

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES

CONCOURS D'ADMISSION 2001

FILIÈRE PC

PREMIÈRE COMPOSITION DE MATHÉMATIQUES

(Durée : 4 heures)

L'utilisation des calculatrices n'est pas autorisée pour cette épreuve.

Les polynômes de Legendre, fonctions de Legendre et harmoniques sphériques étudiés dans ce problème ont des applications à la détermination des équilibres de température et des distributions de charges électriques, ainsi qu'à la mécanique quantique.

Les fonctions considérées sont à valeurs dans \mathbf{R} . On identifie une fonction polynomiale avec le polynôme associé.

Première partie

Pour tout $n \in \mathbf{N}$, on considère la fonction polynomiale P_n , définie par

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} \left((x^2 - 1)^n \right)$$

pour $x \in \mathbf{R}$. Il résulte des conventions habituelles que $P_0(x) = 1$ pour $x \in \mathbf{R}$.

1.a) Montrer que le polynôme P_n est de degré n . Quel est le coefficient du terme de degré n dans P_n ?

b) Pour quelles valeurs de n la fonction P_n est-elle paire ? impaire ?

c) Calculer $P_n(1)$ et $P_n(-1)$.

2. Soit $n \geq 1$. Montrer que pour tout $m \in \mathbf{N}$ tel que $0 \leq m \leq n - 1$,

$$\int_{-1}^1 P_n(x) x^m dx = 0 .$$

3. On désigne par \mathcal{E} l'espace préhilbertien réel des fonctions continues sur $[-1, 1]$ muni du produit scalaire

$$(u | v) = \int_{-1}^1 u(x)v(x) dx ,$$

pour $u, v \in \mathcal{E}$.

a) La famille $(P_n)_{n \in \mathbf{N}}$ est-elle une famille orthogonale dans \mathcal{E} ?

b) Calculer $(P_n | P_n)$ pour chaque $n \in \mathbf{N}$.

4.a) Soit $n \geq 1$. Montrer que $\frac{d}{dx} \left((x^2 - 1) \frac{dP_n}{dx}(x) \right)$ est orthogonal à x^m pour tout $m \in \mathbf{N}$ tel que $0 \leq m \leq n - 1$.

b) Montrer que, pour tout $n \in \mathbf{N}$, P_n est solution de l'équation différentielle

$$(x^2 - 1)y'' + 2xy' - n(n + 1)y = 0 .$$

Deuxième partie

5. Soit $n \in \mathbf{N}$ et soit $m \in \mathbf{N}$ tel que $0 \leq m \leq n$. On pose

$$f_{n,m}(x) = (1 - x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m P_n}{dx^m}(x)$$

pour $x \in [-1, 1]$.

a) Etudier la parité des fonctions $f_{n,m}$ suivant les valeurs de n et m .

b) Montrer que $f_{n,m} \in \mathcal{E}$ et que, si $n' \in \mathbf{N}$, $n' \neq n$ et $0 \leq m \leq n'$, alors $f_{n,m}$ et $f_{n',m}$ sont orthogonales dans \mathcal{E} .

Dans la quatrième partie, on utilisera la propriété suivante, que l'on admettra : sur l'intervalle $] -1, 1[$, la fonction $f_{n,m}$ est de classe \mathcal{C}^2 et est solution de l'équation différentielle

$$(E) \quad (1 - x^2)y'' - 2xy' + \left(n(n + 1) - \frac{m^2}{1 - x^2} \right) y = 0 .$$

Troisième partie

On désigne par x_1, x_2, x_3 les coordonnées canoniques de \mathbf{R}^3 . Par définition une *fonction polynomiale* (ou *polynôme*) *homogène* sur \mathbf{R}^3 de degré N , où $N \in \mathbf{N}$, est une combinaison linéaire à coefficients réels de monômes $(x_1)^{i_1} (x_2)^{i_2} (x_3)^{i_3}$, où $i_1, i_2, i_3 \in \mathbf{N}$ et $i_1 + i_2 + i_3 = N$. On convient que la fonction nulle est un polynôme homogène de degré N pour tout $N \in \mathbf{N}$.

6.a) Soit f une fonction de classe \mathcal{C}^1 sur \mathbf{R}^3 , nulle en 0, dont les dérivées partielles $\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \frac{\partial f}{\partial x_3}$ sont des fonctions polynomiales homogènes sur \mathbf{R}^3 de degré N . Montrer que f est une fonction polynomiale homogène de degré $N + 1$.

b) Soit f une fonction de classe \mathcal{C}^N sur \mathbf{R}^3 qui vérifie

$$f(\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3) = \lambda^N f(x_1, x_2, x_3)$$

pour tous $x_1, x_2, x_3 \in \mathbf{R}$, $\lambda \in \mathbf{R}$. Montrer que f est une fonction polynomiale homogène sur \mathbf{R}^3 de degré N .

7. Montrer que, si f est une fonction polynomiale homogène sur \mathbf{R}^3 de degré N ,

$$x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + x_3 \frac{\partial f}{\partial x_3} = N f .$$

8. On désigne par \mathcal{F}_N l'espace vectoriel des polynômes homogènes sur \mathbf{R}^3 de degré N . Trouver la dimension de \mathcal{F}_N .

9. Soit $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$ le laplacien sur les fonctions sur \mathbf{R}^3 . Une fonction f de classe \mathcal{C}^2 sur \mathbf{R}^3 telle que $\Delta f = 0$ est appelée *harmonique*. Soit

$$\mathcal{H}_N = \{f \in \mathcal{F}_N \mid \Delta f = 0\}$$

l'espace vectoriel réel des polynômes homogènes harmoniques sur \mathbf{R}^3 de degré N . On se propose de déterminer la dimension de \mathcal{H}_N , $\dim \mathcal{H}_N$.

a) Montrer que, pour $N \geq 2$, $\Delta(\mathcal{F}_N) \subset \mathcal{F}_{N-2}$. En déduire que

$$\dim \mathcal{H}_N \geq 2N + 1 .$$

b) On pose $r^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$. Soit $k \in \mathbf{N}$, $0 \leq 2k \leq N$, et soit $g \in \mathcal{F}_{N-2k}$. Calculer $\Delta(r^{2k}g)$ en fonction de $g, \Delta g, r, N, k$.

10. Soit $f \in \mathcal{H}_N$, $N \geq 2$. On suppose qu'il existe $g \in \mathcal{F}_{N-2}$ tel que $f = r^2g$.

a) Montrer qu'il existe une fonction h de classe \mathcal{C}^2 sur \mathbf{R}^3 telle que $f = r^{2K}h$, où K est la partie entière de $\frac{N+2}{2}$.

b) Montrer que $f = 0$.

11.a) Montrer que, si $N \geq 2$, $\dim \mathcal{H}_N \leq \dim \mathcal{F}_N - \dim \mathcal{F}_{N-2}$.

b) Quelle est la valeur de $\dim \mathcal{H}_N$?

Quatrième partie

On conserve les notations de la troisième partie. On introduit les coordonnées sphériques (r, θ, φ) sur \mathbf{R}^3 définies par

$$\begin{cases} x_1 = r \sin \theta \cos \varphi \\ x_2 = r \sin \theta \sin \varphi \\ x_3 = r \cos \theta \end{cases}$$

pour $r \in]0, +\infty[$, $\theta \in]0, \pi[$, $\varphi \in]0, 2\pi[$. On négligera le fait que ces coordonnées ne sont pas définies pour les points d'un demi-plan de \mathbf{R}^3 . On écrira

$$f(x_1, x_2, x_3) = \tilde{f}(r, \theta, \varphi)$$

(expression de f en coordonnées sphériques). Soit

$$S = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbf{R}^3 \mid x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1\}$$

la sphère de centre 0 et de rayon 1. On pose

$$\Delta_S = \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \cotan \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$$

et l'on admettra que

$$\tilde{\Delta} = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \Delta_S$$

est l'expression du laplacien en coordonnées sphériques, c'est-à-dire que

$$\widetilde{\Delta}(f) = \tilde{\Delta}(\tilde{f}) .$$

Soit $n \in \mathbf{N}$ et $m \in \mathbf{N}$. On considère les fonctions sur S définies par

$$\begin{cases} 0 \leq m \leq n & , & Y_{n,m}(\theta, \varphi) = \cos(m\varphi)f_{n,m}(\cos \theta) \\ 0 < m \leq n & , & Y_{n,-m}(\theta, \varphi) = \sin(m\varphi)f_{n,m}(\cos \theta) \end{cases}$$

où les $f_{n,m}$ sont les fonctions étudiées dans la deuxième partie.

12. Montrer que pour tout $n \in \mathbf{N}$ et $m \in \mathbf{Z}$ tel que $-n \leq m \leq n$,

$$\Delta_S Y_{n,m} = -n(n+1)Y_{n,m} .$$

13. Soit $n \in \mathbf{N}$ et $m \in \mathbf{Z}$ tel que $-n \leq m \leq n$. Soit $H_{n,m}$ la fonction sur \mathbf{R}^3 telle que

$$\tilde{H}_{n,m}(r, \theta, \varphi) = r^n Y_{n,m}(\theta, \varphi) .$$

a) Montrer que $\tilde{\Delta} \tilde{H}_{n,m} = 0$.

b) Montrer, en regroupant dans $\tilde{H}_{n,m}$ les termes en $r \sin \theta \cos \varphi$, $r \sin \theta \sin \varphi$ et $r \cos \theta$, que $H_{n,m}$ est un polynôme homogène harmonique sur \mathbf{R}^3 de degré n .

* *
*