

Les calculatrices sont autorisées.

*N.B. Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.
Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.*

Notation et Objectifs :

On note :

- \mathbb{N} : l'ensemble des nombres entiers naturels,
- \mathbb{R} : l'ensemble des nombres réels,
- \mathbb{C} : l'ensemble des nombres complexes,
- \mathbf{c}^0 : le \mathbb{R} – espace vectoriel des fonctions continues de \mathbb{R} dans \mathbb{R} ,
- \mathbf{c}_1^0 : le sous-espace vectoriel de \mathbf{c}^0 des fonctions f 1-périodique (c'est-à-dire telles que $f(x+1) = f(x)$, pour tout $x \in \mathbb{R}$).

Dans tout ce problème, on désigne par q l'application de \mathbf{c}^0 dans \mathbf{c}^0 , définie par :
pour tout $f \in \mathbf{c}^0$, $q(f) = F$ où F est la fonction de \mathbb{R} dans \mathbb{R} qui à x , associe $\int_x^{x+1} f(t)dt$.

On admet que q est un endomorphisme de \mathbf{c}^0 .

L'objet de ce problème est l'étude de quelques propriétés de la fonction F et de l'endomorphisme q .

Tournez la page S.V.P.

PARTIE I

Quelques propriétés de $F = q(f)$

I.1/ Exemples.

I.1.1/ Expliciter $F(x)$, si f est définie sur \mathbb{R} par $f(t) = 1$.

I.1.2/ Expliciter $F(x)$, si f est définie sur \mathbb{R} par $f(t) = t^k$ (où k est fixé dans \mathbb{N}^*).

I.2/ Variation de $F = q(f)$.

On désigne maintenant par f une fonction arbitraire de \mathbf{c}^0 .

I.2.1/ Montrer que la fonction F est de classe \mathbf{c}^1 sur \mathbb{R} . Expliciter $F'(x)$ en fonction de f et de x .

I.2.2/ Montrer que si la fonction f est croissante (respectivement décroissante) sur un intervalle $J_{x_0} = [x_0, +\infty[$, alors la fonction F est croissante (respectivement décroissante) sur J_{x_0} .

I.2.3/ Montrer que la fonction $F = q(f)$ est constante sur \mathbb{R} si et seulement si f appartient à \mathbf{c}_1^0 .

I.2.4/ Expliciter $F(x)$, si f est définie sur \mathbb{R} par $f(t) = |\sin(pt)|$.

On suppose de nouveau que f désigne une fonction arbitraire de \mathbf{c}^0 .

I.2.5/ On suppose que la fonction f admet une limite finie L_1 en $+\infty$.

Montrer que la fonction F admet une limite L_2 (que l'on explicitera) en $+\infty$; on pourra étudier d'abord le cas où $L_1 = 0$.

I.3/ Propriétés du graphe de F .

Soient $f \in \mathbf{c}^0$ et $F = q(f)$.

On considère la fonction y définie sur \mathbb{R} par $y(u) = F\left(u - \frac{1}{2}\right) = \int_{u-\frac{1}{2}}^{u+\frac{1}{2}} f(t) dt$.

I.3.1/ Comparer $y(-u)$ et $y(u)$, si la fonction f est impaire (respectivement paire).

I.3.2/ Quelle propriété géométrique de la représentation graphique de la fonction F peut-on déduire des résultats obtenus en I.3.1, si la fonction f est impaire (respectivement paire)?

I.4/ Étude d'un exemple.

Soit $f(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{e^{-kt^2}}{k^2 + 1}$, pour t réel.

I.4.1/ Montrer que la fonction f est définie et continue sur \mathbb{R} .

I.4.2/ La fonction f est-elle de classe \mathbf{C}^1 sur \mathbb{R} ?

I.4.3/ La fonction f admet-elle une limite en $+\infty$? Si oui, laquelle ?

I.4.4/ Indiquer l'allure de la représentation graphique de la fonction f (on ne cherchera pas à préciser $f(0)$).

I.4.5/ La fonction f est-elle intégrable sur \mathbb{R} ?

I.4.6/ Soit $F = \mathbf{q}(f)$.

I.4.6.1/ Indiquer l'allure de la représentation graphique de la fonction F .

I.4.6.2/ La fonction F est-elle intégrable sur \mathbb{R} ?

(on pourra comparer $F(x)$ et $f(x)$ pour x appartenant à \mathbb{R}_+).

PARTIE II

L'endomorphisme \mathbf{q}

II.1/ L'endomorphisme \mathbf{q} est-il surjectif ?

II.2/ Sur le noyau de ?.

On note désormais $\text{Ker} \mathbf{q}$ le noyau de l'endomorphisme \mathbf{q} .

II.2.1/ Montrer que $f \in \text{Ker} \mathbf{q} \Leftrightarrow [f \in \mathbf{C}_1 \text{ et } \int_0^1 f(t)dt = 0]$.

II.2.2/ Soit $(f, g) \in (\mathcal{C}_1)^2$. On note $\langle f | g \rangle = \int_0^1 f(t)g(t)dt$.

On admettra, sans justification, que $\langle \cdot | \cdot \rangle$ est un produit scalaire sur \mathbf{C}_1^0 .

Soit $k \in \mathbb{N}^*$. On note C_k la fonction définie sur \mathbb{R} par $C_k(t) = \cos(2\mathbf{p}kt)$.

II.2.2.1/ Vérifier que C_k appartient à \mathbf{c}_1^0 pour tout $k \in \mathbb{N}^*$ et calculer $\langle C_j | C_k \rangle$ pour $(j, k) \in (\mathbb{N}^*)^2$.

II.2.2.2/ Ker? est-il de dimension finie ?

II.2.3/ Soit $f \in \mathbf{c}_1^0$.

Soit $n \in \mathbb{N}$. On note : $j_n(x) = \int_n^x f(t)dt$ pour $x \in [n, n+1]$.

Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On pose $w_n = \int_n^{n+1} \frac{f(t)}{t} dt$.

II.2.3.1/ Établir, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, la relation : $w_n = \frac{j_0(1)}{n+1} + \int_n^{n+1} \frac{j_n(t)}{t^2} dt$.

II.2.3.2/ Si on suppose que f appartient à Ker? , quelle est la nature de la série

$$\sum_{n \geq 1} w_n ?$$

II.2.3.3/ Si on suppose que f n'appartient pas à Ker? , quelle est la nature de la

série $\sum_{n \geq 1} w_n$?

II.3/ Sur le spectre de q .

On note $Sp(q)$ l'ensemble des valeurs propres réelles de l'endomorphisme q .

Si a est un nombre réel fixé, on note h_a la fonction définie sur \mathbb{R} par $h_a(t) = e^{at}$.

II.3.1/ Montrer que chaque h_a est un vecteur propre de l'endomorphisme q .

II.3.2/ Étudier les variations de la fonction $u \mapsto \frac{e^u - 1}{u}$ pour $u \in \mathbb{R}^*$.

II.3.3/ Expliciter l'ensemble $[Sp(q)] \cap \mathbb{R}_+$.

PARTIE III

Une suite de fonctions propres de l'endomorphisme q

Soit λ une valeur propre de l'endomorphisme q .

On note E_λ le sous-espace propre associé à la valeur propre λ qui est fixée dans toute cette partie.

On suppose $\lambda > 0$.

III.1/ Soit $k \in \mathbb{N}^*$. On note I_k l'intervalle $]2k\pi, (2k+1)\pi[$.

On pose, pour tout t de l'intervalle I_k : $g(t) = t \left(\frac{\cos t}{\sin t} \right) + \ln \left(\frac{\sin t}{t} \right)$, où \ln désigne la fonction logarithme népérien.

III.1.1/ Soit r la fonction définie sur I_k , par : $r(t) = t \sin(2t) - t^2 - \sin^2 t$.

Étudier la fonction r sur I_k et préciser son signe.

III.1.2/ Montrer que g définit une bijection de I_k sur un intervalle de \mathbb{R} à préciser.

On se propose de montrer l'existence, dans E_λ , d'une suite (non triviale) $(f_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$ de fonctions propres.

III.2/ Soit $g = a + ib$, où $(a, b) \in \mathbb{R} \times]0, +\infty[$.

III.2.1/ Soit $x \in \mathbb{R}$. Calculer $\int_x^{x+1} e^{gt} dt$.

III.2.2/ À quelle condition nécessaire et suffisante la fonction h de \mathbb{R} dans \mathbb{R} définie par $h(t) = e^{at} \cos(bt)$ est-elle un vecteur propre de l'endomorphisme q associé à la valeur propre λ ?

III.3/ En déduire une suite $(f_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$ de fonctions propres de l'endomorphisme q .