

5. Transformation de Fourier de fonctions intégrables

Exercice 1. Soit $a > 0$. Calculer (si possible) la transformée de Fourier des fonctions suivantes :

- (a) $f_1 : x \in \mathbb{R} \rightarrow e^{ix} e^{-|x|}$
 (b) $f_2 : x \in \mathbb{R} \rightarrow (1 - a|x|)\chi_{[-\frac{1}{a}, \frac{1}{a}]}(x)$
 (c) $f_3 : x \in \mathbb{R} \rightarrow e^{-|x-1|}$
 (d) $f_4 : x \in \mathbb{R} \rightarrow \sin(2x)\chi_{[-1,1]}(x)$.

Exercice 2. (a) Calculer (si possible) la transformée de Fourier de la fonction $x \mapsto e^{-\lambda|x|}$ ($x \in \mathbb{R}$) où λ est une constante strictement positive.

(b) Pour tout $\lambda > 0$, on pose

$$R_\lambda(x) = \frac{\lambda}{\pi(x^2 + \lambda^2)}, \quad x \in \mathbb{R}.$$

Montrer que, pour tous $a, b > 0$, on a $R_a \star R_b = R_{a+b}$.

(c) En déduire que, pour tous $a, b > 0$, on a

$$\int_0^{+\infty} \frac{dx}{(x^2 + a^2)(x^2 + b^2)} = \frac{\pi}{2ab} \frac{1}{a+b}.$$

Exercice 3. Soit E l'espace des fonctions intégrables sur \mathbb{R}^n et F l'espace des fonctions bornées sur \mathbb{R}^n . Montrer que l'opérateur

$$\mathcal{F}^\pm : E \rightarrow F$$

est injectif mais pas surjectif.

Exercice 4. Montrer que la transformée de Fourier d'une fonction paire (resp. impaire) est paire (resp. impaire). Qu'en est-il de la réciproque ?

Exercice 5. Soient $a, b > 0$. Si possible, calculer

- (a) $\int_0^{+\infty} \frac{\sin(ax)\sin(bx)}{x^2} dx$
 (b) $\int_0^{+\infty} \frac{\sin(ax)\cos(bx)}{x} dx$
 (c) $\int_0^{+\infty} \frac{\sin(ax)\sin(bx)}{x} dx$, si $a \neq b$.

(Rappel : Pour tout $\lambda > 0$, on a $\int_0^{+\infty} \frac{\sin(\lambda x)}{x} dx = \frac{\pi}{2}$.)

Exercice 6. En utilisant le théorème du transfert, calculer

$$\int_0^{+\infty} \frac{e^{-x}}{x} \sin(x) dx.$$

Exercice 7. Soit un signal f (on suppose que cette fonction est intégrable et de carré intégrable). On définit l'autocorrélation du signal par

$$E_f(t) = \int_{\mathbb{R}} f(x)\overline{f(x-t)} dx, \quad t \in \mathbb{R}$$

et la densité spectrale de puissance de ce signal (PSD) par

$$D_f(y) = |\mathcal{F}_y^- f|^2, \quad y \in \mathbb{R}.$$

On pose $f^s(x) = \overline{f(-x)}$ pour $x \in \mathbb{R}$.

- (a) Montrer que l'autocorrélation s'écrit $E_f = f \star f^s$.
- (b) Montrer que l'autocorrélation d'une fonction à valeurs réelles est une fonction paire.
- (c) Montrer que

$$\sup_{t \in \mathbb{R}} |E_f(t)| = E_f(0).$$

- (d) Montrer que la densité spectrale et l'autocorrélation sont liées par la transformation de Fourier (l'une est la transformée de l'autre).

Exercice 8 (Equation de la chaleur). Soit une fonction $u \in C_2(\mathbb{R} \times [0, +\infty[)$ telle que, pour tout $t \geq 0$, les fonctions $x \mapsto u(x, t)$, $x \mapsto D_x u(x, t)$ et $x \mapsto D_x^2 u(x, t)$ sont intégrables sur \mathbb{R} . On suppose qu'il existe $U_1, U_2 \in L^1(\mathbb{R})$ tel que $|u(x, t)| \leq U_1(x)$ et $|D_t u(x, t)| \leq U_2(x)$ pour tout $(x, t) \in \mathbb{R} \times]0, +\infty[$. Soit v une constante strictement positive. On suppose que u vérifie l'équation de la chaleur

$$D_t u(x, t) = v^2 D_x^2 u(x, t), \quad x \in \mathbb{R}, t > 0.$$

On pose

$$f(x) = u(x, 0), \quad x \in \mathbb{R}$$

et on définit la fonction F de telle sorte que, pour tout $t \geq 0$, $F(y, t)$ est la transformée de Fourier (négative) en y de la fonction $x \mapsto u(x, t)$.

- (a) Montrer que pour tout $y \in \mathbb{R}$, la fonction $t \mapsto F(y, t)$ vérifie

$$D_t F(y, t) + v^2 y^2 F(y, t) = 0.$$

- (b) En déduire que, pour $y \in \mathbb{R}$ et $t \geq 0$, on a

$$F(y, t) = e^{-v^2 y^2 t} \mathcal{F}_y^- f.$$

- (c) En déduire finalement que, pour $x \in \mathbb{R}$ et $t \geq 0$, on a

$$u(x, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\mathbb{R}} f(x + 2v\sqrt{t}y) e^{-y^2} dy.$$

— Exercice destiné aux mathématiciens —

Exercice 9. Démontrer que 0 est la seule fonction intégrable sur \mathbb{R}^n telle que $f \star f = f$.