

* Banque filière PT *

Epreuve de Mathématiques II-B

Durée 4 h

L'usage des machines à calculer est interdit.

Toutes les réponses seront justifiées.

La notation tiendra compte du soin apporté à la rédaction

Dans tout le problème, p, q et f désignent trois fonctions définies et continues sur $[0, 1]$ telles que p est de classe C^1 (continûment dérivable) sur $[0, 1]$ et vérifiant :

$$\forall x \in [0, 1], \quad p(x) > 0 \quad \text{et} \quad q(x) \geq 0.$$

I. Préliminaires.

1. Soit E un espace vectoriel réel muni d'un produit scalaire noté $\langle \cdot, \cdot \rangle$ et dont la norme euclidienne associée est notée $\| \cdot \|$. Prouver que :

$$\forall (x, y) \in E^2, \quad 2 \langle x, y \rangle = \|x + y\|^2 - \|x\|^2 - \|y\|^2.$$

2. a. Démontrer l'inégalité de Cauchy-Schwarz :

$$\forall (x, y) \in E^2, \quad |\langle x, y \rangle| \leq \|x\| \|y\|.$$

(On pourra s'intéresser à la fonction $\lambda \mapsto \|\lambda x + y\|^2$ de la variable réelle λ .)

- b. Montrer que $|\langle x, y \rangle| = \|x\| \|y\|$ si et seulement si $\{x, y\}$ est une famille liée de E .
- c. En déduire que si f et g sont deux fonctions réelles continues sur $[0, a]$ (où a est un réel strictement positif),

$$\left| \int_0^a f(t)g(t) dt \right| \leq \sqrt{\left(\int_0^a f^2(t) dt \right) \left(\int_0^a g^2(t) dt \right)}.$$

3. Soit E un espace vectoriel réel, N une application de E dans $\mathbb{R}$ à valeurs positives ou nulles et vérifiant $\forall x \in E, N(x) = N(-x)$.

On pose $\varphi(x, y) = \frac{1}{2} (N^2(x + y) - N^2(x) - N^2(y))$ et on suppose que φ est un produit scalaire.

Après avoir vérifié que $N(0_E)$ est nul (où 0_E désigne l'élément nul de E), prouver que N est la norme euclidienne associée à φ .

II. Equivalence de normes.

1. Justifier l'existence de trois réels positifs p_0, p_1 et q_1 tels que :

$$\forall x \in [0, 1], \quad 0 < p_0 \leq p(x) \leq p_1 \quad \text{et} \quad q(x) \leq q_1.$$

2. Soit H l'espace vectoriel réel formé des fonctions réelles de classe $\mathcal{C}^1$ sur $[0, 1]$ s'annulant en 0 et en 1, c'est-à-dire :

$$H = \{u \in \mathcal{C}^1([0, 1], \mathbb{R}), u(0) = u(1) = 0\}.$$

Pour tout couple (u, v) de fonctions de H , on pose :

$$\begin{aligned} \langle u, v \rangle &= \int_0^1 \left(u(t)v(t) + u'(t)v'(t) \right) dt, \\ b(u, v) &= \int_0^1 \left(q(t)u(t)v(t) + p(t)u'(t)v'(t) \right) dt, \\ L(v) &= \int_0^1 f(t)v(t) dt. \end{aligned}$$

- a. Vérifier que L est une forme linéaire sur H .
b. Montrer que $(u, v) \mapsto \langle u, v \rangle$ est un produit scalaire sur H . On pose alors :

$$\|u\| = \sqrt{\langle u, u \rangle}.$$

- c. Montrer que $(u, v) \mapsto b(u, v)$ est un produit scalaire sur H .
3. a. Prouver, en utilisant la question **I(2)c**, l'existence d'un réel γ positif tel que :

$$\forall v \in H, \quad |L(v)| \leq \gamma \|v\|.$$

- b. Prouver de même l'existence d'un réel δ strictement positif tel que :

$$\forall (u, v) \in H^2, \quad |b(u, v)| \leq \delta \|u\| \|v\|.$$

4. a. Prouver à l'aide de la question **I(2)c** que pour toute fonction v de H et pour tout réel x de $[0, 1]$,

$$v^2(x) \leq x \int_0^1 v'^2(t) dt.$$

- b. En déduire que :

$$\forall v \in H, \quad p_0 \|v\|^2 \leq \frac{3}{2} b(v, v).$$

5. Soient u_1 et u_2 des fonctions de H vérifiant $\forall v \in H, \quad b(u_1, v) = L(v) = b(u_2, v)$. Prouver que $u_1 = u_2$.
6. Soit G l'espace vectoriel réel formé des fonctions réelles continues, $\mathcal{C}^1$ par morceaux s'annulant en 0 et 1, c'est à dire :

$$G = \{u \in \mathcal{C}^0([0, 1], \mathbb{R}), u(0) = u(1) = 0, u \text{ est } \mathcal{C}^1 \text{ par morceaux sur } [0, 1]\}.$$

- a. Après avoir rappelé la définition d'une fonction $\mathcal{C}^1$ par morceaux sur $[0, 1]$, montrer que $\langle u, v \rangle$ et $b(u, v)$ peuvent être définies lorsque u et v sont éléments de G .

b. Vérifier que $b(v, v) = 0$ avec $v \in G$ si et seulement si $\forall x \in [0, 1], v(x) = 0$.

On admet que $(u, v) \mapsto \langle u, v \rangle$ et $(u, v) \mapsto b(u, v)$ sont encore des produits scalaires sur G et on continue à noter $\| \cdot \|$ la norme euclidienne associée au produit scalaire $\langle \cdot, \cdot \rangle$.

III. Equation de Sturm-Liouville.

On s'intéresse aux solutions de classe $\mathcal{C}^2$ sur $[0, 1]$ de :

$$\forall x \in [0, 1], -\frac{d}{dx} \left(p(x)u'(x) \right) + q(x)u(x) = f(x) \quad (1)$$

vérifiant de plus

$$u(0) = u(1) = 0 \quad (2)$$

On admet dans toute la suite que les fonctions p, q et f sont choisies de telle sorte qu'il existe au moins une solution de l'équation différentielle (1) vérifiant les conditions initiales (2).

1. Résoudre le problème posé lorsque $p(x) = e^{-\alpha x}$ (avec α réel non nul), $q(x) = 0$ et $f(x) = -2n_0\pi \cos(2n_0\pi x)$ (avec n_0 entier naturel non nul).
2. On revient au cas général. Soit u une solution du problème posé (c'est-à-dire vérifiant (1) et (2)), prouver que :

$$\forall v \in H, b(u, v) = L(v). \quad (3)$$

En déduire que l'équation (3) admet une unique solution u dans H .

3. On pose, pour tout élément v de H , $J(v) = \frac{1}{2} b(v, v) - L(v)$ et on désigne par u l'unique solution de (3) dans H .

- a. En calculant $J(u + w)$ avec $w \in H$, prouver que

$$\forall v \in H, J(u) \leq J(v).$$

- b. Réciproquement, soit u_0 un élément de H tel que $\forall v \in H, J(u_0) \leq J(v)$.
Etablir, en calculant $J(u_0 + \lambda w)$ pour tout réel λ , que :

$$\forall w \in H, b(u_0, w) = L(w).$$

u est donc l'unique fonction de H réalisant le minimum de J sur H .

4. On désigne par W un sous-espace vectoriel de G de dimension d de base $(\varphi_i)_{1 \leq i \leq d}$ et par π_W la projection orthogonale sur W pour le produit scalaire b .

- a. Montrer que $\forall w \in W, b(\pi_W(u) - u, \pi_W(u) - u) \leq b(w - u, w - u)$.
- b. Prouver que $u_W = \pi_W(u)$ si et seulement si u_W est élément de W et vérifie

$$\forall v \in W, b(u_W, v) = L(v).$$

- c. Soit $(\alpha_1, \dots, \alpha_d)$ les composantes de u_W dans la base $(\varphi_i)_{1 \leq i \leq d}$. Montrer que ces composantes sont solutions du système :

$$\forall i \in [1, d], \sum_{j=1}^d b(\varphi_i, \varphi_j) \alpha_j = L(\varphi_i). \quad (4)$$

Prouver que ce système est un système de Cramer.

IV. Approximations de la solution u .

Soit n un entier naturel non nul ; on pose $h = \frac{1}{n+1}$ et pour tout entier naturel i , $x_i = ih$. De plus, pour i compris entre 1 et n , on désigne par φ_i la fonction définie par :

$$\begin{cases} x \in [x_{i-1}, x_{i+1}] \Rightarrow \varphi_i(x) = 1 - \frac{|x - x_i|}{h} \\ x \notin [x_{i-1}, x_{i+1}] \Rightarrow \varphi_i(x) = 0. \end{cases}$$

1. a. Tracer le graphe d'une fonction φ_i et vérifier que pour tout i , φ_i est élément de G .
- b. Soit W_n le sous-espace de G engendré par la famille $\{\varphi_i\}_{1 \leq i \leq n}$.

Soit $\varphi = \sum_{i=1}^n t_i \varphi_i$ un élément de W_n . Quelle est la valeur de t_i ? En déduire que les fonctions $(\varphi_i)_{1 \leq i \leq n}$ forment une base de W_n .

- c. Prouver que si $|j - i| \geq 2$, $b(\varphi_i, \varphi_j) = 0$.
2. Dans cette question, $p(x) = e^{-\alpha x}$ (avec α réel non nul) et $q(x) = 0$.
 - a. Calculer $b(\varphi_i, \varphi_j)$ pour $1 \leq i \leq n$ et $1 \leq j \leq n$.
 - b. Calculer alors le déterminant du système (4) lorsque $n = 2$ et retrouver que dans ce cas particulier ce système est un système de Cramer.

3. On pose $w_n = \sum_{i=1}^n u(x_i) \varphi_i$.

- a. Etablir l'égalité suivante, pour $1 \leq i \leq n+1$:

$$\forall x \in [x_{i-1}, x_i], u(x) - w_n(x) = \frac{1}{h} \int_{x_{i-1}}^x \left(\int_{x_{i-1}}^{x_i} \left(\int_y^t u''(z) dz \right) dy \right) dt.$$

- b. En déduire à l'aide d'une inégalité donnée par la question I(2)c que :

$$\forall x \in [x_{i-1}, x_i], |u(x) - w_n(x)| \leq h^{\frac{3}{2}} \left(\int_{x_{i-1}}^{x_i} (u''(z))^2 dz \right)^{\frac{1}{2}}.$$

- c. Prouver de même que :

$$\forall x \in]x_{i-1}, x_i[, |u'(x) - w'_n(x)| \leq h^{\frac{1}{2}} \left(\int_{x_{i-1}}^{x_i} (u''(z))^2 dz \right)^{\frac{1}{2}}.$$

4. Montrer alors que :

$$\|u - w_n\| \leq \frac{\sqrt{5}h}{2} \left(\int_0^1 (u''(z))^2 dz \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Quelle interprétation vous suggère cette inégalité ?

Rappel : $\| \cdot \|$ est la norme euclidienne associée au produit scalaire $\langle \cdot, \cdot \rangle$.

V. Appendice.

Ce problème provient de la modélisation des vibrations de cordes fixées aux deux extrémités. La recherche d'une solution sous forme de série conduit à la résolution d'un problème de Sturm-Liouville où u est le déplacement vertical en un point d'abscisse x , p et q sont des caractéristiques de la corde et f est liée aux forces appliquées à la corde.