questions précédentes le théorème de décomposition polaire :
Pour toute matrice A de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, il existe une matrice U de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ et une matrice S de $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ telles que $A = U S$.
(Remarque : on peut également établir l'unicité de la matrice S de $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ et même l'unicité de la matrice U de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ si A est de plus inversible dans cette décomposition mais ce ne sera pas utile pour la suite du problème).

B. Calcul de $d(A, \mathcal{O}_n(\mathbb{R}))$

12. Montrer que, pour toute matrice M de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et pour toute matrice Ω de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$,
 $\|M \Omega\| = \|\Omega M\| = \|M\|$.

- 13.** Dans la suite de cette partie, soit A une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, soit $U \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ et $S \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ telles que $A = U S$; il existe une matrice diagonale D et une matrice P de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ telles que $S = P D P^{-1}$.
- a.** Montrer que, pour toute matrice Ω de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$, $\|A - \Omega\| = \|S - U^{-1}\Omega\|$ et en déduire que $d(A, \mathcal{O}_n(\mathbb{R})) = d(S, \mathcal{O}_n(\mathbb{R}))$.
- b.** Montrer que $d(A, \mathcal{O}_n(\mathbb{R})) = d(D, \mathcal{O}_n(\mathbb{R}))$.
- 14.** On note $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$.
- a.** Montrer que pour toute matrice Ω de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$, $\|D - \Omega\|^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 - 2 \text{Tr}(D \Omega) + n$.
- b.** Montrer que pour toute matrice Ω de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$, $\text{Tr}(D \Omega) \leq \sum_{i=1}^n \lambda_i$.
- c.** Conclure que $d(D, \mathcal{O}_n(\mathbb{R})) = \|D - I_n\|$.
- 15.** Montrer que $d(A, \mathcal{O}_n(\mathbb{R})) = \|A - U\|$.
- 16.** Calculer $d(\Gamma, \mathcal{O}_3(\mathbb{R}))$ où Γ est la matrice exemple de la partie I.

IV. Calcul de la distance de A à Δ_p

- 17.** Un résultat de densité.
- a.** Soit M un élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, montrer qu'il existe un réel $\alpha > 0$ tel que pour tout réel λ vérifiant $0 < \lambda < \alpha$, la matrice $M - \lambda I_n$ est inversible.
- b.** En déduire que $\text{GL}_n(\mathbb{R})$ est dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
- 18.** Soit A un élément de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, déterminer, pour tout entier naturel $p \leq n$, $d(A, \Delta_p)$.

V. Calcul de la distance de A à ∇_p

A. Théorème de Courant et Fischer

Soit A une matrice de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. On notera $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ ses valeurs propres, on notera $D = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, P la matrice de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ vérifiant $A = P D {}^tP$ et C_1, C_2, \dots, C_n les matrices de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ formant les colonnes de la matrice P .

Si k est un entier entre 1 et n , on note Ψ_k l'ensemble des sous-espaces vectoriels de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ de dimension k . Nous allons montrer que :

$$\lambda_k = \max_{F \in \Psi_k} \min_{X \in F - \{0\}} \frac{{}^t X A X}{{}^t X X} \quad (\text{théorème de Courant et Fischer}).$$

19. Soit X un vecteur de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ de coordonnées (x_1, x_2, \dots, x_n) dans la base orthonormée (C_1, C_2, \dots, C_n) de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. Calculer en fonction des x_i et λ_i (i compris entre 1 et n) : ${}^t X A X$ et ${}^t X X$ et pour k entier entre 1 et n , $\frac{{}^t C_k A C_k}{{}^t C_k C_k}$.

20. Soit k entier entre 1 et n , on pose $F_k = \text{vect}\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$.

Montrer que pour tout X non nul de F_k , $\frac{{}^t X A X}{{}^t X X} \geq \lambda_k$ et déterminer $\min_{X \in F_k - \{0\}} \frac{{}^t X A X}{{}^t X X}$.

21. Soit $F \in \Psi_k$,

a. montrer que $\dim(F \cap \text{vect}\{C_k, C_{k+1}, \dots, C_n\}) \geq 1$.

b. Si X est un vecteur non nul de $F \cap \text{vect}\{C_k, C_{k+1}, \dots, C_n\}$, montrer que $\frac{{}^t X A X}{{}^t X X} \leq \lambda_k$.

22. Conclure.

B. Calcul de $d(A, \nabla_p)$

Dans toute cette partie : A est une matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ de rang r et p est un entier naturel, $p < r$.

23. Montrer qu'il existe deux matrices E et P de $\mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ et une matrice diagonale D à termes positifs telles que $A = E D P$. En déduire que le rang de la matrice ${}^t A A$ est encore r .
(On pourra utiliser les résultats de la question 9.)

24. Si on note les valeurs propres de la matrice symétrique réelle ${}^t A A$ de rang r : $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_r > 0$ et $\mu_{r+1} = \dots = \mu_n = 0$, si on pose $D = \text{diag}(\sqrt{\mu_1}, \sqrt{\mu_2}, \dots, \sqrt{\mu_r}, 0, \dots, 0)$, si pour $1 \leq l \leq n$ on note M_l la matrice de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ dont la l -ième colonne est celle de la matrice $E \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ de la question 23., tous les autres termes de M_l étant nuls, on a clairement : $E D = \sum_{l=1}^n \sqrt{\mu_l} M_l$.

Montrer alors qu'il existe une famille orthonormale (R_1, R_2, \dots, R_n) de matrices de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ (pour le produit scalaire $(A|B) = \text{Tr}({}^t A B)$ de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$), toutes de rang un, et telles que

$$A = \sum_{l=1}^n \sqrt{\mu_l} R_l = \sum_{l=1}^r \sqrt{\mu_l} R_l.$$

25. Avec les notations de la question **24**, on pose $N = \sum_{l=1}^p \sqrt{\mu_l} R_l$.

Montrer que $\text{rang}(N) \leq p$ puis que $d(A, \nabla_p) \leq \sqrt{\mu_{p+1} + \dots + \mu_r}$.

26. Soit M une matrice de rang p ($p < r$), on note $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_n \geq 0$ les valeurs propres de la matrice ${}^t(A - M)(A - M)$ et on pose $G = \text{Ker } M \cap \text{Im}({}^tA A)$.

Soit k un entier compris entre 1 et $r - p$.

a. Montrer que $\dim G \geq r - p$.

b. Soit F un sous-espace vectoriel de G de dimension k , montrer que :

$$\alpha_k \geq \min_{X \in F - \{0\}} \frac{{}^tX {}^tA A X}{{}^tX X}.$$

c. On note (V_1, V_2, \dots, V_n) une base de \mathbb{R}^n formée de vecteurs propres de la matrice ${}^tA A$, le vecteur V_i étant associé à la valeur propre μ_i de telle sorte que : $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_r > 0$ et $\mu_{r+1} = \dots = \mu_n = 0$.

Montrer que $\dim(G \cap \text{vect}\{V_1, V_2, \dots, V_{k+p}\}) \geq k$.

d. En déduire que $\alpha_k \geq \mu_{k+p}$.

27. En déduire $d(A, \nabla_p)$.

28. Calculer, pour $p \in \{0, 1, 2, 3\}$, $\gamma_p = d(\Gamma, \nabla_p)$ où Γ est la matrice exemple de la partie I.

Fin de l'énoncé.