

# 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

Remarquons que dans la définition d'un noyau reproduisant la troisième condition entraîne automatiquement la seconde. En effet, d'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz,

$$|\mathbb{V}_x(f)| = |f(x)| = |\langle k_x, f \rangle| \leq \|k_x\| \|f\|$$

et la forme linéaire  $\mathbb{V}_x$  est alors continue par caractérisation de la continuité pour les applications linéaires.

1 Soit  $x \in F^\perp$ . Alors pour tout  $y \in F$ ,

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

car  $x \in F^\perp$  et  $u(y) \in u(F) \subset F$ . Ainsi  $u(x) \in F^\perp$  :  $F^\perp$  est donc stable par  $u$ .

2 Par bilinéarité du produit scalaire et linéarité de  $u$ , pour tout  $t \in \mathbb{R}$ ,

$$\varphi(t) = \cos^2(t) \langle u(x_0), x_0 \rangle + \sin^2(t) \langle u(y), y \rangle + \sin(t) \cos(t) (\langle u(x_0), y \rangle + \langle x_0, u(y) \rangle)$$

Comme  $\cos$  et  $\sin$  sont de classe  $\mathcal{C}^1$ ,  $\varphi$  l'est également par opérations.

3 Par bilinéarité du produit scalaire,

$$\|\gamma(t)\|^2 = \cos^2 t \|x_0\|^2 + 2 \cos t \sin t \langle x_0, y \rangle + \sin^2 t \|y\|^2 = \cos^2 t + \sin^2 t = 1$$

car  $\|x_0\| = \|y\| = 1$  et  $x_0 \perp y$ . Ainsi  $\|\gamma(t)\| = 1$ .

Remarquons que  $\gamma(0) = x_0$  et que  $\gamma$  est à valeurs dans  $\{x \in F, \|x\| = 1\}$ . Par définition de  $u_0$ ,  $\varphi(t) \leq \varphi(0)$  pour tout  $t \in \mathbb{R}$ . Ainsi  $\varphi$  admet un maximum en 0 de sorte que  $\varphi'(0) = 0$ .

4 Remarquons que pour tout  $t \in \mathbb{R}$ ,  $\gamma'(t) = -x_0 \sin t + y \cos t$ . Notamment  $\gamma'(0) = y$ . Par linéarité de  $u$  et bilinéarité du produit scalaire,

$$0 = \varphi'(0) = \langle u \circ \gamma'(0), \gamma(0) \rangle + \langle u \circ \gamma(0), \gamma'(0) \rangle = \langle u(y), x_0 \rangle + \langle u(x_0), y \rangle = 2 \langle u(x_0), y \rangle$$

Par conséquent,  $u(x_0) \perp y$ .

5 Par bilinéarité du produit scalaire, on peut en fait montrer que pour tout vecteur  $y \in F$  (pas nécessairement unitaire) orthogonal à  $x_0$ ,  $u(x_0)$  est également orthogonal à  $y$ . Mais comme  $u$  est auto-adjoint ceci équivaut  $x_0 \perp u(y)$ .

Comme  $F$  est stable par  $u$ , on peut considérer l'endomorphisme  $u_F$  de  $F$  induit par  $u$ . Ce qui précède montre que  $\text{vect}(x_0)^\perp$  (orthogonal dans  $F$ ) est stable par  $u_F$ . Mais comme  $u_F$  est encore auto-adjoint,  $(\text{vect}(x_0)^\perp)^\perp$  (orthogonal dans  $F$  à nouveau) est encore stable par  $u_F$ . Comme  $\text{vect}(x_0)$  est de dimension finie,  $(\text{vect}(x_0)^\perp)^\perp = \text{vect}(x_0)$ . Ainsi  $\text{vect}(x_0)$  est stable par  $u_F$ .  $x_0$  est donc un vecteur propre de  $u_F$  et donc de  $u$ .

6 La courbe de  $k_s$  est composée du segment de droite reliant le point  $(0,0)$  au point  $(s, s(1-s))$  et du segment de droite reliant le point  $(s, s(1-s))$  au point  $(1,0)$ .

7 Remarquons que  $K(s, t) = \min(s, t)(1 - \max(s, t))$ . Or pour tout  $(t, s) \in [0, 1]^2$ ,

$$\begin{aligned} \min(s, t) &= \frac{s + t - |s - t|}{2} \\ \max(s, t) &= \frac{s + t + |s - t|}{2} \end{aligned}$$

Ainsi par continuité de la valeur absolue,  $(s, t) \mapsto \min(s, t)$  et  $(s, t) \mapsto \max(s, t)$  sont continues sur  $[0, 1]^2$  puis  $K$  également.

8 T est clairement linéaire. Soit  $f \in E$ . Via la relation de Chasles,

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

D'après le théorème fondamental de l'analyse,  $T(f)$  est continue (et même de classe  $\mathcal{C}^1$ ) sur  $[0, 1]$ . Ainsi T est bien à valeurs dans E. Finalement, T est bien un endomorphisme de E.

D'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz,

$$\forall s \in [0, 1], |T(f)(s)| \leq \|k_s\| \|f\|$$

Comme K est continue sur le compact  $[0, 1]^2$ , il existe M tel que  $|K(s, t)| \leq M$  pour tout  $(s, t) \in [0, 1]^2$ . Ainsi

$$\|k_s\|^2 = \int_0^1 k_s(t)^2 dt = \int_0^1 K(s, t)^2 dt \leq M^2$$

puis  $\|k_s\| \leq M$ . Ainsi

$$\forall s \in [0, 1], |T(f)(s)| \leq M \|f\|$$

puis

$$\|T(f)\|^2 = \int_0^1 T(f)(s)^2 dt \leq M^2 \|f\|^2$$

puis  $\|T(f)\| \leq M \|f\|$ . L'endomorphisme T est donc continu par caractérisation de la continuité pour les applications linéaires.

9 Soit  $k \in \mathbb{N}$ . En exploitant à nouveau la relation de Chasles

$$\begin{aligned} \forall s \in [0, 1], T(p_k)(s) &= (1-s) \int_0^s t p_k(t) dt + s \int_s^1 (1-t) p_k(t) dt \\ &= (1-s) \int_0^s t^{k+1} dt + s \int_s^1 (1-t) t^k dt \\ &= (1-s) \frac{s^{k+2}}{k+2} + s \left( \frac{1}{k+1} - \frac{1}{k+2} - \frac{s^{k+1}}{k+1} + \frac{s^{k+2}}{k+2} \right) \\ &= \frac{s^{k+2}}{k+2} - \frac{s^{k+3}}{k+2} + \frac{s}{k+1} - \frac{s}{k+2} - \frac{s^{k+2}}{k+1} + \frac{s^{k+3}}{k+2} \\ &= -\frac{s^{k+2}}{(k+1)(k+2)} + \frac{s}{(k+1)(k+2)} \\ &= -\frac{1}{(k+1)(k+2)} p_{k+2}(s) + \frac{1}{(k+1)(k+2)} p_1(s) \end{aligned}$$

Finalement,  $T(p_k) = -\frac{1}{(k+1)(k+2)} p_{k+2} + \frac{1}{(k+1)(k+2)} p_1 \in F$ . Comme  $(p_k)_{k \in \mathbb{N}}$  est une base de F, F est stable par l'endomorphisme T.

10 Pour tout  $k \in \mathbb{N}$ ,

$$T(p_k)'' = -\frac{1}{(k+1)(k+2)} p_{k+2}'' + \frac{1}{(k+1)(k+2)} p_1'' = -p_k$$

Par linéarité de T et de la dérivation et comme  $(p_k)_{k \in \mathbb{N}}$  est une base de F,  $T(p)'' = -p$  pour tout  $p \in F$ .

11  $k_0$  et  $k_1$  sont clairement nulles sur  $[0, 1]$ . On en déduit que  $T(f)(0) = T(f)(1) = 0$ .

12 Soit  $f \in E$ . On rappelle que

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

Le théorème fondamental de l'analyse garantit que  $T(f)$  est de classe  $\mathcal{C}^1$  et que

$$\forall s \in [0, 1], T(f)'(s) = -\int_0^s t f(t) dt + (1-s)s f(s) + \int_s^1 (1-t) f(t) dt - s(1-s)f(s) = -\int_0^s t f(t) dt + \int_s^1 (1-t) f(t) dt$$

Le théorème fondamental de l'analyse garantit à nouveau que  $T(f)'$  est de classe  $\mathcal{C}^1$  i.e.  $T(f)$  est de classe  $\mathcal{C}^2$  et que

$$\forall s \in [0, 1], T(f)''(s) = -s f(s) - (1-s)f(s) = -f(s)$$

Ainsi  $T(f)'' = -f$ .

- 13** Soit  $f \in \text{Ker } T$ . Alors  $T(f) = 0_E$  puis  $f = -T(f)'' = 0_E$ . Ainsi  $\text{Ker } T = \{0\}$  et  $T$  est injectif.
- 14** Notons  $G$  le sous-espace vectoriel de  $E$  des fonctions de classe  $\mathcal{C}^2$  s'annulant en 0 et 1. D'après les questions **11** et **12**,  $\text{Im } T \subset G$ . Réciproquement, soit  $g \in G$ . La question **12** montre que le seul antécédent de  $g$  ne peut être que  $-g''$ . Vérifions-le. Posons  $h = T(-g'') - g$ . Toujours d'après la question **12**,  $h$  est de classe  $\mathcal{C}^2$  et  $h'' = T(-g'')'' - g'' = g'' - g'' = 0_E$ . Ainsi  $h$  est affine. Mais comme  $h(0) = h(1) = 0$ ,  $h$  est nulle i.e.  $g = T(-g'') \in \text{Im } T$ . Par double inclusion,  $\text{Im } T = G$ .

- 15** On a  $T(f) = \lambda f$ . Comme  $\lambda \neq 0$ ,  $f = \frac{1}{\lambda}T(f)$  donc  $f$  est de classe  $\mathcal{C}^2$ . On peut alors affirmer que  $T(f)'' = \lambda f''$  i.e.  $\lambda f'' = -f$ .

- 16** Comme  $\text{Ker } T = \{0_E\}$ , 0 n'est pas valeur propre de  $T$ . Soit alors une valeur propre non nulle de  $T$ . Alors il existe  $f \in E$  non nulle telle que  $f'' + \frac{1}{\lambda}f = 0$  d'après la question précédente.

Supposons  $\lambda < 0$ . Il existe alors  $(A, B) \in \mathbb{R}^2$  tel que  $f(x) = A \text{ch}(x/\sqrt{-\lambda}) + B \text{sh}(x/\sqrt{-\lambda})$  pour  $x \in [0, 1]$ . Comme  $f(0) = \frac{1}{\lambda}T(f)(0) = 0$ ,  $A = 0$ . Pour la même raison,  $f(1) = 0$  donc  $B = 0$ . Ceci est impossible puisque  $f$  n'est pas nulle en tant que vecteur propre.

Supposons  $\lambda > 0$ . Il existe alors  $(A, B) \in \mathbb{R}^2$  tel que  $f(x) = A \cos(x/\sqrt{\lambda}) + B \sin(x/\sqrt{\lambda})$  pour  $x \in [0, 1]$ . Comme  $f(0) = \frac{1}{\lambda}T(f)(0) = 0$ ,  $A = 0$ . Comme  $f$  n'est pas nulle,  $B \neq 0$ . Mais  $f(1) = 0$  donc il existe  $k \in \mathbb{N}^*$  tel que  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = k\pi$

$$\text{i.e. } \lambda = \frac{1}{k^2\pi^2}.$$

Posons  $\lambda_k = \frac{1}{k^2\pi^2}$ . Montrons que  $\lambda_k$  est effectivement valeur propre de  $T$  et déterminons son sous-espace propre associé  $E_k$ . Ce qui précède montre déjà que  $E_k \subset \text{vect}(f_k)$  avec  $f_k : t \mapsto \sin(k\pi t)$ . Il suffit donc maintenant de prouver que  $T(f_k) = \lambda_k f_k$  pour affirmer que  $\lambda_k$  est effectivement valeur propre de  $T$  et que  $E_k = \text{vect}(f_k)$ . On sait que  $T(f_k)'' = -f_k = \lambda_k f_k''$  donc  $T(f_k) - \lambda_k f_k$  est affine. Comme cette fonction s'annule en 0 et 1, elle est nulle i.e.  $T(f_k) = \lambda_k f_k$ .

Pour conclure,  $\text{Sp}(T) = \left\{ \frac{1}{k^2\pi^2}, k \in \mathbb{N}^* \right\}$  et pour tout  $k \in \mathbb{N}^*$ , le sous-espace propre associé à la valeur propre  $\frac{1}{k^2\pi^2}$  est la droite engendré par  $t \mapsto \sin(k\pi t)$ .

- 17** Soit  $(f, g) \in E^2$ . Alors

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

D'après la question **12**,  $T(f)$  et  $-T(g)'$  sont de classe  $\mathcal{C}^1$  de dérivées respectives  $T(f)'$  et  $g$ . Ainsi par intégration par parties

$$\langle T(f), g \rangle = -[T(f)(t)T(g)'(t)]_0^1 + \int_0^1 T(f)'(t)T(g)'(t) dt$$

Or  $T(f)(0) = T(f)(1) = 0$  donc

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

Mais  $T(f)'$  et  $T(g)$  sont de classe  $\mathcal{C}^1$  de dérivées respectives  $-f$  et  $T(g)'$  donc par intégration par parties

$$\langle T(f), g \rangle = -[T(f)'(t)T(g)(t)]_0^1 + \int_0^1 f(t)T(g)(t) dt$$

A nouveau,  $T(g)(0) = T(g)(1) = 0$  donc

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

- 18** Supposons  $H \neq \{0_E\}$ . D'après le résultat admis par l'énoncé, il existe  $f \in H$  telle que  $\|f\| = 1$  et  $\langle T(f), f \rangle = \sup_{h \in H, \|h\|=1} \langle T(h), h \rangle$ . Il est clair que  $G$  est stable par  $T$  puisque tous les  $g_k$  sont des vecteurs propres de  $T$ . Mais alors  $H = G^\perp$  est également stable par  $T$  d'après la question **1**. D'après la question **5**,  $f$  est alors un vecteur propre de  $T$ . On en déduit que  $f \in G$ . Ainsi  $f \in G \cap G^\perp = \{0_E\}$ , ce qui est absurde car  $f$  est unitaire. On en déduit que  $H = \{0_E\}$ .

- 19** Soit  $(k, \ell) \in (\mathbb{N}^*)^2$ . Alors

$$\langle g_k, g_\ell \rangle = 2 \int_0^1 \sin(k\pi t) \sin(\ell\pi t) dt = \int_0^1 (\cos((k-\ell)\pi t) - \cos((k+\ell)\pi t)) dt$$

Si  $k = \ell$ ,

$$\langle g_k, g_\ell \rangle = 1 - \frac{1}{k + \ell} [\sin((k + \ell)\pi t)]_0^1 = 1$$

Si  $k \neq \ell$ ,

$$\langle g_k, g_\ell \rangle = \frac{1}{k - \ell} [\sin((k - \ell)\pi t)]_0^1 - \frac{1}{k + \ell} [\sin((k + \ell)\pi t)]_0^1 = 0$$

Par conséquent,  $(g_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$  est bien une famille orthonormale.

20 Pour tout  $k \in \mathbb{N}^*$ ,

$$\left\| \frac{1}{k^2 \pi^2} \langle f, g_k \rangle g_k \right\|_\infty = \frac{|\langle f, g_k \rangle|}{k^2 \pi^2} \|g_k\|_\infty$$

Or  $\|g_k\|_\infty = \sqrt{2}$  et d'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz,  $|\langle f, g_k \rangle| \leq \|f\| \|g_k\| = \|f\|$  puisque les  $g_k$  sont unitaires. On en déduit que pour tout  $k \in \mathbb{N}^*$

$$\left\| \frac{1}{k^2 \pi^2} \langle f, g_k \rangle g_k \right\|_\infty \leq \frac{\sqrt{2} \|f\|}{k^2 \pi^2}$$

La série de fonctions  $\sum_{k \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{k^2 \pi^2} \langle f, g_k \rangle g_k$  converge donc normalement sur  $[0, 1]$ . Comme les  $g_k$  sont continues, la somme  $\Phi$  de cette série est donc également continue sur  $[0, 1]$ .

21 Comme les  $g_k$  sont des vecteurs propres de  $T$  associés aux valeurs propres  $\frac{1}{k^2 \pi^2}$ ,

$$T(f_N) = \sum_{k=1}^N \langle f, g_k \rangle T(g_k) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{k^2 \pi^2} \langle f, g_k \rangle g_k$$

On a prouvé la convergence normale et donc uniforme de la série de fonctions  $\sum_{k \in \mathbb{N}^*} \frac{1}{k^2 \pi^2} \langle f, g_k \rangle g_k$  vers  $\Phi$  à la question précédente. Ceci signifie que  $\lim_{N \rightarrow +\infty} \|T(f_N) - \Phi\|_\infty = 0$ .

Or pour tout  $h \in E$ ,

$$\|h\|^2 = \int_0^1 h(t)^2 dt \leq \int_0^1 \|h\|_\infty^2 dt = \|h\|_\infty^2$$

**REMARQUE.**  $h$  est bien bornée car continue sur le segment  $[0, 1]$ .

Ainsi  $\|h\| \leq \|h\|_\infty$ . On en déduit donc que  $\lim_{N \rightarrow +\infty} \|T(f_N) - \Phi\| = 0$ .

22 La question précédente montre que la suite  $(T(f_N))_{N \in \mathbb{N}^*}$  converge vers  $\Phi$  pour la norme  $\|\cdot\|$ . Mais comme la suite  $(g_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$  est une famille orthonormale totale, la suite  $(f_N)_{N \in \mathbb{N}^*}$  converge vers  $f$  pour la norme  $\|\cdot\|$ . Mais comme  $T$  est un endomorphisme continu pour la norme  $\|\cdot\|$ , la suite  $(T(f_N))_{N \in \mathbb{N}^*}$  converge alors vers  $T(f)$  pour la norme  $\|\cdot\|$ . Par unicité de la limite,  $T(f) = \Phi$ .

23 La définition de  $(\cdot | \cdot)$  est problématique puisqu'une fonction de classe  $\mathcal{C}^1$  par morceaux sur  $[0, 1]$  n'est pas toujours dérivable sur  $[0, 1]$ . Néanmoins la dérivée d'une telle fonction n'est pas défini qu'en un nombre fini de points. On peut alors la prolonger arbitrairement en ces points. L'intégrale de cette dérivée prolongée ne dépend pas alors du prolongement choisi. Le raisonnement est encore valable pour un produit de deux dérivées de fonctions de classe  $\mathcal{C}^1$  par morceaux sur  $[0, 1]$ , ce qui légitime la définition de  $(\cdot | \cdot)$ .

L'application  $(\cdot | \cdot)$  est alors clairement symétrique, bilinéaire et positive. Soit  $f \in E_1$  telle que  $(f | f) = 0$ . Notons  $(x_i)_{0 \leq i \leq p}$  une subdivision adaptée à  $f$  comme dans la définition. On a donc par la relation de Chasles :

$$\sum_{i=1}^p \int_{x_{i-1}}^{x_i} f'(t)^2 dt = 0$$

et, comme les termes de cette somme sont tous positifs,

$$\forall i \in \llbracket 1, p \rrbracket, \int_{x_{i-1}}^{x_i} f'(t)^2 dt = 0$$

Par définition, la restriction de  $f$  à  $]x - i - 1, x_i[$  se prolonge en une fonction  $\tilde{f}_i$  de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $[x_{i-1}, x_i]$ . Alors  $\tilde{f}_i'$  est continue sur  $[x_i, x_{i+1}]$  et  $\int_{x_{i-1}}^{x_i} \tilde{f}_i'(t)^2 dt = 0$ . Comme  $(\tilde{f}_i')^2$  est continue et positive sur  $[x_{i-1}, x_i]$ , elle est nulle sur  $[x_{i-1}, x_i]$ . On en déduit que  $f'$  est nulle sur  $]x_{i-1}, x_i[$ . Ainsi  $f$  est constante sur chaque intervalle  $]x_{i-1}, x_i[$ . Mais  $f$  est continue sur  $[0, 1]$  par hypothèse donc elle est constante sur  $[0, 1]$ . Puisque  $f(0) = f(1) = 0$ ,  $f$  est nulle sur  $[0, 1]$ .

**24** Soit  $x \in [0, 1]$ . Puisque  $f(0) = 0$ ,

$$f(x) = \int_0^x f'(t) dt = \int_0^x 1 \cdot f'(t) dt$$

D'après l'inégalité de Cauchy-Schwarz appliquée au produit scalaire  $(f, g) \mapsto \int_0^x f(t)g(t) dt$ ,

$$|f(x)| \leq \sqrt{\int_0^x 1^2 dt} \sqrt{\int_0^x f'(t)^2 dt} = \sqrt{x \int_0^x f'(t)^2 dt}$$

**25** Soit  $s \in [0, 1]$ . Pour tout  $t \in [0, s]$ ,  $k'_s(t) = 1 - s$  et pour tout  $t \in ]s, 1]$ ,  $k'_s(t) = s$ . Ainsi  $k_s$  admet des prolongements de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $[0, s]$  et  $[s, 1]$ .

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

Par intégration par parties, on obtient d'une part,

$$\int_0^s k'_s(t)f'(t) dt = [k_s(t)f'(t)]_0^s - \int_0^s k_s(t)f''(t) dt = s(1-s)f'(s) - \int_0^s k_s(t)f''(t) dt$$

et d'autre part

$$\int_s^1 k'_s(t)f'(t) dt = [k_s(t)f'(t)]_s^1 - \int_s^1 k_s(t)f''(t) dt = -s(1-s)f'(s) - \int_s^1 k_s(t)f''(t) dt$$

Ainsi

$$U(f)(s) = - \int_0^1 k_s(t)f''(t) dt = -T(f'')(s)$$

Par conséquent,  $U(f) = -T(f'')$ .

D'après la question **12**,  $(T(f'')'' + f)'' = 0$  donc  $T(f'') + f$  est affine. Mais  $T(f)'' + f$  s'annule en 0 et 1 en utilisant **12** et car  $f \in E_1$ . Ainsi  $T(f'') + f$  est nulle i.e.  $U(f) = f$ .

**26** Soit  $s \in [0, 1]$ . A nouveau,

$$U(f)(s) = \int_0^s k'_s(t)f'(t) dt + \int_s^1 k'_s(t) dt = (1-s) \int_0^s f'(t) dt + s \int_s^1 f'(t) dt = (1-s)(f(s)-f(0)) + s(f(1)-f(s)) = f(s)$$

car  $f(0) = f(1) = 0$ .

Il faut néanmoins montrer que pour une fonction  $f$  continue et de classe  $\mathcal{C}^1$  par morceaux sur un segment  $[a, b]$ ,

$\int_a^b f'(t) dt = f(b) - f(a)$ . On utilise une subdivision  $(x_i)_{0 \leq i \leq p}$  de  $[a, b]$ . Quitte à considérer le prolongement  $\tilde{f}_i$  de  $f$  de classe  $\mathcal{C}^1$  sur  $[x_{i-1}, x_i]$ ,

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f'(t) dt = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \tilde{f}'_i(t) dt = \tilde{f}_i(x_i) - \tilde{f}_i(x_{i-1})$$

Mais comme  $f$  est continue  $\tilde{f}_i(x_i) - \tilde{f}_i(x_{i-1}) = f(x_i) - f(x_{i-1})$ . On conclut par la relation de Chasles que

$$\int_a^b f'(t) dt = \sum_{i=1}^p \int_{x_{i-1}}^{x_i} f'(t) dt = \sum_{i=1}^p f(x_i) - f(x_{i-1}) = f(b) - f(a)$$

**27**  $E_1$  est bien un sous-espace vectoriel de  $\mathcal{F}([0, 1], \mathbb{R})$ . De plus,

$$\forall f \in E_1, (f | k_s) = U(f)(s) = f(s)$$

D'après notre remarque liminaire,  $(E_1, (\cdot | \cdot))$  est bien un espace à noyau reproduisant de noyau  $K$ .

**28** Supposons que  $(E, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  soit un espace à noyau reproduisant. Alors pour tout  $x \in [0, 1]$ ,  $V_x$  serait continue pour la norme

$\|\cdot\|$  associée au produit scalaire  $\langle \cdot, \cdot \rangle$ . Considérons à nouveau les applications  $p_k : x \mapsto x^k$ . Alors  $\|p_k\|^2 = \int_0^1 t^{2k} dt =$

$\frac{1}{2k+1}$ . Mais alors

$$\frac{|V_1(p_k)|}{\|p_k\|} = \sqrt{2k+1} \xrightarrow{k \rightarrow +\infty} +\infty$$

Ainsi la forme linéaire  $V_1$  ne peut être continue.

- 29** Comme la série  $\sum a_n^2$  converge la suite  $(a_n^2)$  converge vers 0. La suite  $(a_n)$  converge alors également vers 0. Notamment  $(a_n)$  est bornée et le rayon de convergence de la série entière  $\sum a_n t^n$  est supérieur ou égal à 1.
- 30** Montrons déjà que  $E_2$  est un sous-espace vectoriel de  $\mathbb{R}^{]-1,1[}$ .  $E_2$  contient clairement la fonction nulle. Soit  $(f, g) \in E_2^2$ . Il existe donc deux suites réelles  $(a_n)$  et  $(b_n)$  telles que  $\sum a_n^2$  et  $\sum b_n^2$  convergent et telles que pour tout  $t \in ]-1, 1[$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n t^n \quad \text{et} \quad g(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_n t^n$$

Soit également  $(\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$ . Alors

$$(\lambda a_n + \mu b_n)^2 = \lambda^2 a_n^2 + \mu^2 b_n^2 + 2\lambda\mu a_n b_n$$

Puisque  $|a_n b_n| \leq \frac{1}{2}(a_n^2 + b_n^2)$ , la série  $\sum a_n b_n$  converge (absolument). On en déduit que  $\sum (\lambda a_n + \mu b_n)^2$  convergent comme combinaison linéaire de séries convergentes. On en déduit que  $\lambda f + \mu g \in E_2$ . Ceci prouve bien que  $E_2$  est un sous-espace vectoriel de  $\mathbb{R}^{]-1,1[}$  et donc que c'est un espace vectoriel réel.

L'application  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  est clairement symétrique, bilinéaire et positive. Si  $\langle f, f \rangle = 0$ , alors  $\sum_{n=0}^{+\infty} a_n^2 = 0$  et donc  $a_n = 0$  pour tout  $n \in \mathbb{N}$  puis  $f$  est nulle sur  $] -1, 1[$ . L'application  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  est donc bien un produit scalaire sur  $E_2$ .

- 31** Posons  $g_x(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} x^n t^n = \frac{1}{1-xt}$ . On a bien  $g_x \in E_2$  puisque  $\sum (x^n)^2$  converge comme série géométrique de raison  $x^2 \in [0, 1[$ .

Soit  $f \in E_2$ , il existe donc  $(a_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}}$  telle que  $\sum a_n^2$  converge et  $f(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n t^n$  pour tout  $t \in ]-1, 1[$ . Alors

$$\langle g_x, f \rangle = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n x^n = f(x)$$

- 32** D'après notre remarque liminaire,  $(E_2, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  est donc bien un espace à noyau reproduisant de noyau  $K(x, y) \mapsto \frac{1}{1-xy}$ .
- 33** On vérifie aisément que  $(E_3, (\cdot | \cdot))$  est bien un espace préhilbertien réel. Posons  $K(x, y) = k_x(y) = \min(x, y)$  pour  $(x, y) \in [0, a]^2$ . Soit  $x \in [0, a]$ . Alors  $k'_x(t) = 1$  pour  $t \in [0, x[$  et  $k'_x(t) = 0$  pour  $t \in ]x, a]$ . Ainsi pour  $f \in E_3$ ,

$$(k_x | f) = \int_0^x f'(t) dt = f(x) - f(0) = f(x)$$

quitte à raisonner comme dans la question 26. D'après notre remarque liminaire,  $(E_3, (\cdot | \cdot))$  est bien un espace à noyau reproduisant de noyau  $K$ .

- 34** Posons pour  $(f, g) \in E_4$ ,  $\langle f, g \rangle = - \int_0^a \frac{f'(t)g'(t)}{\varphi'(t)} dt$ . On vérifie que  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  est bien un produit scalaire sur  $E_4$  comme dans la question 23. Posons  $K(x, y) = k_x(y) = \min(\varphi(x), \varphi(y))$  pour  $(x, y) \in [0, a]^2$ . Comme  $\varphi$  est strictement décroissante,

$$k_x(y) = \begin{cases} \varphi(x) & \text{si } x \geq y \\ \varphi(y) & \text{si } x \leq y \end{cases}$$

Notamment  $k'_x(t) = 0$  pour  $t \in [0, a]$  et  $k'_x(t) = \varphi'(t)$  pour  $t \in ]x, a]$ . Ainsi

$$\langle k_x, f \rangle = - \int_x^a f'(t) dt = f(x) - f(a) = f(x)$$

quitte à raisonner comme dans la question 26. D'après notre remarque liminaire,  $(E_4, \langle \cdot, \cdot \rangle)$  est bien un espace à noyau reproduisant de noyau  $K$ .

- 35** Si  $k_x$  est nulle, alors  $N(V_x) = 0 = \|k_x\|$ .

Sinon, en posant  $g = \frac{k_x}{\|k_x\|}$ ,  $g$  est unitaire de sorte que

$$g(x) = \frac{k_x(x)}{\|k_x\|} = \frac{\langle k_x, k_x \rangle}{\|k_x\|} = \|k_x\|$$

Donc  $N(V_x) \geq \|k_x\|$ . De plus, pour tout  $f \in E$  unitaire et pour tout  $x \in I$ ,

$$|f(x)| = |\langle k_x, f \rangle| \leq \|k_x\| \|f\| = \|k_x\|$$

Ainsi  $N(V_x) \leq \|k_x\|$ . Finalement,  $N(V_x) = \|k_x\|$ .

36 Soient  $f \in E$  et  $(x, y) \in I^2$ . Alors, par inégalité de Cauchy-Schwarz,

$$|f(x) - f(y)| = |\langle k_x - k_y, f \rangle| \leq \|k_x - k_y\| \|f\|$$

Mais par identité remarquable

$$\|k_x - k_y\|^2 = \|k_x\|^2 + \|k_y\|^2 - 2\langle k_x, k_y \rangle = K(x, x) + K(y, y) - 2K(x, y)$$

Par continuité de  $K$ ,

$$\lim_{y \rightarrow x} \|k_x - k_y\|^2 = K(x, x) + K(x, x) - 2K(x, x) = 0$$

donc

$$\lim_{y \rightarrow x} \|k_x - k_y\| = 0$$

puis

$$\lim_{y \rightarrow x} |f(x) - f(y)| = 0$$

et enfin,  $\lim_{y \rightarrow x} f(y) = f(x)$  ce qui prouve que  $f$  est continue sur  $I$ .

37 L'application  $T$  est bien linéaire. On vérifie qu'elle est bien à valeurs dans  $E$  même si l'énoncé semble le supposer. Il s'agit du théorème de continuité des intégrales à paramètre. On se permet de vérifier uniquement l'hypothèse de domination. Soit  $f \in E$ . Comme  $A$  est continue sur le compact  $[0, 1]^2$ , elle y est bornée. Alors

$$\forall (x, t) \in [0, 1]^2, |A(x, t)f(t)| \leq \|A\|_\infty |f(t)|$$

et la fonction continue  $t \mapsto \|A\|_\infty |f(t)|$  est évidemment intégrable sur le segment  $[0, 1]$ . Ainsi  $T(f)$  est bien continue sur  $[0, 1]$ .

Comme  $\text{Ker } T$  est de dimension finie,  $(\text{Ker } T)^\perp$  est un supplémentaire de  $\text{Ker } T$  dans  $E$ . On sait alors que  $T$  induit un isomorphisme de  $(\text{Ker } T)^\perp$  sur  $\text{Im } T$ .

38 Posons  $k_x : y \in [0, 1] \mapsto K(x, y)$  et  $\ell_x : t \mapsto A(x, t)$  pour  $x \in [0, 1]$  et vérifions que  $\ell_x = S(k_x)$ . Il s'agit donc de vérifier que  $\ell_x \in (\text{Ker } T)^\perp$  et  $T(\ell_x) = k_x$ . Soit  $f \in \text{Ker } T$ . Alors

$$\langle \ell_x, f \rangle = \int_0^1 \ell_x(t)f(t) dt = \int_0^1 A(x, t)f(t) dt = T(f)(x) = 0$$

car  $f \in \text{Ker } T$ . Ainsi  $\ell_x \in (\text{Ker } T)^\perp$ . De plus,

$$\forall y \in [0, 1], T(\ell_x)(y) = \int_0^1 A(y, t)\ell_x(t) dt = \int_0^1 A(y, t)A(x, t) dt = K(x, y) = k_x(y)$$

donc  $T(\ell_x) = k_x$  puis  $S(k_x) = \ell_x$  puisque  $\ell_x \in (\text{Ker } T)^\perp$ .

Soit alors  $f \in \text{Im } T$ . Il existe donc  $g \in (\text{Ker } T)^\perp$  tel que  $f = T(g)$  ou encore  $g = S(f)$ . Pour tout  $x \in [0, 1]$ ,

$$\varphi(k_x, f) = \langle S(k_x), S(f) \rangle = \langle \ell_x, g \rangle = \int_0^1 A(x, t)g(t) dt = T(g)(x) = f(x)$$

D'après notre remarque liminaire,  $(\text{Im } T, \varphi)$  est donc bien un espace à noyau reproduisant de noyau  $K$ .