Corrigé TD : Espaces préhilbertiens réels

Solution 1.

1. Prouvons que $\langle\cdot|\cdot\rangle$ définit un produit scalaire.

   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est bilinéaire par bilinéarité du produit sur $\mathbb{R}$ et par linéarité de l'évaluation.
   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est symétrique par commutativité du produit sur $\mathbb{R}$.
   - Soit $P \in E$. On a $\langle P|P\rangle = P^2(-1) + P^2(0) + P^2(1) \geqslant 0$, la forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc positive.
   - Soit $P \in E$. Puisqu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls , on a

   $$\langle P|P\rangle = P^2(-1) + P^2(0) + P^2(1) = 0$$

   si et seulement si $0, 1, -1$ sont racines de P. Puisque P est de degré inférieur à deux , cette condition est équivalente à $P = 0$. La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc définie.

2. Prouvons que $\langle\cdot|\cdot\rangle$ définit un produit scalaire.

   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est bilinéaire par bilinéarité du produit sur $\mathbb{R}$ et par linéarité de l'évaluation.
   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est symétrique par commutativité du produit sur $\mathbb{R}$.
   - Soit $P \in E$. On a

   $$\langle P|P\rangle = P^2(x_0) + \dots + P^2(x_n) \geqslant 0,$$

   la forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc positive.
   - Soit $P \in E$. Puisqu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls , on a

   $$\langle P|P\rangle = P^2(x_0) + \cdots + P^2(x_n) = 0$$

   si et seulement si $x_0, \dots, x_n$ sont racines de P. Puisque P est de degré inférieur à n et que les x_k sont deux à deux distincts , cette condition est équivalente à $P = 0$. La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc définie.

3. Prouvons que $\langle\cdot|\cdot\rangle$ définit un produit scalaire.

   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est bilinéaire par bilinéarité du produit sur $\mathbb{R}$, par linéarité de la dérivation des polynômes et par linéarité de l'évaluation.
   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est symétrique par commutativité du produit sur $\mathbb{R}$.
   - Soit $P \in E$. On a

   $$\langle P|P\rangle = P^2(a_0) + \dots + (P^{(n)})^2(a_n) \geqslant 0,$$

   la forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc positive.
   - Soit $P \in E$ tel que

   $$\langle P|P\rangle = P^2(a_0) + \dots + (P^{(n)})^2(a_n) = 0.$$

   Puisqu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les réels sont nuls, on a $(P^{(n)})^2(a_n) = 0$. Puisque P est de degré inférieur à n, $P^{(n)}$ est une constante , qui est donc nulle d'après l'égalité précédente. P est donc de degré inférieur à $n-1$, et puisque

   $$(P^{(n-1)})^2(a_{n-1}) = 0,$$

   on en déduit que la constante $P^{(n-1)}$ est nulle et donc que P est de degré inférieur à $n-2$. Par une récurrence descendante immédiate, on prouve que $P = 0$. La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc définie.

4. Prouvons que $\langle \cdot | \cdot \rangle$ définit un produit scalaire sur E.

   - L'application $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est bilinéaire par linéarité du produit sur $\mathbb{R}$, de l'évaluation et de l'intégrale.
   - La forme bilinéaire $\langle \cdot | \cdot_, \rangle$ est symétrique car le produit sur $\mathbb{R}$ est commutatif.
   - Soit $P \in E$. Par positivité de l'intégrale , on a

   $$\langle P|P\rangle = \int_0^1 P(t)^2 dt \geqslant 0.$$

   La forme bilinéaire $\langle \cdot | \cdot)$ est donc positive.

- Reprenons les notations précédentes. Puisque qu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls, l'égalité $\langle \mathrm{P}|\mathrm{P}\rangle = 0$ est équivalente à
$$\int_0^1 \mathrm{P}^2(t)dt = 0.$$
La fonction P^2 étant continue et positive , la condition est équivalente à $\mathrm{P} = 0$. La forme bilinéaire $\langle | \rangle$ est donc définie.

5. Prouvons que $\langle \cdot | \cdot \rangle$ définit un produit scalaire sur E.

- L'application $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est bilinéaire par linéarité du produit sur $\mathbb{R}$, de l'évaluation et de l'intégrale.
- La forme bilinéaire $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est symétrique car le produit sur $\mathbb{R}$ est commutatif.
- Soit $f \in \mathrm{E}$. Par positivité de l'intégrale , on a
$$\langle f|f\rangle = \int_0^1 f(t)^2 dt \geqslant 0.$$
La forme bilinéaire $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est donc positive.
- Reprenons les notations précédentes. Puisque qu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls, l'égalité $\langle f|f\rangle = 0$ est équivalente à
$$\int_0^1 f^2(t)dt = 0.$$
La fonction f^2 étant continue et positive la condition est équivalente à $f = 0$. La forme bilinéaire $\langle , \rangle$ est donc définie.

6. Prouvons que $(\cdot|\cdot)$ définit un produit scalaire sur E.

- Soient $\mathrm{A}, \mathrm{B}, \mathrm{C} \in \mathrm{E}$ et $\lambda \in \mathbb{R}$. On a
$$\begin{aligned}\langle \mathrm{A}|\lambda\mathrm{B} + \mathrm{C}\rangle &= \operatorname{tr}({}^t\mathrm{A}(\lambda\mathrm{B} + \mathrm{C})) = \operatorname{tr}(\lambda{}^t\mathrm{AB} + {}^t\mathrm{AC}) \\ &\quad \text{(par linéarité de la transposition)} \\ &= \lambda \operatorname{tr}({}^t\mathrm{AB}) + \operatorname{tr}({}^t\mathrm{AC}) \\ &\quad \text{(par linéarité de la trace)} \\ &= \lambda\langle \mathrm{A}|\mathrm{B}\rangle + \langle \mathrm{A}|\mathrm{C}\rangle\end{aligned}$$
L'application $(\cdot|\cdot)$ est donc linéaire à droite.
- Soient $\mathrm{A}, \mathrm{B} \in \mathrm{E}$. On a
$$\langle \mathrm{B}|\mathrm{A}\rangle = \operatorname{tr}({}^t\mathrm{BA}) = \operatorname{tr}({}^t({}^t\mathrm{AB})) = \operatorname{tr}({}^t\mathrm{AB}) = \langle \mathrm{A}|\mathrm{B}\rangle$$
L'application $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est symétrique donc linéaire à gauche puisqu'elle est linéaire à droite.
- Pour tout $\mathrm{A} = (a_{i,j})_{1 \leqslant i,j \leqslant n}$ et tout indice $1 \leqslant i \leqslant n$,
$$({}^t\mathrm{AA})_{i,i} = \sum_{k=1}^n a_{k,i}^2.$$
On a donc
$$\langle \mathrm{A}|\mathrm{A}\rangle = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_{k,i}^2 \geqslant 0.$$
La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc positive.
- Puisque sur $\mathbb{R}$, une somme de carrés est nulle *si et seulement si* tous les carrés sont nuls, on a, d'après le calcul précédent, $\langle \mathrm{A}|\mathrm{A}\rangle = 0$ *si et seulement si* $\forall 1 \leqslant k, i \leqslant n$, $a_{k,i} = 0$, ie $\mathrm{A} = 0$. La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc définie.

7. Prouvons que $\langle\cdot|\cdot\rangle$ définit un produit scalaire sur E.

- L'application $(\cdot|\cdot)$ est bilinéaire par linéarité du produit sur $\mathbb{R}$, de la dérivation et de l'intégrale.
- La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est symétrique car le produit sur $\mathbb{R}$ est commutatif.

- Soit $f \in \mathrm{E}$. Par positivité de l'intégrale , on a

$$(f|f) = f(1)^2 + \int_0^1 f'(t)^2 dt \geqslant 0.$$

La forme bilinéaire $\langle \, | \, \rangle$ est donc positive.

- Reprenons les notations précédentes. Puisque qu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls, l'égalité $\langle f|f \rangle = 0$ *implique*

$$f(1) = 0 \quad \text{et} \quad \int_0^1 f'^2(t)dt = 0.$$

La fonction f'^2 étant continue et positive, la deuxième condition est équivalente à $f' = 0$, la fonction f est donc constante et finalement nulle puisque $f(1) = 0$. La forme bilinéaire $\langle \cdot|\cdot \rangle$ est donc définie.

8. Prouvons que $\langle \cdot|\cdot \rangle$ est une forme bilinéaire symétrique définie positive sur E.

- *Symétrie* : pour tous f et g dans E, on a

$$\begin{aligned}
\langle f|g \rangle &= \int_0^1 (f(t)g(t) + f'(t)g'(t))dt \\
&= \int_0^1 (g(t)f(t) + g'(t)f'(t))dt \\
&= \langle g|f \rangle
\end{aligned}$$

par commutativité du produit sur le corps $(\mathbb{R}, +, \times)$.

- *Linéarité* : pour tous f, g et h dans E et $\lambda \in \mathbb{R}$, on a

$$\begin{aligned}
\langle f + \lambda g|h \rangle &= \int_0^1 ((f + \lambda g)(t)h(t) + (f + \lambda g)'(t)h'(t))dt \\
&= \int_0^1 (f(t)h(t) + \lambda g(t)h(t) + f'(t)h'(t) \\
&\qquad\qquad + \lambda g'(t)h'(t)) \\
&= \int_0^1 (f(t)h(t) + f'(t)h'(t))dt \\
&\qquad\qquad + \lambda \int_0^1 (g(t)h(t) + g'(t)h'(t))dt \\
&= \langle f|h \rangle + \lambda \langle g|h \rangle
\end{aligned}$$

par linéarité de la dérivation, de l'évaluation et de l'intégrale. Ainsi, $\langle \cdot|\cdot \rangle$ est linéaire à gauche donc bilinéaire sur E par symétrie.

- *Positivité* : pour tout f dans E, on a

$$\langle f|f \rangle = \int_0^1 (f^2(t) + (f')^2(t))dt \geqslant 0$$

par positivité de l'intégrale puisque $f^2 + (f')^2 \geqslant 0$.

- *Caractère défini* : pour tout f dans E, on a

$$\langle f|f \rangle = \int_0^1 (f^2(t) + (f')^2(t))dt = 0$$

si et seulement si $f^2 + (f')^2 = 0$ car l'intégrale sur un segment d'une fonction continue et positive est nulle *si et seulement si* cette fonction est nulle. Ceci équivaut à

$$f^2 = (f')^2 = 0,$$

ie $f = 0$.

Solution 2.

1. Prouvons que $\langle\cdot|\cdot\rangle$ définit un produit scalaire sur E.

   - L'application $(\cdot|\cdot)$ est bilinéaire par linéarité du produit sur $\mathbb{R}$, de la dérivation et de l'intégrale.
   - La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est symétrique car le produit sur $\mathbb{R}$ est commutatif.
   - Soit $f \in \mathrm{E}$. Par positivité de l'intégrale , on a

   $$(f|f) = f(1)^2 + \int_0^1 f'(t)^2 dt \geqslant 0.$$

   La forme bilinéaire $\langle\ |\ \rangle$ est donc positive.
   - Reprenons les notations précédentes. Puisque qu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls, l'égalité $\langle f|f\rangle = 0$ *implique*

   $$f(1) = 0 \quad \text{et} \quad \int_0^1 f'^2(t)dt = 0.$$

   La fonction f'^2 étant continue et positive, la deuxième condition est équivalente à $f' = 0$, la fonction f est donc constante et finalement nulle puisque $f(1) = 0$. La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc définie.

2. Appliquons l'inégalité de Cauchy-Schwarz aux fonctions de E définies par

   $$f \in \mathrm{E},\ g : t \in [0,1] \longmapsto t.$$

   Puisque

   $$\langle f|g\rangle = f(1) + \int_0^1 f'(t)dt,$$

   puis

   $$\|f\|^2 = f^2(1) + \int_0^1 f^2(t)dt$$

   et finalement

   $$\|g\|^2 = 1 + 1 = 2,$$

   l'inégalité s'écrit

   $$\left(f(1) + \int_0^1 f'(t)dt\right)^2 \leqslant 2\left(f^2(1) + \int_0^1 f'^2(t)dt\right).$$

Solution 3.

1. Prouvons que $\langle\cdot|\cdot\rangle$ définit un produit scalaire.

   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est bilinéaire par bilinéarité du produit sur $\mathbb{R}$ et par linéarité de l'évaluation.
   - $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est symétrique par commutativité du produit sur $\mathbb{R}$.
   - Soit $\mathrm{P} \in \mathrm{E}$. On a $\langle \mathrm{P}|\mathrm{P}\rangle = \mathrm{P}^2(-1) + \mathrm{P}^2(0) + \mathrm{P}^2(1) \geqslant 0$, la forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc positive.
   - Soit $\mathrm{P} \in \mathrm{E}$. Puisqu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls , on a

   $$\langle \mathrm{P}|\mathrm{P}\rangle = \mathrm{P}^2(-1) + \mathrm{P}^2(0) + \mathrm{P}^2(1) = 0$$

   si et seulement si $0, 1, -1$ sont racines de P. Puisque P est de degré inférieur à deux , cette condition est équivalente à $\mathrm{P} = 0$. La forme bilinéaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$ est donc définie.

2. Orthonormalisons la base canonique de E par le procédé de Gram-Schmidt.

▶ *Première étape*. On pose

$$\Gamma_1 = \frac{1}{\|1\|} = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

▶ *Deuxième étape*. Notons p_1 la projection orthogonale sur $\mathrm{vect}(\Gamma_1)$. Posons $n_1 = X - p_1(X)$. On a

$$n_1 = X - \langle X|\Gamma_1\rangle\Gamma_1 = X - 0\Gamma_1 = X$$

Puisque $\|n_1\| = \sqrt{2}$, on complète (Γ_1) par

$$\Gamma_2 = \frac{n_1}{\|n_1\|} = \frac{X}{\sqrt{2}}.$$

▶ *Troisième étape*. Notons p_2 la projection orthogonale sur $\mathrm{vect}(\Gamma_1, \Gamma_2)$. Posons $n_2 = X^2 - p_2(X^2)$. On a

$$\begin{aligned} n_2 &= X^2 - \langle X^2|\Gamma_1\rangle \cdot \Gamma_1 - \langle X^2|\Gamma_2\rangle \cdot \Gamma_2 \\ &= X^2 - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \Gamma_1 - 0 \cdot \Gamma_2 \\ &= X^2 - \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

Puisque $\|n_2\| = \sqrt{2/3}$, on complète (Γ_1, Γ_2) par

$$\Gamma_3 = \frac{n_2}{\|n_2\|} = \sqrt{3/2}(X^2 - 2/3).$$

La famille $(\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3)$ est une base orthonormée de E.

3. Posons

$$L_{-1} = \frac{X(X-1)}{2} \quad , \quad L_1 = \frac{X(X+1)}{2} \quad \text{et} \quad L_0 = 1 - X^2.$$

Il s'agit des polynômes de Lagrange associés aux réels ± 1 et 0. Cette famille est clairement orthonormée pour le produit scalaire $\langle\cdot|\cdot\rangle$, elle est donc libre dans E qui est de dimension trois : il s'agit d'une base orthonormée de E.

Remarque. Le procédé d'orthonormalisation de Gram-Schmidt est lourd en calculs au-delà de trois vecteurs…Il faut parfois avoir un peu de culture – voire du flair ! – mais surtout suivre les indications de l'énoncé pour trouver des bases orthonormées.

Solution 4.

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 $x_1, \dots, x_{n-1} \in E$, $x_1' \in E$ et $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$. Pour tout $x \in E$,

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

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 $x \in E$, $\langle u, x\rangle = \lambda\langle v, x\rangle + \mu\langle w, x\rangle$ i.e. $\langle u - (\lambda v + \mu w), x\rangle = 0$. Donc $u - (\lambda v + \mu w) \in E^{\perp} = \{0\}$. 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 5.

1. L'application $\langle .,. \rangle$ 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 6.

1. En développant $\|x+y\|^2$, on prouve sans peine que
$$\langle x|y\rangle = \frac{\|x+y\|^2 - \|x\|^2 - \|y\|^2}{2},$$
et l'on en déduit que
$$\forall (x,y) \in \mathrm{E}^2,\ \ \langle x|y\rangle = \sum_{i=1}^n \langle x|e_i\rangle\langle y|e_i\rangle.$$

2. Soit $x \in \mathrm{E}$. Posons
$$z = x - \sum_{i=1}^n \langle x|e_i\rangle e_i.$$
On a
$$\begin{aligned}\|z\|^2 = \sum_{k=1}^n \langle z|e_k\rangle^2 = \sum_{k=1}^n \left\langle x - \sum_{i=1}^n \langle x|e_i\rangle e_i \middle| e_k\right\rangle^2 = \sum_{k=1}^n \left(\langle x|e_k\rangle - \sum_{i=1}^n \langle x|e_i\rangle\langle e_k|e_i\rangle\right)^2 \\ = \sum_{k=1}^n (\langle x|e_k\rangle - \langle x|e_k\rangle)^2 = 0\end{aligned}$$
Ainsi $z = 0$, cqfd.

3. D'après la question précédente, la famille $(e_k)_{1 \leqslant k \leqslant n}$ est génératrice de E. Comme $n = \dim(\mathrm{E})$, cette famille est une base de E. Pour tout $1 \leqslant k \leqslant n$, on a
$$e_k = \sum_{i=1}^n \langle e_k|e_i\rangle e_i.$$
Ainsi, par identification des coordonées dans la base $(e_1, \dots, e_n)$,
$$\forall 1 \leqslant i \leqslant n,\ \ \langle e_k|e_i\rangle = \delta_{k,i}.$$
Comme cela est valable pour tout $1 \leqslant k \leqslant n$, on en déduit que la famille $(e_1, \dots, e_n)$ est une bon de E.

Solution 7.

1. Prouvons que $\langle \cdot | \cdot \rangle$ définit un produit scalaire sur E.

- L'application $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est bilinéaire par linéarité du produit sur $\mathbb{R}$, de l'évaluation et de l'intégrale.
- La forme bilinéaire $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est symétrique car le produit sur $\mathbb{R}$ est commutatif.
- Soit $f \in \mathrm{E}$. Par positivité de l'intégrale , on a
$$\langle f|f\rangle = \int_0^1 f(t)^2 dt \geqslant 0.$$
La forme bilinéaire $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est donc positive.
- Reprenons les notations précédentes. Puisque qu'une somme de réels positifs est nulle *si et seulement si* tous les termes sont nuls, l'égalité $\langle f|f\rangle = 0$ est équivalente à
$$\int_0^1 f^2(t)dt = 0.$$
La fonction f^2 étant continue et positive la condition est équivalente à $f = 0$. La forme bilinéaire $\langle , \rangle$ est donc définie.

2. *Calcul de* $\mathrm{F}^\perp$.

a. Soit $f \in \mathrm{F}^\perp$. On a alors
$$\forall g \in \mathrm{F},\ \ \langle f|g\rangle = 0.$$
Comme $\forall g \in \mathrm{F}$, on a $fg \in \mathrm{F}$ (car $(fg)(0) = 0$), on en déduit que :
$$\forall g \in \mathrm{F},\ \ \langle f|fg\rangle = 0.$$
Puisque $\forall g \in \mathrm{F}$,
$$\begin{aligned} 0 = \langle f|fg\rangle &= \int_0^1 f(t)f(t)g(t)dt = \int_0^1 f^2(t)g(t)dt \\ &= \langle f^2|g\rangle \end{aligned}$$
on a $f^2 \in \mathrm{F}^\perp$.

b. Notons $g_0 : [0,1] \to \mathbb{R}$ définie par $g_0(t) = t$. On a clairement $g_0 \in \mathrm{F}$. Ainsi, pour $f \in \mathrm{F}^\perp$, on déduit de la question précédente que $\langle f^2, g_0\rangle = 0$, i.e.
$$\int_0^1 tf^2(t)dt = 0.$$
Comme $f^2 g_0$ est continue et positive, on en déduit que $f^2 g_0 = 0$ et donc que :
$$\forall t \in [0,1],\ \ tf^2(t) = 0.$$
En particulier, $f(t) = 0$ pour tout $0 < t \leqslant 1$. On en déduit que $f(0) = 0$ par continuité de f en 0. Ainsi $f = 0$, ce qui achève de prouver que $\mathrm{F}^\perp = \{0\}$.

3. Non, car en dimension finie, on a $\mathrm{F}^\perp = \{0\}$ *si et seulement si* $\mathrm{F} = \mathrm{E}$, ce qui n'est manifestement pas le cas.

Solution 8.

s est clairement linéaire et $s^2 = \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}$ donc s est une symétrie. Soit $\mathrm{S} \in \mathrm{Ker}(s - \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})})$ et $\mathrm{A} \in \mathrm{Ker}(s + \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}$. Ainsi ${}^t\mathrm{S} = \mathrm{S}$ et ${}^t\mathrm{A} = -\mathrm{A}$. Par conséquent $\langle \mathrm{S}, \mathrm{A}\rangle = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{SA}) = \mathrm{tr}(\mathrm{SA})$ et $\langle \mathrm{A}, \mathrm{S}\rangle = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{AS}) = -\mathrm{tr}(\mathrm{AS}) = -\mathrm{tr}(\mathrm{SA})$. Donc $\langle \mathrm{S}, \mathrm{A}\rangle = 0$. Ceci signifie que $\mathrm{Ker}(s - \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})})$ et $\mathrm{Ker}(s + \mathrm{Id}_{\mathcal{M}_n(\mathbb{R})}$ sont orthogonaux l'un à l'autre : s est une symétrie orthogonale.

Solution 9.

1. Posons $\mathrm{A} = \mathrm{mat}_{\mathcal{B}}(f)$ et $\mathcal{B} = (e_1, \dots, e_n)$. Comme $\mathcal{B}$ est une base orthonormale, pour tout $j \in [\![1, n]\!]$, $f(e_j) = \sum_{i=1}^{n} \langle f(e_j), e_i \rangle e_i$. On en déduit que pour tout $(i, j) \in [\![1, n]\!]^2$,
$$a_{ij} = \langle f(e_j), e_i \rangle = \langle e_j, f(e_i) \rangle = \langle f(e_i), e_j \rangle = a_{ji}$$
Ainsi A est symétrique.

2. Soit $x \in \mathrm{Ker}\, f$ et $y \in \mathrm{Im}\, f$. 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 $\mathrm{Ker}\, f \subset (\mathrm{Im}\, f)^{\perp}$. De plus, $\dim(\mathrm{Im}\, f)^{\perp} = n - \dim \mathrm{Im}\, f = \dim \mathrm{Ker}\, f$ d'après le théorème du rang. Ainsi $\mathrm{Ker}\, f = (\mathrm{Im}\, f)^{\perp}$.

Solution 10.

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. $\mathrm{F} \cap \mathrm{G} \subset \mathrm{F}$ donc $\mathrm{F}^{\perp} \subset (\mathrm{F} \cap \mathrm{G})^{\perp}$ d'après la première question. De même, $\mathrm{F} \cap \mathrm{G} \subset \mathrm{G}$ donc $\mathrm{G}^{\perp} \subset (\mathrm{F} \cap \mathrm{G})^{\perp}$. On en déduit que $\mathrm{F}^{\perp} + \mathrm{G}^{\perp} \subset (\mathrm{F} \cap \mathrm{G})^{\perp}$.
Supposons E de dimension finie. Alors
$$\dim(\mathrm{F}^{\perp} + \mathrm{G}^{\perp}) = \dim \mathrm{F}^{\perp} + \dim \mathrm{G}^{\perp} - \dim(\mathrm{F}^{\perp} \cap \mathrm{G}^{\perp})$$
Or d'après la question précédente, $\mathrm{F}^{\perp} \cap \mathrm{G}^{\perp} = (\mathrm{F} + \mathrm{G})^{\perp}$ donc
$$\begin{aligned}\dim(\mathrm{F}^{\perp} + \mathrm{G}^{\perp}) &= \dim \mathrm{F}^{\perp} + \dim \mathrm{G}^{\perp} - \dim(\mathrm{F} + \mathrm{G})^{\perp} \\ &= (\dim \mathrm{E} - \dim \mathrm{F}) + (\dim \mathrm{E} - \dim \mathrm{G}) - (\dim \mathrm{E} - \dim(\mathrm{F} + \mathrm{G})) \\ &= \dim \mathrm{E} - (\dim \mathrm{F} + \dim \mathrm{G} - \dim(\mathrm{F} + \mathrm{G})) \\ &= \dim \mathrm{E} - \dim(\mathrm{F} \cap \mathrm{G}) = \dim(\mathrm{F} \cap \mathrm{G})^{\perp}\end{aligned}$$
Puisqu'on a précédemment montré que $\mathrm{F}^{\perp} + \mathrm{G}^{\perp} \subset (\mathrm{F} \cap \mathrm{G})^{\perp}$, on peut conclure que $(\mathrm{F} \cap \mathrm{G})^{\perp} = \mathrm{F}^{\perp} + \mathrm{G}^{\perp}$.

Solution 11.

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 $x \in \mathrm{E}$, $p(x) = \langle x, u \rangle u$. Notons X le vecteur colonne associé à un vecteur x de E. On a $\mathrm{PX} = ({}^t\mathrm{UX})\mathrm{U} = \mathrm{U}({}^t\mathrm{UX}) = \mathrm{U}^t\mathrm{UX}$. La matrice de P dans $\mathcal{B}$ est donc UU^t.

Solution 12.

▶ Prouvons que **1.** ⇒ **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.** ⇒ **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.** ⇒ **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 13.

Commençons par établir un plan de bataille…Il nous faut calculer une base orthonormée de F afin de calculer la projection orthogonale p sur F. On commence donc par déterminer une base de F qu'il faudra ensuite orthonormaliser par le procédé de Schmidt.

▶ *Détermination d'une base de* F. Il est clair que le système d'équations définissant F est équivalent à

$$x_1 + x_3 = x_2 + x_4 = 0.$$

Un vecteur X appartient donc à F *si et seulement si* il est de la forme

$$\mathrm{X} = x_1(1, 0, -1, 0) + x_2(0, 1, 0, -1)$$

où $x_1, x_2 \in \mathbb{R}$. Posons

$$u = (1, 0, -1, 0) \quad \text{et} \quad v = (0, 1, 0, -1).$$

La famille (u, v) est clairement libre et génératrice de F , il s'agit d'une base de ce sous-espace de $\mathbb{R}^4$.

▶ *Détermination d'une base orthonormée de* F. La base (u, v) est clairement orthogonale. Puisque l'on a $\|u\| = \|v\| = \sqrt{2}$, la famille formée par

$$u' = (1/\sqrt{2}, 0, -1/\sqrt{2}, 0) \;\text{ et }\; v' = (0, 1/\sqrt{2}, 0, -1/\sqrt{2}).$$

est une base orthonormée de F.

▶ *Calcul de* p. Pour tout vecteur x de E, on a

$$p(x) = (x|u')u' + (x|v')v'.$$

Ainsi , en notant $\mathcal{B} = (e_1, e_2, e_3, e_4)$ la base canonique de E, on a

$$p(e_1) = (1/2, 0, -1/2, 0) \quad , \quad p(e_2) = (0, 1/2, 0, -1/2),$$

puis

$$p(e_3) = (-1/2, 0, 1/2, 0) \quad \text{et} \quad p(e_4) = (0, -1/2, 0, 1/2).$$

Ainsi

$$\operatorname{mat}_{\mathcal{B}}(p) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Solution 14.

1. Pout tout $P \in E$, la formule de Taylor s'écrit

$$P = P(1) + P'(1)(X-1) + \frac{P''(1)}{2}(X-1)^2.$$

Un polynôme P de F est donc combinaison linéaire des vecteurs

$$P_1 = X - 1, \quad P_2 = (X-1)^2.$$

Puisque ces deux polynômes appartiennent à F et ne sont pas proportionnels, la famille (P_1, P_2) est une base de F.

2. D'après le cours, la quantité $||X-P||^2$ est minimale lorsque $P = \pi_F(X)$, où π_F désigne la projection orthogonale sur F. Orthonormalisons la famille $(P_1 P_2)$ par le procédé de Gram-Schmidt. Posons

$$Q_1 = \frac{X-1}{||P_1||} = \frac{X-1}{\sqrt{2}}.$$

Notons π_1 la projection orthogonale sur vect(P_1). Posons

$$\begin{aligned} n &= (X-1)^2 - \pi_1((X-1)^2) \\ &= (X-1)^2 - \langle (X-1)^2 | Q_1 \rangle Q_1 \\ &= (X-1)^2 + \frac{3}{2}(X-1) \\ &= X^2 - X/2 - 1/2 \end{aligned}$$

Notons ensuite

$$Q_2 = \frac{n}{||n||} = \sqrt{2/3}n.$$

On a

$$\begin{aligned} \pi_F(X) &= \langle X|Q_1 \rangle Q_1 + \langle X|Q_2 \rangle Q_2 \\ &= \frac{X-1}{2} - \frac{1}{3}(X^2 - X/2 - 1/2) \\ &= -X^2/3 + 2/3X - 1/3 \end{aligned}$$

Ainsi

$$X - \pi_F(X) = (X^2 + X + 1)/3$$

et

$$\delta = \|X - \pi_F(X)\| = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Remarque. On pouvait aussi remarquer que l'orthogonal de F est la droite vectorielle engendrée par $X^2 + X + 1$, ce qui est plus facile à voir lorsque l'on choisit $(X-1, X(X-1))$ comme base de F. Le calcul de la projection et de la distance de X à F s'en trouve simplifié.

Solution 15.

Soit $E = \mathcal{C}([0;\pi], \mathbb{R})$. On munit E du produit scalaire $(f,g) \mapsto \int_0^\pi f(x)g(x)dx$.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

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

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 $d(x,F)^2 = \|\sin - p_F(\sin)\|^2$ 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 $e_1 = \frac{f_1}{\|f_1\|}$ et $e_2 = \frac{g}{\|g\|}$ avec $g = f_2 - \langle f_2, e_1\rangle e_1$. Alors $p_F(\sin) = \langle \sin, e_1\rangle e_1 + \langle \sin, e_2\rangle e_2$. D'après le théorème de Pythagore,

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

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

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

Seconde méthode

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

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

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 16.

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 $\{\mathrm{AX}, \mathrm{X} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})\} = \operatorname{Im} \mathrm{A}$, 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 Im A. Or AX est la projection de B sur Im A *si et seulement si* $\mathrm{AX} - \mathrm{B}$ est orthogonal à Im A. Or $\mathrm{AX} - \mathrm{B}$ est orthogonal à Im A *si et seulement si* il est orthogonal à chaque colonne de A puisque les colonnes de A engendrent Im A. Ainsi $\mathrm{X} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$ est pseudo-solution de $(\mathcal{S})$ *si et seulement si* ${}^t\mathrm{A}(\mathrm{AX} - \mathrm{B}) = 0$ i.e. *si et seulement si* X est solution de $(\mathcal{S}')$.
   Seconde méthode
   Supposons que X soit solution de $(\mathcal{S}')$ i.e. ${}^t\mathrm{A}(\mathrm{AX} - \mathrm{B}) = 0$. Alors pour tout $\mathrm{Y} \in \mathcal{M}_{n,1}(\mathbb{R})$

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

   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 $\langle \mathrm{Y}, {}^t\mathrm{A}(\mathrm{AX} - \mathrm{B}) = 0$, ce qui prouve que ${}^t\mathrm{A}(\mathrm{AX} - \mathrm{B}) = 0$ et que X est solution de $(\mathcal{S}')$.

4. Soit $X \in \operatorname{Ker} A$. On a donc $AX = 0$ puis ${}^tAAX = 0$ donc $X \in \operatorname{Ker} {}^tAA$. Ainsi $\operatorname{Ker} A \subset \operatorname{Ker} {}^tAA$.
Soit maintenant $X \in \operatorname{Ker} {}^tAA$. On a donc ${}^tAAX = 0$ puis ${}^tX{}^tAAX = 0$. Notons $Y = AX$. Ainsi ${}^tYY = 0$ i.e. $\|Y\|^2 = 0$ donc $Y = 0$ i.e. $AX = 0$. D'où $X \in \operatorname{Ker} A$. Ainsi $\operatorname{Ker} {}^tAA \subset \operatorname{Ker} A$.
Finalement, $\operatorname{Ker} A = \operatorname{Ker} {}^tAA$ et $\operatorname{rg} A = \operatorname{rg} {}^tAA$ via le théorème du rang.

5. Si $\operatorname{rg}(A) = n$, alors $\operatorname{rg}({}^tAA) = n$. La matrice ${}^tAA$ 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 17.

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

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

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

Solution 18.

Pour $x \in E$,

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

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

Solution 19.

Puisque $O(E)$ est un groupe, $r \circ s$ est un endomorphisme orthogonal de E. Comme

$$\det(r \circ s) = 1 \times -1 = -1,$$

$r \circ s$ est indirect : il s'agit d'une symétrie. On a donc

$$(r \circ s)^2 = r \circ s \circ r \circ s = id_{\mathrm{E}},$$

d'où $s \circ r \circ s = r^{-1}$ et $r \circ s \circ r = s^{-1} = s$.

Solution 20.

Notons

$$\vec{a} = \frac{\vec{u} + \vec{v} + \vec{w}}{\sqrt{3}}$$

un vecteur normé dirigeant l'axe de la rotation. D'après le cours, pour tout vecteur $\vec{x} \in \mathrm{E}$,

$$f(\vec{x}) = \langle \vec{x} | \vec{a} \rangle \vec{a} + \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)(\vec{x} - \langle \vec{x} | \vec{a} \rangle \vec{a}) + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)\vec{a} \wedge \vec{x}$$

ie

$$f(\vec{x}) = \frac{1}{2}\langle \vec{x} | \vec{a} \rangle \vec{a} - \frac{1}{2}\vec{x} + \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{a} \wedge \vec{x}.$$

On a donc

$$f(\vec{u}) = \vec{v}$$

puis

$$f(\vec{v}) = \vec{w}$$

et

$$f(\vec{w}) = \vec{u},$$

d'où

$$\operatorname{mat}_{\mathcal{B}}(f) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Remarque. L'esquisse d'un petit tétraèdre trirectangle permet de retrouver *empiriquement* le résultat démontré ci-dessus, à moins de se fendre d'une petite démonstration…

Solution 21.

Les colonnes de la matrice M étant normées et deux à deux orthogonales, la matrice étudié est orthogonale. Une simple application de la règle de Sarrus permet de conclure que le déterminant de f vaut 1 : f est donc une rotation ; notons θ son angle. Déterminons son axe en résolvant le système $\mathcal{S}$ suivant, $\mathrm{MX} = \mathrm{X}$…

$$\mathcal{S} \sim \begin{pmatrix} -1 & 1 & \sqrt{6} \\ 1 & -1 & -\sqrt{6} \\ -\sqrt{6} & \sqrt{6} & -2 \end{pmatrix}.$$

Effectuons $\mathrm{L}_2 \longleftarrow \mathrm{L}_2 + \mathrm{L}_1$, $\mathrm{L}_3 \longleftarrow \mathrm{L}_3 - \sqrt{6}\mathrm{L}_1$

$$\mathcal{S} \sim \begin{pmatrix} -1 & 1 & \sqrt{6} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -8 \end{pmatrix},$$

les solutions sont donc les vecteurs colinéaires au vecteur unitaire

$$\vec{a} = \frac{e_1 + e_2}{\sqrt{2}}.$$

Le vecteur e_3 est unitaire et orthogonal à $\vec{a}$ donc

$$\langle f(e_3)|e_3\rangle = \frac{1}{2} = \cos(\theta) \quad \text{et} \quad \text{Det}(a, u, f(u)) = \frac{\sqrt{3}}{2} = \sin(\theta),$$

f est donc la rotation d'axe orienté par $\vec{a}$ et d'angle $\pi/3$.

Solution 22.

- Prouvons **1)**$\Rightarrow$**2)** Soient x et y deux vecteurs non nuls de E. Comme

$$\left(\frac{x}{\|x\|} - \frac{y}{\|y\|}\right) \perp \left(\frac{x}{\|x\|} + \frac{y}{\|y\|}\right),$$

on a :

$$\left\langle \frac{x}{\|x\|} - \frac{y}{\|y\|} \middle| \frac{x}{\|x\|} + \frac{y}{\|y\|} \right\rangle = 0$$

i.e.

$$\frac{\|u(x)\|^2}{\|x\|^2} = \frac{\|u(y)\|^2}{\|y\|^2},$$

d'où, par positivité de la norme :

$$\frac{\|u(x)\|}{\|x\|} = \frac{\|u(y)\|}{\|y\|}.$$

La quantité

$$\frac{\|u(x)\|}{\|x\|}$$

est donc indépendante du vecteur $x \neq 0$. Notons-la k. On a

$$\forall x \neq 0, \ \ \|u(x)\| = k\|x\|.$$

Comme $u(x) = 0$, cette égalité est prolongeable à E :

$$\forall x \in \text{E}, \ \ \|u(x)\| = k\|x\|.$$

- Prouvons **2)**$\Rightarrow$**3)** Supposons que

$$\exists k \geqslant 0, \ \ \forall x \in \text{E}, \ \ \|u(x)\| = k\|x\|.$$

Si $k = 0$, u est la composée de n'importe quelle rotation avec l'homothétie de rapport nul. Si $k \neq 0$, alors $k > 0$, notons h_k l'homothétie de rapport k. On a, pour tout vecteur x de E,

$$\|((h_k)^{-1} \circ u)(x)\| = \frac{\|u(x)\|}{k} = \|x\|.$$

Ainsi l'endomorphisme $(h_k)^{-1} \circ u$ de E est une isométrie i de E et $u = h_k \circ i$.

- Prouvons **3)**$\Rightarrow$**1)** Si $u = h_k \circ i$ avec h_k homothétie de rapport $k \geqslant 0$ et i isométrie de E, alors, pour tous vecteurs x et y de E, on a

$$\langle u(x)|u(y)\rangle = k\langle x|y\rangle$$

et donc,

$$\langle x|y\rangle = 0 \quad \Rightarrow \quad \langle u(x)|u(y)\rangle = 0.$$

Solution 23.

- 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 nouvau 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 24.

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 25.

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 26.

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 27.

1. Soient $y \in \operatorname{Im} v$ et $z \in \operatorname{Ker} v$. Il existe donc $x \in E$ tel que $y = v(x)$ i.e. $y = x - u(x)$. On a également $v(z) = 0_E$ 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 $\dim\operatorname{Ker} v + \dim\operatorname{Im} v = \dim E$, donc $\operatorname{Im} v$ et $\operatorname{Ker} v$ sont supplémentaires.

2. Une composée d'automorphismes orthogonaux est un automorphisme orthogonal.

Solution 28.

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 :

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

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 $x, t \in \mathbb{R}$:

$$
\begin{aligned}
\cos(2\pi(x-t)) &= \cos(2\pi x)\cos(2\pi t) + \sin(2\pi x)\sin(2\pi t) \\
\sin(2\pi(x-t)) &= \sin(2\pi x)\cos(2\pi t) - \cos(2\pi x)\sin(2\pi t)
\end{aligned}
$$

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 $\mathrm{vect}(e_1, e_2, e_3) = \mathrm{E}$. 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 un automorphisme orthogonal.

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 $MX = X$ où $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3$.

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

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 $P_x = \mathrm{vect}(e_1, \cos(\pi x)e_2 + \sin(\pi x)e_3)$.

Solution 29.

Posons $g(x) = f(x) - f(0_E)$ pour tout $x \in E$. En particulier, $g(0_E) = 0 - E$.
Montrons que g conserve la norme. Soit $x \in E$. Alors, d'après l'énoncé,

$$\|g(x)\| = \|f(x) - f(0_E)\| = \|x - 0_E\| = \|x\|$$

Montrons que g conserve le produit scalaire. Soit $(x, y) \in E^2$. Alors

$$
\begin{aligned}
\langle g(x), g(y)\rangle &= \frac{1}{2}\left(\|g(x)\|^2 + \|g(y)\|^2 - \|g(x) - g(y)\|^2\right) \\
&= \frac{1}{2}\left(\|x\|^2 + \|y\|^2 - \|f(x) - f(y)\|^2\right) \\
&= \frac{1}{2}\left(\|x\|^2 + \|y\|^2 - \|x - y\|^2\right) \\
&= \langle x, y\rangle
\end{aligned}
$$

Montrons que g est linéaire. Soient $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ et $(x, y) \in E^2$.

$$
\begin{aligned}
\|g(\lambda x + \mu y) - \lambda g(x) - \mu g(y)\|^2 &= \|g(\lambda x + \mu y)\|^2 + \lambda^2\|g(x)\|^2 + \mu^2\|g(y)\|^2 \\
&\quad - 2\lambda\langle g(\lambda x + \mu y), g(x)\rangle - 2\mu\langle g(\lambda x + \mu y), g(y)\rangle + 2\lambda\mu\langle g(x), g(y)\rangle \\
&= \|\lambda x + \mu y\|^2 + \lambda^2\|x\|^2 + \mu^2\|y\|^2 \\
&\quad - 2\lambda\langle \lambda x + \mu y, x\rangle - 2\mu\langle \lambda x + \mu y, y\rangle + 2\lambda\mu\langle x, y\rangle \\
&= 0
\end{aligned}
$$

D'où $g(\lambda x + \mu y) = \lambda x + \mu y$. g est donc linéaire.
g est linéaire et conserve le produit scalaire : c'est un automorphisme orthogonal. Comme $f = g + f(0_E)$, f est la composée de g par la translation de vecteur $f(0_E)$.

Solution 30.

Supposons que f est une symétrie orthogonale. Alors f est un automorphisme orthogonal et donc A est orthogonale i.e. ${}^tAA = I_n$. De plus, f est une symétrie donc $A^2 = I_n$. On en déduit que ${}^tA = A$ et donc A est symétrique. Réciproquement, supposons A orthogonale et symétrique. Alors f est un automorphisme orthogonal. Or ${}^tAA = I_n$ et ${}^tA = A$ donc $A^2 = I_n$ et f est une symétrie. Il est alors classique de montrer que f est une symétrie orthogonale.

Solution 31.

Notons $C_1, \dots, C_n$ les vecteurs colonnes de la matrice $|A| = (|a_{i,j}|)_{1\leqslant i,j\leqslant n}$ et U le vecteur colonne de taille n dont tous les coefficients valent 1. On a

$$\sum_{1\leqslant i,j\leqslant n} |a_{i,j}| = \sum_{i=1}^{n} \langle C_i | U\rangle \leqslant \sum_{i=1}^{n} \|C_i\| \cdot \|U\| = \sum_{i=1}^{n} 1 \times \sqrt{n} = n\sqrt{n},$$

d'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz et puisque les vecteurs $C_1, \dots, C_n$ sont unitaires (car A est orthogonale).

Solution 32.

Comme O est orthogonale, ${}^t\text{OO} = I_n$. On en déduit en particulier,

$$\begin{aligned} {}^t AA + {}^t CC &= I_p & \qquad {}^t AB + {}^t CD &= 0 \\ {}^t BB + {}^t DD &= I_q & \qquad {}^t BA + {}^t DC &= 0 \end{aligned}$$

- Si $\det A = \det D = 0$, alors on a bien l'inégalité demandée.
- Si $\det D \neq 0$, posons $M = \left(\begin{array}{c|c} {}^tA & {}^tC \\ \hline 0 & {}^tD \end{array}\right)$ et $N = MO = \left(\begin{array}{c|c} I_p & 0 \\ \hline {}^tDC & {}^tDD \end{array}\right)$. Les matrices M et N étant triangulaires par blocs, on a $\det M = \det({}^tA)\det({}^tD) = \det A \det D$ et $\det N = \det I_p \det({}^tDD) = (\det D)^2$. De plus, $\det N = \det(MO) = \det M \det O$. On en déduit que $(\det D)^2 = \det A \det D \det O$. Puisque $\det D \neq 0$, $\det D = \det A \det O$ et donc $(\det D)^2 = (\det A)^2(\det O)^2$. Or O est orthogonale donc $\det O = \pm 1$ et $(\det O)^2 = 1$. On a bien l'égalité demandée.
- Si $\det A \neq 0$, posons $M = \left(\begin{array}{c|c} {}^tA & 0 \\ \hline {}^tB & {}^tD \end{array}\right)$ et $N = MO = \left(\begin{array}{c|c} {}^tAA & {}^tAB \\ \hline 0 & I_q \end{array}\right)$. Les matrices M et N étant triangulaires par blocs, on a $\det M = \det({}^tA)\det({}^tD) = \det A \det D$ et $\det N = \det({}^tAA)\det I_q = (\det A)^2$. De plus, $\det N = \det(MO) = \det M \det O$. On en déduit que $(\det A)^2 = \det A \det D \det O$. Puisque $\det A \neq 0$, $\det A = \det D \det O$ et donc $(\det A)^2 = (\det D)^2(\det O)^2$. On conclut comme précédemment en remarquant que $(\det O)^2 = 1$.

Solution 33.

On a $B = P^{-1}AP$ où P est une matrice de passage entre deux bases orthonormales. P est donc une matrice orthogonale. On a donc $P^{-1} = {}^tP$ puis $B = {}^tPAP$. Ainsi

$$\operatorname{tr}({}^tBB) = \operatorname{tr}({}^tP{}^tAP{}^tPAP = \operatorname{tr}({}^tP{}^tAAP) = \operatorname{tr}(({}^tP{}^tAA)P) = \operatorname{tr}(P({}^tP{}^tAA)) = \operatorname{tr}({}^tAA)$$

Solution 34.

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

3. On a ${}^t\mathrm{A}\mathrm{A} = {}^t\left((\mathrm{I}_n+\mathrm{M})^{-1}\right){}^t(\mathrm{I}_n-\mathrm{M})(\mathrm{I}_n-\mathrm{M})(\mathrm{I}_n+\mathrm{M})^{-1}$. Or

$${}^t\left((\mathrm{I}_n+\mathrm{M})^{-1}\right) = \left({}^t(\mathrm{I}_n+\mathrm{M})\right)^{-1} = (\mathrm{I}_n-\mathrm{M})^{-1} \quad \text{et} \quad {}^t(\mathrm{I}_n-\mathrm{M}) = \mathrm{I}_n+\mathrm{M}$$

Ainsi ${}^t\mathrm{A}\mathrm{A} = (\mathrm{I}_n-\mathrm{M})^{-1}(\mathrm{I}_n+\mathrm{M})(\mathrm{I}_n-\mathrm{M})(\mathrm{I}_n+\mathrm{M})^{-1}$. Or $\mathrm{I}_n-\mathrm{M}$ et $\mathrm{I}_n+\mathrm{M}$ commutent donc

$${}^t\mathrm{A}\mathrm{A} = (\mathrm{I}_n-\mathrm{M})^{-1}(\mathrm{I}_n-\mathrm{M})(\mathrm{I}_n+\mathrm{M})(\mathrm{I}_n+\mathrm{M})^{-1} = \mathrm{I}_n$$

Ainsi A est orthogonale.

Solution 35.

Supposons $\mathrm{A}=0$. Alors il est clair que $\mathrm{A} = \mathrm{com}(\mathrm{A}) = 0$.
Supposons $\mathrm{A} \in \mathrm{SO}(n)$. On sait que $\mathrm{com}(\mathrm{A}){}^t\mathrm{A} = \det(\mathrm{A})\mathrm{I}_n$. Puisque $\mathrm{A} \in \mathrm{SO}(n)$, $\det(\mathrm{A}) = 1$ et ${}^t\mathrm{A} = \mathrm{A}^{-1}$. Il s'ensuit que $\mathrm{com}(\mathrm{A}) = \mathrm{A}$.
Supposons maintenant $\mathrm{A} = \mathrm{com}(\mathrm{A})$. Puisque ${}^t\mathrm{com}(\mathrm{A})\mathrm{A} = \det(\mathrm{A})\mathrm{I}_n$, ${}^t\mathrm{A}\mathrm{A} = \det(\mathrm{A})\mathrm{I}_n$.

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

Solution 36.

1.
- Supposons que la famille $(x_1, \dots, x_p)$ soit liée. Il existe donc $\lambda_1, \dots, \lambda_p \in \mathbb{R}$ non tous nuls tels que $\sum_{j=1}^p \lambda_i x_i = 0_\mathrm{E}$. On a alors pour tout $i \in [\![1, n]\!]$:

$$\sum_{j=1}^p \lambda_j (x_i|x_j) = 0$$

Si on note $(\mathrm{C}_1, \dots, \mathrm{C}_p)$ les colonnes de la matrice $\mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p)$, on a donc $\sum_{j=1}^p \lambda_j \mathrm{C}_j = 0$. Les colonnes de la matrice $\mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p)$ sont liées donc $\det \mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p) = 0$.
- Réciproquement, supposons que $\det \mathrm{G} = 0$. Alors les colonnes $\mathrm{C}_1, \dots, \mathrm{C}_p$ de G sont liées. Il existe donc $\lambda_1, \dots, \lambda_p \in \mathbb{R}$ non tous nuls tels que $\sum_{j=1}^p \lambda_j \mathrm{C}_j = 0$. On en déduit comme précédemment que pour tout $i \in [\![1, p]\!]$:

$$\sum_{j=1}^p \lambda_j (x_i|x_j) = 0$$

Posons $z = \sum_{j=1}^p \lambda_j x_j$. L'égalité précédente signifie que $(z|x_i) = 0$ pour $1 \leq i \leq p$. Par linéarité, on a donc $(z|\sum_{i=1}^p \lambda_i x_i) = 0$ i.e. $\|z\|^2 = 0$. Donc $z = 0$, ce qui signifie que $(x_1, \dots, x_p)$ est liée.

2. **a.** Pour $1 \leq j \leq p$, $x_j = \sum_{i=1}^n (x_j|e_i)e_i$ puisque $\mathcal{B}$ est orthonormée. Donc $\mathrm{A} = ((x_j|e_i))_{1 \leq i, j \leq p}$. De plus,

$$(x_i|x_j) = \sum_{k=1}^n (x_i|e_k)(x_j|e_k)$$

Ceci signifie que $\mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p) = {}^t\mathrm{A}\mathrm{A}$.

b. On a $\det \mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p) = \det({}^t\mathrm{A})\det(\mathrm{A}) = (\det \mathrm{A})^2$. Comme $x_1, \dots, x_p$ est libre, c'est une base de F et donc $\det \mathrm{A} \neq 0$. Ainsi $\det \mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p) > 0$.

3. **a.**
- Si $x \in \mathrm{F}$, les deux déterminants sont nuls.

▶ Si $x \notin \mathrm{F}$, notons $\mathcal{B}$ une base orthonormée de $\mathrm{vect}(x, x_1, \dots, x_p)$ et posons comme précédemment $\mathrm{A} = \mathrm{mat}_{\mathcal{B}}(x, x_1, \dots, x_p)$. On a alors également $\mathrm{G}_{p+1}(x, x_1, \dots, x_p) = {}^t\mathrm{AA}$. Notons également $\mathrm{A}' = \mathrm{mat}_{\mathcal{B}}(x - \pi(x), x_1, \dots, x_p)$ de sorte que $\mathrm{G}_{p+1}(x - \pi(x), x_1, \dots, x_p) = {}^t\mathrm{A}'\mathrm{A}'$.
Comme $\pi(x) \in \mathrm{F}$ et que $(x_1, \dots, x_p)$ est une base de F, il existe $\lambda_1, \dots, \lambda_p \in \mathbb{R}$ tel que $\pi(x) = \sum_{i=1}^{p} \lambda_i x_i$. Notons $\mathrm{C}, \mathrm{C}_1, \dots, \mathrm{C}_n$ les colonnes de A : la matrice A′ s'obtient à partir de A en effectuant l'opération de pivot $\mathrm{C} \leftarrow \mathrm{C} - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \mathrm{C}_i$. On en déduit que $\det(\mathrm{A}') = \det(\mathrm{A})$ puis que $\det \mathrm{G}_{p+1}(x, x_1, \dots, x_p) = \det \mathrm{G}_{p+1}(x - \pi(x), x_1, \dots, x_p)$.

b. Comme $x - \pi(x) \in \mathrm{F}^{\perp}$, on a $x - \pi(x) \perp x_i$ pour tout $i \in [\![1, p]\!]$. On en déduit que

$$\mathrm{G}_{p+1}(x - \pi(x), x_1, \dots, x_p) = \left(\begin{array}{c|c} \|x - \pi(x)\|^2 & 0 \ \dots \ 0 \\ \hline 0 & \\ \vdots & \mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p) \\ 0 & \end{array}\right)$$

On a donc $\det \mathrm{G}_{p+1}(x - \pi(x), x_1, \dots, x_p) = \|x - \pi(x)\|^2 \det \mathrm{G}_p(x_1, \dots, x_p)$. On conlut en remarquant que $d(x, \mathrm{F})^2 = \|x - \pi(x)\|^2$.

Solution 37.

1. On a $u + v = 0$. Donc $\|u\|^2 = -\langle u, v\rangle = -\sum_{(i,j)\in \mathrm{I}\times\mathrm{J}} \alpha_i\alpha_j\langle x_i, x_j\rangle$. Or pour $(i, j) \in \mathrm{I} \times \mathrm{J}$, $\alpha_i\alpha_j\langle x_i, x_j\rangle > 0$. Ainsi si I et J sont non vides, $\|u\|^2 < 0$, ce qui est absurde.

2. Supposons que I soit non vide. Alors J est vide. On a donc $v = 0$ puis $u = 0$. Donc $\langle u, x_p\rangle = 0$. Or $\langle u, x_p\rangle = \sum_{i\in\mathrm{I}} \alpha_i\langle x_i, x_p\rangle$. Mais pour $i \in \mathrm{J}$, $\alpha_i\langle x_i, x_p\rangle < 0$. Comme I est non vide, $\langle u, x_p\rangle < 0$. Il y a donc contradiction. Ainsi I est vide. On démontre de même que J est vide.

3. Comme I et J sont vides, $\alpha_i = 0$ pour tout $i \in [\![1, p-1]\!]$. Ceci signifie que la famille $(x_1, \dots, x_{p-1})$ est libre.

Solution 38.

1. On a $\mathrm{A} = (\langle x_j, e_i\rangle)_{\substack{1\le i\le n\\ 1\le j\le p}}$. De plus, comme $\mathcal{B}$ est orthonormée, pour tout $(i, j) \in [\![1, p]\!]^2$:

$$\langle x_i, x_j\rangle = \sum_{k=1}^{n} \langle x_i, e_k\rangle\langle x_j, e_k\rangle$$

Ceci signifie que $\mathrm{G}(x_1, \dots, x_p) = {}^t\mathrm{AA}$.

2. Si $(x_1, \dots, x_p)$ est liée, alors $\mathrm{rg}\,\mathrm{A} < p$. Par conséquent, $\mathrm{rg}\,\mathrm{G}(x_1, \dots, x_p) = \mathrm{rg}({}^t\mathrm{AA}) \le \mathrm{rg}\,\mathrm{A} < p$. Ceci signifie que $\mathrm{G}(x_1, \dots, x_p)$ est non inversible. Donc $\det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p) = 0$.
Si $(x_1, \dots, x_p)$ est libre, alors A est une matrice carrée inversible. Donc $\det(\mathrm{A}) \neq 0$. Par conséquent, $\det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p) = \det({}^t\mathrm{AA}) = \det(\mathrm{A})^2 > 0$.

3. On pose $x = y + z$ avec $y \in \mathrm{F}$ et $z \in \mathrm{F}^{\perp}$. On a alors :

$$\det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p, x) = \det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p, y) + \det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p, z)$$

Comme $y \in \mathrm{F}$, la famille $(x_1, \dots, x_p, y)$ est liée et $\det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p, y) = 0$. De plus, $\det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p, z) = \|z\|^2 \det \mathrm{G}(x_1, \dots, x_p)$, le déterminant étant diagonal par blocs. On conclut en remarquant que $d(x, \mathrm{F})^2 = \|z\|^2$.

Solution 39.

1. La symétrie de φ est évidente. La bilinéarité de φ provient de la linéarité de l'intégrale. Pour $\mathrm{P} \in \mathbb{R}_n[\mathrm{X}]$, $\displaystyle\int_{-1}^{1} \mathrm{P}(t)\mathrm{Q}(t)\,\mathrm{d}t \geq 0$ donc φ est positive. Soit $\mathrm{P} \in \mathbb{R}_n[\mathrm{X}]$ tel que $\displaystyle\int_{-1}^{1} \mathrm{P}(t)\mathrm{Q}(t)\,\mathrm{d}t = 0$. 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 $\mathrm{Q}_n^{(k)}(-1) = \mathrm{Q}_n^{(k)}(1) = 0$ 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 :

$$\langle \mathrm{P}_k, \mathrm{P}_l \rangle = \int_{-1}^{1} \mathrm{Q}_k^{(k)}(t)\mathrm{Q}_l^{(l)}(t)\,\mathrm{d}t = \left[\mathrm{Q}_k^{(k)}(t)\mathrm{Q}_l^{(l-1)}(t)\right]_{-1}^{1} - \int_{-1}^{1} \mathrm{Q}_k^{(k+1)}(t)\mathrm{Q}_l^{(l-1)}(t)\,\mathrm{d}t$$

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

Solution 40.

1. Soient $x, y, z \in \mathrm{E}$ 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 $z \in \mathrm{E}$. Comme $\mathrm{E}^\perp = \{0_\mathrm{E}\}$, $u(\lambda x + \mu y) - \lambda u(x) - \mu(y) = 0_\mathrm{E}$. D'où la linéarité de u.

2. $(i) \Rightarrow (ii)$ Soient $x, y \in \mathrm{E}$. 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, $u(e_j) = \displaystyle\sum_{i=1}^{n} \left\langle u(e_j), e_i \right\rangle e_i$ pour $1 \leq j \leq n$. On en déduit que $a_{ij} = \left\langle u(e_j), e_i \right\rangle$ pour $1 \leq i, j \leq n$. Or, par antisymétrie de u, $\left\langle u(e_j), e_i \right\rangle = -\left\langle u(e_i), e_j \right\rangle$ i.e. $a_{ij} = -a_{ji}$ pour $1 \leq i, j \leq n$. 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

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

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 A(E) est un sous-espace vectoriel de $\mathcal{L}(\mathrm{E})$ comme image d'un sous-espace vectoriel par une application linéaire et $\dim \mathrm{A}(\mathrm{E}) = \dim \mathrm{A}_n(\mathbb{R}) = \frac{n(n-1)}{2}$ 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 41.

Soit $\mathcal{B}'$ une base orthonormale adaptée à la décomposition en somme directe $\mathrm{E} = \operatorname{Im} p \oplus \operatorname{Ker} p$. La matrice A′ de p dans la base $\mathcal{B}'$ est diagonale (les éléments diagonaux valent 1 ou 0). Notons P la matrice de passage de $\mathcal{B}$ vers $\mathcal{B}'$. On a $\mathrm{A} = \mathrm{PA}'\mathrm{P}^{-1}$. Or P est orthogonale donc $\mathrm{P}^{-1} = {}^t\mathrm{P}$. Ainsi $\mathrm{A} = \mathrm{PA}'\,{}^t\mathrm{P}$ est symétrique.

Solution 42.

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 $\mathrm{A}' = \mathrm{P}^{-1}\mathrm{BP} = {}^t\mathrm{PAP}$. 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 $\det({}^t\mathrm{B}) = \det(-\mathrm{B}) = (-1)^p \det \mathrm{B}$ donc p est pair sinon on aurait $\det \mathrm{B} = 0$ et B non inversible.

Solution 43.

D'après le cours sur les espaces euclidiens et le théorème du rang :

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

il suffit donc de prouver que

$$\operatorname{Im}(u) \subset \operatorname{Ker}(u)^{\perp}.$$

Soit $y \in \operatorname{Im}(u)$. Il existe $x \in \mathrm{E}$ tel que $y = u(x)$. Soit $x' \in \operatorname{Ker}(u)$. On a :

$$\begin{aligned} 0 &= \langle u(x + x')|x + x'\rangle = \langle u(x)|x'\rangle + \langle x|u(x')\rangle \\ &= \langle u(x)|x'\rangle + 0 \end{aligned}$$

et donc

$$\langle y|x'\rangle = 0.$$

On a donc prouvé que $\operatorname{Im}(u) \subset \operatorname{Ker}(u)^{\perp}$.

Solution 44.

1. L'application f est clairement un endomorphisme par linéarité à droite du produit scalaire $\langle\cdot,\cdot\rangle$. Soient x et y dans E. On a

$$\begin{aligned}\langle f(x),y\rangle &= \langle\langle a,x\rangle b+\langle b,x\rangle a,y\rangle\\ &= \langle a,x\rangle\langle b,y\rangle+\langle b,x\rangle\langle a,y\rangle\end{aligned}$$

Comme cette expression est symétrique en (x,y), on a

$$\langle f(x),y\rangle = \langle f(y),x\rangle = \langle x,f(y)\rangle$$

par symétrie du produit scalaire $\langle\cdot,\cdot\rangle$.

2. Pour tout $x\in\mathrm{E}$, on a $x\in\mathrm{Ker}(f)$ *si et seulement si*

$$\langle a,x\rangle b+\langle b,x\rangle a=0.$$

Comme (a,b) est libre, cela équivaut à

$$\langle a,x\rangle=\langle b,x\rangle=0,$$

ie $x\in\mathrm{vect}(a,b)^{\perp}$. Ainsi

$$\mathrm{Ker}(f)=\mathrm{vect}(a,b)^{\perp}$$

et, d'après le théorème du rang,

$$\begin{aligned}\mathrm{rg}(f) &= n-\dim(\mathrm{Ker}(f)) = n-\dim(\mathrm{vect}(a,b)^{\perp})\\ &= n-(n-\dim(\mathrm{vect}(a,b))) = \dim(\mathrm{vect}(a,b))\\ &= 2\end{aligned}$$

car (a,b) est libre.

3. On pose $\mathrm{F}=\mathrm{Im}(f)$.

a. F est un sev de E en tant que noyau d'un endomorphisme de E.

- F *est stable par* f : soit $y\in\mathrm{Im}(f)$; on a alors $f(y)\in\mathrm{Im}(f)=\mathrm{F}$. Ainsi F est stable par f.
- *Base de* F : on a clairement

$$\mathrm{F}=\mathrm{Im}(f)\subset\mathrm{vect}(a,b).$$

Comme $\dim(\mathrm{F})=2$ (d'après la question **2.**), on a nécessairement

$$\mathrm{F}=\mathrm{Im}(f)=\mathrm{vect}(a,b).$$

Ainsi (a,b) est une base de F car cette famille est libre.

b. Notons $\mathcal{B}=(a,b)$ et $\mathrm{M}=\mathrm{mat}_{\mathcal{B}}(f)$. Comme

$$\begin{cases} f(a) &= \|a\|^2 b+\langle a,b\rangle a\\ f(b) &= \|b\|^2 a+\langle a,b\rangle b\end{cases},$$

on a

$$\mathrm{M}=\begin{pmatrix}\langle a,b\rangle & \|b\|^2\\ \|a\|^2 & \langle a,b\rangle\end{pmatrix}.$$

Solution 45.

- Soit

$$x\in\mathrm{Ker}(u-id_{\mathrm{E}})\cap\mathrm{Im}(u-id_{\mathrm{E}}).$$

On a alors $u(x)=x$ et il existe $y\in\mathrm{E}$ tel que $x=u(y)-y$. Par une récurrence sans difficulté, on établit que

$$\forall n\in\mathbb{N},\quad nx=u^n(y)-y.$$

Ainsi,

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \quad x = \frac{u^n(y) - y}{n}$$

et donc, d'après l'inégalité triangulaire,

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \quad \|x\| \leqslant \frac{\|u^n(y)\| + \|y\|}{n}.$$

Par une récurrence immédiate, on a

$$\forall n \in \mathbb{N}, \quad \|u^n(y)\| \leqslant \|y\|$$

et ainsi

$$\forall n \in \mathbb{N}^*, \quad 0 \leqslant \|x\| \leqslant \frac{2\|y\|}{n}.$$

En faisant tendre n vers $+\infty$, on obtient par le théorème d'encadrement, $\|x\| = 0$, ie $x = 0$. Ainsi

$$\mathrm{Ker}(u - id_{\mathrm{E}}) \cap \mathrm{Im}(u - id_{\mathrm{E}}) = \{0\}.$$

▶ Comme $\mathrm{Ker}(u - id_{\mathrm{E}}) \oplus \mathrm{Im}(u - id_{\mathrm{E}})$, on déduit du théorème du rang que

$$\dim(\mathrm{Ker}(u - id_{\mathrm{E}}) \oplus \mathrm{Im}(u - id_{\mathrm{E}})) = \dim(\mathrm{E})$$

et donc que

$$\mathrm{E} = \mathrm{Ker}(u - id_{\mathrm{E}}) \oplus \mathrm{Im}(u - id_{\mathrm{E}})$$

car $\mathrm{Ker}(u - id_{\mathrm{E}}) \oplus \mathrm{Im}(u - id_{\mathrm{E}}) \subset \mathrm{E}$.

Solution 46.

1. La bilinéarité vient de la linéarité de la trace. De plus, pour tout $\mathrm{M} \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R})$, $\mathrm{tr}({}^t\mathrm{M}) = \mathrm{tr}(\mathrm{M})$. Par conséquent, $\mathrm{tr}({}^t\mathrm{AB}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{BA})$, d'où la symétrie. De plus,

$$\mathrm{tr}({}^t\mathrm{AB}) = \sum_{1 \leq i,j \leq n} a_{ij} b_{ij}$$

et en particulier

$$\mathrm{tr}({}^t\mathrm{AA}) = \sum_{1 \leq i,j \leq n} a_{ij}^2 \geq 0$$

Cette dernière somme ne s'annulant que si tous les a_{ij} sont nuls i.e. $\mathrm{A} = 0$. 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,

$$|\,\mathrm{tr}(\mathrm{A})| = |\,\mathrm{tr}(\mathrm{I}_n\mathrm{A})| \leq \|\mathrm{I}_n\|\|\mathrm{A}\|$$

On vérifie facilement que $\|\mathrm{I}_n\| = \sqrt{n}$.

3. **a.** Soient $\mathrm{A} \in \mathcal{A}_n(\mathbb{R})$ et $\mathrm{S} \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R})$.

$$(\mathrm{A}|\mathrm{S}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{AS}) = -\,\mathrm{tr}(\mathrm{AS})$$
$$(\mathrm{S}|\mathrm{A}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{SA}) = \mathrm{tr}(\mathrm{SA})$$

Or $\mathrm{tr}(\mathrm{SA}) = \mathrm{tr}(\mathrm{AS})$ 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 $p(\mathrm{A}) = \frac{{}^t\mathrm{A}+\mathrm{A}}{2}$. Ainsi

$$\|\mathrm{A} - p(\mathrm{A})\| = \frac{1}{2}\|\mathrm{A} - {}^t\mathrm{A}\| = \frac{1}{2}\sqrt{\sum_{1 \leq i,j \leq n} (a_{ij} - a_{ji})^2}$$

en utilisant la formule donnant le carré de la norme vue à la première question.

4. Comme $\mathrm{U} \in \mathcal{O}_n(\mathbb{R})$, ${}^t\mathrm{U}\mathrm{U} = \mathrm{U}{}^t\mathrm{U} = \mathrm{I}_n$.

$$\|\mathrm{UA}\|^2 = \mathrm{tr}({}^t(\mathrm{UA})\mathrm{UA}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{A}{}^t\mathrm{UUA}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{AA}) = \|\mathrm{A}\|^2$$
$$\|\mathrm{AU}\|^2 = \mathrm{tr}({}^t(\mathrm{AU})\mathrm{AU}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{U}{}^t\mathrm{AAU}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{AAU}{}^t\mathrm{U}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{AA}) = \|\mathrm{A}\|^2$$

5. D'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz

$$\begin{aligned}\|\mathrm{AB}\|^2 &= \mathrm{tr}({}^t\mathrm{B}{}^t\mathrm{AAB}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{AAB}{}^t\mathrm{B}) = \mathrm{tr}({}^t({}^t\mathrm{AA})\mathrm{B}{}^t\mathrm{B}) \\ &= ({}^t\mathrm{AA}|\mathrm{B}{}^t\mathrm{B}) \leq \|{}^t\mathrm{AA}\|\|\mathrm{B}{}^t\mathrm{B}\| = \|{}^t\mathrm{AA}\|\|{}^t\mathrm{BB}\|\end{aligned}$$

car $\|\mathrm{B}{}^t\mathrm{B}\|^2 = \mathrm{tr}(\mathrm{B}{}^t\mathrm{BB}{}^t\mathrm{B}) = \mathrm{tr}({}^t\mathrm{BB}{}^t\mathrm{BB}) = \|{}^t\mathrm{BB}\|^2$. En utilisant la formule donnant le carré de la norme vue à la première question, on a :

$$\|{}^t\mathrm{AA}\|^2 = \sum_{1 \leq i,j \leq n} \left(\sum_{k=1}^n a_{ki}a_{kj} \right)^2$$

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 $\mathrm{S}_i = \sum_{k=1}^n a_{ki}^2$ pour $1 \leq i \leq n$. Ainsi

$$\|{}^t\mathrm{AA}\|^2 \leq \sum_{1 \leq i,j \leq n} \mathrm{S}_i\mathrm{S}_j = \left(\sum_{i=1}^n \mathrm{S}_i\right)\left(\sum_{j=1}^n \mathrm{S}_j\right) = \left(\sum_{l=1}^n \mathrm{S}_l\right)^2$$

Par conséquent,

$$\|{}^t\mathrm{AA}\| \leq \sum_{1 \leq k,l \leq n} a_{kl}^2 = \|\mathrm{A}\|^2$$

On a donc également $\|{}^t\mathrm{BB}\| \leq \|\mathrm{B}\|^2$, ce qui nous donne finalement l'inégalité demandée.

Solution 47.

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 $\mathrm{vect}(u_{n+1})^\perp$. 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, $\cos\alpha_{n-1} = \frac{\cos\alpha_n}{1+\cos\alpha_n}$ i.e. $\cos\alpha_n = \frac{\cos\alpha_{n-1}}{1-\cos\alpha_{n-1}}$.
L'énoncé n'a de sens que pour $n \geq 2$. On trouve aisément $\alpha_2 = \frac{2\pi}{3}$. Posons $z_n = \frac{1}{\cos\alpha_n}$. 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 $\alpha_n = \arccos\left(-\frac{1}{n}\right)$.

Deuxième méthode

Puisque $\dim \mathrm{E} = n$, 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 $\sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i u_i = 0_\mathrm{E}$. Fixons $j \in [\![1, n+1]\!]$. On a donc

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

ou encore

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

Posons $\Lambda = \sum_{i=1}^{n+1} \lambda_i$. 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 qye $\cos \alpha_n = -\frac{1}{n}$. On cherche implicitement un angle α_n *non orienté* donc $\alpha_n = \arccos\left(-\frac{1}{n}\right)$.

Solution 48.

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

Solution 49.

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 $\mathbb{R}[X]$.

Solution 50.

1. D'une part, on a :

$$\begin{aligned}\|f(x)-f(y)\|^2 &= \langle f(x)-f(y), f(x)-f(y)\rangle \\ &= \|f(x)\|^2 - 2\langle f(x), f(y)\rangle + \|f(y)\|^2 \\ &= \frac{1}{\|x\|^2} - 2\frac{\langle x,y\rangle}{\|x\|\|y\|} + \frac{1}{\|y\|2}.\end{aligned}$$

D'autre part on a :

$$\begin{aligned}\left(\frac{\|x-y\|}{\|x\|\|y\|}\right)^2 &= \frac{\|x^2\| - 2\langle x,y\rangle + \|y\|^2}{\|x\|^2\|y\|^2} \\ &= \frac{1}{\|y\|^2} - 2\frac{\langle x,y\rangle}{\|x\|\|y\|} + \frac{1}{\|x\|2}.\end{aligned}$$

D'où la conclusion.

2. Remarquons tout d'abord que l'inégalité est évidente si deux des vecteurs a, b, c, d sont égaux. On les suppose maintenant deux à deux distincts. Soient $x, y, z \in \mathrm{E} \setminus \{0\}$. L'inégalité triangulaire donne

$$\|f(x)-f(y)\| \leq \|f(x)-f(z)\| + \|f(z)-f(y)\|$$

qui devient en utilisant la première question :

$$\frac{\|x-y\|}{\|x\|\|y\|} \leq \frac{\|x-z\|}{\|x\|\|z\|} + \frac{\|z-y\|}{\|z\|\|y\|}.$$

En multipliant par $\|x\|\|y\|\|z\|$, on obtient :

$$\|z\|\|x-y\| \leq \|y\|\|x-z\| + \|x\|\|z-y\|.$$

En posant $x = b-a$, $y = d-a$ et $z = c-a$, on obtient le résultat voulu.

Solution 51.

Si la famille $(x_1, \dots, x_n)$ est libre, alors $\det_{\mathcal{B}}(x_1, \dots, x_n) = 0$ et l'inégalité est trivialement vérifiée.
Sinon, on peut orthonormaliser la famille $(x_1, \dots, x_n)$ en une base orthonormale $\mathcal{B}' = (e_1, \dots, e_n)$ de E. Notons M la matrice de $(x_1, \dots, x_n)$ dans la base $\mathcal{B}$, Q la matrice de passage de la base $\mathcal{B}$ vers la base $\mathcal{B}'$ et R la matrice de $(x_1, \dots, x_n)$ dans la base $\mathcal{B}'$. On a donc $\mathrm{M} = \mathrm{QR}$ puis $\det_{\mathcal{B}}(x_1, \dots, x_n) = \det(\mathrm{M}) = \det(\mathrm{Q})\det(\mathrm{R})$. Puisque $\mathcal{B}$ et $\mathcal{B}'$ sont des bases orthonormales, Q est orthogonale et donc $\det(\mathrm{Q}) = \pm 1$. De plus, par procédé de Gram-Schmidt, la matrice R est triangulaire supérieure et ses coefficients diagonaux sont $\langle x_1, e_1\rangle$, …, $\langle x_n, e_n\rangle$. On en déduit que

$$\det_{\mathcal{B}}(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \langle x_i, e_i\rangle$$

puis par inégalité de Cauchy-Schwarz

$$\det_{\mathcal{B}}(x_1, \dots, x_n) \leq \prod_{i=1}^n \|x_i\|\|e_i\| = \prod_{i=1}^n \|x_i\|$$

Solution 52.

En appliquant l'inégalité de Cauchy-Schwarz aux

$$a_k = 1 \quad , \quad b_k = \frac{1}{k},$$

on obtient

$$\sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \leqslant \sqrt{\sum_{k=1}^n 1^2}\sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2}},$$

d'où, en élevant au carré,

$$\left(\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{k}\right)^2 \leqslant n\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{k^2}.$$

Solution 53.

En appliquant l'inégalité de Cauchy-Schwarz aux

$$a_k=\sqrt{x_k}\ ,\ \ b_k=\frac{1}{\sqrt{x_k}},$$

on aboutit à

$$\sum_{k=1}^{n}1 \leqslant \sqrt{\sum_{k=1}^{n}x_k}\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{x_k}},$$

d'où, en élevant au carré,

$$n^2 \leqslant \left(\sum_{k=1}^{n}x_k\right)\left(\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{x_k}\right).$$

Solution 54.

En appliquant l'inégalité de Cauchy-Schwarz aux réels

$$a_k=\sqrt{k}\ ,\ \ b_k=\frac{\sqrt{k}}{n-k}\ ,\ 1\leqslant k\leqslant n-1,$$

on aboutit à

$$\sum_{k=1}^{n-1}\frac{k}{n-k} \leqslant \sqrt{\sum_{k=1}^{n-1}k}\sqrt{\sum_{k=1}^{n-1}\frac{k}{(n-k)^2}},$$

d'où, en élevant au carré,

$$\left(\sum_{k=1}^{n-1}\frac{k}{n-k}\right)^2 \leqslant \frac{n(n-1)}{2}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{k}{(n-k)^2}$$

d'où le résultat.

Solution 55.

D'après-Cauchy-Schwarz,

$$\int_a^b f(x)dx\int_a^b\frac{dx}{f(x)} \geq \left(\int_a^b\sqrt{f(x)}\frac{1}{\sqrt{f(x)}}dx\right)^2=(b-a)^2$$

Donc la borne inférieure de l'énoncé existe. Elle est atteint si $\sqrt{f}$ et $\frac{1}{\sqrt{f}}$ sont colinéaires : il suffit par exemple de prendre $f=1$ sur $[a,b]$.

Solution 56.

On a

$$\forall t\in[a,b],\ \ f(t)=\int_a^t f'(u)du.$$

Appliquons alors l'inégalité de Cauchy-Schwarz. On obtient

$$f^2(t) \leqslant \left(\int_a^t du \right)\left(\int_a^t f'^2(u)du \right),$$

soit

$$f^2(t) \leqslant (t-a) \int_a^t f'^2(u)du.$$

Comme $f'^2 \geqslant 0$ et $a \leqslant t \leqslant b$, on a

$$\int_a^t f'^2(u)du \leqslant \int_a^b f'^2(u)du$$

d'où

$$\forall t \in [a,b], \quad f^2(t) \leqslant (t-a) \int_a^b f'^2(u)du,$$

puis, par positivité de l'intégrale,

$$\int_a^b f^2(t)dt \leqslant \left(\int_a^b (t-a)dt \right) \int_a^b f'^2(u)du$$

et donc

$$\int_a^b f^2(u)du \leqslant \frac{(b-a)^2}{2} \int_a^b f'^2(u)du.$$