

DEVOIR SURVEILLÉ N°17

- La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.
- On prendra le temps de vérifier les résultats dans la mesure du possible.
- Les calculatrices sont interdites.

Problème 1 – Centrale MP 2020 Maths 2

Espaces à noyau reproduisant

Les espaces à noyau reproduisant ont des applications dans divers domaines comme l'apprentissage statistique ou la résolution d'équations aux dérivées partielles.

Ce problème présente en partie III quelques exemples d'espaces à noyau reproduisant, l'un de ces exemples étant obtenu à partir de l'étude préalable dans la partie II d'un opérateur intégral. La partie IV propose quelques résultats sur les espaces à noyau reproduisant.

L'attention du candidat est attirée sur le fait que l'espace préhilbertien étudié *n'est pas le même* dans les différentes parties du problème.

Définitions

Soit I un intervalle de \mathbb{R} et soit $(E, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ un espace préhilbertien réel muni de la norme $\|\cdot\|$ associée au produit scalaire. On dit que E est un espace à noyau reproduisant sur I lorsqu'il vérifie les trois propriétés suivantes :

- l'espace E est un sous-espace vectoriel de l'espace $\mathcal{F}(I, \mathbb{R})$ des fonctions définies sur I et à valeurs dans \mathbb{R} ;
- pour tout $x \in I$, l'application $V_x : (E, \|\cdot\|) \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $V_x(f) = f(x)$ est continue ;
- pour tout $x \in I$, il existe une application $k_x \in E$ vérifiant,

$$\forall f \in E, f(x) = \langle k_x, f \rangle$$

On appelle alors *noyau reproduisant* l'application K définie par

$$\forall (x, t) \in I^2, K(x, t) = k_x(t)$$

Soit $[a, b]$ un segment de \mathbb{R} . On dit qu'une fonction $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ est de classe \mathcal{C}^1 par morceaux s'il existe une subdivision $(x_i)_{0 \leq i \leq p}$ de $[a, b]$ telle que, pour tout $i \in \llbracket 1, p \rrbracket$, la restriction de f à $]x_{i-1}, x_i[$ se prolonge en une fonction de classe \mathcal{C}^1 sur $[x_{i-1}, x_i]$.

I Préliminaires

Soit $(E, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ un espace préhilbertien réel, de norme associée $\| \cdot \|$. Soit u un endomorphisme de E vérifiant,

$$\forall (x, y) \in E^2, \langle u(x), y \rangle = \langle x, u(y) \rangle$$

- 1** Soit F un sous-espace vectoriel de E stable par u . Montrer que l'orthogonal F^\perp de F est stable par u .

On suppose qu'il existe un vecteur unitaire $x_0 \in F$ vérifiant

$$\langle u(x_0), x_0 \rangle = \sup_{x \in F, \|x\|=1} \langle u(x), x \rangle$$

Pour tout vecteur unitaire $y \in F$ orthogonal à x_0 , on pose, pour tout réel t ,

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= x_0 \cos t + y \sin t \\ \varphi(t) &= \langle u \circ \gamma(t), \gamma(t) \rangle \end{aligned}$$

- 2** Montrer que φ est de classe \mathcal{C}^1 .
3 Calculer $\|\gamma(t)\|$ puis justifier que $\varphi'(0) = 0$.
4 En déduire que $u(x_0)$ est orthogonal à y .
5 Montrer que x_0 est vecteur propre de u .

II Etude d'un opérateur

Dans cette partie, E désigne l'espace vectoriel des fonctions $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ continues, muni du produit scalaire défini par,

$$\forall (f, g) \in E^2, \langle f, g \rangle = \int_0^1 f(t)g(t) dt$$

On note $\| \cdot \|$ la norme associée au produit scalaire.

Pour tout $s \in [0, 1]$, on définit la fonction k_s par,

$$\forall t \in [0, 1], k_s(t) = \begin{cases} t(1-s) & \text{si } t < s \\ s(1-t) & \text{si } t \geq s \end{cases}$$

On note également, pour tout $(s, t) \in [0, 1]^2$, $K(s, t) = k_s(t)$.

- 6** Soit $s \in]0, 1[$. Tracer la courbe représentative de k_s sur $[0, 1]$.
7 Montrer que K est continue sur $[0, 1] \times [0, 1]$.

Pour tout $f \in E$, on pose

$$\forall s \in [0, 1], T(f)(s) = \int_0^1 k_s(t)f(t) dt$$

- 8** Montrer que T est un endomorphisme continu de E .

Soit F le sous-espace vectoriel de E formé des fonctions polynomiales. Pour $k \in \mathbb{N}$, on note p_k la fonction définie par $p_k(x) = x^k$.

- 9** Pour tout $k \in \mathbb{N}$, calculer $T(p_k)$. En déduire que F est stable par T .
10 En déduire $(T(p))''$ pour tout $p \in F$.

- 11** Soit $f \in E$. Calculer $T(f)(0)$ et $T(f)(1)$.
- 12** Pour tout $f \in E$, montrer que $T(f)$ est de classe \mathcal{C}^2 puis que $T(f)'' = -f$.
- 13** Montrer que T est injectif.
- 14** Déterminer l'image de T .
- 15** Soit $\lambda \in \mathbb{R}$ une valeur propre non nulle de T et f un vecteur propre associé. Montrer que f est solution de l'équation différentielle $\lambda f'' = -f$.
- 16** Déterminer les valeurs propres de T et montrer que les sous-espaces propres associés sont de dimension 1.

Pour tout $k \in \mathbb{N}^*$, on pose $g_k(x) = \sqrt{2} \sin(k\pi x)$. On note $G = \text{vect}((g_k)_{k \in \mathbb{N}^*})$ et $H = G^\perp$.

- 17** Justifier que, pour tout $(f, g) \in E^2$, on a

$$\langle T(f), g \rangle = \langle f, T(g) \rangle$$

On pourra utiliser la question 12.

On admet que,

$$H \neq \{0\} \implies \exists f \in H \text{ telle que } \begin{cases} \|f\| = 1 \\ \langle T(f), f \rangle = \sup_{h \in H, \|h\|=1} \langle T(h), h \rangle \end{cases}$$

- 18** En déduire que $H = \{0\}$.
- 19** Montrer que la famille de vecteurs $(g_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$ est orthonormale.

On admet pour la suite que $(g_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$ est une suite totale.

Pour tout $f \in E$, on pose,

$$\forall x \in [0, 1], \Phi(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k^2 \pi^2} \langle f, g_k \rangle g_k(x)$$

- 20** Montrer que Φ est continue.

Pour tout $N \in \mathbb{N}^*$, on pose $f_N = \sum_{k=1}^N \langle f, g_k \rangle g_k$.

- 21** Montrer que

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \|T(f_N) - \Phi\| = 0$$

- 22** En déduire $T(f) = \Phi$.

III Exemples d'espaces à noyau reproduisant

Dans cette partie, E_1 désigne l'espace vectoriel des fonctions $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ continues, de classe \mathcal{C}^1 par morceaux, et vérifiant $f(0) = f(1) = 0$.

III.1 Un exemple

- 23** Montrer que l'on définit un produit scalaire sur E_1 en posant

$$\forall (f, g) \in (E_1)^2, (f | g) = \int_0^1 f'(t)g'(t) dt$$

Dans la suite de cette partie, on désigne par N la norme associée à ce produit scalaire.

- 24** Montrer que, pour toute fonction $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 telle que $f(0) = 0$, on a

$$\forall x \in [0, 1], |f(x)| \leq \sqrt{x \int_0^x (f'(t))^2 dt}$$

On pose, pour tout $f \in E_1$,

$$U(f)(s) = \int_0^1 k'_s(t)f'(t) dt$$

où k_s a été défini dans la partie précédente.

- 25** Soit $f \in E_1$ de classe \mathcal{C}^2 . Montrer que $U(f) = -T(f'')$. En déduire que $U(f) = f$.
- 26** Montrer que U est l'application identité de E_1 .
- 27** Démontrer que l'espace préhilbertien $(E_1, (\cdot | \cdot))$ est un espace à noyau reproduisant et que son noyau reproduisant est l'application K définie dans la partie précédente.

III.2 Un contre-exemple

On considère à nouveau l'espace E des fonctions continues de $[0, 1]$ dans \mathbb{R} , muni du produit scalaire défini par

$$\langle f, g \rangle = \int_0^1 f(t)g(t) dt$$

- 28** Montrer que $(E, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ n'est pas un espace à noyau reproduisant.

III.3 Fonctions développables en série entière

- 29** Soit $(a_n)_n \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ une suite de réels telle que la série $\sum (a_n)^2$ soit convergente. Montrer que le rayon de convergence de la série entière $\sum a_n t^n$ est supérieur ou égal à 1.

Dans la suite de cette sous-partie, on considère l'ensemble E_2 des fonctions de $] -1, 1[$ dans \mathbb{R} de la forme

$$t \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} a_n t^n$$

où $(a_n)_n \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$ et $\sum (a_n)^2$ converge. Pour $f, g \in E_2$, on pose

$$\langle f, g \rangle = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n b_n \quad \text{où } f : t \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} a_n t^n \text{ et } g : t \mapsto \sum_{n=0}^{+\infty} b_n t^n$$

- 30** Montrer que E_2 muni de $\langle \cdot, \cdot \rangle$ est un espace préhilbertien réel.
- 31** Soit $x \in] -1, 1[$. Déterminer $g_x \in E_2$ tel que, pour tout $f \in E_2$,

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

- 32** En déduire que E_2 est un espace à noyau reproduisant et préciser son noyau.

III.4 Autre exemple parmi les fonctions de classe \mathcal{C}^1 par morceaux

On se donne dans cette sous-partie un réel $a > 0$.

On considère l'espace E_3 des fonctions $f : [0, a] \rightarrow \mathbb{R}$, continues et de classe \mathcal{C}^1 par morceaux sur $[0, a]$, et vérifiant $f(0) = 0$. On munit E_3 du produit scalaire défini, pour $f, g \in E_3$, par

$$(f | g) = \int_0^a f'(t)g'(t) dt$$

- 33** Montrer que la fonction $(x, y) \mapsto \min(x, y)$ est un noyau reproduisant sur $(E_3, (\cdot | \cdot))$.

Soit E_4 l'espace des fonctions continues sur $[0, a]$, à valeurs dans \mathbb{R} , de classe \mathcal{C}^1 par morceaux et vérifiant de plus $f(a) = 0$. Soit $\varphi : [0, a] \rightarrow \mathbb{R}$ de classe \mathcal{C}^1 vérifiant $\varphi(a) = 0$ et, pour tout $x \in [0, a]$, $\varphi'(x) < 0$.

- 34** Déterminer un produit scalaire sur E_4 tel que la fonction $(x, y) \mapsto \min(\varphi(x), \varphi(y))$ soit un noyau reproduisant sur l'espace préhilbertien E_4 .

IV Quelques résultats sur les espaces à noyau reproduisant

IV.1 Continuité

Soit $(E, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ un espace à noyau reproduisant sur un intervalle I , de noyau reproduisant K .

Pour tout $(x, y) \in I^2$, on pose $k_x(y) = K(x, y)$.

Soit $x \in I$ et V_x définie sur E par $V_x(f) = f(x)$. On pose

$$N(V_x) = \sup_{\|f\|=1} |f(x)|$$

- 35** Démontrer que

$$N(V_x) = \sqrt{\langle k_x, k_x \rangle}$$

On suppose que K est continue sur $I \times I$.

- 36** Démontrer que toutes les fonctions de E sont continues.

IV.2 Construction d'un espace à noyau reproduisant

On note ici E l'espace vectoriel des fonctions continues définies sur $[0, 1]$ et à valeurs dans \mathbb{R} muni du produit scalaire défini par

$$\langle f, g \rangle = \int_0^1 f(t)g(t) dt$$

On considère une fonction $A : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ continue. On s'intéresse à l'application $T : E \rightarrow E$ définie par

$$T(f)(x) = \int_0^1 A(x, t)f(t) dt$$

On suppose que $\text{Ker } T$ est de dimension finie.

- 37** Justifier que T induit un isomorphisme de $(\text{Ker } T)^\perp$ sur $\text{Im } T$.

On note désormais S la bijection réciproque de cet isomorphisme.

On définit le produit scalaire φ sur $\text{Im } T$ en posant, pour tout $(f, g) \in (\text{Im } T)^2$,

$$\varphi(f, g) = \langle S(f), S(g) \rangle$$

On considère l'application K définie sur $[0, 1]^2$ par

$$K(x, y) = \int_0^1 A(x, t)A(y, t) dt$$

- 38** Montrer que $(\text{Im } T, \varphi)$ est un espace à noyau reproduisant, de noyau K .