Endomorphismes d'un espace euclidien

Bases orthonormales

Solution 1

1. Soit u l'endomorphisme de E tel que $u(\mathcal{B}) = \mathcal{B}'$. u transforme une base orthonormée directe en une base orthonormée directe donc u est une isométrie vectorielle directe donc $\det(u) = 1$. Or $\det(u) = \det_{\mathcal{B}}(\mathcal{B}')$.

2. On a $\det_{\mathcal{B}'} = \det_{\mathcal{B}}(\mathcal{B}')\det_{\mathcal{B}}$. Donc $\det_{\mathcal{B}'} = \det_{\mathcal{B}}$.

   Remarque. On en déduit que le déterminant dans une base orthonormée directe ne dépend pas du choix de cette base. Le déterminant de n vecteurs $u_1, \dots, u_n$ dans une base orthonormée quelconque s'appelle le *produit mixte* de ces vecteurs et est noté $[x_1, \dots, x_n]$.

3. Cette application est linéaire car le déterminant est linéaire par rapport à chacune de ses variables et notamment par rapport à la dernière. De plus, elle est à valeurs dans $\mathbb{R}$. C'est donc une forme linéaire.

4. C'est tout simplement le théorème de Riesz.

5. Démontrons simplement la linéarité par rapport à la première variable. Soient $x_1, \dots, x_{n-1} \in \mathrm{E}$, $x_1' \in \mathrm{E}$ et $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$. Pour tout $x \in \mathrm{E}$,

   $$\det_{\mathcal{B}}(\lambda x_1 + \mu x_1', x_2, \dots, x_n) = \lambda \det_{\mathcal{B}}(x_1, x_2, \dots, x_n) + \mu \det_{\mathcal{B}}(x_1', x_2, \dots, x_n)$$

   Notons $u = (\lambda x_1 + \mu x_1') \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_{n-1}$, $v = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_{n-1}$ et $w = x_1' \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_{n-1}$. Ainsi pour tout $x \in \mathrm{E}$, $\langle u, x\rangle = \lambda\langle v, x\rangle + \mu\langle w, x\rangle$ i.e. $\langle u - (\lambda v + \mu w), x\rangle = 0$. Donc $u - (\lambda v + \mu w) \in \mathrm{E}^{\perp} = \{0\}$. On a donc $u = \lambda v + \mu w$, ce qui prouve bien la linéarité par rapport à la première variable. La linéarité par rapport aux autres variables se traite de la même manière.
   Soient $x_1, \dots, x_{n-1} \in \mathrm{E}$ tels que deux vecteurs parmi ceux-ci soient égaux. On a donc $\det(x_1, \dots, x_{n-1}, x) = 0$ pour tout $x \in \mathrm{E}$ puisque le déterminant est une forme multilinéaire alternée. Ceci signifie que $\langle x_1 \wedge \dots \wedge x_{n-1}, x\rangle = 0$ pour tout $x \in \mathrm{E}$. Ainsi $x_1 \wedge \dots \wedge x_{n-1} = 0$. L'application de l'énoncé est bien alternée.

Solution 2

1. L'application $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est clairement symétrique. Elle est bilinéaire puisque la dérivation et l'évaluation en a sont linéaires. Elle est évidemment positive. Soit enfin $\mathrm{P} \in \mathbb{R}_n[\mathrm{X}]$ tel que $\langle \mathrm{P}, \mathrm{P}\rangle = 0$. On a donc $\mathrm{P}(a) = \mathrm{P}'(a) = \cdots = \mathrm{P}^{(n)}(a) = 0$. Ainsi a est une racine d'ordre au moins $n+1$ de P et $\deg \mathrm{P} \leq n$ donc $\mathrm{P} = 0$.

2. La famille $\left((\mathrm{X}-a)^k\right)_{0\leq k\leq n}$ est clairement orthonormée. Puisqu'elle contient $n+1$ éléments et que $\dim \mathbb{R}_n[\mathrm{X}] = n+1$, c'est une base.

Solution 3

1. En développant $\|x+y\|^2$, on prouve sans peine que

   $$\langle x \mid y\rangle = \frac{\|x+y\|^2 - \|x\|^2 - \|y\|^2}{2}$$

   et l'on en déduit que

   $$\forall (x, y) \in \mathrm{E}^2,\ \langle x \mid y\rangle = \sum_{i=1}^{n} \langle x \mid e_i\rangle\langle y \mid e_i\rangle$$

2. Soit $x \in \mathrm{E}$. Posons

   $$z = x - \sum_{i=1}^{n} \langle x \mid e_i\rangle e_i$$

On a

$$\begin{aligned}\|z\|^2 &= \sum_{k=1}^{n}\langle z \mid e_k\rangle^2 = \sum_{k=1}^{n}\left\langle x - \sum_{i=1}^{n}\langle x \mid e_i\rangle e_i \mid e_k\right\rangle^2 = \sum_{k=1}^{n}\left(\langle x \mid e_k\rangle - \sum_{i=1}^{n}\langle x \mid e_i\rangle\langle e_k \mid e_i\rangle\right)^2 \\ &= \sum_{k=1}^{n}(\langle x \mid e_k\rangle - \langle x \mid e_k\rangle)^2 = 0\end{aligned}$$

Ainsi $z = 0$.

3. D'après la question précédente, la famille $(e_k)_{1\leq k\leq n}$ est génératrice de E. Comme $n = \dim(\mathrm{E})$, cette famille est une base de E. Pour tout $1 \leq k \leq n$, on a

$$e_k = \sum_{i=1}^{n}\langle e_k \mid e_i\rangle e_i$$

Ainsi, par identification des coordonées dans la base $(e_1, \dots, e_n)$,

$$\forall 1 \leq i \leq n,\ \langle e_k \mid e_i\rangle = \delta_{k,i}$$

Comme cela est valable pour tout $1 \leq k \leq n$, on en déduit que la famille $(e_1, \dots, e_n)$ est une base orthonormée de E.

Solution 4

Notons p_n le projecteur orthogonal sur $\operatorname{vect}(e_0, \dots, e_n)$. Soit $x \in \mathrm{E}$. On sait alors que $(p_n(x))_{n\in\mathbb{N}}$ converge vers x pour la norme euclidienne $\|\cdot\|$. D'après le théorème de Pythagore, pour tout $n \in \mathbb{N}$,

$$\|x\|^2 = \|p_n(x)\|^2 + \|x - p_n(x)\|^2$$

D'une part,

$$\|x - p_n(x)\|^2 \underset{n\to+\infty}{\longrightarrow} 0$$

et d'autre part,

$$\forall n \in \mathbb{N},\ \|p_n(x)\|^2 = \sum_{k=0}^{n}\langle e_k, x\rangle^2$$

Par passage à la limite

$$\|x\|^2 = \sum_{k=0}^{+\infty}\langle e_k, x\rangle^2$$

Sous-espaces orthogonaux

Solution 5

s est clairement linéaire et $s^2 = \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}$ donc s est une symétrie. Soit $\mathrm{S} \in \operatorname{Ker}(s - \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})})$ et $\mathrm{A} \in \operatorname{Ker}(s + \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})})$. Ainsi $\mathrm{S}^\top = \mathrm{S}$ et $\mathrm{A}^\top = -\mathrm{A}$. Par conséquent $\langle \mathrm{S}, \mathrm{A}\rangle = \operatorname{tr}(\mathrm{S}^\top\mathrm{A}) = \operatorname{tr}(\mathrm{SA})$ et $\langle \mathrm{A}, \mathrm{S}\rangle = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{S}) = -\operatorname{tr}(\mathrm{AS}) = -\operatorname{tr}(\mathrm{SA})$. Donc $\langle \mathrm{S}, \mathrm{A}\rangle = 0$. Ceci signifie que $\operatorname{Ker}(s - \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})})$ et $\operatorname{Ker}(s + \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})})$ sont orthogonaux l'un à l'autre : s est une symétrie orthogonale.

Solution 6

1. Supposons $\mathrm{F} \subset \mathrm{G}$. Soit $x \in \mathrm{G}^\perp$. Alors x est orthogonal à tout vecteur de G et a fortiori de F donc $x \in \mathrm{F}^\perp$. Ainsi $\mathrm{G}^\perp \subset \mathrm{F}^\perp$.
Supposons F et G de dimension finie et $\mathrm{G}^\perp \subset \mathrm{F}^\perp$. D'après ce qui précède, $(\mathrm{F}^\perp)^\perp \subset (\mathrm{G}^\perp)^\perp$. Mais F et G étant de dimension finie, $(\mathrm{F}^\perp)^\perp = \mathrm{F}$ et $(\mathrm{G}^\perp)^\perp = \mathrm{G}$.

2. On sait que $\mathrm{F} \subset \mathrm{F} + \mathrm{G}$ donc $(\mathrm{F} + \mathrm{G})^\perp \subset \mathrm{F}^\perp$ d'après la question précédente. De même, $\mathrm{G} \subset \mathrm{F} + \mathrm{G}$ donc $(\mathrm{F} + \mathrm{G})^\perp \subset \mathrm{G}^\perp$. Ainsi $(\mathrm{F} + \mathrm{G})^\perp \subset \mathrm{F}^\perp \cap \mathrm{G}^\perp$.
Soit $x \in \mathrm{F}^\perp \cap \mathrm{G}^\perp$. Soit $y \in \mathrm{F} + \mathrm{G}$. Il existe donc $(u, v) \in \mathrm{F} \times \mathrm{G}$ tel que $y = u + v$. Alors $\langle x, y\rangle = \langle x, u\rangle + \langle x, v\rangle$. Or $x \in \mathrm{F}^\perp$ et $u \in \mathrm{F}$ donc $\langle x, u\rangle = 0$. De même, $x \in \mathrm{G}^\perp$ et $v \in \mathrm{G}$ donc $\langle x, v\rangle = 0$. Ainsi $\langle x, y\rangle = 0$. Ceci étant vrai pour tout $y \in \mathrm{F} + \mathrm{G}$, $x \in (\mathrm{F} + \mathrm{G})^\perp$. D'où $\mathrm{F}^\perp \cap \mathrm{G}^\perp \subset (\mathrm{F} + \mathrm{G})^\perp$.
Par double inclusion, $(\mathrm{F} + \mathrm{G})^\perp = \mathrm{F}^\perp \cap \mathrm{G}^\perp$.

3. $F \cap G \subset F$ donc $F^\perp \subset (F \cap G)^\perp$ d'après la première question. De même, $F \cap G \subset G$ donc $G^\perp \subset (F \cap G)^\perp$. On en déduit que $F^\perp + G^\perp \subset (F \cap G)^\perp$.
Supposons E de dimension finie. Alors

$$\dim(F^\perp + G^\perp) = \dim F^\perp + \dim G^\perp - \dim(F^\perp \cap G^\perp)$$

Or d'après la question précédente, $F^\perp \cap G^\perp = (F+G)^\perp$ donc

$$\begin{aligned}\dim(F^\perp + G^\perp) &= \dim F^\perp + \dim G^\perp - \dim(F+G)^\perp \\ &= (\dim E - \dim F) + (\dim E - \dim G) - (\dim E - \dim(F+G)) \\ &= \dim E - (\dim F + \dim G - \dim(F+G)) \\ &= \dim E - \dim(F \cap G) = \dim(F \cap G)^\perp\end{aligned}$$

Puisqu'on a précédemment montré que $F^\perp + G^\perp \subset (F \cap G)^\perp$, on peut conclure que $(F \cap G)^\perp = F^\perp + G^\perp$.

Solution 7

---

1. Remarquons que pour tout $y \in E$, la forme linéaire $\varphi_y : x \mapsto \langle x, y\rangle$ est continue. En effet, d'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz :

$$\forall x \in E,\ |\varphi_y(x)| = |\langle x, y\rangle| \leq \|x\|\|y\|$$

de sorte que φ_y est continue d'après la caractérisation de la continuité pour les applications linéaires.

2. On peut remarquer que

$$F = \{x \in E,\ \forall y \in F,\ \langle x, y\rangle = 0\} = \bigcap_{y \in F} \varphi_y^{-1}(\{0_E\})$$

Pour tout $y \in E$, $\varphi_y^{-1}(\{0_E\})$ est fermé comme image réciproque d'un fermé (le sous-espace nul) par une application continue. Par conséquent, F est fermé comme intersection de fermés.
On peut aussi utiliser la caractérisation séquentielle des fermés si l'on préfère. Soit (x_n) une suite d'éléments de $F^\perp$ convergeant vers $x \in E$. Fixons $y \in F$. Alors pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\varphi_y(x_n) = \langle x_n, y\rangle = 0$. Par continuité de φ_y, $\lim_{n\to+\infty} \varphi_y(x_n) = \varphi_y(x)$. Par unicité de la limite, $\langle x, y\rangle = \varphi_y(x) = 0$. Ceci étant valable pour tout $y \in F$, $x \in F^\perp$. Ainsi $F^\perp$ est fermé par caractérisation séquentielle de la limite.

3. On sait que $F \subset (F^\perp)^\perp$. Or $(F^\perp)^\perp$ est fermé en applquant la question précédente à $F^\perp$. On sait que $\overline{F}$ est le plus grand fermé contenant F. Ainsi $\overline{F} \subset (F^\perp)^\perp$.

Projection orthogonale

Solution 8

Notons p la projection orthogonale sur $\mathrm{vect}(u)$ et P sa matrice dans $\mathcal{B}$. Comme (u) est une base orthonormale de $\mathrm{vect}(u)$, on a, pour $x \in E$, $p(x) = \langle x, u\rangle u$. Notons X le vecteur colonne associé à un vecteur x de E. On a $PX = (U^\top X)U = U(U^\top X) = UU^\top X$. La matrice de P dans $\mathcal{B}$ est donc UU^t.

Solution 9

---

1. Notons p_u le projecteur orthogonal sur $\mathrm{vect}(u)$. Remarquons que $p_u(e_i) = \left\langle \frac{u}{\|u\|}, e_i \right\rangle \frac{u}{\|u\|}$. Ainsi $\|p_u(e_i)\| = \frac{|\langle u, e_i\rangle|}{\|u\|}$. Posons alors $u = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\|e_i\|^2}$. Comme $(e_1, \dots, e_n)$ est orthogonale, pour tout $k \in [\![1, n]\!]$, $\langle u, e_k\rangle = 1$. Donc pour tout $k \in [\![1, n]\!]$, $\|p_u(e_k)\| = \frac{1}{\|u\|}$. Les projetés orthogonaux de $e_1, \dots, e_n$ sur $\mathrm{vect}(u)$ ont donc toute la même norme.

2. Soit u un vecteur répondant aux conditions de l'énoncé. Notons N la norme commune des vecteurs $p_u(e_1), \dots, p_u(e_n)$. On a donc $N = \frac{|\langle e_i, u\rangle|}{\|u\|}$ pour $1 \leq i \leq n$.

Comme la base $\left(\dfrac{e_i}{\|e_i\|}\right)_{1\leq i\leq n}$ est orthonormale, on a :

$$\|u\|^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{\langle e_i, u\rangle^2}{\|e_i\|^2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathrm{N}^2\|u\|^2}{\|e_i\|^2}$$

Comme u est non nul, on obtient :

$$\mathrm{N} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\|e_i\|^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

Ceci prouve que N est indépendante de u et nous donne bien une expression de N en fonction de $\|e_1\|, \dots, \|e_n\|$.

Solution 10

- Prouvons que **1.** $\Rightarrow$ **2.**

  Lorsque p est une projection orthogonale de E, on a $\mathrm{Im}(id_{\mathrm{E}} - p) = \mathrm{Ker}(p) = \mathrm{Im}(p)^{\perp}$ donc, pour tout x et y dans E, $p(x) \perp y - p(y)$ ie

  $$\langle p(x)|y\rangle = \langle p(x)|p(y)\rangle.$$

  Cette expression étant symétrique en (x, y), on a

  $$\begin{aligned}\langle p(x)|y\rangle &= \langle p(x)|p(y)\rangle = \langle p(y)|p(x)\rangle = \langle p(y)|x\rangle \\ &= \langle x|p(y)\rangle\end{aligned}$$

- Prouvons que **2.** $\Rightarrow$ **3.**

  Soit x dans E. Appliquons le **2.** à x et $y = p(x)$. On a

  $$\|p(x)\|^2 = \langle p(x)|p(x)\rangle = \langle x|p(x)\rangle.$$

  ainsi, d'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz,

  $$\|p(x)\|^2 \leqslant \|x\| \cdot \|p(x)\|.$$

  Si $p(x) = 0$, l'inégalité **3.** est banalement vérifiée. Si $p(x) \neq 0$, $\|p(x)\| > 0$ et en divisant membre à membre l'inégalité précédente, on aboutit à

  $$\|p(x)\| \leqslant \|x\|.$$

- Prouvons que **3.** $\Rightarrow$ **1.**

  Soient $x \in \mathrm{Im}\, p$, $y \in \mathrm{Ker}\, p$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. Si $y = 0$, alors $x \perp y$.
  Supposons maintenant $y \neq 0$. D'une part,

  $$\|p(x + \lambda y)\|^2 = \|x\|^2$$

  et d'autre part,

  $$\|x + \lambda y\|^2 = \|x\|^2 + 2\lambda\langle x|y\rangle + \lambda^2\|y\|^2$$

  D'après **2.**, $2\lambda\langle x|y\rangle + \lambda^2\|y\|^2 \geq 0$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$. Le discriminant de ce trinôme du second degré en λ est donc négatif, ce qui impose $\langle x|y\rangle^2 \leq 0$ et donc $\langle x|y\rangle = 0$. On a donc $x \perp y$. On en déduit que $\mathrm{Im}\, p \perp \mathrm{Ker}\, p$ et donc que p est une projection orthogonale.

Solution 11

---

1. Soient $x \in \mathrm{Ker}(\mathrm{Id}_{\mathrm{E}} - u)$ et $y \in \mathrm{Im}(\mathrm{Id}_{\mathrm{E}} - u)$. Alors $u(x) = x$ et il existe $a \in \mathrm{E}$ tel que $y = a - u(a)$. Ainsi

   $$\langle x, y\rangle = \langle x, a - u(a)\rangle = \langle x, a\rangle - \langle x, u(a) = \langle x, a\rangle - \langle u(x), u(a)\rangle = 0$$

   car u conserve le produit scalaire. Ainsi $\mathrm{Ker}(\mathrm{Id}_{\mathrm{E}} - u)$ et $\mathrm{Im}(\mathrm{Id}_{\mathrm{E}} - u)$ sont orthogonaux. On conclut grâce au théorème du rang.

2. D'après la question précédente, il existe $y \in \operatorname{Ker}(\mathrm{Id_E} - u)$ et $a \in \mathrm{E}$ tel que $x = y + a - u(a)$. Pour tout $k \in \mathbb{N}$, $u^k(x) = y + u^k(a) - u^{k+1}(a)$. Par télescopage, $x_n = y + \frac{1}{n}(a - u^n(a))$. On a alors

$$\|x_n - y\| \leq \frac{\|a\| + \|u^n(a)\|}{n} = \frac{2\|a\|}{n}$$

car u^n conserve la norme. En passant à la limite, on obtient que (x_n) converge vers y qui est justement la projection de x sur $\operatorname{Ker}(\mathrm{Id_E} - u)$ parallélement à $\operatorname{Im}(\mathrm{Id_E} - u)$.

Solution 12

1. Tout d'abord, pour $(\mathrm{P}, \mathrm{Q}) \in \mathrm{E}^2$, $\mathrm{P}(t)\mathrm{Q}(t)e^{-t} \underset{t \to +\infty}{=} o(1/t^2)$ par croissances comparées donc $\langle \mathrm{P}, \mathrm{Q} \rangle$ est bien défini. La bilinéarité et la positivité sont évidentes. Soit enfin $\mathrm{P} \in \mathrm{E}$ tel que $\langle \mathrm{P}, \mathrm{P} \rangle = 0$. Comme $t \mapsto \mathrm{P}^2(t)e^{-t}$ est continue, positive et d'intégrale nulle sur $\mathbb{R}_+$, cette fonction est nulle sur $\mathbb{R}_+$. Ainsi P admet une infinité de racines puis $\mathrm{P} = 0$.

2. Notons I_n l'intégrale à calculer. Par intégration par parties, $\mathrm{I}_n = n\mathrm{I}_{n-1}$ pour $n \in \mathbb{N}^*$. Or $\mathrm{I}_0 = 1$ donc $\mathrm{I}_n = n!$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

3. On orthonormalise la base $(1, \mathrm{X}, \mathrm{X}^2)$ de F via le procédé de Gram-Schmidt. On pose

$$\begin{aligned}
\mathrm{P}_0 &= \frac{1}{\|1\|} = 1 \\
\mathrm{P}_1 &= \frac{\mathrm{X} - \langle \mathrm{P}_0, \mathrm{X} \rangle \mathrm{P}_0}{\sqrt{\|\mathrm{X}\|^2 - \langle \mathrm{P}_0, \mathrm{X} \rangle^2}} = \frac{\mathrm{X} - \mathrm{I}_1 \mathrm{P}_0}{\sqrt{\mathrm{I}_2 - \mathrm{I}_1^2}} = \mathrm{X} - 1 \\
\mathrm{P}_2 &= \frac{\mathrm{X}^2 - \langle \mathrm{P}_0, \mathrm{X}^2 \rangle \mathrm{P}_0 - \langle \mathrm{P}_1, \mathrm{X}^2 \rangle \mathrm{P}_1}{\sqrt{\|\mathrm{X}^2\|^2 - \langle \mathrm{P}_0, \mathrm{X}^2 \rangle^2 - \langle \mathrm{P}_1, \mathrm{X}^2 \rangle^2}} = \frac{\mathrm{X}^2 - \mathrm{I}_2 \mathrm{P}_0 - (\mathrm{I}_3 - \mathrm{I}_2)\mathrm{P}_1}{\sqrt{\mathrm{I}_4 - \mathrm{I}_2^2 - (\mathrm{I}_3 - \mathrm{I}_2)^2}} = \frac{1}{2}\mathrm{X}^2 - 2\mathrm{X} + 1
\end{aligned}$$

Alors $(\mathrm{P}_0, \mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2)$ est une base orthonormée de F.

4. Comme $(\mathrm{P}_0, \mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2)$ est une base orthonormée de F, le projeté orthogonal de X^3 sur F est

$$\langle \mathrm{P}_0, \mathrm{X}^3 \rangle \mathrm{P}_0 + \langle \mathrm{P}_1, \mathrm{X}^3 \rangle \mathrm{P}_1 + \langle \mathrm{P}_2, \mathrm{X}^3 \rangle \mathrm{P}_2 = \mathrm{I}_3 \mathrm{P}_0 + (\mathrm{I}_4 - \mathrm{I}_3)\mathrm{P}_1 + (\mathrm{I}_5/2 - 2\mathrm{I}_4 + \mathrm{I}_3)\mathrm{P}_2 = 9\mathrm{X}^2 - 18\mathrm{X} + 6$$

5. Par inégalité de Cauchy-Schwarz,

$$\left| \int_0^{+\infty} \mathrm{P}(t)e^{-t} \, \mathrm{d}t \right| = |\langle \mathrm{P}, 1 \rangle| \leq \|\mathrm{P}\|\|1\| = \sqrt{\int_0^{+\infty} \mathrm{P}^2(t)e^{-t} \, \mathrm{d}t}$$

Solution 13

1. L'image de M est clairement engendrées par les deux premières colonnes de M qui sont linéairement indépendantes. Ainsi $\operatorname{rg}(\mathrm{M}) = 2$.

2. D'après le théorème du rang $\dim \operatorname{Ker} \mathrm{M} = 2$. Ainsi 0 est valeur propre de M est la dimension du sous-espace propre associé est $n - 2$. Il est engendré par les $\mathrm{E}_2 - \mathrm{E}_i$ pour $3 \leq i \leq n$ où $(\mathrm{E}_1, \dots, \mathrm{E}_n)$ est la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$.
Le calcul (laborieux) du polynôme caractéristique donne $\chi_\mathrm{M} = \mathrm{X}^n - (n-1)\mathrm{X}^{n-2}$. Ainsi M possède deux valeurs propres supplémentaires qui sont $\pm\sqrt{n-1}$. On aurait aussi pu remarquer que $\mathrm{M}^3 = (n-1)\mathrm{M}$. Les sous-espaces propres associés aux valeurs propres $\sqrt{n-1}$ et $-\sqrt{n-1}$ sont respectivement engendrés par $\mathrm{U} = \begin{pmatrix} \sqrt{n-1} \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$ et $\mathrm{V} = \begin{pmatrix} -\sqrt{n-1} \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$.

3. Notons u et v les vecteurs canoniquement associés à U et V. Puisque $\pm\sqrt{n-1}$ sont les seules valeurs propres non nulles de f, il est clair que $\operatorname{Im} f$ est engendré par u et v. Remarquons que u et v sont orthogonaux (ce qui est normal puisque M est symétrique). En notant p le projecteur orthogonal sur $\operatorname{Im} f$, on a donc,

$$\forall x \in \mathbb{R}^n,\ p(x) = \frac{\langle u, x\rangle}{\|u\|^2}u + \frac{\langle v, x\rangle}{\|v\|^2}v$$

Comme $\|u\|^2 = \|v\|^2 = 2(n-1)$, on obtient en notant P la matrice de p dans la base canonique,

$$\forall \mathrm{X} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}),\ \mathrm{PX} = \frac{1}{2n-2}\left((\mathrm{U}^\mathsf{T}\mathrm{X})\mathrm{U} + (\mathrm{V}^\mathsf{T}\mathrm{X})\mathrm{V}\right) = \frac{1}{2n-2}\left(\mathrm{UU}^\mathsf{T}\mathrm{X} + \mathrm{VV}^\mathsf{T}\mathrm{X}\right)$$

car $\mathrm{U}^\mathsf{T}\mathrm{X}$ et $\mathrm{V}^\mathsf{T}\mathrm{X}$ sont des scalaires. On en déduit que

$$\mathrm{P} = \frac{1}{2n-2}\left(\mathrm{UU}^\mathsf{T} + \mathrm{VV}^\mathsf{T}\right) = \frac{1}{n-1}\begin{pmatrix} n-1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Optimisation

Solution 14

Soit $\mathrm{E} = \mathcal{C}([0;\pi], \mathbb{R})$. On munit E du produit scalaire $(f, g) \mapsto \displaystyle\int_0^\pi f(x)g(x)\,\mathrm{d}x$.On pose pour $(a, b) \in \mathbb{R}^2$

$$f_{a,b} : \begin{cases} [0,\pi] & \longrightarrow & \mathbb{R} \\ x & \longmapsto & ax^2 + bx \end{cases}$$

et

$$\mathrm{F} = \left\{f_{a,b},\ (a, b) \in \mathbb{R}^2\right\} = \operatorname{vect}(f_1, f_2)$$

avec $f_1 = f_{0,1}$ et $f_2 = f_{1,0}$. F est un sous-espace vectoriel de E et $\phi(a, b) = \|\sin - f_{a,b}\|^2$. Le minimum de ϕ est donc atteint quand $f_{a,b}$ est la projection orthogonale de sin sur F et vaut alors $d(x, \mathrm{F})^2 = \|\sin - p_\mathrm{F}(\sin)\|^2$ où p_F est la projection orthogonale sur F.

Première méthode

On utilise le procédé d'orthonormalisation de Schmidt pour orthonormaliser la famille (f_1, f_2). On pose donc $e_1 = \dfrac{f_1}{\|f_1\|}$ et $e_2 = \dfrac{g}{\|g\|}$ avec $g = f_2 - \langle f_2, e_1\rangle e_1$. Alors $p_\mathrm{F}(\sin) = \langle \sin, e_1\rangle e_1 + \langle \sin, e_2\rangle e_2$. D'après le théorème de Pythagore,

$$\begin{aligned}
\|\sin - p_\mathrm{F}(\sin)\|^2 &= \|\sin\|^2 - \|p_\mathrm{F}(\sin)\|^2 \\
&= \|\sin\|^2 - \langle \sin, e_1\rangle^2 - \langle \sin, e_2\rangle^2 \\
&= \|\sin\|^2 - \frac{\langle \sin, f_1\rangle^2}{\|f_1\|^2} - \frac{\langle \sin, g\rangle^2}{\|g\|^2} \\
&= \|\sin\|^2 - \frac{\langle \sin, f_1\rangle^2}{\|f_1\|^2} - \frac{(\langle \sin, f_2\rangle - \langle f_2, e_1\rangle\langle \sin, e_1\rangle)^2}{\|f_2\|^2 - \langle f_2, e_1\rangle^2} \\
&= \|\sin\|^2 - \frac{\langle \sin, f_1\rangle^2}{\|f_1\|^2} - \frac{\left(\langle \sin, f_2\rangle - \frac{\langle f_2, f_1\rangle\langle \sin, f_1\rangle}{\|f_1\|^2}\right)^2}{\|f_2\|^2 - \frac{\langle f_2, f_1\rangle^2}{\|f_1\|^2}} \\
&= \|\sin\|^2 - \frac{\langle \sin, f_1\rangle^2}{\|f_1\|^2} - \frac{\left(\|f_1\|^2\langle \sin, f_2\rangle - \langle f_2, f_1\rangle\langle \sin, f_1\rangle\right)^2}{\|f_1\|^2\left(\|f_1\|^2\|f_2\|^2 - \langle f_2, f_1\rangle^2\right)}
\end{aligned}$$

A l'aide éventuellement d'intégrations par parties, on trouve

$$\|\sin\|^2 = \frac{\pi}{2} \qquad \|f_1\|^2 = \frac{\pi^3}{3} \qquad \|f_2\|^2 = \frac{\pi^5}{5} \qquad \langle f_1, f_2\rangle = \frac{\pi^4}{4} \qquad \langle \sin, f_1\rangle = \pi \qquad \langle \sin, f_2\rangle = \pi^2 - 4$$

On trouve finalement

$$\min_{\mathbb{R}^2} \phi = d(x, \mathrm{F})^2 = \frac{\pi}{2} - \frac{8}{\pi} + \frac{160}{\pi^3} - \frac{1280}{\pi^5}$$

Seconde méthode

On sait qu'il existe $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ tel que $p_\mathrm{F}(\sin) = af_2 + bf_1$. De plus, $\sin - p_\mathrm{F}(\sin) \in \mathrm{F}^\perp = \mathrm{vect}(f_1, f_2)^\perp$ donc

$$\begin{cases} \langle \sin - p_\mathrm{F}(\sin), f_1 \rangle = 0 \\ \langle \sin - p_\mathrm{F}(\sin), f_2 \rangle = 0 \end{cases}$$

Ceci équivaut à

$$\begin{cases} a\langle f_2, f_1 \rangle + b\|f_1\|^2 = \langle \sin, f_1 \rangle \\ a\|f_2\|^2 + b\langle f_1, f_2 \rangle = \langle \sin, f_2 \rangle \end{cases}$$

Or on a trouvé précédemment que

$$\|f_1\|^2 = \frac{\pi^3}{3} \qquad \|f_2\|^2 = \frac{\pi^5}{5} \qquad \langle f_1, f_2 \rangle = \frac{\pi^4}{4} \qquad \langle \sin, f_1 \rangle = \pi \qquad \langle \sin, f_2 \rangle = \pi^2 - 4$$

Ainsi

$$\begin{cases} \frac{\pi^4}{4} a + \frac{\pi^3}{3} b = \pi \\ \frac{\pi^5}{5} a + \frac{\pi^4}{4} b = \pi^2 - 4 \end{cases}$$

La résolution de ce système donne

$$a = \frac{20}{\pi^3} - \frac{320}{\pi^5} \qquad b = -\frac{12}{\pi^2} + \frac{240}{\pi^4}$$

A nouveau en vertu du théorème de Pythagore

$$\begin{aligned} \|\sin - p_\mathrm{F}(\sin)\|^2 &= \|\sin\|^2 - \|p_\mathrm{F}(\sin)\|^2 \\ &= \|\sin\|^2 - \|af_2 + bf_1\|^2 \\ &= \|\sin\|^2 - a^2\|f_2\|^2 - 2ab\langle f_1, f_2 \rangle - b^2\|f_1\|^2 \\ &= \frac{\pi}{2} - \frac{8}{\pi} + \frac{160}{\pi^3} - \frac{1280}{\pi^5} \end{aligned}$$

Solution 15

1. E est une partie non vide de $\mathbb{R}$ minorée par 0. Elle admet une borne inférieure.

2. Si $(\mathcal{S})$ admet une solution, alors $\mathrm{K} = 0$. Les pseudo-solutions de $(\mathcal{S})$ sont donc les éléments X de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ tels que $\|\mathrm{AX} - \mathrm{B}\|^2 = 0$ i.e. tels que $\mathrm{AX} - \mathrm{B} = 0$. Ce sont donc les solutions de $(\mathcal{S})$.

3. **Première méthode**

   Puisque $\{\mathrm{AX}, \mathrm{X} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})\} = \mathrm{Im}\,\mathrm{A}$, on peut affirmer que $\mathrm{X} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ est pseudo-solution de $(\mathcal{S})$ si et seulement si AX est la projection de B sur $\mathrm{Im}\,\mathrm{A}$. Or AX est la projection de B sur $\mathrm{Im}\,\mathrm{A}$ si et seulement si $\mathrm{AX} - \mathrm{B}$ est orthogonal à $\mathrm{Im}\,\mathrm{A}$. Or $\mathrm{AX} - \mathrm{B}$ est orthogonal à $\mathrm{Im}\,\mathrm{A}$ si et seulement si il est orthogonal à chaque colonne de A puisque les colonnes de A engendrent $\mathrm{Im}\,\mathrm{A}$. Ainsi $\mathrm{X} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ est pseudo-solution de $(\mathcal{S})$ si et seulement si $\mathrm{A}^\top(\mathrm{AX} - \mathrm{B}) = 0$ i.e. si et seulement si X est solution de $(\mathcal{S}')$.

   Seconde méthode

   Supposons que X soit solution de $(\mathcal{S}')$ i.e. $\mathrm{A}^\top(\mathrm{AX} - \mathrm{B}) = 0$. Alors pour tout $\mathrm{Y} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$

$$\begin{aligned} \|\mathrm{AY} - \mathrm{B}\|^2 &= \|\mathrm{A}(\mathrm{Y} - \mathrm{X}) + \mathrm{AX} - \mathrm{B}\|^2 \\ &= \|\mathrm{A}(\mathrm{Y} - \mathrm{X})\|^2 + \|\mathrm{AX} - \mathrm{B}\|^2 + 2\langle \mathrm{A}(\mathrm{Y} - \mathrm{X}), \mathrm{AX} - \mathrm{B} \rangle \\ &= \|\mathrm{A}(\mathrm{Y} - \mathrm{X})\|^2 + \|\mathrm{AX} - \mathrm{B}\|^2 + 2(\mathrm{Y} - \mathrm{X})^\top \mathrm{A}^\top(\mathrm{AX} - \mathrm{B}) \\ &= \|\mathrm{A}(\mathrm{Y} - \mathrm{X})\|^2 + \|\mathrm{AX} - \mathrm{B}\|^2 \geq \|\mathrm{AX} - \mathrm{B}\|^2 \end{aligned}$$

   Ainsi X est pseudo-solution de $(\mathcal{S})$.

   Supposons que X soit pseudo-solution de $(\mathcal{S})$. Alors pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$ et tout $\mathrm{Y} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$,

$$\|\mathrm{A}(\mathrm{X} + \lambda\mathrm{Y}) - \mathrm{B}\|^2 \geq \|\mathrm{AX} - \mathrm{B}\|^2$$

ou encore

$$\|(\mathrm{AX}-\mathrm{B})+\lambda\mathrm{AY}\|^2 \geq \|\mathrm{AX}-\mathrm{B}\|^2$$

ce qui donne via une identité remarquable

$$2\lambda\langle \mathrm{AY}, \mathrm{AX}-\mathrm{B}\rangle + \lambda^2\|\mathrm{AY}\|^2 \geq 0$$

Si on fixe Y, la dernière inégalité étant vraie pour tout $\lambda \in \mathbb{R}$, on a nécessairement $\langle \mathrm{AY}, \mathrm{AX}-\mathrm{B}\rangle = 0$. Ainsi pour tout $\mathrm{Y} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, $\langle \mathrm{AY}, \mathrm{AX}-\mathrm{B}\rangle = 0$ ou encore $\langle \mathrm{Y}, \mathrm{A}^\mathsf{T}(\mathrm{AX}-\mathrm{B}) = 0$, ce qui prouve que $\mathrm{A}^\mathsf{T}(\mathrm{AX}-\mathrm{B}) = 0$ et que X est solution de $(\mathcal{S}')$.

4. Soit $\mathrm{X} \in \operatorname{Ker} \mathrm{A}$. On a donc $\mathrm{AX} = 0$ puis $\mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{AX} = 0$ donc $\mathrm{X} \in \operatorname{Ker} \mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A}$. Ainsi $\operatorname{Ker} \mathrm{A} \subset \operatorname{Ker} \mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A}$.
Soit maintenant $\mathrm{X} \in \operatorname{Ker} \mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A}$. On a donc $\mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{AX} = 0$ puis $\mathrm{X}^\mathsf{T}\mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{AX} = 0$. Notons $\mathrm{Y} = \mathrm{AX}$. Ainsi $\mathrm{Y}^\mathsf{T}\mathrm{Y} = 0$ i.e. $\|\mathrm{Y}\|^2 = 0$ donc $\mathrm{Y} = 0$ i.e. $\mathrm{AX} = 0$. D'où $\mathrm{X} \in \operatorname{Ker} \mathrm{A}$. Ainsi $\operatorname{Ker} \mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A} \subset \operatorname{Ker} \mathrm{A}$.
Finalement, $\operatorname{Ker} \mathrm{A} = \operatorname{Ker} \mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A}$ et $\operatorname{rg} \mathrm{A} = \operatorname{rg} \mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A}$ via le théorème du rang.

5. Si $\operatorname{rg}(\mathrm{A}) = n$, alors $\operatorname{rg}(\mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A}) = n$. La matrice $\mathrm{A}^\mathsf{T}\mathrm{A}$ est une matrice carrée de taille n et de rang n le système $(\mathcal{S}')$ est donc de Cramer : il admet une unique solution i.e. $(\mathcal{S})$ admet une unique pseudo-solution.

Solution 16

Comme E est ouvert, un minimum de f est forcément un minimum local et donc un point critique. Pour $x \in \mathrm{E}$, $\nabla f(x) = 2\sum_{i=1}^{p}(x - x_i)$. L'unique point critique de f sur E est donc $m = \frac{1}{p}\sum_{i=1}^{p} x_i$. Il suffit donc de vérifier que m est bien un minimum : il sera nécessairement unique. Pour $x \in \mathrm{E}$

$$\begin{aligned}
f(x) &= \sum_{i=1}^{p} \|x - m + m - x_i\|^2 \\
&= \sum_{i=1}^{p} \left(\|x-m\|^2 + 2\langle x-m, m-x_i\rangle + \|m-x_i\|^2\right) \\
&= p\|x-m\|^2 + f(m) + \left\langle x-m, \sum_{i=1}^{p} m - x_i \right\rangle \\
&= p\|x-m\|^2 + f(m) \geq f(m)
\end{aligned}$$

car $\sum_{i=1}^{p} m - x_i = 0$. Ceci prouve que f atteint bien son minimum en m.

Solution 17

Pour $x \in \mathrm{E}$,

$$\begin{aligned}
f(x) &= \sum_{i=1}^{p} \|x - m + m - x_i\|^2 \\
&= \sum_{i=1}^{p} \left(\|x-m\|^2 + 2\langle x-m, m-x_i\rangle + \|m-x_i\|^2\right) \\
&= p\|x-m\|^2 + f(m) + \left\langle x-m, \sum_{i=1}^{p} m - x_i \right\rangle \\
&= p\|x-m\|^2 + f(m) \geq f(m)
\end{aligned}$$

car $\sum_{i=1}^{p} m - x_i = 0$. Ceci prouve que f atteint bien son minimum en m.

Solution 18

1. Remarquons que l'intégrale définissant $\langle \mathrm{P}, \mathrm{Q}\rangle$ est bien définie car $\mathrm{P}(t)\mathrm{Q}(t)e^{-t^2} \underset{t\to\pm\infty}{=} o(1/t^2)$.

   (i) $\langle\cdot,\cdot\rangle$ est clairement symétrique.

(ii) $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est bilinéaire par linéarité de l'intégrale.

(iii) $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est positive par positivité de l'intégrale.

(iv) Soit $\mathrm{P} \in \mathbb{R}[\mathrm{X}]$ tel que $\langle \mathrm{P}, \mathrm{P} \rangle = 0$. Alors $\displaystyle\int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{P}(t)^2 e^{-t^2}\,\mathrm{d}t = 0$. Comme $t \mapsto \mathrm{P}(t)e^{-t^2}$ est continue, elle est nulle sur $]-\infty, +\infty[$. Par conséquent, P admet une infinité de racines (tous les réels) puis $\mathrm{P} = 0$.

Ainsi $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est bien un produit scalaire sur $\mathbb{R}[\mathrm{X}]$.

2. Remarquons que $t \mapsto t^{2n+1}e^{-t^2}$ est impaire donc $\mathrm{A}_{2n+1} = 0$.
Par intégration par parties

$$\mathrm{A}_n = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} t^n e^{-t^2}\,\mathrm{d}t = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{n+1} \left[t^{n+1} e^{-t^2} \right]_{-\infty}^{+\infty} + \frac{2}{n+1} \int_{-\infty}^{+\infty} t^{n+2} e^{-t^2}\,\mathrm{d}t \right)$$

L'intégration par parties est légitimée par le fait que $\lim_{t \to \pm\infty} t^{n+1}e^{-t^2} = 0$. On en déduit que

$$\mathrm{A}_n = \frac{2}{n+1} \mathrm{A}_{n+2}$$

ou encore

$$\mathrm{A}_{n+2} = \frac{n+1}{2} \mathrm{A}_n$$

Comme $\mathrm{A}_0 = 1$, on en déduit que

$$\mathrm{A}_{2n} = \frac{(2n)!}{2^{2n} n!}$$

3. On peut orthonormaliser la base canonique $(1, \mathrm{X}, \mathrm{X}^2)$ via le processus de Gram-Schmidt.

Remarque. Si $(e_1, \dots, e_n)$ est une base d'un espace euclidien E, on peut l'orthonormaliser en une base orthonormée en posant

$$\forall k \in [\![1, n]\!],\ f_k = \frac{e_k - \sum_{i=0}^{k-1} \langle f_i, e_k \rangle f_i}{\left\| e_k - \sum_{i=0}^{k-1} \langle f_i, e_k \rangle f_i \right\|} = \frac{e_k - \sum_{i=0}^{k-1} \langle f_i, e_k \rangle f_i}{\sqrt{\|e_k\|^2 - \sum_{i=0}^{k-1} \langle f_i, e_k \rangle^2}}$$

(i) $\|1\|^2 = \mathrm{A}_0 = 1$ donc on pose $\mathrm{P}_0 = 1$.

(ii) $\langle 1, \mathrm{X} \rangle = \mathrm{A}_1 = 0$ et $\|\mathrm{X}\|^2 = \mathrm{A}_2 = \dfrac{1}{2}$ donc on pose $\mathrm{P}_1 = \mathrm{X}\sqrt{2}$.

(iii) $\langle 1, \mathrm{X}^2 \rangle = \mathrm{A}_2 = \dfrac{1}{2}$, $\langle \mathrm{X}, \mathrm{X}^2 \rangle = \mathrm{A}_3 = 0$ et $\|\mathrm{X}^2\|^2 = \mathrm{A}_4 = \dfrac{3}{4}$ donc on pose $\mathrm{P}_2 = \dfrac{2(2\mathrm{X}^2 - 1)}{\sqrt{5}}$.

$(\mathrm{P}_0, \mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2)$ est alors une base orthonormée de $\mathbb{R}_2[\mathrm{X}]$.

4. Si p désigne le projecteur orthogonal sur $\mathbb{R}_2[\mathrm{X}]$,

$$\begin{aligned} d(\mathrm{X}^3, \mathbb{R}_2[\mathrm{X}])^2 &= \|\mathrm{X}^3 - p(\mathrm{X}^3)\|^2 \\ &= \|\mathrm{X}^3\|^2 - \|p(\mathrm{X}^3)\|^2 \\ &= \|\mathrm{X}^3\|^2 - \langle \mathrm{X}^3, \mathrm{P}_0 \rangle^2 - \langle \mathrm{X}^3, \mathrm{P}_1 \rangle^2 - \langle \mathrm{X}^3, \mathrm{P}_2 \rangle^2 \\ &= \mathrm{A}_6 - \mathrm{A}_3^2 - 2\mathrm{A}_4 \qquad \text{car } \mathrm{X}^3\mathrm{P}_2 \text{ est impair} \\ &= \frac{15}{8} - \frac{3}{2} = \frac{3}{8} \end{aligned}$$

donc $d(\mathrm{X}^3, \mathbb{R}_2[\mathrm{X}]) = \dfrac{\sqrt{6}}{4}$.

Isométries vectorielles et matrices orthogonales

Solution 19

- Si $\mathrm{H} = \mathrm{K}$ alors $s_\mathrm{H} = s_\mathrm{K}$ et s_H et s_K commutent évidemment.
- Si $\mathrm{H}^\perp \subset \mathrm{K}$, alors on a également $\mathrm{K}^\perp \subset \mathrm{H}$. Soient $a, b \in \mathrm{E}$ tels que $\mathrm{H} = \mathrm{vect}(a)^\perp$ et $\mathrm{K} = \mathrm{vect}(b)^\perp$. On a donc $a \in \mathrm{K}$ et $b \in \mathrm{H}$. De plus, a et b sont orthogonaux. Enfin, $(\mathrm{H} \cap \mathrm{K})^\perp = \mathrm{H}^\perp + \mathrm{K}^\perp = \mathrm{vect}(a) \oplus \mathrm{vect}(b)$. Soit $x \in \mathrm{E}$. Il existe donc $u \in \mathrm{H} \cap \mathrm{K}$ et $\lambda, \mu \in \mathbb{K}$ tels que $x = u + \lambda a + \mu b$. On a alors :

$$s_\mathrm{H} \circ s_\mathrm{K}(x) = s_\mathrm{H}(u + \lambda a - \mu b) = u - \lambda a - \mu b$$
$$s_\mathrm{K} \circ s_\mathrm{H}(x) = s_\mathrm{K}(u - \lambda a + \mu b) = u - \lambda a - \mu b$$

  On a bien prouvé que s_H et s_K sommutent.

  Remarque. On a même prouvé que $s_\mathrm{H} \circ s_\mathrm{K} = s_\mathrm{K} \circ s_\mathrm{H} = s_{\mathrm{H}\cap\mathrm{K}}$.

- Réciproquement, si s_H et s_K commutent, soit à nouveau a tel que $\mathrm{H} = \mathrm{vect}(a)^\perp$. On a donc $s_\mathrm{H}(a) = -a$. Par conséquent, $s_\mathrm{H} \circ s_\mathrm{K}(a) = s_\mathrm{K} \circ s_\mathrm{H}(a) = -s_\mathrm{K}(a)$. Ceci implique que $s_\mathrm{K}(a) \in \mathrm{H}^\perp = \mathrm{vect}(a)$. Comme s_K est une isométrie, on a $s_\mathrm{K}(a) = a$ ou $s_\mathrm{K}(a) = -a$. Si $s_\mathrm{K}(a) = a$ alors $a \in \mathrm{K}$ et donc $\mathrm{H}^\perp \subset \mathrm{K}$. Si $s_\mathrm{K}(a) = -a$ alors $a \in \mathrm{K}^\perp$, c'est-à-dire que $\mathrm{K} = \mathrm{vect}(a)^\perp = \mathrm{H}$.

Solution 20

1. Soit (i, j, k) une base orthonormée directe de E et f vérifiant la condition de l'énoncé. Alors

$$f(i) = f(j) \wedge f(k) \qquad f(j) = f(k) \wedge f(i) \qquad f(k) = f(i) \wedge f(j)$$

   La famille $(f(i), f(j), f(k))$ est donc orthogonale. Par conséquent

$$\|f(i)\| = \|f(j)\|\|f(k)\|$$
$$\|f(j)\| = \|f(k)\|\|f(i)\|$$
$$\|f(k)\| = \|f(i)\|\|f(j)\|$$

   Si l'un des vecteurs $f(i)$, $f(j)$, $f(k)$ est nul alors ces 3 vecteurs sont nuls et donc $f = 0$. Si les 3 vecteurs sont non nuls, on tire des 3 dernières relations que :

$$\|f(i)\| = \|f(j)\| = \|f(k)\| = 1$$

   Comme de plus $f(i) = f(j) \wedge f(k)$, la famille $(f(i), f(j), f(k))$ est une base orthonormée directe. On a donc $f \in \mathrm{SO(E)}$. Réciproquement, si $f = 0$ ou $f \in \mathrm{SO(E)}$, alors f vérifie bien la condition de l'énoncé puisque les applications $(u, v) \mapsto f(u \wedge v)$ et $(u, v) \mapsto f(u) \wedge f(v)$ sont bilinéaires et que ces deux applications coïncident sur une base orthonormée directe. L'ensemble des endomorphismes recherché est donc $\mathrm{SO(E)} \cup \{0\}$.

2. Tout le raisonnement précédent reste valable à l'exception près que $f(i) = -f(j) \wedge f(k)$ et la famille $(f(i), f(j), f(k))$ est donc une base orthonormée indirecte. f est donc soit l'endomorphisme nul soit une isométrie indirecte. L'ensemble recherché est donc $(\mathrm{O(E)} \setminus \mathrm{SO(E)}) \cup \{0\}$.

Solution 21

Notons P le plan d'équation $x + 2y - 3z = 0$. On a $\mathrm{P} = \{(3z - 2y, y, z), (y, z) \in \mathbb{R}^2\} = \mathrm{vect}((-2, 1, 0), (3, 0, 1))$. Notons $u_1 = (-2, 1, 0)$ et $u_2 = (3, 0, 1)$. Notons s la symétrie de l'énoncé. On va déterminer les images des vecteurs de la base canonique par s. Un vecteur normal à P est $n = u_1 \wedge u_2 = (1, 2, -3)$. Le projeté orthogonal d'un vecteur u sur $\mathrm{P}^\perp = \mathrm{vect}(n)$ est donc $p(u) = \dfrac{\langle u, n\rangle}{\|n\|^2} n$. On a alors $s(u) = u - 2p(u) = u - 2\dfrac{\langle u, n\rangle}{\|n\|^2} n$. Il suffit alors d'appliquer à $e_1 = (1, 0, 0)$, $e_2 = (0, 1, 0)$ et $e_3 = (0, 0, 1)$. On trouve

$$s(e_1) = \frac{1}{7}(6, -2, 3) \qquad s(e_2) = \frac{1}{7}(-2, 3, 6) \qquad s(e_3) = \frac{1}{7}(3, 6, -2)$$

La matrice de s dans la base canonique est donc $\frac{1}{7}\begin{pmatrix} 6 & -2 & 3 \\ -2 & 3 & 6 \\ 3 & 6 & -2 \end{pmatrix}$.

Solution 22

Notons L_1, L_2, L_3 les lignes de A. La matrice A est une matrice de rotation si et seulement si la famille (L_1, L_2, L_3) est orthonormale et si $\det A = 1$.
La condition $\|L_1\| = 1$ équivaut à $a^2 = \frac{1}{6}$ i.e. $a = \pm\frac{1}{\sqrt{6}}$.
La condition $\|L_2\| = 1$ équivaut à $b^2 = \frac{2}{3}$ i.e. $b = \pm\frac{2}{\sqrt{6}}$.
La condition $\|L_3\| = 1$ équivaut à $c^2 = \frac{1}{6}$ i.e. $c = \pm\frac{1}{\sqrt{6}}$.
La condition $\langle L_1, L_2\rangle = 0$ équivaut à $ab = -\frac{1}{3}$.
La condition $\langle L_1, L_3\rangle = 0$ équivaut à $ac = \frac{1}{6}$.
La condition $\langle L_2, L_3\rangle = 0$ équivaut à $bc = -\frac{1}{6}$.
La condition $\det A = 1$ équivaut à $-a + 2b - c = \sqrt{6}$.
Toutes ces conditions équivalent à $\begin{cases} a = \varepsilon\frac{1}{\sqrt{6}} \\ b = -\varepsilon\frac{2}{\sqrt{6}} \\ dC = \varepsilon\frac{1}{\sqrt{6}} \\ -a + 2b - c = \sqrt{6} \\ \varepsilon = \pm 1 \end{cases}$. On trouve $\varepsilon = -1$ puis $a = -\frac{1}{\sqrt{6}}$, $b = \frac{2}{\sqrt{6}}$, $c = -\frac{1}{\sqrt{6}}$.

Solution 23

1. Soient s une réflexion de E, (u, v) une base de E, et $A = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{pmatrix}$ la matrice de s dans la base (u, v). Recherchons l'axe de s.

   Les vecteurs de l'axe sont les vecteurs de matrice colonne X dans la base (u, v) vérifiant AX = X. Posons $X = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$. Alors

$$\begin{aligned} AX = X &\iff \begin{cases} x\cos\theta + y\sin\theta = x \\ x\sin\theta - y\cos\theta = y \end{cases} \iff \begin{cases} x(\cos\theta - 1) + y\sin\theta = 0 \\ x\sin\theta - y(\cos\theta + 1) = 0 \end{cases} \\ &\iff \begin{cases} -2x\sin^2\frac{\theta}{2} + 2y\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2} = 0 \\ 2x\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2} - 2y\cos^2\frac{\theta}{2} = 0 \end{cases} \iff x\sin\frac{\theta}{2} - y\cos\frac{\theta}{2} = 0 \end{aligned}$$

   La dernière équivalence est justifiée par le fait que $\sin\frac{\theta}{2}$ et $\cos\frac{\theta}{2}$ ne peuvent être simultanément nuls. Un vecteur directeur de l'axe est donc $\cos\frac{\theta}{2}u + \sin\frac{\theta}{2}v$. On en déduit que $\frac{\theta}{2}$ est l'angle orienté de droites entre l'axe des abscisses i.e. $\operatorname{vect}(u)$ et l'axe de la réflexion s (modulo π puisqu'il s'agit d'un angle orienté de droites).

2. Soit s_1 et s_2 deux réflexions de E. On peut choisir une base orthonormée $\mathcal{B}$ de E de telle sorte que la matrice de s_1 dans cette base soit $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$. La matrice de s_2 dans $\mathcal{B}$ est de la forme $\begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{pmatrix}$. La matrice de $s_1 + s_2$ dans $\mathcal{B}$ est donc $A = \begin{pmatrix} 1 + \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -1 - \cos\theta \end{pmatrix}$.

$s_1 + s_2$ est une réflexion si et seulement si la matrice A est orthogonale de déterminant -1. Ceci nous donne donc les conditions

$$\begin{cases} (1+\cos\theta)^2 + \sin^2\theta = 1 \\ \sin^2\theta + (-1-\cos\theta)^2 = 1 \\ (1+\cos\theta)(-1-\cos\theta) - \sin^2\theta = -1 \end{cases}$$

Un rapide calcul montre que chacune des équations de ce système équivaut à $2\cos\theta = -1$ i.e. $\theta \equiv \pm\frac{2\pi}{3} \pmod{2\pi}$. On a donc $\frac{\theta}{2} \equiv \pm\frac{\pi}{3} \pmod{\pi}$. Avec notre choix de base, l'axe de s_1 est l'axe des abscisses. A l'aide de la première question, on peut donc conclure que $s_1 + s_2$ est une réflexion si et seulement si l'angle non orienté de droites entre l'axe de s_1 et l'axe de s_2 vaut $\frac{\pi}{3}$.

Solution 24

Soient $y \in \operatorname{Im} v$ et $z \in \operatorname{Ker} v$. Il existe donc $x \in \mathrm{E}$ tel que $y = v(x)$ i.e. $y = x - u(x)$. On a également $v(z) = 0_{\mathrm{E}}$ i.e. $z = u(z)$.

$$(y|z) = (x - u(x)|z) = (x|z) - (u(x)|z) = (x|z) - (u(x)|u(z)) = 0$$

car u conserve le produit scalaire. On a donc prouvé que $\operatorname{Im} v$ et $\operatorname{Ker} v$ sont orthogonaux.
En particulier, ces deux sous-espaces vectoriels sont en somme directe. De plus, d'après le théorème du rang $\dim \operatorname{Ker} v + \dim \operatorname{Im} v = \dim \mathrm{E}$, donc $\operatorname{Im} v$ et $\operatorname{Ker} v$ sont supplémentaires.

Solution 25

1. L'application Φ est clairement symétrique. Elle est bilinéaire par linéarité de l'intégrale. Elle est positive par positivité de l'intégrale. Enfin, soit $f \in \mathrm{E}$ telle que $\Phi(f,f) = 0$. On a donc $\int_0^1 f(t)^2 \, \mathrm{d}t = 0$. Comme l'application f^2 est positive et continue sur $[0,1]$, elle est nulle sur $[0,1]$. Par conséquent, f est également nulle sur $[0,1]$. De plus, f est une combinaison linéaire des fonctions 1-périodiques e_1, e_2, e_3. Donc f est aussi 1-périodique. Elle est alors nulle sur $\mathbb{R}$. L'application Φ est une forme bilinéaire symétrique définie positive : c'est un produit scalaire.

2. Les calculs sont élémentaires :

$$\|e_1\|^2 = 2\int_0^1 \frac{1}{2} \, \mathrm{d}t = 1$$
$$\|e_2\|^2 = 2\int_0^1 \cos^2(2\pi t) \, \mathrm{d}t = \int_0^1 (1+\cos(4\pi t)) \, \mathrm{d}t = 1$$
$$\|e_3\|^2 = 2\int_0^1 \sin^2(2\pi t) \, \mathrm{d}t = \int_0^1 (1-\cos(4\pi t)) \, \mathrm{d}t = 1$$
$$\langle e_1, e_2\rangle = \sqrt{2}\int_0^1 \cos(2\pi t) \, \mathrm{d}t = 0$$
$$\langle e_1, e_3\rangle = \sqrt{2}\int_0^1 \sin(2\pi t) \, \mathrm{d}t = 0$$
$$\langle e_2, e_3\rangle = 2\int_0^1 \sin(2\pi t)\cos(2\pi t) \, \mathrm{d}t = \int_0^1 \sin(4\pi t) \, \mathrm{d}t = 0$$

La base (e_1, e_2, e_3) est donc orthonormée.

3. **a.** Soient $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ et $f_1, f_2 \in \mathrm{E}$. $\tau_x(\lambda f_1 + \mu f_2)$ est l'application $t \mapsto (\lambda f_1 + \mu f_2)(x-t)$, c'est-à-dire l'application $t \mapsto \lambda f_1(x-t) + \mu f_2(x-t)$ i.e. l'application $\lambda\tau_x(f_1) + \mu\tau_x(f_2)$. Ainsi τ_x est linéaire.
De plus, $\tau_x(e_1) = e_1$. De plus, pour $x, t \in \mathbb{R}$:

$$\cos(2\pi(x-t)) = \cos(2\pi x)\cos(2\pi t) + \sin(2\pi x)\sin(2\pi t)$$
$$\sin(2\pi(x-t)) = \sin(2\pi x)\cos(2\pi t) - \cos(2\pi x)\sin(2\pi t)$$

Autrement dit, $\tau_x(e_2) = \cos(2\pi x)e_2 + \sin(2\pi x)e_3$ et $\tau_x(e_3) = \sin(2\pi x)e_2 - \cos(2\pi x)e_3$. Donc $\tau_x(e_1)$, $\tau_x(e_2)$ et $\tau_x(e_3)$ appartiennent à $\operatorname{vect}(e_1, e_2, e_3) = \mathrm{E}$. Comme (e_1, e_2, e_3) est une famille génératrice de E, on en déduit que $\tau_x(f) \in \mathrm{E}$ pour tout $f \in \mathrm{E}$. Ainsi f est bien un endomorphisme de E.

b. Les calculs précédents montrent que la matrice de τ_x dans la base (e_1, e_2, e_3) est $\mathrm{M}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\pi x) & \sin(2\pi x) \\ 0 & \sin(2\pi x) & -\cos(2\pi x) \end{pmatrix}$.

c. On vérifie sans peine que M_x est orthogonale. Comme M_x est la matrice de τ_x dans une base orthonormale, on en déduit que τ_x est une isométrie vectorielle.

d. On a $\det \mathrm{M} = -1$ donc τ_x est une isométrie vectorielle indirecte. Comme $\dim \mathrm{E} = 3$, τ_x est une réflexion ou une anti-rotation.

Cherchons les vecteurs invariants par τ_x. On résout le système $\mathrm{MX} = \mathrm{X}$ où $\mathrm{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$.

$$\begin{aligned}
\mathrm{MX} = \mathrm{X} &\iff \begin{cases} x_1 = x_1 \\ x_2\cos(2\pi x) + x_3\sin(2\pi x) = x_2 \\ x_2\sin(2\pi x) - x_3\cos(2\pi x) = x_3 \end{cases} \\
&\iff \begin{cases} x_2(\cos(2\pi x) - 1) + x_3\sin(2\pi x) = 0 \\ x_2\sin(2\pi x) - x_3(1 + \cos(2\pi x)) = 0 \end{cases} \\
&\iff \begin{cases} -2x_2\sin^2(\pi x) + 2x_3\sin(\pi x)\cos(\pi x) = 0 \\ 2x_2\sin(\pi x)\cos(\pi x) - 2x_3\cos^2(\pi x) = 0 \end{cases} \\
&\iff x_2\sin(\pi x) - x_3\cos(\pi x) = 0
\end{aligned}$$

Le sous-espace des vecteurs invariants par τ_x est donc le plan P_x d'équation $x_2\sin(\pi x) - x_3\cos(\pi x) = 0$ dans la base (e_1, e_2, e_3). τ_x est donc une réflexion. On peut également définir P_x par $\mathrm{P}_x = \mathrm{vect}(e_1, \cos(\pi x)e_2 + \sin(\pi x)e_3)$.

Solution 26

Notons r la rotation de l'énoncé. La droite $\mathcal{D}$ d'équation $\begin{cases} x = 0 \\ z = 0 \end{cases}$ admet pour vecteur directeur $\vec{u}(0,0,1)$. L'image de $\mathcal{D}$ par r est une droite dirigée par $r(\vec{u})$. Notons $\vec{b} = \dfrac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}$. Le vecteur $\vec{b}$ a donc pour coordonnées $\dfrac{1}{\sqrt{3}}(1,1,1)$. Notons Δ l'axe de la rotation. Le projeté orthogonal de $\vec{u}$ sur Δ est $\vec{v} = (\vec{u}.\vec{b})\vec{b}$. Le vecteur $\vec{v}$ a donc pour coordonnées $\dfrac{1}{3}(1,1,1)$. On a alors $\vec{u} = \vec{v} + \vec{w}$ avec $\vec{w} \in \Delta^\perp$. Le vecteur $\vec{w}$ a pour coordonnées $\dfrac{1}{3}(-1,-1,2)$. Mais alors $r(\vec{u}) = r(\vec{v}) + r(\vec{w}) = \vec{v} + r(\vec{w})$ car $\vec{v} \in \Delta$. Comme $\vec{w} \in \Delta^\perp$, $r(\vec{w}) = \cos\dfrac{\pi}{6}\vec{w} + \sin\dfrac{\pi}{6}\vec{b} \wedge \vec{w}$. Après calcul, le vecteur $r(\vec{w})$ admet pour coordonnées $\dfrac{1}{\sqrt{3}}(0,-1,1)$. Ainsi $r(\vec{u})$ admet donc pour coordonnées $\left(\dfrac{1}{3}, \dfrac{1}{3} - \dfrac{1}{\sqrt{3}}, \dfrac{1}{3} + \dfrac{1}{\sqrt{3}}\right)$.

Solution 27

1. Les vecteurs $\vec{a}(1,1,1)$ et $\vec{b}(1,-1,0)$ sont des vecteurs du plan d'équation $x + y - 2z = 0$. Le vecteur $\vec{c}(1,1,-2)$ est normal à ce plan. On vérifie que $\vec{a}$ et $\vec{b}$ sont orthogonaux. Posons $\vec{u}_1 = \dfrac{\vec{a}}{\|\vec{a}\|}$, $\vec{u}_2 = \dfrac{\vec{b}}{\|\vec{b}\|}$ et $\vec{u}_3 = \dfrac{\vec{c}}{\|\vec{c}\|}$. La famille (u_1, u_2, u_3) est une base orthonormale de E et dans cette base, la matrice de s_1 est $\mathrm{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$. La matrice de (u_1, u_2, u_3) dans la base canonique est $\mathrm{P} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{2}{\sqrt{6}} \end{pmatrix}$. La matrice de s_1 dans la base canonique est donc $\mathrm{M}_1 = \mathrm{PMP}^\top = \dfrac{1}{3}\begin{pmatrix} 2 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & -1 \end{pmatrix}$.

2. Notons A la matrice de l'énoncé. A est clairement orthogonale et, en développant par rapport à la première ligne, $\det \mathrm{A} = 1$. f est donc une rotation. On a clairement $f(\vec{a}) = \vec{a}$ donc l'axe de f est $\mathrm{vect}(\vec{a})$. Notons θ l'angle de f si on dirige l'axe par $\vec{a}$. On a

$\operatorname{tr}(A) = 1 + 2\cos\theta = 0$ donc $\theta \equiv \pm\frac{2\pi}{3} \pmod{2\pi}$. De plus, on a vu que $\vec{b}$ est orthogonal à $\vec{a}$ et, si $\mathcal{B}$ désigne la base canonique, $\det_{\mathcal{B}}(\vec{b}, f(\vec{b}), \vec{a}) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 3 > 0$ donc $\sin\theta > 0$. On en déduit $\theta \equiv \frac{2\pi}{3} \pmod{2\pi}$.

Remarque. On peut raisonner plus géométriquement. Si on note $A(1,0,0)$, $B(0,1,0)$, $C(0,0,1)$ la rotation affine d'axe $O + \operatorname{vect}(\vec{a})$ associée à f effectue une permutation circulaire des trois points A, B, C. Comme le vecteur $\vec{a}$ est normal au plan ABC, la restriction de la rotation à ce plan est une rotation plane d'angle θ. Il est alors évident que $\theta \equiv \frac{2\pi}{3} \pmod{2\pi}$.

3. Il suffit de poser $s_2 = s_1 \circ f$ et $s_3 = f \circ s_1$. Les matrices de s_2 et s_3 dans la base canonique sont donc respectivement $M_2 = M_1 A = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} -1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & 2 \end{pmatrix}$ et $M_3 = AM_1 = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 2 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & 2 \end{pmatrix}$. On trouve les plans plans de réflexions de s_2 et s_3 en résolvant $M_2X = X$ et $M_3X = X$ avec $X = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$. On trouve pour s_2 le plan d'équation $2x - y - z = 0$ et pour s_3 le plan d'équation $2y - x - z = 0$.

Solution 28

Supposons que f est une symétrie orthogonale. Alors f est une isométrie vectorielle et donc A est orthogonale i.e. $A^{\mathsf{T}}A = I_n$. De plus, f est une symétrie donc $A^2 = I_n$. On en déduit que $A^{\mathsf{T}} = A$ et donc A est symétrique. Réciproquement, supposons A orthogonale et symétrique. Alors f est une isométrie vectorielle. Or $A^{\mathsf{T}}A = I_n$ et $A^{\mathsf{T}} = A$ donc $A^2 = I_n$ et f est une symétrie. Il est alors classique de montrer que f est une symétrie orthogonale.

Solution 29

f et g sont deux rotations. Si l'une des deux est l'identité, alors on peut toujours considérer que f et g sont deux rotations de même axe.
Supposons maintenant f et g distinctes de l'identité. Soit u un vecteur directeur de l'axe de f. Comme f et g commutent, $f(g(u)) = g(f(u)) = g(u)$. Donc $g(u)$ appartient à l'axe de f, c'est-à-dire $\operatorname{vect}(u)$. Mais comme g est une isométrie, $\|g(u)\| = \|u\|$ et donc $g(u) = u$ ou $g(u) = -u$.
Si $g(u) = u$, alors u est un vecteur de l'axe de g. f et g sont donc deux rotations de même axe.
Si $g(u) = -u$, notons v un vecteur directeur de l'axe de g de sorte que $g(v) = v$. Puisque g est une isométrie $\langle g(u), g(v)\rangle = \langle u, v\rangle$ et donc $\langle u, v\rangle = 0$. Les axes de f et g sont donc orthogonaux. Comme $g(u) = -u$, g est une rotation d'angle π autrement dit une symétrie orthogonale par rapport à son axe. On a également $g(f(v)) = f(v)$ donc $f(v)$ appartient à l'axe de g et on a à nouveau $f(v) = v$ ou $f(v) = -v$. On ne peut avoir $f(v) = v$ puisque v n'appartient pas à l'axe de f (il lui est orthogonal et non nul). Ainsi $f(v) = -v$, ce qui prouve que f est une rotation d'angle π donc une symétrie orthogonale par rapport à son axe.

Solution 30

1. Soit $(x, y) \in \operatorname{Ker}(f - \operatorname{Id}_E) \times \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E)$. Alors $f(x) = x$ et il existe $a \in E$ tel que $y = f(a) - a$. Alors

$$\langle x, y\rangle = \langle x, f(a) - a\rangle = \langle x, f(a)\rangle - \langle x, a\rangle = \langle f(x), f(a)\rangle - \langle x, a\rangle = 0$$

car $f \in O(E)$. Ainsi $\operatorname{Ker}(f - \operatorname{Id}_E) \subset \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E)^{\perp}$.
De plus, d'après le théorème du rang,

$$\dim \operatorname{Ker}(f - \operatorname{Id}_E) = \dim E - \dim \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E) = \dim \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E)^{\perp}$$

Par conséquent, $\operatorname{Ker}(f - \operatorname{Id}_E) = \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E)^{\perp}$.

2. Supposons que $(f - \operatorname{Id}_E)^2 = 0$. Alors $\operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E) \subset \operatorname{Ker}(f - \operatorname{Id}_E)$. D'après la question précédente, on a donc $\operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E) \subset \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E)^{\perp}$. Ainsi $F \subset \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E) \cap \operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E)^{\perp} = \{0_E\}$ puis $\operatorname{Im}(f - \operatorname{Id}_E) = \{0_E\}$ i.e. $f = \operatorname{Id}_E$.

Remarque. On peut également directement en terme d'adjoint sans utiliser la question précédente. Comme $f \in O(E)$, $f^* = f^{-1}$. Remarquons alors que

$$(f - \operatorname{Id})^* \circ (f - \operatorname{Id}_E) = f^* \circ f - f - f^* + \operatorname{Id}_E = 2\operatorname{Id}_E - f - f^{-1} = -f^{-1} \circ (f - \operatorname{Id}_E)^2 = 0$$

Alors pour tout $x \in \mathrm{E}$,
$$\|f(x)-x\|^2 = \langle f(x)-x, f(x)-x\rangle = \langle x, (f-\mathrm{Id}_\mathrm{E})^* \circ (f-\mathrm{Id}_\mathrm{E})(x)\rangle = 0$$
puis $f = \mathrm{Id}_\mathrm{E}$.

Solution 31

Puisque O(E) est un groupe, $r \circ s$ est une isométrie vectorielle de E. Comme $\det(r\circ s) = \det(r)\det(s) = 1 \times -1 = -1$, $r \circ s$ est une isométrie vectorielle indirecte. Or E est un plan euclidien donc $r \circ s$ est une réflexion. Ainsi
$$= r\circ s\circ r\circ s = (r\circ s)^2 = \mathrm{Id}_\mathrm{E}$$
d'où $s \circ r \circ s = r^{-1}$ et $r\circ s\circ r = s^{-1} = s$.

Solution 32

Comme O est orthogonale, $\mathrm{O}^\top\mathrm{O} = \mathrm{I}_n$. On en déduit en particulier,
$$\mathrm{A}^\top\mathrm{A} + \mathrm{C}^\top\mathrm{C} = \mathrm{I}_p \qquad \mathrm{A}^\top\mathrm{B} + \mathrm{C}^\top\mathrm{D} = 0$$
$$\mathrm{B}^\top\mathrm{B} + \mathrm{D}^\top\mathrm{D} = \mathrm{I}_q \qquad \mathrm{B}^\top\mathrm{A} + \mathrm{D}^\top\mathrm{C} = 0$$

- Si $\det\mathrm{A} = \det\mathrm{D} = 0$, alors on a bien l'inégalité demandée.
- Si $\det\mathrm{D} \neq 0$, posons $\mathrm{M} = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{A}^\top & \mathrm{C}^\top \\ \hline \mathbf{0} & \mathrm{D}^\top \end{array}\right)$ et $\mathrm{N} = \mathrm{MO} = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{I}_p & \mathbf{0} \\ \hline \mathrm{D}^\top\mathrm{C} & \mathrm{D}^\top\mathrm{D} \end{array}\right)$. Les matrices M et N étant triangulaires par blocs, on a $\det\mathrm{M} = \det(\mathrm{A}^\top)\det(\mathrm{D}^\top) = \det\mathrm{A}\det\mathrm{D}$ et $\det\mathrm{N} = \det\mathrm{I}_p\det(\mathrm{D}^\top\mathrm{D}) = (\det\mathrm{D})^2$. De plus, $\det\mathrm{N} = \det(\mathrm{MO}) = \det\mathrm{M}\det\mathrm{O}$. On en déduit que $(\det\mathrm{D})^2 = \det\mathrm{A}\det\mathrm{D}\det\mathrm{O}$. Puisque $\det\mathrm{D} \neq 0$, $\det\mathrm{D} = \det\mathrm{A}\det\mathrm{O}$ et donc $(\det\mathrm{D})^2 = (\det\mathrm{A})^2(\det\mathrm{O})^2$. Or O est orthogonale donc $\det\mathrm{O} = \pm 1$ et $(\det\mathrm{O})^2 = 1$. On a bien l'égalité demandée.
- Si $\det\mathrm{A} \neq 0$, posons $\mathrm{M} = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{A}^\top & \mathbf{0} \\ \hline \mathrm{B}^\top & \mathrm{D}^\top \end{array}\right)$ et $\mathrm{N} = \mathrm{MO} = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{A}^\top\mathrm{A} & \mathrm{A}^\top\mathrm{B} \\ \hline \mathbf{0} & \mathrm{I}_q \end{array}\right)$. Les matrices M et N étant triangulaires par blocs, on a $\det\mathrm{M} = \det(\mathrm{A}^\top)\det(\mathrm{D}^\top) = \det\mathrm{A}\det\mathrm{D}$ et $\det\mathrm{N} = \det(\mathrm{A}^\top\mathrm{A})\det\mathrm{I}_q = (\det\mathrm{A})^2$. De plus, $\det\mathrm{N} = \det(\mathrm{MO}) = \det\mathrm{M}\det\mathrm{O}$. On en déduit que $(\det\mathrm{A})^2 = \det\mathrm{A}\det\mathrm{D}\det\mathrm{O}$. Puisque $\det\mathrm{A} \neq 0$, $\det\mathrm{A} = \det\mathrm{D}\det\mathrm{O}$ et donc $(\det\mathrm{A})^2 = (\det\mathrm{D})^2(\det\mathrm{O})^2$. On conclut comme précédemment en remarquant que $(\det\mathrm{O})^2 = 1$.

Solution 33

Première méthode. On a $\mathrm{B} = \mathrm{P}^{-1}\mathrm{AP}$ où P est une matrice de passage entre deux bases orthonormales. P est donc une matrice orthogonale. On a donc $\mathrm{P}^{-1} = \mathrm{P}^\top$ puis $\mathrm{B} = \mathrm{P}^\top\mathrm{AP}$. Ainsi
$$\mathrm{tr}(\mathrm{B}^\top\mathrm{B}) = \mathrm{tr}(\mathrm{P}^\top\mathrm{A}^\top\mathrm{PP}^\top\mathrm{AP} = \mathrm{tr}(\mathrm{P}^\top\mathrm{A}^\top\mathrm{AP}) = \mathrm{tr}((\mathrm{P}^\top\mathrm{A}^\top\mathrm{A})\mathrm{P}) = \mathrm{tr}(\mathrm{P}(\mathrm{P}^\top\mathrm{A}^\top\mathrm{A})) = \mathrm{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{A})$$

Deuxième méthode. Notons u l'endomorphisme dont A et B sont les matrices dans deux bases orthonormales. Alors $\mathrm{tr}(u^*\circ u) = \mathrm{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{A}) = \mathrm{tr}(\mathrm{B}^\top\mathrm{B})$.

Solution 34

1. Notons $\mathrm{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$. Alors $\mathrm{X}^\top\mathrm{X}$ est une matrice carrée réelle de taille 1 i.e. un réel et $\mathrm{X}^\top\mathrm{X} = \sum_{k=1}^n x_k^2$. Ainsi $\mathrm{X}^\top\mathrm{X} \geq 0$ puisque les x_k sont des réels et $\mathrm{X}^\top\mathrm{X} = 0$ implique $\forall k \in [\![1,n]\!]$, $x_k = 0$ i.e. $\mathrm{X} = 0$.
2. Soit $\mathrm{X} \in \mathrm{Ker}(\mathrm{I}_n + \mathrm{M})$. On a donc $(\mathrm{I}_n+\mathrm{M})\mathrm{X} = 0$ i.e. $\mathrm{MX} = -\mathrm{X}$. Ainsi $\mathrm{X}^\top\mathrm{MX} = -\mathrm{X}^\top\mathrm{X}$. Mais en transposant l'égalité $\mathrm{MX} = -\mathrm{X}$, on obtient $\mathrm{X}^\top\mathrm{M}^\top = -\mathrm{X}^\top$ et donc $\mathrm{X}^\top\mathrm{M} = \mathrm{X}^\top$ puisque $\mathrm{M}^\top = -\mathrm{M}$. Ainsi $\mathrm{X}^\top\mathrm{MX} = \mathrm{X}^\top\mathrm{X}$. Par conséquent, $\mathrm{X}^\top\mathrm{X} = -\mathrm{X}^\top\mathrm{X}$ et donc $\mathrm{X}^\top\mathrm{X} = 0$. D'après la question précédente, $\mathrm{X} = 0$. D'où $\mathrm{Ker}(\mathrm{I}_n + \mathrm{M}) = \{0\}$ et $\mathrm{I}_n + \mathrm{M}$ est inversible.

3. On a $A^\top A = \left((I_n+M)^{-1}\right)^\top (I_n-M)^\top(I_n-M)(I_n+M)^{-1}$. Or

$$\left((I_n+M)^{-1}\right)^\top = \left((I_n+M)^\top\right)^{-1} = (I_n-M)^{-1} \quad \text{et} \quad (I_n-M)^\top = I_n+M$$

Ainsi $A^\top A = (I_n-M)^{-1}(I_n+M)(I_n-M)(I_n+M)^{-1}$. Or I_n-M et I_n+M commutent donc

$$A^\top A = (I_n-M)^{-1}(I_n-M)(I_n+M)(I_n+M)^{-1} = I_n$$

Ainsi A est orthogonale.

Solution 35

Soit $A \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ laissant $(\mathbb{R}_+)^n$ invariant. On notera $(C_j)_{1\le j\le n}$ la famille des vecteurs colonnes de A et $(L_i)_{1\le i\le n}$ la famille des vecteurs lignes de A. Notons $(E_i)_{1\le j\le n}$ la base canonique de $\mathbb{R}^n$. Comme $E_i \in (\mathbb{R}_+)^n$ pour tout $i \in [\![1,n]\!]$, $C_i = AE_i \in (\mathbb{R}_+)^n$ pour tout $i \in [\![1,n]\!]$. Autrement dit A est à coefficients positifs.
Soit $(i,j) \in [\![1,n]\!]^2$. Supposons $A_{ij} \neq 0$, c'est-à-dire $A_{ij} > 0$ puisque A est à coefficients positifs. Soit $k \in [\![1,n]\!] \setminus \{i\}$.

$$\langle L_i, L_k\rangle = \sum_{l=1}^n A_{il}A_{kl} \geq A_{ij}A_{kj}$$

car A est à coefficients positifs. Or la famille des vecteurs lignes de A est orthonormée donc $\langle L_i, L_k\rangle = 0$. On en déduit que $A_{kj} = 0$. En raisonnnant sur les colonnes de A, on démontre de la même manière que pour $k \in [\![1,n]\!], \setminus\{j\}$, $A_{ik} = 0$.
Ceci signifie que chaque ligne et chaque colonne comporte au plus un coefficient non nul. Puisque les vecteurs lignes et colonnes de A sont normés, chaque ligne et chaque colonne possède exactement un coefficient non nul valant ± 1, en fait 1 car A est à coefficients positifs. Ainsi A est une matrice de permutation.
Réciproquement, toute matrice de permutation est bien orthogonale et laisse stable $(\mathbb{R}_+)^n$.

Solution 36

Supposons $A = 0$. Alors il est clair que $A = \mathrm{com}(A) = 0$.
Supposons $A \in SO(n)$. On sait que $\mathrm{com}(A)A^\top = \det(A)I_n$. Puisque $A \in SO(n)$, $\det(A) = 1$ et $A^\top = A^{-1}$. Il s'ensuit que $\mathrm{com}(A) = A$.
Supposons maintenant $A = \mathrm{com}(A)$. Puisque $\mathrm{com}(A)^\top A = \det(A)I_n$, $A^\top A = \det(A)I_n$.

- Si $\det(A) = 0$, $A^\top A = 0$ et, a fortiori, $\mathrm{tr}(A^\top A) = 0$ et donc $A = 0$ puisque $(M,N) \mapsto \mathrm{tr}(M^\top N)$ est un produit scalaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.
- Si $\det(A) \neq 0$, alors $\mathrm{tr}(A^\top A) = \mathrm{tr}(\det(A)I_n) = n\det A$. En particulier, $\det(A) > 0$ à nouveau car $(M,N) \mapsto \mathrm{tr}(M^\top N)$ est un produit scalaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Par ailleurs, $\det(A^\top A) = \det(\det(A)I_n)$ ou encore $\det(A)^2 = \det(A)^n$. Puisque $n \neq 2$ et $\det(A) > 0$, $\det(A) = 1$. Ainsi $A^\top A = I_n$ et $A \in SO(n)$.

Adjoint

Solution 37

Si $f = 0$, alors $f^* = 0$ et $|||f||| = |||f^*||| = 0$.
Supposons maintenant $f \neq 0$. Soit x un vecteur unitaire de E. Alors

$$\begin{aligned}
\|f(x)\|^2 &= \langle f(x), f(x)\rangle \\
&= \langle f^* \circ f(x), x\rangle && \text{par définition de l'adjoint} \\
&\leq \|f^* \circ f(x)\|\|x\| && \text{d'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz} \\
&\leq |||f^*|||\,|||f|||\,\|x\|^2 && \text{par définition de la norme subordonnée} \\
&\leq |||f^*|||\,|||f||| && \text{car } x \text{ est unitaire}
\end{aligned}$$

Puisque $|||f||| = \sup_{\|x\|=1} \|f(x)\|$, on a par passage à la borne supérieure,

$$|||f|||^2 \leq |||f^*|||\,|||f|||$$

et donc $|||f||| \leq |||f^*|||$ puisque $|||f||| > 0$.
En appliquant ce qui précède à f^* qui est également non nul, on obtient $|||f^*||| \leq |||f^{**}|||$. Or $f^{**} = f$ donc, par double inégalité, $|||f^*||| = |||f|||$.

Solution 38

1. Il est clair que $\mathrm{Ker}(u) \subset \mathrm{Ker}(u^* \circ u)$. Soit $x \in \mathrm{Ker}(u^* \circ u)$. Alors $u^* \circ u(x) = 0$. En particulier, $\langle u^* \circ u(x), x\rangle = 0$ puis $\langle u(x), u(x)\rangle = 0$ par définition de l'adjoint. On en déduit que $u(x) = 0_{\mathrm{E}}$ par axiome de séparation. Ainsi $x \in \mathrm{Ker}(u)$ puis $\mathrm{Ker}(u^* \circ u) \subset \mathrm{Ker}(u)$. Par double inclusion, $\mathrm{Ker}(u) = \mathrm{Ker}(u^* \circ u)$.

2. Puisque $\mathrm{Ker}(u) = \mathrm{Ker}(u^* \circ u)$, on en déduit d'après le théorème du rang que $\mathrm{rg}(u) = \mathrm{rg}(u^* \circ u)$. En appliquant ce résultat à u^* et en utilisant l'involutivité de l'adjonction, on obtient $\mathrm{rg}(u^*) = \mathrm{rg}(u \circ u^*)$. Enfin, en notant A la matrice de u dans une base orthonormée de E,
$$\mathrm{rg}(u) = \mathrm{rg}(\mathrm{A}) = \mathrm{rg}(\mathrm{A}^\top) = \mathrm{rg}(u^*)$$

Solution 39

Soit $x \in \mathrm{Ker}(u + u^*)$. Alors $\|u(x) + u^*(x)\|^2 = 0$. En développant, on obtient
$$\|u(x)\|^2 + \|u^*(x)\|^2 + 2\langle u(x), u^*(x)\rangle = 0$$
Mais par définition de l'adjoint, $\langle u(x), u^*(x)\rangle = \langle u^2(x), x\rangle$. Or $\mathrm{Im}\, u = \mathrm{Ker}\, u$ donc $u^2 = 0$. Finalement
$$\|u(x)\|^2 + \|u^*(x)\|^2 = 0$$
et donc $u(x) = u^*(x) = 0$. Ainsi $x \in \mathrm{Ker}\, u \cap \mathrm{Ker}\, u^*$. On montre classiquement que $\mathrm{Ker}\, u^* = (\mathrm{Im}\, u)^\perp$. Or $\mathrm{Im}\, u = \mathrm{Ker}\, u$ donc $\mathrm{Ker}\, u^* = (\mathrm{Ker}\, u)^\perp$. On en déduit que
$$x \in \mathrm{Ker}\, u \cap (\mathrm{Ker}\, u)^\perp = \{0\}$$
Ainsi $\mathrm{Ker}(u + u^*) = \{0\}$ et u est injectif et donc bijectif puisque E est de dimension finie.

Solution 40

Il est clair que $\mathrm{Ker}(f) \cap \mathrm{Ker}(f^*) \subset \mathrm{Ker}(f + f^*)$. Réciproquement, soit $x \in \mathrm{Ker}(f + f^*)$, soit encore $f(x) = -f^*(x)$. Comme $(f^*)^* = f$, on a :
$$\|f^*(x)\|^2 = \langle f^*(x), f^*(x)\rangle = \langle x, f \circ f^*(x)\rangle$$
Or,
$$(f \circ f^*)(x) = f(f^*(x)) = f(-f(x)) = -f^2(x) = 0$$
car $\mathrm{Im}(f) \subset \mathrm{Ker}(f)$. Ainsi $\|f^*(x)\|^2 = 0$ puis $f^*(x) = 0$ et $f(x) = -f^*(x) = 0$. Ainsi $x \in \mathrm{Ker}(f) \cap \mathrm{Ker}(f^*)$.
Par double inclusion, $\mathrm{Ker}(f + f^*) = \mathrm{Ker}(f) \cap \mathrm{Ker}(f^*)$.

Solution 41

Soit $(\mathrm{M}, \mathrm{N}) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^2$. Posons $\mathrm{P} = g_{\mathrm{A}}^*(\mathrm{M})$. Alors, par définition de l'adjoint
$$\langle \mathrm{P}, \mathrm{N}\rangle = \langle g_{\mathrm{A}}^*(\mathrm{M}), \mathrm{N}\rangle = \langle \mathrm{M}, g_{\mathrm{A}}(\mathrm{N})\rangle = \langle \mathrm{M}, \mathrm{AN}\rangle$$
Par définition du produit scalaire usuel sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$,
$$\langle \mathrm{M}, \mathrm{AN}\rangle = \mathrm{tr}(\mathrm{M}^\top \mathrm{AN}) = \mathrm{tr}((\mathrm{A}^\top \mathrm{M})^\top \mathrm{N}) = \langle \mathrm{A}^\top \mathrm{M}, \mathrm{N}\rangle$$
Ainsi $\langle \mathrm{P}, \mathrm{N}\rangle = \langle \mathrm{A}^\top \mathrm{M}, \mathrm{N}\rangle$ ou encore $\langle \mathrm{P} - \mathrm{A}^\top \mathrm{M}, \mathrm{N}\rangle = 0$. Ceci étant valable pour tout $\mathrm{N} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $\mathrm{P} - \mathrm{A}^\top \mathrm{M} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^\perp = \{0\}$. Ainsi $g_{\mathrm{A}}^*(\mathrm{M}) = \mathrm{P} = \mathrm{A}^\top \mathrm{M}$. Finalement, $g_{\mathrm{A}}^* = g_{\mathrm{A}^\top}$.

Solution 42

1. Soit $x \in \mathrm{E}$. Alors
$$\begin{aligned} & x \in \mathrm{Ker}\, u^* \\ \iff & u^*(x) = 0_{\mathrm{E}} \\ \iff & \forall y \in \mathrm{E},\ \langle u^*(x), y\rangle = 0 \\ \iff & \forall y \in \mathrm{E},\ \langle x, u(y)\rangle = 0 \\ \iff & \forall z \in \mathrm{Im}\, u,\ \langle x, z\rangle \\ \iff & x \in (\mathrm{Im}\, u)^\perp \end{aligned}$$

Ainsi $\operatorname{Ker} u^* = (\operatorname{Im} u)^\perp$.
En appliquant cette égalité à u^*, on obtient $\operatorname{Ker} u = (\operatorname{Im} u^*)^\perp$ car $(u^*)^* = u$. Mais comme E est de dimension finie, $(\operatorname{Ker} u)^\perp = \operatorname{Im} u^*$.

2. D'après le théorème du rang et la question précédente

$$\operatorname{rg}(u^*) = \dim \mathrm{E} - \dim \operatorname{Ker}(u^*) = \dim \operatorname{Ker}(u^*)^\perp = \dim \operatorname{Im}(u) = \operatorname{rg}(u)$$

Solution 43

1. En passant à l'adjoint dans l'égalité de l'énoncé, on obtient également

$$u^* \circ u + \alpha u^* + \beta u = 0$$

En soustrayant cette égalité de celle de l'énoncé, on obtient

$$(\alpha - \beta)(u - u^*) = 0$$

donc $u = u^*$. Finalement, $u^2 + \alpha u + \beta u = 0$ ou encore $u^2 = -(\alpha + \beta)u$.

- Si $\alpha + \beta \neq 0$, posons $\lambda = -(\alpha + \beta)$ et $p = \dfrac{1}{\lambda} u$. On a donc bien $u = \lambda p$. De plus,

$$p^2 = \frac{1}{\lambda^2} u^2 = \frac{1}{\lambda} u = p$$

  Et enfin, comme $u = u^*$, $p = p^*$ donc p est un projecteur orthogonal.
- Si $\alpha + \beta = 0$, alors $u^* \circ u = u^2 = 0$. Ainsi

$$\forall x \in \mathrm{E},\ \|u(x)\|^2 = \langle u(x), u(x) \rangle = \langle u^* \circ u(x), x \rangle = 0$$

  donc $u = 0$ et on peut choisir $\lambda = 0$ et $p = 0$.

2.
- Supposons $\alpha = \beta \neq 0$. Soit $(x, y) \in \operatorname{Ker} u \times \operatorname{Im} u$. Il existe donc $z \in \mathrm{E}$ tel que $y = u(z)$. Alors

$$\langle x, y \rangle = \langle x, u(z) \rangle = \langle u^*(x), z \rangle$$

  Or $u^* \circ u(x) = \alpha u(x) + \alpha u^*(x)$ donc $\alpha u^*(x) = 0_\mathrm{E}$ puisque $x \in \operatorname{Ker} u$ puis $u^*(x) = 0_\mathrm{E}$ acr $\alpha \neq 0$. Finalement $\langle x, y \rangle = 0$ puis $\operatorname{Ker} u \perp \operatorname{Im} u$.
- Supposons $\alpha = \beta = 0$. Alors $u^* \circ u = 0$ puis $u = 0$ comme montré précédemment. On a donc $\operatorname{Ker} u = \mathrm{E} \perp \{0_\mathrm{E}\} = \operatorname{Im} u$.

Solution 44

On se donne $\mathcal{B}$ une base orthonormée de E. Alors

$$\forall (f, g) \in \mathcal{L}(\mathrm{E})^2,\ \operatorname{tr}(f^* \circ g) = \operatorname{tr}(\operatorname{mat}_\mathcal{B}(f^* \circ g)) = \operatorname{tr}(\operatorname{mat}_\mathcal{B}(f^*) \circ \operatorname{mat}_\mathcal{B}(g)) = \operatorname{tr}(\operatorname{mat}_\mathcal{B}(f)^\top \operatorname{mat}_\mathcal{B}(g))$$

On conclut alors facilement car on sait que $(\mathrm{A}, \mathrm{B}) \mapsto \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top \mathrm{B})$ est un produit scalaire sur $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$.

Solution 45

Dans ce qui suit, on note A la matrice de f dans une base orthonormée de E. Ainsi $\mathrm{A}^\top$ est la matrice de f^* dans cette même base. On note également $n = \dim \mathrm{E}$.

1. La trace est invariante par transposition :

$$\operatorname{tr}(f) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top) = \operatorname{tr}(f^*)$$

2. Le déterminant est invariant par transposition :

$$\det(f) = \det(\mathrm{A}) = \det(\mathrm{A}^\top) = \det(f^*)$$

3. On sait que

$$\chi_f = \chi_\mathrm{A} = \det(\mathrm{XI}_n - \mathrm{A}) = \det((\mathrm{XI}_n - \mathrm{A})^\top) = \det(\mathrm{XI}_n - \mathrm{A}^\top) = \chi_{\mathrm{A}^\top} = \chi_{f^*}$$

4. Le spectre est l'ensemble des racines du polynôme caractéristique : comme $\chi_f = \chi_{f^*}$, $\mathrm{Sp}(f) = \mathrm{Sp}(f^*)$.

5. Le rang est invariant par transposition

$$\dim(\mathrm{E}_\lambda(f)) = \dim \mathrm{Ker}(f - \lambda\,\mathrm{Id}_\mathrm{E}) = \dim \mathrm{Ker}(\mathrm{A} - \lambda \mathrm{I}_n) \dim \mathrm{Ker}((\mathrm{A} - \lambda \mathrm{I}_n)^\top) = \dim \mathrm{Ker}(\mathrm{A}^\top - \lambda \mathrm{I}_n) = \dim \mathrm{Ker}(f^* - \lambda\,\mathrm{Id}_\mathrm{E}) = \dim \mathrm{E}_\lambda(f^*)$$

Solution 46

1. Notons $\mathrm{M} = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix}$ la matrice de u dans la base $\mathcal{B}$. Puisque $\mathcal{B}$ est orthonormée, la matrice de u^* dans cette base est $\mathrm{M}^\top = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$.
La condition $u^* \circ u = u \circ u^*$ donne $\mathrm{M}^\top\mathrm{M} = \mathrm{M}\mathrm{M}^\top$ ou encore

$$\begin{pmatrix} a^2 + b^2 & ac + bd \\ ac + bd & c^2 + d^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2 + c^2 & ab + cd \\ ab + cd & b^2 + d^2 \end{pmatrix}$$

Notamment $b^2 = c^2$ donc $c = \pm b$. On ne peut avoir $b = c$ car sinon M serait symétrique et u serait alors diagonalisable car $\mathcal{B}$ est orthonormée. Notamment, χ_u serait scindé, ce qui n'est pas. On en déduit que $b \neq 0$ et $c = -b$. Or $ac + bd = ab + cd$ ce qui donne $a = d$ car $c = -b$ et $b \neq 0$. La matrice de u dans la base $\mathcal{B}$ est donc bien de la forme annoncée.

2. Soit $\mathcal{B}$ une base *orthonormée* de E adaptée à la décomposition $\mathrm{E} = \mathrm{F} \oplus \mathrm{F}^\perp$. Comme F est stable par u, la matrice M de u dans cette base $\mathcal{B}$ est de la forme

$$\mathrm{M} = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{A} & \mathrm{B} \\ \hline 0 & \mathrm{C} \end{array}\right)$$

avec A et C des matrices carrées. Comme $\mathcal{B}$ est orthonormée, la matrice de u dans la base $\mathcal{B}$ est

$$\mathrm{M}^\top = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{A}^\top & 0 \\ \hline \mathrm{B}^\top & \mathrm{C}^\top \end{array}\right)$$

La condition $u^* \circ u = u \circ u^*$ donne $\mathrm{M}^\top\mathrm{M} = \mathrm{M}\mathrm{M}^\top$. En raisonnant par blocs, on obtient :

$$\left(\begin{array}{c|c} \mathrm{A}^\top\mathrm{A} & \mathrm{A}^\top\mathrm{B} \\ \hline \mathrm{B}^\top\mathrm{A} & \mathrm{B}^\top\mathrm{B} + \mathrm{C}^\top\mathrm{C} \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{A}\mathrm{A}^\top + \mathrm{B}\mathrm{B}^\top & \mathrm{B}\mathrm{C}^\top \\ \hline \mathrm{C}\mathrm{B}^\top & \mathrm{C}\mathrm{C}^\top \end{array}\right)$$

Notamment, $\mathrm{B}^\top\mathrm{B} + \mathrm{C}^\top\mathrm{C} = \mathrm{C}\mathrm{C}^\top$ puis $\mathrm{tr}(\mathrm{B}^\top\mathrm{B}) + \mathrm{tr}(\mathrm{C}^\top\mathrm{C}) = \mathrm{tr}(\mathrm{C}\mathrm{C}^\top)$. Mais $\mathrm{tr}(\mathrm{C}^\top\mathrm{C}) = \mathrm{tr}(\mathrm{C}\mathrm{C}^\top)$ donc $\|\mathrm{B}\|^2 = \mathrm{tr}(\mathrm{B}^\top\mathrm{B}) = 0$ puis $\mathrm{B} = 0$. Ceci prouve que $\mathrm{F}^\perp$ est stable par u.
On obtient alors également que $\mathrm{A}^\top\mathrm{A} = \mathrm{A}\mathrm{A}^\top$. Mais A est la matrice de u_F dans une base orthonormée de F donc $u_\mathrm{F}^* \circ u_\mathrm{F} = u_\mathrm{F} \circ u_\mathrm{F}^*$ ce qui prouve que u_F est un endomorphisme normal de F. De même, $\mathrm{C}^\top\mathrm{C} = \mathrm{C}\mathrm{C}^\top$ donc $\mathrm{U}_{\mathrm{F}^\perp}$ est un endomorphisme normal de $\mathrm{F}^\perp$.

3. On raisonne par récurrence sur la dimension n de E. Si $n = 1$, le résultat est trivialement vrai et si $n = 2$, il est encore vrai d'après la première question.
Supposons le résultat vrai pour toute dimension de E inférieure ou égale à $n - 1 \in \mathbb{N}^*$. Soit alors u un endomorphisme normal d'un espace euclidien E de dimension n.
Si u possède une valeur propre λ, on choisit un vecteur propre x associé à cette valeur propre. Alors u induit un endomorphisme normal de $\mathrm{vect}(x)^\perp$. On applique l'hypothèse de récurrence à cet endomorphisme induit, ce qui donne le résultat.
Si u ne possède pas de valeur propre, alors son polynôme minimal μ_u ne possède que des facteurs irréductibles de degré 2. Soit P un tel facteur que l'on suppose unitaire. Il existe donc un polynôme Q tel que $\mu_u = \mathrm{PQ}$. Alors $\mathrm{P}(u) \circ \mathrm{Q}(u) = 0$ donc $\mathrm{P}(u)$ n'est pas inverse sinon $\mathrm{Q}(u) = 0$, ce qui contredit la minimalité de μ_u. Il existe donc $x \in \mathrm{E}$ non nul tel que $\mathrm{P}(u)(x) = 0$. La famille $(x, u(x))$ est libre car u ne possède pas de valeur propre. De plus, il existe $(c, d) \in \mathbb{R}^2$ tel que $\mathrm{P} = \mathrm{X}^2 + c\mathrm{X} + d$. Alors $u^2(x) = -cu(x) - dx$ de sorte que $\mathrm{F} = \mathrm{vect}(x, u(x))$ est stable par u. On sait que u_F est un endomorphisme normal de F. De plus, $\chi_{\mathrm{U}_\mathrm{F}} = \mathrm{P}$ est irréductible donc, d'après la première question, sa matrice dans une base orthonormée de F est de la forme $\begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$ avec $(a, b) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^*$. On applique alors l'hypothèse de récurrence à l'endomorphisme normal $u_{\mathrm{F}^\perp}$ ce qui permet de conclure.

Solution 47

1. Soit $\lambda \in \mathbb{R}$. Alors

$$\begin{aligned}
x \in \operatorname{Ker}(u - \lambda \operatorname{Id}_E) &\iff u(x) = \lambda x \\
&\iff \|u(x) - \lambda x\|^2 = 0 \\
&\iff \langle u(x) - \lambda x, u(x) - \lambda x\rangle = 0 \\
&\iff \langle (u - \lambda \operatorname{Id}_E)^* \circ (u - \lambda \operatorname{Id}_E)(x), x\rangle = 0 \\
&\iff \langle (u^* - \lambda \operatorname{Id}_E) \circ (u - \lambda \operatorname{Id}_E)(x), x\rangle = 0 \\
&\iff \langle (u - \lambda \operatorname{Id}_E) \circ (u^* - \lambda \operatorname{Id}_E)(x), x\rangle = 0 \qquad \text{car } u^* \circ u = u \circ u^* \\
&\iff \langle (u - \lambda \operatorname{Id}_E) \circ (u - \lambda \operatorname{Id}_E)^*(x), x\rangle = 0 \\
&\iff \langle (u - \lambda \operatorname{Id}_E)^*(x), (u - \lambda \operatorname{Id}_E)^*(x)\rangle = 0 \\
&\iff \|u^*(x) - \lambda x\|^2 = 0 \\
&\iff u^*(x) = \lambda x \\
&\iff x \in \operatorname{Ker}(u^* - \lambda \operatorname{Id}_E)
\end{aligned}$$

   On en déduit que $\operatorname{Sp}(u) = \operatorname{Sp}(u^*)$ et que pour tout $\lambda \in \operatorname{Sp}(u) = \operatorname{Sp}(u^*)$, $E_\lambda(u) = E_\lambda(u^*)$.

2. Soient λ et μ deux valeurs propres distinctes de u. Soient $x \in E_\lambda(u)$ et $y \in E_\mu(u)$. Alors

$$\langle u(x), y\rangle = \lambda\langle x, y\rangle$$

   Mais on a également,

$$\langle u(x), y\rangle = \langle x, u^*(y)\rangle$$

   Or d'après la question précédente, $y \in E_\mu(u) = E_\mu(u^*)$ donc $u^*(y) = \mu y$. On en déduit que $\lambda\langle x, y\rangle = \mu\langle x, y\rangle$ puis $\langle x, y\rangle = 0$ car $\lambda \neq \mu$. Ainsi $E_\lambda(u) \perp E_\mu(u^*)$.

Endomorphismes auto-adjoints et matrices symétriques

Solution 48

Remarquons que $\phi = p + q$ où p et q sont les projecteurs orthogonaux respectifs sur $\operatorname{vect}(a)$ et $\operatorname{vect}(b)$. Ainsi ϕ est un endomorphisme auto-adjoint comme somme d'endomorphismes auto-adjoints. En particulier, ϕ est diagonalisable. On va de toute façon s'en rendre compte en déterminant les éléments propres de ϕ.
Remarquons déjà que ϕ est nulle sur $(\operatorname{vect}(a) + \operatorname{vect}(b))^\perp$. Ainsi $(\operatorname{vect}(a) + \operatorname{vect}(b))^\perp \subset \operatorname{Ker}\phi$. Réciproquement si $x \in \operatorname{Ker}\phi$, $\langle a, x\rangle a + \langle b, x\rangle b = 0$ de sorte que $\langle a, x\rangle = \langle b, x\rangle = 0$ car la famille (a, b) est libre. Ainsi $x \in \operatorname{vect}(a)^\perp \cap \operatorname{vect}(b)^\perp = (\operatorname{vect}(a) + \operatorname{vect}(b))^\perp$. Finalement, $\operatorname{Ker}\phi = (\operatorname{vect}(a) + \operatorname{vect}(b))^\perp$.
La nature géométrique de ϕ incite fortement à penser que $a+b$ et $a-b$ sont vecteurs propres. En effet, ces deux vecteurs sont non nuls puisque a et b sont non colinéaires et un calcul simple montrer que $\phi(a) = a + \langle a, b\rangle b$ et $\pi(b) = b + \langle a, b\rangle b$ donc $\phi(a + b) = (1 + \langle a, b\rangle)(a + b)$ et $\phi(a-b) = (1-\langle a, b\rangle)(a-b)$. Donc $a+b$ et $a-b$ sont bien des vecteurs propres associés aux valeurs propres $1+\langle a, b\rangle$ et $1-\langle a, b\rangle$. Si $\langle a, b\rangle \neq 0$, ces valeurs propres sont distinctes : les sous-espaces propres associées à ces valeurs propres sont donc de dimension 1 puisqu'on a déjà vu que le noyau i.e. le sous-espace propre associé à la valeur propre 0 était de dimension $n - 2$. Ces sous-espaces propres sont donc respectivement $\operatorname{vect}(a + b)$ et $\operatorname{vect}(a - b)$. Si $\langle a, b\rangle = 0$, alors le sous-espace propre associé à la valeur propre 1 contient $\operatorname{vect}(a + b, a - b) = \operatorname{vect}(a, b)$ et est en fait exactement égal à celui-ci puisque la diemnsion de $\operatorname{vect}(a, b)$ est 2 et que $\operatorname{Ker}\phi$ est déjà de dimension $n - 2$.

Récapitulons. Dans tous les cas, 0 est valeur propre de ϕ et le sous-espace propre associé est $(\operatorname{vect}(a) + \operatorname{vect}(b))^\perp$. Si $\langle a, b\rangle \neq 0$, ϕ possède deux valeurs propres supplémentaires $1 + \langle a, b\rangle$ et $1 - \langle a, b\rangle$ et les sous-espaces propres respectivement associés sont $\operatorname{vect}(a + b)$ et $\operatorname{vect}(a - b)$. Si $\langle a, b\rangle = 0$, ϕ possède 1 comme seule valeur propre en sus de 0 et le sous-espace propre associé est $\operatorname{vect}(a, b)$. Il est d'ailleurs géométriquement clair dans ce cas que ϕ induit l'identité sur $\operatorname{vect}(a, b)$.

Solution 49

1. Pour tout $x \in \mathrm{E}$,

$$\langle f(x), x\rangle = \sum_{k=1}^{n} \langle x, u_k\rangle^2 \geq 0$$

donc v est positif. Supposons maintenant que $\langle f(x), x\rangle = 0$. Tous les termes de la somme précédente étant positifs, ils sont tous nuls. Ainsi x est orthogonal à chacun des u_k et donc au sous-espace vectoriel qu'ils engendrent, c'est-à-dire E. Ainsi $x = 0_{\mathrm{E}}$.

2. Considérons une base orthonormée $(e_1, \dots, e_n)$ de E formée de vecteurs propres de E. Notons $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ les valeurs propres associées à ces vecteurs propres. Ces valeurs propres sont toutes strictement positives. Comme $(e_1, \dots, e_n)$ est une base de E, il existe un unique endomorphisme g de E tel que $g(e_i) = \dfrac{1}{\sqrt{\lambda_i}} e_i$. On a clairement $g^2(e_i) = \dfrac{1}{\lambda_i} e_i = f^{-1}(e_i)$ pour tout $i \in [\![1, n]\!]$. Comme $(e_1, \dots, e_n)$ est une base de E, $g^2 = f^{-1}$.
Soit $(x, y) \in \mathrm{E}^2$. Alors

$$\langle g(x), y\rangle = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \langle x, e_i\rangle\langle y, e_i\rangle = \langle x, g(y)\rangle$$

donc g est auto-adjoint. Les valeurs propres de g sont les réels strictement positifs $\dfrac{1}{\sqrt{\lambda_i}}$ donc v est défini positif.

3. Soit $i \in [\![1, n]\!]$. Alors

$$u_i = f(f^{-1}(u_i)) = \sum_{k=1}^{n} \langle f^{-1}(u_i), u_k\rangle u_k$$

Mais comme $(u_1, \dots, u_n)$ est libre, $\langle f^{-1}(u_i), u_k\rangle = \delta_{i,k}$ pour tout $k \in [\![1, n]\!]$.
Soit $(i, j) \in [\![1, n]\!]^2$. Alors, comme g est auto-adjoint,

$$\langle g(u_i), g(u_j)\rangle = \langle g^2(u_i), u_j\rangle = \langle f^{-1}(u_i), u_j\rangle = \delta_{i,j}$$

Ainsi $(g(u_1), \dots, g(u_n))$ est bien une base orthonormée de E.

Solution 50

D'après le théorème spectral, il existe une base orthonormée $(e_1, \dots, e_n)$ de E formée de vecteurs propres de f. Notons λ_i la valeur propre associée à e_i. Comme $\mathrm{Sp}(f) \subset \mathbb{R}_+$, $\lambda_i \geq 0$ pour tout $i \in [\![1, n]\!]$. Comme $(e_1, \dots, e_n)$ est une base de E, on définit bien un endomorphisme g de E en posant $g(e_i) = \sqrt{\lambda_i} e_i$ pour tout $i \in [\![1, n]\!]$. On a alors clairement $g^2(e_i) = \lambda_i e_i = f(e_i)$ pour tout $i \in [\![1, n]\!]$. Comme $(e_1, \dots, e_n)$ est une base de E, on a bien $g^2 = f$.
Enfin, la matrice de g dans la base orthonormale $(e_1, \dots, e_n)$ est diagonale donc symétrique : g est donc un endomorphisme auto-adjoint.

Solution 51

Soit $x \in \operatorname{Ker} f$ et $y \in \operatorname{Im} f$. Il existe donc $z \in \mathrm{E}$ tel que $y = f(z)$. Ainsi

$$\langle x, y\rangle = \langle x, f(z)\rangle = \langle f(x), z\rangle = \langle 0_{\mathrm{E}}, z\rangle 0$$

Ainsi $\operatorname{Ker} f \subset (\operatorname{Im} f)^{\perp}$. De plus, $\dim(\operatorname{Im} f)^{\perp} = n - \dim \operatorname{Im} f = \dim \operatorname{Ker} f$ d'après le théorème du rang. Ainsi $\operatorname{Ker} f = (\operatorname{Im} f)^{\perp}$.

Solution 52

Comme f est auto-adjoint, il existe une base orthonormée $\mathcal{B}$ de E qui diagonalise f.

$(i) \implies (iii)$ La condition (i) implique que les valeurs propres de f sont positives. Notons $e_1, \dots, e_n$ les éléments de $\mathcal{B}$ et $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ les valeurs propres associées. On définit h en posant $h(e_i) = \sqrt{\lambda_i} e_i$ pour $1 \leq i \leq n$. On vérifie qu'on a bien $h = h^*$ et $f = h^2$.

$(iii) \implies (ii)$ Il suffit de prendre $g = h$.

$(ii) \implies (i)$ Pour tout $x \in \mathrm{E}$,

$$\langle f(x), x\rangle = \langle g^* \circ g(x), x\rangle = \langle g(x), g(x)\rangle \geq 0$$

Solution 53

Supposons f défini positif. L'application $\varphi : (x, y) \in \mathrm{E}^2 \mapsto \langle f(x), y\rangle$ est un produit scalaire :

- la bilinéarité provient de la linéarité de f et de la bilinéarité de $\langle\cdot,\cdot\rangle$;
- la symétrie provient de la symétrie de $\langle\cdot,\cdot\rangle$ et du fait que f est autoadjoint ;
- pour $x \in \mathrm{E}$, $\langle f(x), x\rangle \geq 0$ et on a égalité uniquement si $x = 0_{\mathrm{E}}$..

La partie X est la boule unité fermée pour la norme associée au produit scalaire φ : elle est donc compacte pour cette norme puisque E est de dimension finie. Les normes étant toutes équivalentes en dimension finie, X est également compacte pour la norme associée au produit scalaire $\langle\cdot,\cdot\rangle$.
Supposons X bornée. Soit $\lambda \in \mathrm{Sp}(f)$ et x un vecteur propre associé. Comme X est bornée et $x \neq 0_{\mathrm{E}}$, on peut choisir $r \in \mathbb{R}_+^*$ suffisamment grand tel que $rx \notin \mathrm{B}$. Alors $\langle f(rx), rx\rangle > 1$ i.e. $\lambda r^2\|x\|^2 > 1$ puis $\lambda > \dfrac{1}{r^2\|x\|^2} > 0$. Ainsi $\mathrm{Sp}(f) \subset \mathbb{R}_+^*$ et f est défini positif.

Solution 54

Soit S_n l'ensemble des vecteurs de $\mathbb{R}^n$ de norme 1. Pour $\mathrm{A} \in \S_n(\mathbb{R})$ et $\mathrm{X} \in \mathbb{R}^n$, on pose $\varphi_{\mathrm{A}}(\mathrm{X}) = \mathrm{X}^{\mathsf{T}}\mathrm{AX}$.
Soit $\mathrm{A} \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. Il existe une base orthonormée $(\mathrm{E}_1, \dots, \mathrm{E}_n)$ de $\mathbb{R}^n$ dans laquelle A diagonalise. Pour $i \in [\![1, n]\!]$, notons λ_i la valeur propre de A associée à E_i. Soit $\mathrm{X} \in \mathrm{S}_n$. Il existe donc $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ tel que $\mathrm{X} = \sum_{i=1}^n x_i\mathrm{E}_i$ et $\sum_{i=1}^n x_i^2 = 1$. On a alors $\varphi_{\mathrm{A}}(\mathrm{X}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i^2$. On a alors $\varphi(\mathrm{X}) \leq \left(\max_{i\in[\![1,n]\!]} \lambda_i\right)\sum_{i=1}^n x_i^2 = \Phi(\mathrm{A})$. De plus, notons j l'indice de la plus grande valeur propre de A, on a alors $\varphi_{\mathrm{A}}(\mathrm{E}_j) = \lambda_j = \Phi(\mathrm{A})$. Par conséquent, $\Phi(\mathrm{A}) = \max_{\mathrm{X}\in\mathrm{S}_n} \varphi_{\mathrm{A}}(\mathrm{X})$.
Soient $\mathrm{A}, \mathrm{B} \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ et $\lambda \in [0, 1]$.

$$\Phi(\lambda\mathrm{A} + (1-\lambda)\mathrm{B}) = \max_{\mathrm{X}\in\mathrm{S}_n} \varphi_{\lambda\mathrm{A}+(1-\lambda)\mathrm{B}}(\mathrm{X}) = \max_{\mathrm{X}\in\mathrm{S}_n}(\lambda\varphi_{\mathrm{A}}(\mathrm{X}) + (1-\lambda)\varphi_{\mathrm{B}}(\mathrm{X})$$

Puisque $\lambda \geq 0$ et $1 - \lambda \geq 0$, on a pour tout $\mathrm{X} \in \mathrm{S}_n$

$$\lambda\varphi_{\mathrm{A}}(\mathrm{X}) + (1-\lambda)\varphi_{\mathrm{B}}(\mathrm{X}) \leq \lambda \max_{\mathrm{X}\in\mathrm{S}_n} \varphi_{\mathrm{A}}(\mathrm{X}) + (1-\lambda)\max_{\mathrm{X}\in\mathrm{S}_n} \varphi_{\mathrm{B}}(\mathrm{X}) = \lambda\Phi(\mathrm{A}) + (1-\lambda)\Phi(\mathrm{B})$$

Il suffit alors de passer au maximum pour $\mathrm{X} \in \mathrm{S}_n$ pour obtenir

$$\Phi(\lambda\mathrm{A} + (1-\lambda)\mathrm{B}) \leq \lambda\Phi(\mathrm{A}) + (1-\lambda)\Phi(\mathrm{B})$$

Autrement dit, Φ est convexe.

Solution 55

Comme A est symétrique, elle diagonalise dans une base orthonormale i.e. il existe $\mathrm{P} \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ telle que $\mathrm{P}^{\mathsf{T}}\mathrm{AP} = \mathrm{D}$ avec D diagonale. Posons $\mathrm{Q} = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(\begin{array}{c|c} \mathrm{P} & \mathrm{P} \\ \hline \mathrm{P} & -\mathrm{P} \end{array}\right)$. On vérifie que $\mathrm{Q} \in \mathcal{O}_{2n}(\mathbb{R})$. De plus, $\mathrm{Q}^{\mathsf{T}}\mathrm{BQ} = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{D} + \mathrm{I}_n & 0 \\ \hline 0 & \mathrm{D} - \mathrm{I}_n \end{array}\right)$. Ceci prouve que B est diagonalisable et que ses valeurs propres sont les $\lambda \pm 1$ où $\lambda \in \mathrm{Sp}(\mathrm{A})$.

Solution 56

---

1. Puisque A est réelle symétrique positive, elle est diagonalisable. Notons $(\mathrm{X}_1, \dots, \mathrm{X}_n)$ une base de $\mathbb{R}^n$ constituée de vecteurs propres de A et λ_i la valeur propre associée au vecteur propre X_i pour chaque i dans $[\![1, n]\!]$.

   Soit X un vecteur propre de A^k associée à une valeur propre λ. Il existe donc $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \mathbb{R}$ non tous nuls tels que $\mathrm{X} = \sum_{i=1}^n \alpha_i\mathrm{X}_i$. Notons I l'ensemble des indices $i \in [\![1, n]\!]$ tels que $\alpha_i \neq 0$ de sorte que $\mathrm{X} = \sum_{i\in\mathrm{I}} \alpha_i\mathrm{X}_i$. Ainsi d'une part

   $$\mathrm{A}^k\mathrm{X} = \sum_{i\in\mathrm{I}} \lambda_i^k\alpha_i\mathrm{X}_i$$

   et d'autre part

   $$\mathrm{A}^k\mathrm{X} = \lambda\mathrm{X} = \sum_{i\in\mathrm{I}} \lambda\alpha_i\mathrm{X}_i$$

Comme $(X_i)_{i\in I}$ est une famille libre, $\lambda_i^k\alpha_i = \lambda\alpha_i$ pour tout $i \in I$. Or $\alpha_i \neq 0$ pour $i \in I$ donc $\lambda_i^k = \lambda$. De plus, A est symétrique positive donc les λ_i sont positifs : pour tout $i \in I$, $\lambda_i = \sqrt[k]{\lambda}$. Finalement

$$AX = \sum_{i\in I} \lambda_i\alpha_i X = \sqrt[k]{\lambda}\sum_{i\in I} \alpha_i X_i = \sqrt[k]{\lambda}X$$

et donc X est un vecteur propre de A.

2. Puisque $(A^k)^\top = (A^\top)^k = A^k$, A^k est symétrique. Il existe donc $P \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$ tel que $P^{-1}A^kP$ soit diagonale. Les vecteurs colonnes de P sont des vecteurs propres de A^k et donc de A d'après la question précédente. En clair, $P^{-1}AP$ est également diagonale. Puisque $A^k = B^k$, le même raisonnement montre que $P^{-1}BP$ est également diagonale. Notons $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ les éléments diagonaux de $P^{-1}AP$ et $\mu_1, \dots, \mu_n$ ceux de $P^{-1}BP$. Puisque $\left(P^{-1}AP\right)^k = P^{-1}A^kP$ et $\left(P^{-1}BP\right)^k = P^{-1}B^kP$, on a $\lambda_i^k = \mu_i^k$ pour tout $i \in [\![1, n]\!]$. Mais puisque, A et B sont symétriques positives, leurs valeurs propres i.e. les λ_i et les μ_i sont positives. L'application $x \mapsto x^k$ étant injective sur $\mathbb{R}_+$, on en déduit que $\lambda_i = \mu_i$ pour tout $i \in [\![1, n]\!]$. Ainsi $P^{-1}AP = P^{-1}BP$ puis $A = B$.

3. Le résultat ne tient plus. Prendre par exemple $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ et $k = 2$.

Néanmoins, le résultat reste valable si A et B sont symétriques (non nécessairement positives) et si k est impair car dans ce cas $x \mapsto x^k$ est injective sur $\mathbb{R}$.

Solution 57

Première méthode
D'après le théorème spectral, il existe une matrice orthogonale P et une matrice diagonale D à coefficients positifs de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telles que $A = PDP^\top$. Mais alors

$$\mathrm{tr}(AB) = \mathrm{tr}(PDP^\top B) = \mathrm{tr}(DP^\top BP) = \mathrm{tr}(DC)$$

en posant $C = P^\top BP$. La matrice C est évidemment symétrique et pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$

$$X^\top CX = X^\top P^\top BPX = (PX)^\top B(PX) \geq 0$$

car B est positive. Ainsi C est positive. En notant $(E_1, \dots, E_n)$ la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, on a pour tout $i \in [\![1, n]\!]$

$$C_{ii} = E_i^\top CE_i \geq 0$$

puisque C est positive. Finalement

$$\mathrm{tr}(DC) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij}C_{ji} = \sum_{i=1}^n D_{ii}C_{ii} \geq 0$$

Deuxième méthode
D'après le théorème spectral, il existe une matrice orthogonale P et une matrice diagonale D à coefficients positifs de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telles que $A = PDP^\top$. En notant Δ la matrice diagonale dont les coefficients diagonaux sont les racines carrées de ceux de A, et en posant $R = P\Delta P^\top$, on a $A = R^\top R$. De la même manière, on peut trouver $S \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ telle que $B = S^\top S$. Mais alors

$$\mathrm{tr}(AB) = \mathrm{tr}(R^\top RS^\top S) = \mathrm{tr}(SR^\top RS^\top) = \|RS^\top\|^2 \geq 0$$

où on note $\|\cdot\|$ la norme euclidienne associée au produit scalaire $(X, Y) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^2 \mapsto \mathrm{tr}(X^\top Y)$ (il est classique de montrer que c'est bien un produit scalaire).

Solution 58

---

1. On note $\|\cdot\|$ la norme euclidienne sur $\mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{R})$. Soit $A \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})$. Alors $A^\top A$ est une matrice symétrique donc elle est diagonalisable. Soit x un vecteur propre associée à une valeur propre λ de $A^\top A$. Alors $x^\top A^\top Ax = (Ax)^\top(AX) = \|Ax\|^2 \in \mathbb{R}_+$ et $x^\top A^\top Ax = \lambda x^\top x = \lambda\|x\|^2$. Comme $\|x\|^2 \in \mathbb{R}_*^+$, $\lambda \geq 0$. Ainsi $\mathrm{Sp}(A^\top A) \subset \mathbb{R}_+$ donc N(A) est bien définie.
Soit $\mu \in \mathbb{R}$. Alors

$$N(\mu A) = \sqrt{\max \mathrm{Sp}(\mu^2 A^\top A)} = \sqrt{\max \mu^2\, \mathrm{Sp}(A^\top A)} = \sqrt{\mu^2 \max \mathrm{Sp}(A^\top A)} = |\mu|\sqrt{\max \mathrm{Sp}(A^\top A)} = |\mu|N(A)$$

donc N est bien homogène.
Supposons que $N(A) = 0$. Alors $\max \operatorname{Sp}(A^\top A) = 0$. Mais comme $\operatorname{Sp}(A^\top A) \subset \mathbb{R}_+$, $\operatorname{Sp}(A^\top A) = \{0\}$. Comme $A^\top A$ est diagonalisable, $A^\top A = 0$. Soit $x \in \mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{R})$. Alors $\|Ax\|^2 = (Ax)^\top Ax = x^\top A^\top Ax = 0$ donc $Ax = 0$. Ceci étant vrai pour tout $x \in \mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{R})$, $A = 0$. Ainsi N vérifie l'axiome de séparation.
Soit enfin $(A, B) \in \mathcal{M}_{n,p}(\mathbb{R})^2$. Notons λ la plus grande valeur propre de $(A+B)^\top(A+B)$ et x un vecteur propre associé à cettte valeur propre. Alors $\|(A+B)x\|^2 = \lambda\|x\|^2$. Donc $\|(A+B)x\| = N(A+b)\|x\|$. Par ailleurs, $\|\cdot\|$ est une norme donc $\|(A+B)x\| \leq \|Ax\|+\|Bx\|$.
Notons $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ les valeurs propres de $A^\top A$ et $(e_1, \dots, e_p)$ une base orthonormée de vecteurs propres de $A\top A$. Alors

$$x = \sum_{i=1}^p x_i e_i \qquad \text{et} \qquad A^\top Ax = \sum_{i=1}^p x_i\lambda_i e_i$$

Comme $(e_1, \dots, e_p)$ est une base orthonormée de $\mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{R})$,

$$\|Ax\|^2 = x^\top A^\top Ax = \sum_{i=1}^p \lambda_i x_i^2 \leq \lambda_p \sum_{i=1}^p x_i^2 = \lambda_p\|x\|^2$$

Par conséquent, $\|Ax\| \leq N(A)\|x\|$. De la même manière, $\|Bx\| \leq N(B)\|x\|$ Finalement,

$$N(A+B)\|x\| \leq N(A)\|x\| + N(B)\|x\|$$

et donc $N(A+B) \leq N(A) + N(B)$ car $\|x\| > 0$.
N est bien une norme.

2. Soit x un vecteur propre associé à la plus grande valeur propre de $(AB)^\top(AB)$. On a alors $\|ABx\| = N(A)\|x\|$ (cf. précédemment). De plus, $\|ABx\| \leq N(A)\|Bx\| \leq N(A)N(B)\|x\|$ (cf. précédemment). Comme $\|x\| > 0$, $N(AB) \leq N(A)N(B)$ donc N est bien une norme d'algèbre.

Solution 59

Remarquons qu'en remplaçant x par x/y, on obtient

$$\forall (x,y) \in \mathbb{R}\times\mathbb{R}^*,\ |ax^2 + bxy + cy^2| \leq |Ax^2 + Bxy + Cy^2|$$

Par continuité des deux membres sur $\mathbb{R}^2$, l'inégalité est également vraie sur l'adhérence de $\mathbb{R}\times\mathbb{R}^*$, c'est-à-dire $\mathbb{R}^2$. Ainsi

$$\forall (x,y) \in \mathbb{R}^2,\ |ax^2 + bxy + cy^2| \leq |Ax^2 + Bxy + Cy^2|$$

Posons $m = \begin{pmatrix} a & b/2 \\ b/2 & c \end{pmatrix}$ et $M = \begin{pmatrix} A & B/2 \\ B/2 & C \end{pmatrix}$. Ainsi,

$$\forall u = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2,1}(\mathbb{R}),\ |u^\top mu| \leq |u^\top Mu|$$

En élevant au carré, on obtient

$$\forall u \in \mathcal{M}_{2,1}(\mathbb{R}),\ \|u\|^2 u^\top m^2 u \leq \|u\|^2 u^\top M^2 u$$

Notamment, en notant S la sphère unité de $\mathcal{M}_{2,1}(\mathbb{R})$,

$$\forall u \in S,\ u^\top m^2 u \leq u^\top M^2 u$$

Les matrices m et M sont symétriques réelles donc diagonalisables. Notons λ_1 et λ_2 les valeurs propres (éventuellement confondues) de m ainsi que Λ_1 et Λ_2 celles de M. Quitte à les échanger, on peut supposer $|\lambda_1| \leq |\lambda_2|$ et $|\Lambda_1| \leq |\Lambda_2|$. En considérant des bases orthonormées de vecteurs propres de m et M, on montre classiquement que

$$\lambda_1^2 = \inf_{u\in S} u^\top m^2 u \qquad \lambda_2^2 = \sup_{u\in S} u^\top m^2 u$$
$$\Lambda_1^2 = \inf_{u\in S} u^\top M^2 u \qquad \Lambda_2^2 = \sup_{u\in S} u^\top M^2 u$$

L'inégalité précédente montre alors que $\lambda_1^2 \leq \Lambda_1^2$ et $\lambda_2^2 \leq \Lambda_2^2$. Puisque toutes ces quantités sont positives, $(\lambda_1\lambda_2)^2 \leq (\Lambda_1\Lambda_2)^2$. Or $\lambda_1\lambda_2 = \det(m) = ac - b^2/4$ et $\Lambda_1\Lambda_2 = AC - B^2/4$ de sorte que

$$(b^2 - 4ac)^2 \leq (B^2 - 4AC)^2$$

ou encore

$$|b^2 - 4ac| \leq |B^2 - 4AC|$$

Solution 60

Comme M^TM et MM^T sont symétriques réelles, leurs spectres sont inclus dans $\mathbb{R}$.
Soit $\lambda \in \mathrm{Sp}(M^TM) \setminus \{0\}$. Alors il existe $X \in \mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{R})$ non nul tel que $M^TMX = \lambda X$. On en déduit que

$$\|MX\|^2 = X^TM^TMX = \lambda XX^T = \lambda\|X\|^2 \neq 0$$

car X et λ sont non nuls. Ainsi $MX \neq 0$. Mais comme $M^TMX = \lambda X$, on a également $(MM^T)MX = \lambda MX$ de sorte que $\lambda \in \mathrm{Sp}(MM^T)$. On en déduit que

$$\mathrm{Sp}(M^TM) \setminus \{0\} \subset \mathrm{Sp}(MM^T) \setminus \{0\}$$

En appliquant ce qui précède à M^T, on obtient l'inclusion réciproque et donc l'égalité.

Solution 61

Supposons (i). Alors il existe une base $(e_1, \dots, e_n)$ de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ formée de vecteurs propres de A. Notons $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ les valeurs propres associées. Posons également $E_{i,j} = e_ie_j^T + e_je_i^T$. On montre aisément que $(E_{i,j})_{1\le i\le j\le n}$ est une base de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.
L'application

$$\Phi : \left\{\begin{array}{ccc} \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) & \longrightarrow & \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \\ M & \longmapsto & AM + MA \end{array}\right.$$

est bien définie et c'est un endomorphisme de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. De plus, pour tout $1 \le i \le j \le n$, $\Phi(E_{i,j}) = (\lambda_i + \lambda_j)E_{i,j}$. L'application Φ est donc diagonalisable et ses valeurs propres sont les $\lambda_i + \lambda_j$ pour $1 \le i \le j \le n$. Aucune de ces valeurs propres n'est nulle donc Φ est un automorphisme. On en déduit la proposition (ii).
Remarque. On peut raisonner différemment. Il existe $P \in O_n(\mathbb{R})$ et $D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ diagonale telle que $A = PDP^T$. Fixons $B \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. L'équation $AM + MA = B$ équivaut à $DN + ND = C$ en posant $N = P^TMP$ et $C = P^TBP$. Cette équation équivaut à

$$\forall(i,j) \in [\![1,n]\!]^2,\ (\lambda_i + \lambda_j)N_{i,j} = C_{i,j}$$

Comme $\lambda_i + \lambda_j \neq 0$ pour tout $(i,j) \in [\![1,n]\!]^2$, l'équation admet donc bien une unique solution N. Comme C est symétrique, N l'est également et donc M aussi. L'équation $AM + MA = B$ admet donc bien une unique solution symétrique.

Supposons (ii). Considérons l'application Ψ qui à $B \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ associe l'unique matrice $M \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ telle que $AM + MA = B$. On vérifie aisément que Ψ est un automorphisme de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. Alors $I_n = \Psi(\Psi^{-1}(I_n))$ est l'unique matrice telle que $AI_n + I_nA = \Psi^{-1}(I_n)$. Ainsi $A = \dfrac{1}{2}\Psi^{-1}(I_n) \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. On reprend alors le raisonnement de la première implication. L'endomorphisme Φ (qui n'est autre que Ψ^{-1}) est alors un automorphisme. Ses valeurs propres, à savoir les $\lambda_i + \lambda_j$ ne peuvent être nulles.

Solution 62

Soit (X, Y) un éventuel couple solution. Alors

$$X^T = X^T(Y^TXY) = (X^TY^TX)Y = (X^TYX)^TY = Y$$

Par conséquent, $X(XX^T) = I_n$. On en déduit que XX^T est inversible et que $X = (XX^T)^{-1}$. Or XX^T est symétrique donc X également. D'après le théorème spectral, il existe $D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ diagonale et $P \in O_n(\mathbb{R})$ telle que $X = PDP^T$. En reportant dans l'égalité $X(XX^T) = I_n$ i.e. $X^3 = I_n$, on obtient $D^3 = I_n$. Comme D est diagonale à coefficients *réels*, $D = I_n$ puis $X = Y = I_n$.
Réciproquement, le couple (I_n, I_n) convient. C'est donc l'unique solution du système.

Solution 63

Il est clair que si S est nulle, S + D est semblable à D.
Supposons maintenant que S + D est semblable à D. On rappelle que $X \mapsto \mathrm{tr}(X^TX)$ est une norme euclidienne de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Comme S + D est semblable à D, $(S + D)^2$ est également semblable à D^2 et ces deux matrices ont même trace. Ainsi

$$\mathrm{tr}(D^2) = \mathrm{tr}((S + D)^2) = \mathrm{tr}(S^2) + \mathrm{tr}(SD) + \mathrm{tr}(DS) + \mathrm{tr}(D^2)$$

On vérifie aisément que SD a une diagonale nulle donc $\mathrm{tr}(SD) = \mathrm{tr}(DS) = 0$. Ainsi $\mathrm{tr}(S^2) = \mathrm{tr}(S^TS) = 0$ puis $S = 0$ via la norme euclidienne citée plus haut.

Solution 64

---

1. D'après le théorème spectral, Il existe $P \in O_n(\mathbb{R})$ et $D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ diagonale telle que $A = PDP^\top$. Comme $\mathrm{Sp}(A) \subset \mathbb{R}_+$, les coefficients diagonaux $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ de D sont positifs. On note alors $\Delta \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ la matrice diagonale dont les coefficients diagonaux sont $\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_n}$ de sorte que $\Delta^2 = D$. Posons $B = P\Delta P^\top$. On vérifie asiément que B est symétrique et que $B^2 = A$.

2. La matrice B déterminé à la question précédente convient puisque $\mathrm{Sp}(B) \subset \mathbb{R}_+$. Montrons son unicité. Supposons donc qu'il existe $(S, T) \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})^2$ tel que $A = S^2 = T^2$.
Première méthode. Soit $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$. D'après le lemme des noyaux,
$$\mathrm{Ker}(S^2 - \lambda^2 I_n) = \mathrm{Ker}(S - \lambda I_n) \oplus \mathrm{Ker}(S + \lambda I_n)$$
Mais comme $\mathrm{Sp}(S) \subset \mathbb{R}_+^*$, $\mathrm{Ker}(S+\lambda I_n) = \{0\}$. Ainsi $\mathrm{Ker}(S^2-\lambda^2 I_n) = \mathrm{Ker}(S-\lambda I_n)$. De la même manière, $\mathrm{Ker}(T^2-\lambda^2 I_n) = \mathrm{Ker}(T-\lambda I_n)$. Or $S^2 = T^2$ donc $\mathrm{Ker}(S - \lambda I_n) = \mathrm{Ker}(T - \lambda I_n)$.
Par ailleurs, $\mathrm{Ker}\, S \subset \mathrm{Ker}\, S^2$. Mais si l'on se donne $X \in \mathrm{Ker}\, S^2$, alors $\|SX\|^2 = X^\top S^2 X = 0$ donc $SX = 0$ puis $X \in \mathrm{Ker}\, S$. Ainsi $\mathrm{Ker}\, S = \mathrm{Ker}\, S^2$. De même, $\mathrm{Ker}\, T = \mathrm{Ker}\, T^2$. Or $S^2 = T^2$ donc $\mathrm{Ker}\, S = \mathrm{Ker}\, T$. Finalement
$$\forall \lambda \in \mathbb{R}_+,\ \mathrm{Ker}(S - \lambda I_n) = \mathrm{Ker}(T - \lambda I_n)$$
Mais comme $\mathrm{Sp}(S) \subset \mathbb{R}_+$ et $\mathrm{Sp}(T) \subset \mathbb{R}_+$, S et T ont les mêmes valeurs propres et les mêmes sous-espaces propres. Comme S et T sont diagonalisables, elles sont égales.
Deuxième méthode. Comme S est diagonalisable à valeurs propres positives, les valeurs propres de S sont les racines carrées des valeurs propres de S^2. Il en est de même pour T. Comme $S^2 = T^2$, S et T ont même spectre. Il existe donc $D = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ et $(P, Q) \in O_n(\mathbb{R})^2$ tels que $S = PDP^\top$ et $T = QDQ^\top$. Comme $S^2 = T^2$, $PD^2P^\top = QD^2Q^\top$ ou encore $RD^2 = D^2R$ en posant $R = Q^\top P$. Comme $D^2 = \mathrm{diag}(\lambda_1^2, \dots, \lambda_n^2)$, $R_{i,j}\lambda_j^2 = \lambda_i^2 R_{i,j}$ pour tout $(i, j) \in [\![1, n]\!]^2$. Ceci peut encore s'écrire $R_{i,j}(\lambda_j - \lambda_i)(\lambda_j + \lambda_i) = 0$. Remarquons que les λ_i sont positifs. Si $\lambda_i + \lambda_j > 0$, $R_{i,j}(\lambda_j - \lambda_i)$ ce qui signifie $R_{i,j}\lambda_j = \lambda_i R_{i,j}$. Sinon $\lambda_i = \lambda_j = 0$ donc on a encore $R_{i,j}\lambda_j = \lambda_i R_{i,j}$. Finalement, $R_{i,j}\lambda_j = \lambda_i R_{i,j}$ pour tout $(i, j) \in [\![1, n]\!]^2$. On en déduit que $RD = DR$ ou encore $PDP^\top = QDQ^\top$ i.e. $S = T$.

Solution 65

---

1. M est symétrique réelle donc M est diagonalisable. De plus, M est nilpotente donc sa seule valeur propre est 0. On en déduit que $M = 0$.

2. Comme M et $M^\top$ commutent, $(M^\top M)^n = M^n (M^\top)^n M^n = 0$. Comme $M^\top M$ est symétrique réelle, $M^\top M = 0$ d'après la question précédente. Ainsi $\mathrm{tr}(M^\top M) = 0$. On en déduit que $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} M_{i,j}^2 = 0$ puis $M_{i,j} = 0$ pour tout $(i, j) \in [\![1, n]\!]^2$ (somme nulle de termes positifs). Ainsi $M = 0$.

Solution 66

---

1. Tout d'abord, $A^\top A$ est clairement symétrique réelle. De plus,
$$\forall X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}),\ X^\top (A^\top A) X = \|AX\|^2 \geq 0$$
Donc $A^\top A \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$. Or $A^\top A \in GL_n(\mathbb{R})$ (considérer le déterminant par exemple) donc $A^\top A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. Il existe donc $P \in O_n(\mathbb{R})$ et $D = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ telles que $A^\top A = PD^\top$ avec les λ_i strictement positifs. Si on pose $\Delta = \mathrm{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_n})$ et $S = P\Delta P^\top$, on a bien $S \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ et $A^\top A = S^2$.

2. Notons S la matrice de la question précédente et posons $Q = AS^{-1}$. Alors, comme $S^\top = S$,
$$Q^\top Q = (S^{-1})^\top A^\top A S^{-1} = (S^\top)^{-1} S^2 S^{-1} = I_n$$
donc $Q \in O_n(\mathbb{R})$.

3. Supposons qu'il existe $((Q, S), (R, T)) \in (O_n(\mathbb{R}) \times \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R}))^2$ tel que $A = QS = RT$. En tranposant, on obtient $SQ^\top = TR^\top$. Ainsi
$$S^2 = SQ^\top QS = TR^\top RT = T^2$$
Première méthode. Soit $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$. D'après le lemme des noyaux,
$$\mathrm{Ker}(S^2 - \lambda^2 I_n) = \mathrm{Ker}(S - \lambda I_n) \oplus \mathrm{Ker}(S + \lambda I_n)$$

Mais comme $\mathrm{Sp}(S) \subset \mathbb{R}_+^*$, $\mathrm{Ker}(S+\lambda I_n) = \{0\}$. Ainsi $\mathrm{Ker}(S^2-\lambda^2 I_n) = \mathrm{Ker}(S-\lambda I_n)$. De la même manière, $\mathrm{Ker}(T^2-\lambda^2 I_n) = \mathrm{Ker}(T-\lambda I_n)$. Or $S^2 = T^2$ donc $\mathrm{Ker}(S-\lambda I_n) = \mathrm{Ker}(T-\lambda I_n)$ pour tout $\lambda \in \mathbb{R}_+^*$. Mais comme $\mathrm{Sp}(S) \subset \mathbb{R}_+^*$ et $\mathrm{Sp}(T) \subset \mathbb{R}_+^*$, S et T ont les mêmes valeurs propres et les mêmes sous-espaces propres. Comme S et T sont diagonalisables, elles sont égales.

Deuxième méthode. Comme S est diagonalisable à valeurs propres positives, les valeurs propres de S sont les racines carrées des valeurs propres de S^2. Il en est de même pour T. Comme $S^2 = T^2$, S et T ont même spectre. Il existe donc $D = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ et $(P_1, P_2) \in O_n(\mathbb{R})^2$ tels que $S = P_1 D P_1^\top$ et $T = P_2 D P_2^\top$. Comme $S^2 = T^2$, $P_1 D^2 P_1^\top = P_2 D^2 P_2^\top$ ou encore $PD^2 = D^2 P$ en posant $P = P_2^\top P_1$. Comme $D^2 = \mathrm{diag}(\lambda_1^2, \dots, \lambda_n^2)$, $P_{i,j}\lambda_j^2 = \lambda_i^2 P_{i,j}$ pour tout $(i,j) \in [\![1,n]\!]^2$. Ceci peut encore s'écrire $P_{i,j}(\lambda_j - \lambda_i)(\lambda_j + \lambda_i) = 0$. Mais comme $\lambda_i + \lambda_j > 0$, $P_{i,j}(\lambda_j - \lambda_i)$ ce qui signifie $P_{i,j}\lambda_j = \lambda_i P_{i,j}$ pour tout $(i,j) \in [\![1,n]\!]^2$. On en déduit que $PD = DP$ ou encore $P_1 D P_1^\top = P_2 D P_2^\top$ i.e. $S = T$.

4. Comme $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R})$ est dense dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, il existe une suite (A_p) à valeurs dans $\mathrm{GL}_n(\mathbb{R})$ convergeant vers A. D'après la question précédente, il existe une suite (Q_p) à valeurs dans $O_n(\mathbb{R})$ et une suite (S_p) à valeurs dans $\mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$ telles que $A_p = Q_p S_p$ pour tout $p \in \mathbb{N}$. Or $O_n(\mathbb{R})$ est compact donc il existe une suite extraite $(Q_{\varphi(p)})$ convergeant vers $Q \in O_n(\mathbb{R})$. Alors la suite de terme général $S_{\varphi(p)} = Q_{\varphi(p)}^\top A$ converge vers $S = Q^\top A$. En effet, l'application $X \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mapsto X^\top A$ est continue car elle est linéaire et $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ et de dimension finie. Or $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ est fermé pour tout $p \in \mathbb{N}$, $S_{\varphi(p)} \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ donc $S \in \mathcal{S}^+(\mathbb{R})$. On a alors bien $A = QS$ avec $Q \in O_n(\mathbb{R})$ et $S \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.
   Le couple (Q, S) n'est pas nécessairement unique. En effet, si $A = 0$, on peut prendre $S = 0$ et Q quelconque dans $O_n(\mathbb{R})$.

Solution 67

Soit (S_n) une suite à valeurs dans $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ convergeant vers $S \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ de dimension finie donc il est fermé. Ainsi $S \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. On peut également utiliser la continuité de la transposition (endomorphisme d'un espace vectoriel de dimension finie).
Soit $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. Alors pour tout $p \in \mathbb{N}$, $X^\top S_p X \geq 0$. Or l'application $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mapsto X^\top M X$ est continue comme endomorphisme d'un espace de dimension finie. On en déduit que $\lim\limits_{p\to+\infty} X^\top S_p X = X^\top S X$ et donc $X^\top S X \geq 0$ par passage à la limite. On a donc bien $S \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.
Par caractérisation séquentielle, $\mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$ est fermé.

Solution 68

---

1. $(A^\top A)^\top = A^\top (A^\top)^\top = A^\top A$ donc $A^\top A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. De plus, pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, $X^\top A^\top A X = \|AX\|^2 \geq 0$ donc $A^\top A \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.

2. D'après le théorème spectral, il existe une matrice $V \in O_n(\mathbb{R})$ telle que $V^\top A^\top A V$ soit une matrice diagonale dont les coefficients diagonaux sont les valeurs propres de $A^\top A$. Comme $r = \mathrm{rg}(A^\top A)$, r valeurs propres sont non nulles (et donc strictement positives) et $n - r$ sont nulles. Quitte à réordonner éventuellement les vecteurs propres, on a le résultat voulu.

3. Puisque $V^\top A^\top A V = \left(\begin{array}{c|c} D & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array}\right)$, on a notamment $V_2^\top A^\top A V_2 = 0$ et donc $\|AV_2\|^2 = 0$. On en déduit que $AV_2 = 0$.

4. On a $U_1^\top U_1 = I_r$. Les r colonnes de U_1 forment donc une famille orthonormée de $\mathcal{M}_{m,1}(\mathbb{R})$ que l'on peut compléter en une base orthonormée de $\mathcal{M}_{m,1}(\mathbb{R})$. Autrement dit, il existe $U_2 \in \mathcal{M}_{m,m-r}(\mathbb{R}$ telle que $U = (U_1, U_2) \in O_m(\mathbb{R})$.

5. Un calcul par blocs donne bien $A = U\Sigma V^\top$.

Solution 69

---

1. Comme A est semblable à une matrice réelle triangulaire, son polynôme caractéristique est scindé sur $\mathbb{R}$. Notamment, $\mathrm{Sp}(A) \subset \mathbb{R}$ et $\mathrm{Sp}(A) \neq \emptyset$. Soit $\lambda \in \mathbb{R}$ une valeur propre de A et X un vecteur propre associé. Alors $AX = \lambda X$ puis $X^\top A X = \lambda X^\top X$. En tranposant, on obtient $X^\top A^\top X = \lambda X^\top X$ i.e. $X^\top A X = -\lambda X^\top X$ car $A^\top = -A$. Ainsi $\lambda X^\top X = -\lambda X^\top X$ puis $\lambda = 0$ car $X^\top X = \|X\|^2 > 0$. Ainsi $\mathrm{Sp}(A) = \{0\}$.

2. Comme 0 est l'unique valeur propre de A et χ_A est scindé sur $\mathbb{R}$, $\chi_A = X^n$. D'après le théorème de Cayley-Hamilton, $A^n = 0$.

3. Par conséquent, $(A^2)^n = A^{2n} = (A^n)^2 = 0$ donc A^2 est nilpotente. Sa seule valeur propre est donc 0. De plus, $(A^2)^\top = (A^\top)^2 = (-A)^2 = A^2$ donc A^2 est symétrique réelle. Elle est donc diagonalisable en vertu du théorème spectral. Comme 0 est son unique valeur propre, elle est semblable à la matrice nulle et est donc nulle.

4. Remarquons que $A^\top A = -A^2 = 0$. Notamment, $\|A\|^2 = \operatorname{tr}(A^\top A) = 0$. On en déduit que $A = 0$.

Solution 70

1. A est symétrique réelle donc diagonalisable.

2. On trouve sans difficulté $\operatorname{Sp}(A) = \{0, 2\}$, $E_0(A) = \operatorname{vect}\left(\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}\right)$ et $E_2(A) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

3. **a.** On a clairement $\operatorname{rg}(A - I_n) = 2$ donc $\dim \operatorname{Ker}(A - I_n) = n - 2 \geq 1$. Ainsi 1 est valeur propre de A et on peut ajouter que $\dim E_1(A) = n - 2$.

b. **Première méthode :** On pose $A - I_n = \left(\begin{array}{c|c} 0 & C^\top \\ \hline C & 0 \end{array}\right)$ avec $C = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$. Un calcul par blocs donne alors aisément $(A - I_3)^3 = (n-1)(A - I_3)$. On en déduit que si $\lambda \in \operatorname{Sp}(A)$, alors $(\lambda - 1)^3 = (n-1)(\lambda - 1)$. De plus, si $\lambda \neq 1$, $(\lambda - 1)^2 = n - 1$.

Deuxième méthode Soit $\lambda \in \operatorname{Sp}(A) \setminus \{1\}$ et $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$ un vecteur propre associé. Alors $\sum_{i=1}^n x_i = \lambda x_1$ et pour tout $j \in [\![2, n]\!]$, $x_1 + x_j = \lambda x_j$. En sommant ces $n-1$ dernières égalités, on obtient, $(n-1)x_1 + \sum_{j=2}^n x_j = \lambda \sum_{j=2}^n x_j$. En tenant compte de la première égalité, on obtient $(n-1)x_1 + \lambda x_1 - x_1 = \lambda(\lambda x_1 - x_1)$ ou encore $(\lambda - 1)^2 x_1 = (n-1)x_1$. On ne peut avoir $x_1 = 0$ sinon pour tout $j \in [\![2, n]\!]$, $x_j = \lambda x_j$ puis $x_j = 0$ car $\lambda \neq 1$. Ceci entraîne $X = 0$, ce qui est absurde. On en conclut que $(\lambda - 1)^2 = n - 1$.

c. On sait déjà que $\dim E_1(A) = n - 2$. D'après la question précédente, $\operatorname{Sp}(A) \subset \{1, 1 + \sqrt{n-1}, 1 - \sqrt{n-1}\}$. Comme $\operatorname{tr}(A) = n$, $\alpha = 1 + \sqrt{n-1}$ et $\beta = 1 - \sqrt{n-1}$ sont tous deux valeurs propres de A et $\dim E_\alpha(A) = \dim E_\beta(A) = 1$.
On trouve sans peine $E_1(A) = \operatorname{vect}(E_2 - E_3, E_2 - E_4, \dots, E_2 - E_n)$ en notant $(E_1, \dots, E_n)$ la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. On trouve également $E_\alpha(A) = \operatorname{vect}\left(\begin{pmatrix} \sqrt{n-1} \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}\right)$ et $E_\beta(A) = \operatorname{vect}\left(\begin{pmatrix} -\sqrt{n-1} \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}\right)$.

Solution 71

1. On vérifie que la congruence est une relation binaire réflexive, symétrique et transitive.

- Soit $A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Alors $I_n^\top A I_n = A$ et $I_n \in GL_n(\mathbb{R})$ donc la congruence est réflexive.
- Soit $(A, B) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^2$ tel que B est congruente à A. Alors il existe $P \in GL_n(\mathbb{R})$ telle que $B = P^\top AP$. Comme P est inversible, $P^\top$ l'est égalemente et $(P^\top)^{-1} = (P^{-1})^\top$. On en déduit que $A = (P^{-1})^\top BP^{-1}$ avec $P^{-1} \in GL_n(\mathbb{R})$. Ainsi A est congruente à B et la congruence est symétrique.
- Soit $(A, B, C) \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})^3$ tel que B est congruente à A et C est congruente à B. Il existe $(P, Q) \in GL_n(\mathbb{R})^2$ tel que $B = P^\top AP$ et $C = Q^\top BQ$. Alors $C = Q^\top P^\top APQ = (PQ)^\top A(PQ)$ et $PQ \in GL_n(\mathbb{R})$. Ainsi C est congruente à A et la congruence est transitive.

2. **a.** Notons $J_{p,q} = \begin{pmatrix} I_p & 0 & 0 \\ 0 & -I_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$.

D'après le théorème spectral, il existe une matrice $P \in O_n(\mathbb{R})$ et une matrice diagonale $D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ tel que $A = PDP^\top$. Notons $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ les valeurs propres de A i.e. les coefficients diagonaux de D. On peut supposer $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ strictement positives et $\lambda_{p+1}, \dots, \lambda_{p,q}$ strictement positives. Si on pose Δ la matrice diagonale de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ dont les coefficients diagonaux sont $\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_p}$ puis $\sqrt{-\lambda_{p+1}}, \dots, \sqrt{-\lambda_{p+q}}$ et enfin des 1, on a $\Delta J_{p,q} \Delta^\top = D$ puis $A = (P\Delta)J_{p,q}(P\Delta)^\top$ ou encore $A = Q^\top J_{p,q} Q$ avec $Q = (P\Delta)^\top \in GL_n(\mathbb{R})$ car P et Δ sont inversibles. Ainsi A et $J_{p,q}$ sont congruentes.

b. Si A et B sont deux matrices de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ de même signature (p,q), alors elles sont toutes deux congruentes à $J_{p,q}$. Comme la congruence est une relation d'équivalence, A et B sont elles-mêmes congruentes.

3. **a.** Il suffit de poser $E_+ = \bigoplus_{\lambda\in\mathrm{Sp}(S)\cap\mathbb{R}_+^*} E_\lambda(S)$, $E_- = \bigoplus_{\lambda\in\mathrm{Sp}(S)\cap\mathbb{R}_-^*} E_\lambda(S)$ et $E_0 = \operatorname{Ker} S$.

b. Soit $X \in E_+ \cap (G \oplus H)$. Comme $X \in E_+$, $X^\top SX \geq 0$ et comme $X \in G \oplus H$, $X^\top SX \leq 0$. Ainsi $X^\top SX = 0$ et donc $X = 0$ car $X \in E_+$. Donc E_+ et $G \oplus H$ sont en somme directe. Or $E_+ \oplus G \oplus H \subset \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ donc $\dim E_+ + \dim(G \oplus H) \leq n$ i.e. $p + n - \dim F \leq n$ i.e. $p \leq \dim F$.
Soit $X \in F \cap (E_- \oplus E_0)$. Comme $X \in F$, $X^\top SX \geq 0$ et comme $X \in E_- \oplus E_0$, $X^\top SX \leq 0$. Ainsi $X^\top SX = 0$ et donc $X = 0$ car $X \in F$. Donc F et $E_- \oplus E_0$ sont en somme directe. Or $F \oplus E_- \oplus E_0 \subset \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ donc $\dim F + \dim(E_- \oplus E_0) \leq n$ i.e. $\dim F + n - p \leq n$ i.e. $\dim F \leq p$. On en déduit que $p = \dim F$.
Soit $X \in E_- \cap (F \oplus H)$. Comme $X \in E_-$, $X^\top SX \leq 0$ et comme $X \in F \oplus H$, $X^\top SX \geq 0$. Ainsi $X^\top SX = 0$ et donc $X = 0$ car $X \in E_-$. Donc E_- et $F \oplus H$ sont en somme directe. Or $E_- \oplus F \oplus H \subset \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ donc $\dim E_- + \dim(F \oplus H) \leq n$ i.e. $q + n - \dim G \leq n$ i.e. $q \leq \dim G$.
Soit $X \in G \cap (E_+ \oplus E_0)$. Comme $X \in G$, $X^\top SX \leq 0$ et comme $X \in E_+ \oplus E_0$, $X^\top SX \geq 0$. Ainsi $X^\top SX = 0$ et donc $X = 0$ car $X \in G$. Donc G et $E_+ \oplus E_0$ sont en somme directe. Or $G \oplus E_+ \oplus E_0 \subset \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ donc $\dim G + \dim(E_+ \oplus E_0) \leq n$ i.e. $\dim G + n - q \leq n$ i.e. $\dim G \leq q$. On en déduit que $q = \dim G$.

4. Soient A et B deux matrices congruentes de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$. Il existe donc $P \in GL_n(\mathbb{R})$ tel que $B = P^\top AP$. Notons (p,q) la signature de A et (r,s) la signature de B.
On note $E_+ = \bigoplus_{\lambda\in\mathrm{Sp}(A)\cap\mathbb{R}_+^*}$, $E_- = \bigoplus_{\lambda\in\mathrm{Sp}(A)\cap\mathbb{R}_-^*}$ et $E_0 = \operatorname{Ker} A$. On a donc $\dim E_+ = p$ et $\dim E_- = q$.
Posons $F = \{X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}),\ PX \in E_+\}$, $G = \{X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}),\ PX \in E_-\}$ et $H = \{X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}),\ PX \in E_0\}$. On vérifie aisément que

- $\forall X \in F \setminus \{0\}$, $X^\top BX = (PX)^\top A(PX) > 0$;
- $\forall X \in G \setminus \{0\}$, $X^\top BX = (PX)^\top A(PX) < 0$;
- $\forall X \in H$, $X^\top BX = (PX)^\top A(PX) = 0$;
- $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R}) = F \oplus G \oplus H$.

D'après la question précédente, $\dim F = r$ et $\dim G = s$. De plus, comme P est inversible, $\dim F = \dim E_+ = p$ et $\dim G = \dim E_- = q$. Ainsi $(r,s) = (p,q)$.

Solution 72

Remarquons déjà que φ est clairement bilinéaire.
Supposons que $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$. Soit $(X,Y) \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})^2$. Comme $\varphi(X,Y)$ est un scalaire,

$$\varphi(X,Y) = \varphi(X,Y)^\top = Y^\top A^\top X = Y^\top AX = \varphi(Y,X)$$

donc φ est symétrique. Pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$, $\varphi(X,X) = X^\top AX \geq 0$ et on a égalité que si $X = 0$. Ainsi φ est bien un produit scalaire.
Réciproquement, supposons que φ est un produit scalaire. Notons $(E_1,\dots,E_n)$ la base canonique de $\mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. Alors, pour tout $(i,j) \in [\![1,n]\!]^2$, $\varphi(E_i,E_j) = \varphi(E_j,E_i)$ i.e. $E_i^\top AE_j = E_j^\top AE_i$ i.e. $A_{j,i} = A_{i,j}$ donc A est symétrique. Enfin, $X\top AX \geq 0$ pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ avec égalité si et seulement si $X = 0$ donc $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

Solution 73

Première méthode. Comme $A \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$, il existe $Q \in O_n(\mathbb{R})$ et $\Delta \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ diagonale à coefficients strictement positifs telles que $Q^\top AQ = \Delta$. Notons $\lambda_1,\dots,\lambda_n$ les coefficients diagonaux de Δ et C la matrice diagonale dont les coefficients diagonaux sont $1/\sqrt{\lambda_1},\dots,1/\sqrt{\lambda_n}$. Alors, en notant $M = QC$, on a $M^\top AM = I_n$.
La matrice $M^\top BM$ est symétrique donc il existe $R \in O_n(\mathbb{R})$ et $D \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ diagonale telles que $R^\top M^\top BMR = D$. Posons $P = MR$. On a bien $P^\top BP = D$ et $P^\top AP = R^\top(M^\top AM)R = R^\top R = I_n$ car $R \in O_n(\mathbb{R})$.
Deuxième méthode. Soit E un espace euclidien de dimension n et $\mathcal{B} = (e_1,\dots,e_n)$ une base orthonormée de E. Il existe alors $(f,g) \in \mathcal{L}(E)$ tel que $A = \mathrm{mat}_{\mathcal{B}}(f)$ et $g = \mathrm{mat}_{\mathcal{B}}(g)$. Comme $(A,B) \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R}) \times \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$, $(f,g) \in \mathcal{S}_n^{++}(E) \times \mathcal{S}(E)$ car $\mathcal{B}$ est orthonormée. On prouve alors classiquement que $\Phi : (x,y) \in E^2 \mapsto \langle f(x), y\rangle$ est un produit scalaire sur E. D'après le théorème spectral, il existe une base $\mathcal{E} = (\varepsilon_1,\dots,\varepsilon_n)$ de E, orthonormée pour le produit scalaire Φ, dans laquelle la matrice de g est une matrice diagonale D. Notons P la matrice de

Solution 74

---

1. Il existe $P \in O_n(\mathbb{R})$ et $D = \operatorname{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ telles que $A = PDP^\top$. Par continuité de l'application $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) \mapsto PMP^\top$, $\exp(A) = P\exp(D)P^\top$. Or $\exp(D) = \operatorname{diag}(e^{\lambda_1}, \dots, e^{\lambda_n})$ est une matrice diagonale à coefficients diagonaux strictement positifs. Ainsi $\exp(A) \in \mathcal{S}_n^{++}(\mathbb{R})$.

2. Il existe $P \in O_n(\mathbb{R})$ et $\Delta = \operatorname{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n)$ telles que $B = P\Delta P^\top$. De plus, les μ_i sont strictement positifs. On peut donc poser $\lambda_i = \ln(\mu_i)$ pour $i \in [\![1, n]\!]$, $D = \operatorname{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ et $A = PDP^\top$. La première question montre alors que $\exp(A) = P\exp(D)P^\top = P\Delta P^\top = B$.
Soit $C \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ telle que $B = \exp(A) = \exp(C)$. Il existe $Q \in O_n(\mathbb{R})$ et $E = \operatorname{diag}(\nu_1, \dots, \nu_n)$ telles que $C = QEQ^\top$. De plus $Q\exp(E)Q^\top = P\exp(D)P^\top$. En posant $R = P^\top Q$, on a donc $R\exp(E) = \exp(D)R$. Ainsi pour tout $(i, j) \in [\![1, n]\!]^2$, $R_{i,j}e^{\nu_j} = R_{i,j}e^{\lambda_i}$ i.e. $R_{i,j}(e^{\nu_j} - e^{\lambda_i}) = 0$ de sorte que $R_{i,j} = 0$ ou $e^{\lambda_i} = e^{\nu_j}$. Si $R_{i,j} = 0$, alors $R_{i,j}\nu_j = R_{i,j}\lambda_i$. Sinon, $e^{\lambda_i} = e^{\nu_j}$ puis $\lambda_i = \nu_j$ par injectivité de l'exponentielle. On a donc à nouveau $R_{i,j}\nu_j = R_{i,j}\lambda_i$. Ceci signifie que $RE = DR$ ou encore $QEQ^\top = PDP^\top$ i.e. $C = A$.

Solution 75

1. Tout d'abord, $A \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ par symétrie du produit scalaire. Soit alors $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$. Posons $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$.

$$X^\top AX = \sum_{1 \le i,j \le n} x_i x_j \langle f_i, f_j \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^{j} x_i f_i, \sum_{j=1}^{n} x_j f_j \right\rangle = \left\| \sum_{i=1}^{n} x_i f_i \right\|^2 \ge 0$$

Ainsi $A \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$.

2. Supposons $\det(A) = 0$. Alors $A \notin GL_n(\mathbb{R})$ puis $0 \in \operatorname{Sp}(A)$. On en déduit que A est symétrique positive mais pas définie positive. Autrement dit, il existe $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ non nul tel que $X^\top AX = 0$. Le calcul de la question précédente montre que $\left\| \sum_{i=1}^{n} x_i f_i \right\|^2 = 0$ i.e. $\sum_{i=1}^{n} x_i f_i = 0_E$. Comme X n'est pas nul, la famille $(f_1, \dots, f_n)$ est liée.
Inversement, supposons la famille $(f_1, \dots, f_n)$ liée. Il existe alors $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ non nul tel que $\sum_{i=1}^{n} x_i f_i = 0_E$ i.e. $\left\| \sum_{i=1}^{n} x_i f_i \right\|^2 = 0$. En posant $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$, on a à nouveau $X^\top AX = 0$ avec X non nul. On en déduit que A est symétrique positive mais pas définie positive. Ainsi $0 \in \operatorname{Sp}(A)$ puis $\det(A) = 0$.

Solution 76

Soit $M \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$. Notons $(E_1, \dots, E_n)$ la base canonique de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$. Comme $M \in \mathcal{S}_n^+(\mathbb{R})$, $X^\top MX \ge 0$ pour tout $X \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$.
Notamment, pour tout $i \in [\![1, n]\!]$,

$$M_{i,i} = E_i^\top ME_i \ge 0$$

Polynômes orthogonaux

Solution 77

1. La symétrie de φ est évidente. La bilinéarité de φ provient de la linéarité de l'intégrale. Pour $P \in \mathbb{R}_n[X]$, $\int_{-1}^{1} P(t)Q(t)\, dt \ge 0$ donc φ est positive. Soit $P \in \mathbb{R}_n[X]$ tel que $\int_{-1}^{1} P(t)Q(t)\, dt = 0$. Comme P^2 est continue positive qur $[-1, 1]$, on en déduit que P^2 est nulle sur $[-1, 1]$. Le polynôme P^2 admet donc une infinité de racines : il est donc nul. Par conséquent, P est également nul. Ceci prouve que φ est définie.
φ est donc un produit scalaire.

2. 1 et -1 sont des racines de multiplicité n de Q_n. On en déduit que $Q_n^{(k)}(-1) = Q_n^{(k)}(1) = 0$ pour $k < n$.

3. Soit $k, l \in [\![0, n]\!]$ avec $k \neq l$. On peut supposer $k < l$.
Supposons $l \geq 1$ pour se donner une idée de la marche à suivre. On utilise une intégration par parties :

$$\langle P_k, P_l \rangle = \int_{-1}^{1} Q_k^{(k)}(t) Q_l^{(l)}(t)\, dt = \left[Q_k^{(k)}(t) Q_l^{(l-1)}(t)\right]_{-1}^{1} - \int_{-1}^{1} Q_k^{(k+1)}(t) Q_l^{(l-1)}(t)\, dt$$

Or $l - 1 < l$ donc $Q_l^{(l-1)}(-1) = Q_l^{(l-1)}(1) = 0$ d'après la question précédente. Ainsi $\langle Q_k^{(k)}, Q_l^{(l)} \rangle = -\langle Q_k^{(k+1)}, Q_l^{(l-1)} \rangle$.
On peut donc prouver à l'aide d'une récurrence finie que $\langle Q_k^{(k)}, Q_l^{(l)} \rangle = (-1)^l \langle Q_k^{(k+l)}, Q_l \rangle$. Or $k < l$ donc $k + l > 2k$. Puisque $\deg Q_k = 2k$, $Q_k^{(k+l)} = 0$. On a donc $\langle P_k, P_l \rangle = 0$.
Les P_k sont donc orthogonaux deux à deux. La famille $(P_k)_{0 \leq k \leq n}$ est donc orthogonale. De plus, $\deg Q_k = 2k$ donc $\deg P_k = \deg Q_k^{(k)} = k$. La famille $(P_k)_{0 \leq k \leq n}$ est une famille de polynômes à degrés étagés : elle est donc libre. Comme elle comporte $n + 1$ éléments et que $\dim \mathbb{R}_n[X] = n + 1$, c'est une base orthogonale de $\mathbb{R}_n[X]$.

4. Il est clair que L est linéaire. De plus, pour $P \in \mathbb{R}_n[X]$,

$$\deg((X^2 - 1)P'') = \deg(X^2 - 1) + \deg(P'') \leq 2 + n - 2 = n$$

et

$$\deg(XP') = \deg(X) + \deg(P') \leq 1 + n - 1 = n$$

On en déduit que $\deg(L(P)) \leq n$ i.e. $L(P) \in \mathbb{R}_n[X]$. Ainsi L est bien un endomorphisme de $\mathbb{R}_n[X]$.
Soit $(P, Q) \in \mathbb{R}_n[X]^2$. Alors

$$\begin{aligned}\langle L(P), Q \rangle &= \int_{-1}^{1} \left((t^2 - 1)P''(t) + 2tP'(t)\right) Q(t)\, dt \\ &= \int_{-1}^{1} (t^2 - 1)P''(t)Q(t)\, dt + 2\int_{-1}^{1} tP'(t)Q(t)\, dt\end{aligned}$$

En intégrant par parties,

$$\int_{-1}^{1} (t^2-1)P''(t)Q(t)\, dt = \left[(t^2 - 1)P'(t)Q(t)\right] - \int_{-1}^{1} P'(t)\left((t^2 - 1)Q'(t) + 2tQ(t)\right) dt = -\int_{-1}^{1} (t^2-1)P'(t)Q'(t)\, dt - 2\int_{-1}^{1} tP'(t)Q(t)\, dt$$

Ainsi

$$\langle L(P), Q \rangle = -\int_{-1}^{1} (t^2 - 1)P'(t)Q'(t)\, dt$$

Cette dernière expression est invariante par échange de P et Q donc $\langle L(P), Q \rangle = \langle P, L(Q) \rangle$. Finalement, L est bien un endomorphisme auto-adjoint de $\mathbb{R}_n[X]$.

Solution 78

---

1. Remarquons déjà que l'intégrale définissant $\langle P, Q \rangle$ est bien définie car $t \mapsto P(t)Q(t)e^{-t^2}$ est continue sur $\mathbb{R}$ et $P(t)Q(t)e^{-t^2} \underset{t \to \pm\infty}{=} o\left(\frac{1}{t^2}\right)$.
L'application $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est clairement bilinéaire, symétrique et positive. Enfin, soit $P \in E$ vérifiant $\langle P, P \rangle = 0$. Comme $t \mapsto P(t)^2 e^{-t^2}$ est continue, positive et d'intégrale nulle sur $\mathbb{R}$, elle y est constamment nulle. Comme l'exponentielle ne s'annule pas sur $\mathbb{R}$, $t \mapsto P(t)^2$ est nulle sur $\mathbb{R}$. Le polynôme P admet donc une infinité de racines : il est nul.
On a bien vérifié que $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est un produit scalaire sur E.

2. La matrice de L dans la base canonique est triangulaire supérieure et ses coefficients diagonaux sont $0, -2, \dots, -2n$. Ainsi L admet pour valeurs propres les $n + 1$ réels distincts $0, -2, \dots, -2n$. Comme $\dim E = n + 1$, on peut affirmer que L est diagonalisable.

3. Soient $(P, Q) \in E^2$. Alors

$$\langle L(P), Q\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} (P''(t) - 2tP'(t))Q(t)e^{-t^2}\,dt = \int_{-\infty}^{+\infty} P''(t)Q(t)e^{-t^2}\,dt - 2\int_{-\infty}^{+\infty} tP'(t)Q(t)e^{-t^2}\,dt$$

Comme $t \mapsto e^{-t^2}$ et $t \mapsto P'(t)Q(t)$ sont de classe $\mathcal{C}^1$ sur $\mathbb{R}$ de dérivées respectives $t \mapsto -2te^{-t^2}$ et $t \mapsto P''(t)Q(t) + P'(t)Q'(t)$, on obtient par une intégration par parties :

$$2\int_{-\infty}^{+\infty} tP'(t)Q(t)e^{-t^2}\,dt = -\left[P'(t)Q(t)\right]_{-\infty}^{+\infty} + \int_{-\infty}^{+\infty} \left(P'(t)Q'(t) + P''(t)Q(t)\right)e^{-t^2}\,dt$$

On en déduit que

$$\langle L(P), Q\rangle = -\int_{-\infty}^{+\infty} P'(t)Q'(t)e^{-t^2}\,dt$$

Comme cette expression est invariante par échange de P et Q,

$$\langle L(P), Q\rangle = \langle P, L(Q)\rangle$$

L est bien un endomorphisme auto-adjoint.

4. Notons $(P_0, \dots, P_n)$ l'orthonormalisée de Gram-Schmidt de la base canonique. On sait alors que $(L_0, \dots, L_n)$ est une base orthonormée de E et que pour tout $k \in [\![0, n]\!]$, $\mathrm{vect}(P_0, \dots, P_k) = \mathbb{R}_k[X]$.
Soit $k \in [\![0, n]\!]$. Alors $P_k \in \mathbb{R}_k[X]$. Il est clair que $\mathbb{R}_k[X]$ est stable par L donc $L(P_k) \in \mathbb{R}_k[X] = \mathrm{vect}(P_0, \dots, P_k)$. Il existe donc $(\lambda_0, \dots, \alpha_k) \in \mathbb{R}^{k+1}$ tel que $L(P_k) = \sum_{j=0}^{k} \alpha_j P_j$. Pour tout $j \in [\![0, k-1]\!]$, $\langle L(P_k), P_j\rangle = \alpha_j$ car $(P_0, \dots, P_n)$ est orthonormée. Mais comme L est auto-adjoint, $\langle L(P_k), P_j\rangle = \langle P_k, L(P_j)\rangle$. Or $L(P_j) \in \mathbb{R}_j[X] = \mathrm{vect}(P_0, \dots, P_j)$ donc $\langle P_k, L(P_j)\rangle = 0$ car $(P_0, \dots, P_n)$ est orthonormée. On en déduit donc que $\alpha_j = 0$ et donc $L(P_k) = \alpha_k P_k$ donc P_k est un vecteur propre de L. Finalement, $(P_0, \dots, P_n)$ est bien une base de E formée de vecteurs propres de L.

Divers

Solution 79

1. Soient $x, y, z \in E$ et $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.

$$\begin{aligned}
\langle z, u(\lambda x + \mu y)\rangle &= -\langle u(z), \lambda x + \mu y\rangle && \text{par antisymétrie}\\
&= -\lambda\langle u(z), x\rangle - \mu\langle u(z), y\rangle && \text{par bilinéarité du produit scalaire}\\
&= \lambda\langle z, u(x)\rangle + \mu\langle z, u(y)\rangle && \text{par antisymétrie}
\end{aligned}$$

On a donc $\langle z, u(\lambda x + \mu y) - \lambda u(x) - \mu(y)\rangle = 0$ pour tout $z \in E$. Comme $E^\perp = \{0_E\}$, $u(\lambda x + \mu y) - \lambda u(x) - \mu(y) = 0_E$. D'où la linéarité de u.

2. $(i) \Rightarrow (ii)$ Soient $x, y \in E$. Alors $\langle u(x+y), x+y\rangle = 0$. Or, par linéarité de u et bilinéarité du produit scalaire :

$$\langle u(x+y), x+y\rangle = \langle u(x), x\rangle + \langle u(x), y\rangle + \langle u(y), x\rangle + \langle u(y), y\rangle = \langle u(x), y\rangle + \langle u(y), x\rangle$$

D'où l'antisymétrie de u.

$(ii) \Rightarrow (iii)$ On a vu dans la question précédente que u était linéaire. Soit $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$ une base orthonormée de E et A la matrice de u dans cette base. Comme $\mathcal{B}$ est orthonormée, $u(e_j) = \sum_{i=1}^{n} \langle u(e_j), e_i\rangle e_i$ pour $1 \le j \le n$. On en déduit que $a_{ij} = \langle u(e_j), e_i\rangle$ pour $1 \le i, j \le n$. Or, par antisymétrie de u, $\langle u(e_j), e_i\rangle = -\langle u(e_i), e_j\rangle$ i.e. $a_{ij} = -a_{ji}$ pour $1 \le i, j \le n$. On en déduit que A est antisymétrique.

$(iii) \Rightarrow (i)$ u est bien linéaire par hypothèse. Soient $\mathcal{B}$ une base orthonormale de E et A la matrice de u dans $\mathcal{B}$. Soit $x \in \mathrm{E}$ et X la matrice colonne de x dans $\mathcal{B}$. Alors

$$\langle u(x), x\rangle = (\mathrm{MX})^{\top}\mathrm{X} = -\mathrm{X}^{\top}\mathrm{MX} = -\langle x, u(x)\rangle$$

On en déduit que $\langle u(x), x\rangle = 0$.

3. Fixons une base orthonormée $\mathcal{B}$ de E et considérons Φ l'isomorphisme de $\mathcal{L}(\mathrm{E})$ dans $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ qui à un endomorphisme de E associe sa matrice dans la base $\mathcal{B}$. D'après la question précédente, $\Phi(\mathrm{A}(\mathrm{E})) = \mathrm{A}_n(\mathbb{R})$ où $\mathrm{A}_n(\mathbb{R})$ est le sous-espace vectoriel de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ constitué des matrices antisymétriques. On a donc également $\mathrm{A}(\mathrm{E}) = \Phi^{-1}(\mathrm{A}_n(\mathbb{R}))$ donc $\mathrm{A}(\mathrm{E})$ est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(\mathrm{E})$ comme image d'un sous-espace vectoriel par une application linéaire et $\dim \mathrm{A}(\mathrm{E}) = \dim \mathrm{A}_n(\mathbb{R}) = \dfrac{n(n-1)}{2}$ car Φ est un isomorphisme.

4. Soient $x \in \operatorname{Ker} u$ et $y \in \operatorname{Im} u$. Il existe $z \in \mathrm{E}$ tel que $y = u(z)$.

$$\langle x, y\rangle = \langle x, u(z)\rangle = -\langle z, u(x)\rangle = -\langle z, 0_{\mathrm{E}}\rangle = 0$$

Ainsi $\operatorname{Im} u \subset (\operatorname{Ker} u)^{\perp}$. D'après le théorème du rang $\dim \operatorname{Im} u = n - \dim \operatorname{Ker} u = \dim(\operatorname{Ker} u)^{\perp}$. Ainsi $\operatorname{Im} u = (\operatorname{Ker} u)^{\perp}$.

5. Soit F un sous-espace vectoriel stable par u. Soient $x \in \mathrm{F}^{\perp}$. Alors, pour tout $y \in \mathrm{F}$, $\langle u(x), y\rangle = -\langle x, u(y)\rangle = 0$ car $u(y) \in \mathrm{F}$. Ainsi $u(x) \in \mathrm{F}^{\perp}$, ce qui prouve que $u(\mathrm{F}^{\perp}) \subset \mathrm{F}^{\perp}$.

Solution 80

Soit $\mathrm{A} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ antisymétrique. Si A est nulle, $\operatorname{rg} \mathrm{A} = 0$ et donc le rang de A est pair.
Sinon, notons u l'endomorphisme de $\mathbb{R}^n$ canoniquement associée à A. On munit $\mathbb{R}^n$ de son produit scalaire canonique et on se donne une base orthonormale $\mathcal{B}$ de $\mathbb{R}^n$ adaptée à la décomposition en somme directe $\mathbb{R}^n = \mathrm{S} \oplus \operatorname{Ker} u$ où S est un supplémentaire de $\operatorname{Ker} u$. La matrice de u dans cette base $\mathcal{B}$ est de la forme $\mathrm{A}' = \begin{pmatrix} \mathrm{B} & 0 \\ \mathrm{C} & 0 \end{pmatrix}$ avec B carrée de taille $p = \dim \mathrm{S}$. Si on note P la matrice de passage de la base canonique vers la base $\mathcal{B}$, P est orthogonale et $\mathrm{A}' = \mathrm{P}^{-1}\mathrm{BP} = \mathrm{P}^{\top}\mathrm{AP}$. On en déduit que A′ est également antisymétrique et donc B est antisymétrique et C est nulle. On a donc $\mathrm{A}' = \begin{pmatrix} \mathrm{B} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. On a $\operatorname{rg} \mathrm{A}' = \operatorname{rg} \mathrm{B}$ mais comme S est un supplémentaire de $\operatorname{Ker} u$, $\operatorname{rg} \mathrm{A}' = \dim \mathrm{S} = p$, ce qui prouve que B est inversible. Or $\det(\mathrm{B}^{\top}) = \det(-\mathrm{B}) = (-1)^p \det \mathrm{B}$ donc p est pair sinon on aurait $\det \mathrm{B} = 0$ et B non inversible.

Solution 81

---

1. Si A est symétrique $\mathrm{A}^{\top} = \mathrm{A}$ et donc $\mathrm{A}^2 = \mathrm{I}_n$. On en déduit que a est une symétrie orthogonale.

2. **Première méthode.** Remarquons que

$$\mathrm{A} = (\mathrm{A}^{\top})^2 + \mathrm{A}^{\top} - \mathrm{I}_n = (\mathrm{A}^2 + \mathrm{A} - \mathrm{I}_n)^2 + (\mathrm{A}^2 + \mathrm{A} - \mathrm{I}_n) - \mathrm{I}_n$$

Après simplification, on obtient

$$\mathrm{A}^4 + 2\mathrm{A}^2 - 2\mathrm{A} - \mathrm{I}_n = 0$$

Ainsi $\mathrm{X}^4 + 2\mathrm{X}^3 - 2\mathrm{X} - 1 = (\mathrm{X}-1)(\mathrm{X}+1)^3$ est un polynôme annulateur de A. Ainsi $\mathrm{Sp}(\mathrm{A}) \subset \{-1, 1\}$. On en déduit que 0 est la seule valeur propre de $\mathrm{A}^{\top} - \mathrm{A} = \mathrm{A}^2 - \mathrm{I}_n$. Autrement dit, $\mathrm{M} = \mathrm{A}^{\top} - \mathrm{A}$ est nilpotente. Comme $\mathrm{A}^{\top} = \mathrm{A}^2 + \mathrm{A} - \mathrm{I}_n$, $\mathrm{A}^{\top}$ commute avec A puis $\mathrm{M}^{\top}$ commute avec M. On en déduit que $\mathrm{M}^{\top}\mathrm{M}$ est également nilpotente. Comme $\mathrm{M}^{\top}\mathrm{M}$ est symétrique réelle, elle est également diagonalisable donc nulle. Ainsi

$$\|\mathrm{M}\|^2 = \operatorname{tr}(\mathrm{M}^{\top}\mathrm{M}) = 0$$

puis $\mathrm{M} = 0$. Ceci signifie que $\mathrm{A}^{\top} = \mathrm{A}$ et on est ramené à la question précédente : a est à nouveau une symétrie orthogonale.

Deuxième méthode. Posons $\mathrm{S} = \dfrac{\mathrm{A} + \mathrm{A}^{\top}}{2}$ et $\mathrm{T} = \dfrac{\mathrm{A} - \mathrm{A}^{\top}}{2}$. Alors $\mathrm{A} = \mathrm{S} + \mathrm{T}$ et S et T sont respectivement symétrique et antisymétrique. Comme A et $\mathrm{A}^{\top}$ commutent, S et T commutent également. L'égalité $\mathrm{A}^{\top} = \mathrm{A}^2 + \mathrm{A} - \mathrm{I}_n$ peut alors s'écrire

$$\mathrm{S} - \mathrm{T} = \mathrm{S}^2 + \mathrm{T}^2 + 2\mathrm{ST} + \mathrm{S} + \mathrm{T} - \mathrm{I}_n$$

ou encore

$$\mathrm{S}^2 + \mathrm{T}^2 + 2\mathrm{ST} + 2\mathrm{T} = \mathrm{I}_n$$

Remarquons que ST est antisymétrique. Comme toute matrice s'écrit de manière unique comme la somme d'une matrice symétrique et d'une matrice antisymétrique,

$$\begin{cases} S^2 + T^2 = I_n \\ ST + T = 0 \end{cases}$$

puis

$$\begin{cases} S^2 + T^2 = I_n \\ S^2T^2 = T^2 \end{cases}$$

Comme S^2 et T^2 sont symétriques et diagonalisables, elles possèdent une base commune de vecteurs propres. En notant $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ et $\mu_1, \dots, \mu_n$ leurs valeurs propres respectives, on a alors

$$\forall i \in [\![1, n]\!], \begin{cases} \lambda + \mu & = 1 \\ \lambda\mu & = \mu \end{cases}$$

On en déduit sans peine que $\lambda_i = 1$ et $\mu_i = 0$. Ainsi $T^2 = 0$ et $S^2 = I_n$. De plus,

$$\|T\|^2 = \operatorname{tr}(T^\top T) = \operatorname{tr}(-T^2) = 0$$

donc $T = 0$. Ainsi $A = S = A^\top$ et $A^2 = S^2 = I_n$. a est donc une symétrie orthogonale.

Solution 82

1. Soit $(x, y) \in E^2$. Alors $\langle u(x+y), x+y \rangle = 0$. En développant, on obtient

$$\langle u(x), x \rangle + \langle u(x), y \rangle + \langle u(y), x \rangle + \langle u(y), y \rangle$$

puis $\langle u(y), x \rangle = -\langle u(x), y \rangle$ car $\langle u(x), x \rangle = \langle u(y), y \rangle = 0$.
Soit $(e_1, \dots, e_n)$ une base orthonormale de E. On note A la matrice de u dans $\mathcal{B}$. On a alors $A_{i,j} = \langle u(e_j), e_i \rangle$ pour $(i, j) \in [\![1, n]\!]^2$. D'après ce qui précède,

$$A_{i,j} = \langle u(e_j), e_i \rangle = -\langle u(e_i), e_j \rangle = -A_{j,i}$$

Ainsi A est antisymétrique.

2. Soit $x \in (\operatorname{Ker} u)^\perp$. Alors pour tout $y \in \operatorname{Ker} u$,

$$\langle u(x), y \rangle = -\langle x, u(y) \rangle = -\langle x, 0_E \rangle = 0$$

donc $u(x) \in (\operatorname{Ker} u)^\perp$ et $(\operatorname{Ker} u)^\perp$ est stable par u.

3. On choisit une base orthonormale de $\operatorname{Ker} u$ et une base orthnormale de $(\operatorname{Ker} u)^\perp$. La concaténation de ces deux bases est une base orthonormale de E dans laquelle la matrice de u est de la forme $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & N \end{pmatrix}$ où $N \in \mathcal{M}_r(\mathbb{R})$ avec $r = \dim(\operatorname{Ker} u)^\perp = n - \dim \operatorname{Ker} u = \operatorname{rg} u$. Or $\operatorname{rg}(u) = \operatorname{rg}(A) = \operatorname{rg}(N)$ donc N est inversible.

4. Comme A est antisymétrique, N l'est également. Ainsi $\det(N) = \det(N^\top) = \det(-N) = (-1)^r \det(N)$. Comme N est inversible, $\det(N) \neq 0$ donc $(-1)^r = 1$ et $r = \operatorname{rg}(u)$ est pair.

Solution 83

1. La bilinéarité vient de la linéarité de la trace. De plus, pour tout $M \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $\operatorname{tr}(M^\top) = \operatorname{tr}(M)$. Par conséquent, $\operatorname{tr}(A^\top B) = \operatorname{tr}(B^\top A)$, d'où la symétrie. De plus,

$$\operatorname{tr}(A^\top B) = \sum_{1 \leq i,j \leq n} a_{ij} b_{ij}$$

et en particulier

$$\operatorname{tr}(A^\top A) = \sum_{1 \leq i,j \leq n} a_{ij}^2 \geq 0$$

Cette dernière somme ne s'annulant que si tous les a_{ij} sont nuls i.e. $A = 0$. L'application est donc définie positive.
On vérifie sans difficulté que la base canonique de $\mathcal{M}_n(\mathbb{R})$ est orthonormée.

2. D'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz,
$$|\operatorname{tr}(\mathrm{A})| = |\operatorname{tr}(\mathrm{I}_n\mathrm{A})| \leq \|\mathrm{I}_n\|\|\mathrm{A}\|$$
On vérifie facilement que $\|\mathrm{I}_n\| = \sqrt{n}$.

3. **a.** Soient $\mathrm{A} \in \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ et $\mathrm{S} \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.
$$(\mathrm{A}|\mathrm{S}) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{S}) = -\operatorname{tr}(\mathrm{AS})$$
$$(\mathrm{S}|\mathrm{A}) = \operatorname{tr}(\mathrm{S}^\top\mathrm{A}) = \operatorname{tr}(\mathrm{SA})$$
Or $\operatorname{tr}(\mathrm{SA}) = \operatorname{tr}(\mathrm{AS})$ donc $(\mathrm{A}|\mathrm{S}) = 0$. Les sous-espaces vectoriels $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ et $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ sont donc orthogonaux. On sait également que $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ et $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ sont supplémentaires dans $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$. On en déduit donc que $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ est l'orthogonal de $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.

b. $d(\mathrm{A}, \mathcal{S}_n(\mathbb{R})) = \|\mathrm{A} - p(\mathrm{A})\|$ où p désigne la projection orthogonale sur $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$, c'est-à-dire la projection sur $\mathcal{S}_n(\mathbb{R})$ parallèlement à $\mathcal{A}_n(\mathbb{R})$. On trouve facilement que $p(\mathrm{A}) = \dfrac{\mathrm{A}^\top + \mathrm{A}}{2}$. Ainsi
$$\|\mathrm{A} - p(\mathrm{A})\| = \frac{1}{2}\|\mathrm{A} - \mathrm{A}^\top\| = \frac{1}{2}\sqrt{\sum_{1\leq i,j\leq n}(a_{ij} - a_{ji})^2}$$
en utilisant la formule donnant le carré de la norme vue à la première question.

4. Comme $\mathrm{U} \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$, $\mathrm{U}^\top\mathrm{U} = \mathrm{U}\mathrm{U}^\top = \mathrm{I}_n$.
$$\|\mathrm{UA}\|^2 = \operatorname{tr}((\mathrm{UA})^\top\mathrm{UA}) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{U}^\top\mathrm{UA}) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{A}) = \|\mathrm{A}\|^2$$
$$\|\mathrm{AU}\|^2 = \operatorname{tr}((\mathrm{AU})^\top\mathrm{AU}) = \operatorname{tr}(\mathrm{U}^\top\mathrm{A}^\top\mathrm{AU}) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{AUU}^\top) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{A}) = \|\mathrm{A}\|^2$$

5. D'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz
$$\begin{aligned}\|\mathrm{AB}\|^2 &= \operatorname{tr}(\mathrm{B}^\top\mathrm{A}^\top\mathrm{AB}) = \operatorname{tr}(\mathrm{A}^\top\mathrm{ABB}^\top) = \operatorname{tr}((\mathrm{A}^\top\mathrm{A})^\top\mathrm{BB}^\top)\\ &= (\mathrm{A}^\top\mathrm{A}|\mathrm{BB}^\top) \leq \|\mathrm{A}^\top\mathrm{A}\|\|\mathrm{BB}^\top\| = \|\mathrm{A}^\top\mathrm{A}\|\|\mathrm{B}^\top\mathrm{B}\|\end{aligned}$$
car $\|\mathrm{BB}^\top\|^2 = \operatorname{tr}(\mathrm{BB}^\top\mathrm{BB}^\top) = \operatorname{tr}(\mathrm{B}^\top\mathrm{BB}^\top\mathrm{B}) = \|\mathrm{B}^\top\mathrm{B}\|^2$. En utilisant la formule donnant le carré de la norme vue à la première question, on a :
$$\|\mathrm{A}^\top\mathrm{A}\|^2 = \sum_{1\leq i,j\leq n}\left(\sum_{k=1}^n a_{ki}a_{kj}\right)^2$$
Or pour tous $i, j \in [\![1, n]\!]$, on a d'après Cauchy-Schwarz dans $\mathbb{R}^n$,
$$\sum_{k=1}^n a_{ki}a_{kj} \leq \sqrt{\mathrm{S}_i}\sqrt{\mathrm{S}_j}$$
avec $\mathrm{S}_i = \displaystyle\sum_{k=1}^n a_{ki}^2$ pour $1 \leq i \leq n$. Ainsi
$$\|\mathrm{A}^\top\mathrm{A}\|^2 \leq \sum_{1\leq i,j\leq n}\mathrm{S}_i\mathrm{S}_j = \left(\sum_{i=1}^n \mathrm{S}_i\right)\left(\sum_{j=1}^n \mathrm{S}_j\right) = \left(\sum_{l=1}^n \mathrm{S}_l\right)^2$$
Par conséquent,
$$\|\mathrm{A}^\top\mathrm{A}\| \leq \sum_{1\leq k,l\leq n} a_{kl}^2 = \|\mathrm{A}\|^2$$
On a donc également $\|\mathrm{B}^\top\mathrm{B}\| \leq \|\mathrm{B}\|^2$, ce qui nous donne finalement l'inégalité demandée.

Solution 84

Pour simplifier, on peut supposer $u_1, \dots, u_{n+1}$ unitaires de sorte que pour $i, j \in [\![1, n+1]\!]$ distincts, $(u_i \mid u_j) = \cos\alpha_n$.

Première méthode

Notons $u'_1, \dots, u'_n$ les projections orthogonales de $u_1, \dots, u_n$ sur $\text{vect}(u_{n+1})^\perp$. Pour $i \in [\![1, n]\!]$ $u'_i = u_i - (\cos\alpha_n)u_{n+1}$ et par le théorème de Pythagore, $\|u'_i\|^2 = \|u_i\|^2 - (\cos^2\alpha_n)\|u_{n+1}\|^2 = 1 - \cos^2\alpha_n$. Pour $i, j \in [\![1, n]\!]$ distincts

$$(u'_i \mid u'_j) = (u_i|u_j) - \cos\alpha_n\left((u_i|u_{n+1}) + (u_j|u_{n+1})\right) + \cos^2\alpha_n\|u_{n+1}\|^2 = \cos\alpha_n - \cos^2\alpha_n$$

Par conséquent,

$$\frac{(u'_i \mid u'_j)}{\|u'_i\|\,\|u'_j\|} = \frac{\cos\alpha_n - \cos\alpha_n^2}{1 - \cos\alpha_n^2} = \frac{\cos\alpha_n}{1 + \cos\alpha_n}$$

Les vecteurs $u'_1, \dots, u'_n$ font donc un angle constant α_{n-1} deux à deux. De plus, $\cos\alpha_{n-1} = \dfrac{\cos\alpha_n}{1 + \cos\alpha_n}$ i.e. $\cos\alpha_n = \dfrac{\cos\alpha_{n-1}}{1 - \cos\alpha_{n-1}}$.
L'énoncé n'a de sens que pour $n \geq 2$. On trouve aisément $\alpha_2 = \dfrac{2\pi}{3}$. Posons $z_n = \dfrac{1}{\cos\alpha_n}$. La suite (z_n) vérifie la relation de récurrence $z_n = z_{n-1} - 1$. Puisque $z_2 = -2$, on trouve $z_n = -n$ pour tout $n \geq 2$. Ainsi $\alpha_n = \arccos\left(-\dfrac{1}{n}\right)$.

Deuxième méthode

Puisque $\dim E = n$, les $n+1$ vecteurs $u_1, \dots, u_{n+1}$ forment une famille liée. Il existe donc $(\lambda_1, \dots, \lambda_{n+1}) \in \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{(0, \dots, 0)\}$ tel que $\displaystyle\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i u_i = 0_E$. Fixons $j \in [\![1, n+1]\!]$. On a donc

$$\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i(u_i \mid u_j) = (0_E \mid u_j) = 0$$

ou encore

$$\lambda_j + \sum_{i \neq j} \lambda_i \cos\alpha_n = 0$$

Posons $\Lambda = \displaystyle\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i$. L'égalité précédente s'écrit encore

$$\lambda_j + (\Lambda - \lambda_j)\cos\alpha_n = 0$$

ce qui équivaut à

$$\lambda_j(1 - \cos\alpha_n) + \Lambda\cos\alpha_n = 0$$

En sommant ces égalités pour $j \in [\![1, n+1]\!]$, on obtient

$$\Lambda(1 - \cos\alpha_n) + (n+1)\Lambda\cos\alpha_n = 0$$

ou encore

$$\Lambda(1 + n\cos\alpha_n) = 0$$

Par ailleurs, il existe $j \in [\![1, n+1]\!]$ tel que $\lambda_j \neq 0$ et on rapelle que $\lambda_j(1 - \cos\alpha_n) + \Lambda\cos\alpha_n = 0$. Si on avait $\Lambda = 0$, on aurait donc $\cos\alpha_n = 1$, ce qui est exclu par l'énoncé. Ainsi $\Lambda \neq 0$, ce qui permet d'affirmer que $\cos\alpha_n = -\dfrac{1}{n}$. On cherche implicitement un angle α_n *non orienté* donc $\alpha_n = \arccos\left(-\dfrac{1}{n}\right)$.

Solution 85

Soit $X \in \operatorname{Ker} A$. On a donc $AX = 0$ puis $A^\top AX = 0$ donc $X \in \operatorname{Ker} A^\top A$. Ainsi $\operatorname{Ker} A \subset \operatorname{Ker} A^\top A$.
Soit maintenant $X \in \operatorname{Ker} A^\top A$. On a donc $A^\top AX = 0$ puis $X^\top A^\top AX = 0$. Notons $Y = AX$. Ainsi $Y^\top Y = 0$. Or $Y^\top Y$ est la somme des carrés des composantes de Y donc $Y = 0$ i.e. $AX = 0$. D'où $X \in \operatorname{Ker} A$. Ainsi $\operatorname{Ker} A^\top A \subset \operatorname{Ker} A$.
Finalement, $\operatorname{Ker} A = \operatorname{Ker} A^\top A$ et $\operatorname{rg} A = \operatorname{rg} A^\top A$ via le théorème du rang. En changeant A en $A^\top$, on a également $\operatorname{rg} A^\top = \operatorname{rg} AA^\top$. Or $\operatorname{rg} A = \operatorname{rg} A^\top$. Ainsi $\operatorname{rg} A^\top A = \operatorname{rg} AA^\top = \operatorname{rg} A$.

Solution 86

---

1. Évident.

2. On va montrer que F admet pour supplémentaire la droite vectorielle $\mathbb{R}_0[X]$ dans $\mathbb{R}[X]$.

Soit $P \in \mathbb{R}_0[X] \cap F$. Alors il existe $(\lambda_n) \in \mathbb{R}^{(\mathbb{N}^*)}$ tel que $P = \sum_{n=1}^{+infty} \lambda_n(1+X^n)$. On a donc

$$P = \left(\sum_{n=1}^{+\infty} \lambda_n\right) + \sum_{n=1}^{+\infty} \lambda_n X^n$$

Mais comme $\deg P \leq 0$, $\lambda_n = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$ et donc $P = 0$. Ainsi F et $\mathbb{R}_0[X]$ sont en somme directe.

3. Soit $P \in F^\perp$. Posons $P = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n X^n$ avec $(a_n) \in \mathbb{R}^{(\mathbb{N})}$. Puisque $\langle P, 1+X^n \rangle = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, on a $a_0 + a_n = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. Mais comme la suite (a_n) est nulle à partir d'un certain rang, on en déduit que $a_0 = 0$ puis que $a_n = 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. Ainsi $P = 0$ puis $F^\perp = \{0\}$.
En particulier, $F \oplus F^\perp = F \neq \mathbb{R}[X]$ puisque F est un hyperplan de $\mathbb{R}[X]$.