
ESSEC

Mathématiques I

Mathématiques approfondies

Sujet adapté – 2007

Table des matières

1	Représentation intégrale d'une fonction puissance	2
	<i>Thèmes abordés : fonctions d'une variable ; intégrales généralisées.</i>	<i>2</i>
2	Les matrices symétriques réelles	3
	<i>Thèmes abordés : espaces vectoriels ; réduction ; algèbre bilinéaire.</i>	<i>3</i>
3	Monotonie sur les matrices symétriques définies positives	4
	<i>Thèmes abordés : réduction ; intégrales généralisées ; algèbre bilinéaire.</i>	<i>4</i>
4	Monotonies comparées de f et $\tilde{f}$	6
	<i>Thèmes abordés : fonctions d'une variable ; réduction ; algèbre bilinéaire.</i>	<i>6</i>

Les parties du sujet contenant des éléments n'étant plus au programme depuis 2022 ont été adaptées pour convenir aux nouveaux programmes de la filière Mathématiques approfondies en vigueur depuis 2023.

Dans tout le problème, la lettre n désigne un entier supérieur ou égal à 2 et l'on note $\llbracket 1, n \rrbracket$ l'ensemble des entiers k vérifiant $1 \leq k \leq n$. Par ailleurs, on note :

- $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ l'espace vectoriel des matrices carrées d'ordre n à coefficients réels ;
- $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ l'espace vectoriel des matrices colonnes réelles à n lignes ;
- tM la transposée d'une matrice M ;
- I_n la matrice identité de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$;
- pour $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $\text{Ker}(A) = \{X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) \mid AX = 0\}$.

1 Représentation intégrale d'une fonction puissance

Thèmes abordés : fonctions d'une variable ; intégrales généralisées.

On désigne par φ une application définie et continue sur $\mathbb{R}_+^*$, à valeurs positives, telle que l'intégrale $\int_0^{+\infty} \frac{\varphi(t)}{1+t^2} dt$ soit convergente. On lui associe la fonction f d'une variable réelle définie par

$$\forall x > 0, \quad f(x) = \int_0^{+\infty} \left(\frac{t}{1+t^2} - \frac{1}{x+t} \right) \varphi(t) dt.$$

Montrer que f est bien définie sur $\mathbb{R}_+^*$.

1. Pour quelles valeurs du réel α l'intégrale $\int_0^{+\infty} \frac{t^\alpha}{1+t^2} dt$ est-elle convergente ?

Dans toute la suite du problème, pour de telles valeurs de α , on désignera par f_α l'application définie sur $\mathbb{R}_+^*$ par

$$\forall x > 0, \quad f_\alpha(x) = \int_0^{+\infty} \left(\frac{t}{1+t^2} - \frac{1}{x+t} \right) t^\alpha dt.$$

2. Exprimer f_0 à l'aide des fonctions usuelles.
3. On suppose que $\alpha \in]-1, 0[$. Pour $x > 0$, prouver la convergence de l'intégrale $\int_0^{+\infty} \frac{t^\alpha}{x+t} dt$ et, à l'aide d'un changement de variable, l'exprimer en fonction de x^α et d'un réel ne dépendant que de α .

En déduire l'existence de c et d , réels ne dépendant que de α , tels que

$$\forall x > 0, \quad f_\alpha(x) = c x^\alpha + d.$$

Préciser le signe de c .

4. On suppose que $\alpha \in]0, 1[$.

a) Lorsque x et h sont des réels tels que $x > 0$, $x+h > 0$ et $h \neq 0$, vérifier la relation

$$\frac{f_\alpha(x+h) - f_\alpha(x)}{h} = \int_0^{+\infty} \frac{t^\alpha}{(x+h+t)(x+t)} dt.$$

Montrer alors que f_α est dérivable sur $\mathbb{R}_+^*$ et que

$$\forall x > 0, \quad f'_\alpha(x) = \int_0^{+\infty} \frac{t^\alpha}{(x+t)^2} dt.$$

- b) Justifier la relation $\forall x > 0, f'_\alpha(x) = f'_\alpha(1)x^{\alpha-1}$. En déduire l'existence de c et d , réels ne dépendant que de α , tels que

$$\forall x > 0, \quad f_\alpha(x) = cx^\alpha + d.$$

Préciser le signe de c .

2 Les matrices symétriques réelles

Thèmes abordés : espaces vectoriels ; réduction ; algèbre bilinéaire.

On note $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ le sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ constitué des matrices symétriques, c'est-à-dire $\mathcal{S}_n(\mathbb{R}) = \{M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mid {}^tM = M\}$. On dit qu'une matrice M de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est définie positive si, pour toute matrice colonne X de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, $X \neq 0 \Rightarrow {}^tXMX > 0$. L'ensemble des matrices symétriques définies positives de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ sera noté $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

Enfin, lorsque A et B sont deux matrices symétriques vérifiant $B - A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$, on dira que A est strictement plus petite que B et on le notera $A < B$.

1. Caractérisations des matrices définies positives.

- a) Pour $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$, établir l'équivalence suivante :

$$A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R}) \iff \text{toute valeur propre de } A \text{ est strictement positive.}$$

- b) Lorsque $A = \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix}$ et $X = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, vérifier l'égalité

$$a {}^tXAX = (ax + by)^2 + (ac - b^2)y^2.$$

En déduire que $\begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix} \in \mathcal{S}_2^{++}(\mathbb{R})$ si et seulement si $a > 0$ et $ac - b^2 > 0$.

2. Exemples.

- a) Soient $A = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$ et $B = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 35 \end{pmatrix}$. Vérifier que A et B appartiennent à $\mathcal{S}_2^{++}(\mathbb{R})$ et montrer que $A < B$. A-t-on $A^2 < B^2$?
- b) Soit $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.
- Montrer que A est inversible et que $A^{-1} \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.
 - Pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, on définit l'application

$$\Phi_X^A : \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) \longrightarrow \mathbb{R}, \quad Y \longmapsto 2 {}^tXY - {}^tYAY.$$

Exprimer, pour tout $H \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, $\Phi_X^A(A^{-1}X + H) - \Phi_X^A(A^{-1}X)$ en fonction de H et A . En déduire que Φ_X^A admet en $A^{-1}X$ un maximum qui vaut ${}^tXA^{-1}X$.

- iii) On considère maintenant $B \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ vérifiant $A < B$. Montrer que, pour toutes matrices colonnes X et Y de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$,

$$Y \neq 0 \implies \Phi_X^A(Y) > \Phi_X^B(Y).$$

En déduire que $B^{-1} < A^{-1}$.

3 Monotonie sur les matrices symétriques définies positives

Thèmes abordés : réduction ; intégrales généralisées ; algèbre bilinéaire.

Lorsque F est une application définie sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ et à valeurs dans $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$, on dit que F est strictement croissante sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ si, pour tout $A, B \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$, $A < B \Rightarrow F(A) < F(B)$. On dira de même que F est strictement décroissante sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ lorsque $-F$ est strictement croissante sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

Par exemple, le résultat de la question II-2-b-iii se traduit par la stricte décroissance de l'application $F : \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$, $M \mapsto M^{-1}$.

1. **Résultats préliminaires.** On désigne par A une matrice symétrique réelle dont l'ensemble des valeurs propres distinctes $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p\}$ est classé dans l'ordre croissant. On rappelle que

$$\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) = \bigoplus_{i=1}^p E_{\lambda_i}(A), \quad E_{\lambda_i}(A) = \text{Ker}(A - \lambda_i I_n).$$

- a) Justifier la relation $A = \sum_{i=1}^p \lambda_i M_i$, où M_i est la matrice de la projection orthogonale sur $E_{\lambda_i}(A)$ dans la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. Dans toute la suite du problème, une telle écriture s'appelle la *décomposition* de A .

- b) Montrer que $I_n = \sum_{i=1}^p M_i$.

- c) Donner la décomposition de la matrice $A + tI_n$ lorsque t est réel.

Si $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ admet la décomposition $A = \sum_{i=1}^p \lambda_i M_i$, on définit, lorsque f est une application de $\mathbb{R}_+^*$ dans $\mathbb{R}$, la matrice

$$\tilde{f}(A) = \sum_{i=1}^p f(\lambda_i) M_i.$$

On peut ainsi considérer l'application $\tilde{f}$ définie sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ et à valeurs dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ par $A \mapsto \tilde{f}(A)$.

2. a) Montrer que, pour tout $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$, $\tilde{f}(A) \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et donner la décomposition de $\tilde{f}(A)$ lorsque f est strictement monotone.
- b) Préciser $\tilde{f}$ lorsque $f : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto 1/x$.
- c) Soient $f : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}$ et $g : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}_+^*$ deux applications strictement monotones. Montrer que $\widetilde{f \circ g} = \tilde{f} \circ \tilde{g}$.
- d) Lorsque $(a, b, c, d) \in \mathbb{R}^4$ avec $c > 0$, $d > 0$ et $bc - ad \neq 0$, on considère l'application $h : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto \frac{ax+b}{cx+d}$. Après avoir vérifié que

$$\forall x > 0, \quad h(x) = \frac{bc - ad}{c(cx + d)} + \frac{a}{c},$$

montrer la stricte monotonie de $\tilde{h}$ sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

3. **Intégrales de matrices.** Soit $M : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $t \mapsto (m_{i,j}(t))_{(i,j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2}$, où, pour tout $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$, l'application $m_{i,j} : t \mapsto m_{i,j}(t)$ est continue sur $\mathbb{R}_+^*$. Lorsque, pour

tout couple $(i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2$, l'intégrale $\int_0^{+\infty} m_{i,j}(t) dt$ converge, on dit que la matrice $\left(\int_0^{+\infty} m_{i,j}(t) dt \right)_{(i,j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2}$ existe et on la note $\int_0^{+\infty} M(t) dt$.

a) **Résultats préliminaires.**

(i) Soient M et N telles que $\int_0^{+\infty} M(t) dt$ et $\int_0^{+\infty} N(t) dt$ existent. Montrer que $\int_0^{+\infty} (M(t) + N(t)) dt$ existe et que

$$\int_0^{+\infty} (M(t) + N(t)) dt = \int_0^{+\infty} M(t) dt + \int_0^{+\infty} N(t) dt.$$

Dans le même ordre d'idée, on admettra les deux propriétés suivantes.

(ii) Soient $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et h continue de $\mathbb{R}_+^*$ dans $\mathbb{R}$ telle que $\int_0^{+\infty} h(t) dt$ converge, et $M : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $t \mapsto M(t) = h(t)A$. Alors $\int_0^{+\infty} M(t) dt$ existe et

$$\int_0^{+\infty} M(t) dt = \left(\int_0^{+\infty} h(t) dt \right) A.$$

(iii) Soit M telle que $\int_0^{+\infty} M(t) dt$ existe et X une matrice colonne de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. Alors $\int_0^{+\infty} {}^t X M(t) X dt$ converge et

$${}^t X \left(\int_0^{+\infty} M(t) dt \right) X = \int_0^{+\infty} {}^t X M(t) X dt.$$

b) On revient à l'application f définie sur $\mathbb{R}_+^*$ par

$$\forall x > 0, \quad f(x) = \int_0^{+\infty} \left(\frac{t}{1+t^2} - \frac{1}{x+t} \right) \varphi(t) dt,$$

où φ est une application définie et continue sur $\mathbb{R}_+^*$, à valeurs positives, telle que l'intégrale $\int_0^{+\infty} \frac{\varphi(t)}{1+t^2} dt$ converge. On suppose que $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ admet la décomposition $A = \sum_{i=1}^p \lambda_i M_i$.

i) Montrer que

$$\tilde{f}(A) = \int_0^{+\infty} \varphi(t) \left(\frac{t}{1+t^2} I_n - (A + tI_n)^{-1} \right) dt.$$

ii) Si $B \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ est telle que $A < B$, montrer que, pour toute matrice colonne X de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, non nulle, et tout $t > 0$, on a

$${}^t X \left(\frac{t}{1+t^2} I_n - (A + tI_n)^{-1} \right) X < {}^t X \left(\frac{t}{1+t^2} I_n - (B + tI_n)^{-1} \right) X.$$

iii) En déduire que $\tilde{f}$ est strictement croissante sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

c) À l'aide des résultats de la partie I, vérifier que $\tilde{\ln}$ est strictement croissante sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. Préciser le sens de variation de $\tilde{p}_\alpha$ associée à $p_\alpha : \mathbb{R}_+^* \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto x^\alpha$, selon que $\alpha \in]-1, 0[$ ou $\alpha \in]0, 1[$.

4 Monotonies comparées de f et $\tilde{f}$

Thèmes abordés : fonctions d'une variable ; réduction ; algèbre bilinéaire.

On revient aux notations introduites dans les parties précédentes.

1. On désigne par f une application de $\mathbb{R}_+^*$, à valeurs dans $\mathbb{R}$. Montrer que, lorsque $\tilde{f}$ est strictement croissante sur $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$, f l'est aussi sur $\mathbb{R}_+^*$.
2. Pour $t > 0$, on définit les matrices

$$A(t) = \begin{pmatrix} \frac{e^t + e^{-t}}{2} & \frac{e^t - e^{-t}}{2} \\ \frac{e^t - e^{-t}}{2} & \frac{e^t + e^{-t}}{2} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B(t) = \begin{pmatrix} t^3 & 0 \\ 0 & \frac{2}{e^t + e^{-t}} - t^3 \end{pmatrix}.$$

- a) Montrer que $A(t) \in \mathcal{S}_2^{++}(\mathbb{R})$ et donner la décomposition de $A(t)$.
- b) Montrer qu'il existe $\eta_0 > 0$ tel que, pour tout $t \in]0, \eta_0[$, $B(t) \in \mathcal{S}_2^{++}(\mathbb{R})$. On ne cherchera pas à déterminer une valeur, même approchée, de η_0 .
- c) Établir de même qu'il existe $\eta_1 \in]0, \eta_0[$ tel que, pour tout $t \in]0, \eta_1[$, $B(t) < A(t)$.
- d) Déterminer $\widetilde{p}_\alpha(A(t))$ et $\widetilde{p}_\alpha(B(t))$ pour tout réel t de $]0, \eta_1[$ lorsque p_α est l'application de $\mathbb{R}_+^*$ dans $\mathbb{R}$, $x \mapsto x^\alpha$.
- e) Lorsque $\alpha > 1$, déterminer un équivalent en 0^+ de la quantité

$$\left(\frac{e^{\alpha t} + e^{-\alpha t}}{2} - t^{3\alpha} \right) \left(\frac{e^{\alpha t} + e^{-\alpha t}}{2} - \left(\frac{2}{e^t + e^{-t}} - t^3 \right)^\alpha \right) - \left(\frac{e^{\alpha t} + e^{-\alpha t}}{2} \right)^2.$$

- f) En déduire que, pour $\alpha > 1$, $\widetilde{p}_\alpha$ n'est pas strictement croissante sur $\mathcal{S}_2^{++}(\mathbb{R})$.
3. Démontrer que la propriété énoncée en IV-1 n'admet pas de réciproque dès que $n \geq 2$.