

DEVOIR SURVEILLÉ N°08

- 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 – Mines-Ponts MP 2009 – Théorème de Müntz

On désigne par $\mathcal{C}([0, 1])$ l'espace vectoriel des fonctions réelles continues sur $[0, 1]$. Pour tout $\lambda \geq 0$, on note ϕ_λ l'élément de $\mathcal{C}([0, 1])$ défini par $\phi_\lambda(x) = x^\lambda$. Par convention on a posé $0^0 = 1$ de sorte que ϕ_0 est la fonction constante 1.

Soit $(\lambda_k)_{k \in \mathbb{N}}$ une suite de réels ≥ 0 deux à deux distincts. On note W le sous-espace vectoriel de $\mathcal{C}([0, 1])$ engendré la famille $(\phi_{\lambda_k})_{k \in \mathbb{N}}$. Le but du problème est d'établir des critères de densité de l'espace W dans $\mathcal{C}([0, 1])$ pour l'une ou l'autre des deux normes classiques N_∞ ou N_2 définies par :

$$N_\infty(f) = \sup_{x \in [0, 1]} |f(x)| \quad \text{et} \quad N_2(f) = \left(\int_0^1 |f(x)|^2 dx \right)^{\frac{1}{2}}$$

La question préliminaire et les parties I, II, III et VI sont indépendantes les unes des autres.

Question préliminaire

- 1** Montrer que $(\phi_\lambda)_{\lambda \geq 0}$ est une famille libre de $\mathcal{C}([0, 1])$.

I Déterminants de Cauchy

On considère un entier $n > 0$ et deux suites finies $(a_k)_{1 \leq k \leq n}$ et $(b_k)_{1 \leq k \leq n}$ de réels telles que $a_k + b_k \neq 0$ pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$. Pour tout entier m tel que $0 < m \leq n$, le *déterminant de Cauchy* d'ordre m est défini par :

$$D_m = \begin{vmatrix} \frac{1}{a_1 + b_1} & \frac{1}{a_1 + b_2} & \cdots & \frac{1}{a_1 + b_m} \\ \frac{1}{a_2 + b_1} & \frac{1}{a_2 + b_2} & \cdots & \frac{1}{a_2 + b_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_m + b_1} & \frac{1}{a_m + b_2} & \cdots & \frac{1}{a_m + b_m} \end{vmatrix}$$

On définit la fraction rationnelle :

$$R(X) = \frac{\prod_{k=1}^{n-1} (X - a_k)}{\prod_{k=1}^n (X + b_k)}$$

- 2** Montrer que si $R(X)$ est de la forme $R(X) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{X + b_k}$, alors

$$A_n D_n = R(a_n) D_{n-1}$$

On pourra pour cela considérer le déterminant obtenu à partir de D_n en remplaçant la dernière colonne par

$$\begin{pmatrix} R(a_1) \\ R(a_2) \\ \vdots \\ R(a_n) \end{pmatrix}$$

3 En déduire que

$$D_n = \frac{\prod_{1 \leq i < j \leq n} (a_j - a_i)(b_j - b_i)}{\prod_{1 \leq i \leq n} (a_i + b_i)}$$

II Distance d'un point à une partie d'un espace normé

Soit E un espace vectoriel normé par une norme $\|\cdot\|$. On rappelle que la distance d'un élément $x \in E$ à une partie non vide A de E est le réel noté $d(x, A)$ défini par :

$$d(x, A) = \inf_{y \in A} \|x - y\|$$

4 Montrer que $d(x, A) = 0$ si et seulement si x est adhérent à A .

5 Montrer que si $(A_n)_{n \geq 0}$ est une suite croissante de parties de E et si $A = \bigcup_{n \geq 0} A_n$ alors $d(x, A) = \lim_{n \rightarrow \infty} d(x, A_n)$.

On considère un sous-espace vectoriel V de dimension finie de E , et on note $B = \{y; \|y - x\| \leq \|x\|\}$.

6 Montrer que $B \cap V$ est compact et que $d(x, V) = d(x, B \cap V)$ pour tout $x \in E$.

7 En déduire que pour tout $x \in E$, il existe un élément $y \in V$ tel que $d(x, V) = \|x - y\|$.

III Distance d'un point à un sous-espace de dimension finie dans un espace euclidien

Dans cette partie, on suppose que la norme sur l'espace vectoriel E est définie à partir d'un produit scalaire $\langle \cdot, \cdot \rangle$ sur E : $\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$.

8 Montrer que si V est un sous-espace vectoriel de dimension finie de E , alors pour tout $x \in E$, la projection orthogonale de x sur V est l'unique élément $y \in V$ vérifiant $d(x, V) = \|x - y\|$.

Pour toute suite finie $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in E^n$, on désigne par $G(x_1, x_2, \dots, x_n)$ le déterminant de la *matrice de Gram* d'ordre n définie par :

$$M(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{pmatrix} \langle x_1, x_1 \rangle & \langle x_1, x_2 \rangle & \cdots & \langle x_1, x_n \rangle \\ \langle x_2, x_1 \rangle & \langle x_2, x_2 \rangle & \cdots & \langle x_2, x_n \rangle \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \langle x_n, x_1 \rangle & \langle x_n, x_2 \rangle & \cdots & \langle x_n, x_n \rangle \end{pmatrix}$$

9 Montrer que $G(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ si et seulement si la famille (x_1, x_2, \dots, x_n) est liée.

10 On suppose que la famille (x_1, x_2, \dots, x_n) est libre et l'on désigne par V l'espace vectoriel qu'elle engendre. Montrer que, pour tout $x \in E$,

$$d(x, V)^2 = \frac{G(x_1, x_2, \dots, x_n, x)}{G(x_1, x_2, \dots, x_n)}$$

IV Comparaison des normes N_∞ et N_2

Pour toute partie A de $\mathcal{C}([0, 1])$, on note \overline{A}^∞ et \overline{A}^2 les adhérences de A pour les normes N_∞ et N_2 respectivement. Pour $f \in \mathcal{C}([0, 1])$, la notation $d(f, A)$ désigne toujours la distance de f à A *relativement à la norme* N_2 (on ne considérera jamais, dans l'énoncé, la distance d'un élément à une partie relativement à la norme N_∞).

- 11** Montrer que pour tout $f \in \mathcal{C}([0, 1])$, $N_2(f) \leq N_\infty(f)$. En déduire que pour toute partie A de $\mathcal{C}([0, 1])$, on a $\overline{A}^\infty \subset \overline{A}^2$.

On considère l'ensemble $V_0 = \{f \in \mathcal{C}([0, 1]); f(0) = 0\}$, et on rappelle que ϕ_0 désigne la fonction constante 1.

- 12** Montrer que $\phi_0 \in \overline{V_0}^2$.
- 13** En déduire que V_0 est dense dans $\mathcal{C}([0, 1])$ pour la norme N_2 , mais n'est *pas* dense pour la norme N_∞ .
- 14** Montrer que si V est un sous-espace vectoriel d'un espace vectoriel normé, alors son adhérence \overline{V} est également un espace vectoriel.
- 15** Montrer qu'un sous-espace vectoriel V de $\mathcal{C}([0, 1])$ est dense pour la norme N_∞ si et seulement si pour tout entier $m \geq 0$, $\phi_m \in \overline{V}^\infty$.
- 16** En déduire qu'un sous-espace vectoriel V de $\mathcal{C}([0, 1])$ est dense pour la norme N_2 si et seulement si pour tout entier $m \geq 0$, $\phi_m \in \overline{V}^2$.

V Un critère de densité de W pour la norme N_2

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note W_n l'espace vectoriel engendré par la famille finie $(\phi_{\lambda_k})_{0 \leq k \leq n}$.

- 17** Montrer que l'espace W est dense dans $\mathcal{C}([0, 1])$ pour la norme N_2 si et seulement si $\lim_{n \rightarrow +\infty} d(\phi_\mu, W_n) = 0$ pour tout entier $\mu \geq 0$.
- 18** Montrer que pour tout $\mu \geq 0$,

$$d(\phi_\mu, W_n) = \frac{1}{\sqrt{2\mu+1}} \prod_{k=0}^n \frac{|\lambda_k - \mu|}{\lambda_k + \mu + 1}$$

- 19** Montrer que pour tout $\mu \geq 0$, la suite $\left(\frac{|\lambda_k - \mu|}{\lambda_k + \mu + 1} \right)_{k \in \mathbb{N}}$ tend vers 1 si et seulement si la suite $(\lambda_k)_{k \in \mathbb{N}}$ tend vers $+\infty$.
(On pourra pour cela étudier les variations de la fonction $x \in [0, \mu] \mapsto \frac{\mu - x}{x + \mu + 1}$.)
- 20** En déduire que l'espace W est dense dans $\mathcal{C}([0, 1])$ pour la norme N_2 si et seulement si la série $\sum_k \frac{1}{\lambda_k}$ est divergente.

VI Un critère de densité de W pour la norme N_∞

- 21** Montrer que si W est dense dans $\mathcal{C}([0, 1])$ pour la norme N_∞ , alors la série $\sum_k \frac{1}{\lambda_k}$ est divergente.
- 22** Soit $\psi = \sum_{k=0}^n a_k \phi_{\lambda_k}$ un élément quelconque de W_n . Montrer que si $\lambda_k \geq 1$ pour tout $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, alors pour tout $\mu \geq 1$, on a :

$$N_\infty(\phi_\mu - \psi) \leq N_2(\mu \phi_{\mu-1} - \sum_{k=0}^n a_k \lambda_k \phi_{\lambda_k-1})$$

23 On suppose que la suite $(\lambda_k)_{k \in \mathbb{N}}$ vérifie les deux conditions suivantes :

- (i) $\lambda_0 = 0$;
- (ii) $\lambda_k \geq 1$ pour tout $k \geq 1$;

Montrer que sous ces conditions, si la série $\sum_k \frac{1}{\lambda_k}$ est divergente, alors W est dense dans $C([0, 1])$ pour la norme N_∞ .

24 Montrer que la conclusion précédente est encore valable si on remplace la condition (ii) par la condition plus faible :

$$(ii') : \quad \inf_{k \geq 1} \lambda_k > 0$$