

234 Fonctions et espaces de fonctions Lebesgue-intégrables.

On se place dans un espace mesuré $(X, \mathcal{A}, \mu)$. Soit $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ ou $\mathbb{C}$, que l'on munit de sa tribu borélienne $\mathcal{B}(\mathbb{K})$.

I – L'intégrale de Lebesgue

1. Définition abstraite

DÉFINITION 1

Soit f une fonction étagée positive sur $(X, \mathcal{A})$. **L'intégrale** de f sur X par rapport à la mesure μ est définie par

$$\int_X f \, d\mu = \sum_{\alpha \in f(X)} \alpha \mu(\{f = \alpha\}) \in \overline{\mathbb{R}^+}$$

PROPOSITION 2

Soit f une fonction étagée. Pour toute décomposition de la forme $f = \sum_{i \in I} \alpha_i \mathbb{1}_{A_i}$ (où $(A_i)_{i \in I}$ désigne une partition $\mathcal{A}$ -mesurable finie de X), on a :

$$\int_X f \, d\mu = \sum_{i \in I} \alpha_i \mu(A_i)$$

EXEMPLE 3

Soit $f : X \rightarrow \mathbb{R}^+$ une fonction ne prenant qu'un nombre fini de valeurs.

- On se place dans le cas où $\mu = \delta_a$, la mesure de Dirac en un point $a \in X$. Alors,

$$\int_X f \, d\mu = f(a)$$

- On se place dans le cas où $\mu = m$, la mesure de comptage sur $(X, \mathcal{P}(X))$. Alors,

$$\int_X f \, dm = \sum_{\alpha \in f(X)} \alpha |\{f = \alpha\}|$$

DÉFINITION 4

Soit f une fonction mesurable positive (finie ou non) sur $(X, \mathcal{A})$. On pose

$$\int_X f \, d\mu = \sup \left\{ \int_X \varphi \, d\mu \mid \varphi \text{ étagée positive telle que } \varphi \leq f \right\}$$

on dit que f est μ -**intégrable** si $\int_X f \, d\mu < +\infty$.

2. Propriétés

THÉORÈME 5

Convergence monotone.

Soit (f_n) une suite croissante de fonctions mesurables positives. Alors, la limite f de cette suite est mesurable positive, et,

$$\int_X f \, d\mu = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X f_n \, d\mu$$

COROLLAIRE 6

Soient f, g deux fonctions mesurables positives.

- (i) $f \leq g \implies \int_X f \, d\mu \leq \int_X g \, d\mu$ (l'intégrale est croissante).
- (ii) $\int_X (f + g) \, d\mu = \int_X f \, d\mu + \int_X g \, d\mu$ (l'intégrale est additive).
- (iii) $\forall \lambda \geq 0, \int_X \lambda f \, d\mu = \lambda \int_X f \, d\mu$ (l'intégrale est positivement homogène).
- (iv) Si $f = g$ pp., alors $\int_X f \, d\mu = \int_X g \, d\mu$.

Au vu de la linéarité de l'intégrale, on peut maintenant donner la définition suivante.

DÉFINITION 7

Soit $f : X \rightarrow \mathbb{K}$ mesurable.

- f est dite **μ -intégrable** si $|f|$ est μ -intégrable.
- Dans ce cas, si $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, en notant f^+ et f^- les parties positives et négatives de f , on définit

$$\int_X f \, d\mu = \int_X f^+ \, d\mu - \int_X f^- \, d\mu$$

- Si $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, en reprenant le point précédent, on définit

$$\int_X f \, d\mu = \int_X \operatorname{Re}(f) \, d\mu + i \int_X \operatorname{Im}(f) \, d\mu$$

PROPOSITION 8

Soit $f : X \rightarrow \mathbb{K}$ intégrable. Alors,

$$\left| \int_X f \, d\mu \right| \leq \int_X |f| \, d\mu$$

avec égalité,

- si $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, si f est de signe constant pp.
- si $\mathbb{K} = \mathbb{C}$, si $f = \alpha |f|$ pp. pour $\alpha \in C(0, 1)$.

3. Lien avec l'intégrale de Riemann

PROPOSITION 9

Soit $[a, b]$ un intervalle de $\mathbb{R}$. Soit f une fonction intégrable au sens de Riemann sur $[a, b]$.

(i) Il existe une fonction g λ -intégrable sur $[a, b]$ telle que $f = g$ pp. De plus,

$$\int_a^b f = \int_{[a,b]} g \, d\lambda$$

(ii) En particulier, si f est borélienne,

$$\int_a^b f = \int_{[a,b]} f \, d\lambda$$

CONTRE-EXEMPLE 10

La réciproque est fautive. Par exemple, $\mathbb{1}_{\mathbb{Q} \cap [0,1]}$ est intégrable au sens de Lebesgue, mais pas au sens de Riemann.

II – Construction des espaces L_p

1. L'espace vectoriel $\mathcal{L}_1$

DÉFINITION 11

On note

$$\mathcal{L}_1(X, \mathcal{A}, \mu) = \{f : X \rightarrow \mathbb{K} \mid f \text{ est } \mu\text{-intégrable}\}$$

l'ensemble des fonctions μ -intégrables. En l'absence d'ambiguïté, on notera simplement $\mathcal{L}_1(\mu)$ ou $\mathcal{L}_1$. Cette définition s'étend aux ensembles de fonctions intégrables à valeurs dans $\mathbb{R}^+$, $\mathbb{R}$, etc.

EXEMPLE 12

Si μ est la mesure de comptage sur $(\mathcal{P}(\mathbb{N}), \mathbb{N})$, alors

$$\mathcal{L}_1 = \ell_1 = \left\{ (u_n) \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}} \mid \sum_{n \geq 0} |u_n| < +\infty \right\}$$

THÉORÈME 13

(i) $f \mapsto \int_X f \, d\mu$ est une forme linéaire positive (au sens où $f \geq 0 \implies \int_X f \, d\mu \geq 0$) et croissante sur $\mathcal{L}_1$.

(ii) $\mathcal{L}_1$ est un espace vectoriel sur $\mathbb{K}$.

(iii) $\|\cdot\|_1 : f \mapsto \int_X |f| \, d\mu$ est une semi-norme sur $\mathcal{L}_1$.

THÉORÈME 14**Lemme de Fatou.**

Soit (f_n) une suite de fonctions mesurables positives. Alors,

$$0 \leq \int_X \liminf f_n d\mu \leq \liminf \int_X f_n d\mu \leq +\infty$$

p. 137

EXEMPLE 15

Soit f croissante sur $[0, 1]$, continue en 0 et dérivable en 1 et dérivable pp. dans $[0, 1]$. Alors,

$$\int_0^1 f'(x) dx \leq f(1) - f(0)$$

THÉORÈME 16**Convergence dominée.**

Soit (f_n) une suite d'éléments de $\mathcal{L}_1$ telle que :

(i) pp. en x , $(f_n(x))$ converge dans $\mathbb{K}$ vers $f(x)$.

(ii) $\exists g \in \mathcal{L}_1$ positive telle que

$$\forall n \in \mathbb{N}, \text{ pp. en } x, |f_n(x)| \leq g(x)$$

Alors,

$$\int_X f d\mu = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X f_n d\mu \text{ et } \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X |f_n - f| d\mu = 0$$

EXEMPLE 17

• On reprend l'Exemple 15 et on suppose f partout dérivable sur $[0, 1]$ de dérivée bornée. Alors l'inégalité est une égalité.

• Soit $\alpha > 1$. On pose $\forall n \geq 1, I_n(\alpha) = \int_0^n \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n e^{-\alpha x} dx$. Alors,

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n(\alpha) = \int_0^{+\infty} e^{(1-\alpha)x} dx = \frac{1}{\alpha - 1}$$

APPLICATION 18**Lemme de Borel-Cantelli.**

Soit (A_n) une famille de parties de $\mathcal{A}$. Alors,

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \mu(A_n) < +\infty \implies \mu\left(\limsup_{n \rightarrow +\infty} A_n\right) = 0$$

2. Les espaces vectoriels $\mathcal{L}_p$

DÉFINITION 19

Pour tout réel $p > 0$, on définit

$$\mathcal{L}_p(X, \mathcal{A}, \mu) = \{f : X \rightarrow \mathbb{K} \mid |f|^p \in \mathcal{L}_1(X, \mathcal{A}, \mu)\}$$

on a les mêmes remarques qu'à la Définition 11.

PROPOSITION 20

$\mathcal{L}_p$ est un espace vectoriel.

PROPOSITION 21

(i) Si $\mu(X) < +\infty$, alors

$$0 < p \leq q \implies \mathcal{L}_q \subseteq \mathcal{L}_p$$

(ii) Si $\mu = m$ est la mesure de comptage sur $\mathbb{N}$, alors

$$0 < p \leq q \implies \underbrace{\mathcal{L}_p(m)}_{\ell_p} \subseteq \underbrace{\mathcal{L}_q(m)}_{\ell_q}$$

DÉFINITION 22

Pour tout $p > 0$, on définit

$$\|\cdot\|_p : f \mapsto \left(\int_X |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}}$$

THÉORÈME 23

Inégalité de Hölder.

Soient $p, q \in]1, +\infty[$ tels que $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, $f \in \mathcal{L}_p$ et $g \in \mathcal{L}_q$. Alors $fg \in \mathcal{L}_1$ et

$$\|fg\|_1 \leq \|f\|_p \|g\|_q$$

THÉORÈME 24

Inégalité de Minkowski.

$$\forall f, g \in \mathcal{L}_p, \|f + g\|_p \leq \|f\|_p + \|g\|_p$$

3. Les espaces vectoriels normés L_p

DÉFINITION 25

On définit pour tout $p > 0$,

$$L_p = \mathcal{L}_p / V$$

où $V = \{v \in \mathcal{L}_p \mid v = 0 \text{ pp.}\}$.

p. 171

THÉORÈME 26

Pour tout $p \in [1, +\infty]$, $(L_p, \|\cdot\|_p)$ est un espace vectoriel normé.

THÉORÈME 27

Théorème de Riesz-Fischer.

Pour tout $p \in [1, +\infty]$, L_p est complet pour la norme $\|\cdot\|_p$.

THÉORÈME 28

Soit (f_n) une suite d'éléments de L_p qui converge vers f pour la norme $\|\cdot\|_p$. Alors, il existe une sous-suite de (f_n) qui converge pp. vers f .

PROPOSITION 29

Pour tout $p \in [1, +\infty[$, l'ensemble des fonctions étagées intégrables est dense dans L_p .

p. 176

THÉORÈME 30

On se place sur $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \lambda)$. Alors :

- (i) L'ensemble des fonctions en escalier à support compact est dense dans L_p pour tout $p \in [1, +\infty[$.
- (ii) L'ensemble des fonctions continues à support compact est dense dans L_p pour tout $p \in [1, +\infty[$.

4. L'espace L_∞

DÉFINITION 31

- Soit $f : X \rightarrow \mathbb{K}$. On définit $\|f\|_\infty$ comme le supremum essentiel de la fonction $|f|$ et $\mathcal{L}_\infty(\mu)$ (noté $\mathcal{L}_\infty$ en l'absence d'ambiguïté) l'ensemble des fonctions μ -essentiellement bornées.
- On définit

$$L_\infty = \mathcal{L}_\infty / V$$

où $V = \{v \in \mathcal{L}_\infty \mid v = 0 \text{ pp.}\}$.

p. 180

THÉORÈME 32

L_∞ , muni de $\|\cdot\|_\infty$, est un espace vectoriel normé complet.

REMARQUE 33

L'inégalité de Hölder est encore vraie pour $q = +\infty$.

III – Grands théorèmes d'intégration

1. Régularité sous l'intégrale

Soit $f : E \times X \rightarrow \mathbb{C}$ où (E, d) est un espace métrique. On pose $F : t \mapsto \int_X f(t, x) d\mu(x)$.

[Z-Q]
p. 312

a. Continuité

THÉORÈME 34

Continuité sous le signe intégral.

On suppose :

- (i) $\forall t \in E, x \mapsto f(t, x)$ est mesurable.
- (ii) pp. en $x \in X, t \mapsto f(t, x)$ est continue en $t_0 \in E$.
- (iii) $\exists g \in L_1(X)$ positive telle que

$$|f(t, x)| \leq g(x) \quad \forall t \in E, \text{ pp. en } x \in X$$

Alors F est continue en t_0 .

COROLLAIRE 35

On suppose :

- (i) $\forall t \in E, x \mapsto f(t, x)$ est mesurable.
- (ii) pp. en $x \in X, t \mapsto f(t, x)$ est continue sur E .
- (iii) $\forall K \subseteq E, \exists g_K \in L_1(X)$ positive telle que

$$|f(t, x)| \leq g_K(x) \quad \forall t \in K, \text{ pp. en } x$$

Alors F est continue sur E .

EXEMPLE 36

La fonction

$$\Gamma : \begin{array}{cc} \mathbb{R}_*^+ & \rightarrow \mathbb{R}_*^+ \\ x & \mapsto \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \end{array}$$

est bien définie et continue sur $\mathbb{R}_*^+$.

p. 318

EXEMPLE 37

Soit $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{C}$ intégrable. Alors,

$$\lambda \mapsto \int_0^{+\infty} e^{-\lambda t} f(t) dt$$

est bien définie et est continue sur $\mathbb{R}^+$.

[G-K]
p. 104**b. Dérivabilité**

On suppose ici que E est un intervalle I ouvert de $\mathbb{R}$.

[Z-Q]
p. 313**THÉORÈME 38****Dérivation sous le signe intégral.**

On suppose :

- (i) $\forall t \in I, x \mapsto f(t, x) \in L_1(X)$.
- (ii) pp. en $x \in X, t \mapsto f(t, x)$ est dérivable sur I . On notera $\frac{\partial f}{\partial t}$ cette dérivée définie presque partout.
- (iii) $\forall K \subseteq I$ compact, $\exists g_K \in L_1(X)$ positive telle que

$$\left| \frac{\partial f}{\partial t}(t, x) \right| \leq g_K(x) \quad \forall t \in K, \text{ pp. en } x$$

Alors $\forall t \in I, x \mapsto \frac{\partial f}{\partial t}(t, x) \in L_1(X)$ et F est dérivable sur I avec

$$\forall t \in I, F'(t) = \int_X \frac{\partial f}{\partial t}(t, x) d\mu(x)$$

REMARQUE 39

- Si dans le Théorème 38, hypothèse (ii), on remplace “dérivable” par “ $\mathcal{C}^1$ ”, alors la fonction F est de classe $\mathcal{C}^1$.
- On a un résultat analogue pour les dérivées d’ordre supérieur.

THÉORÈME 40

k -ième dérivée sous le signe intégral.

On suppose :

- (i) $\forall t \in I, x \mapsto f(t, x) \in L_1(X)$.
- (ii) pp. en $x \in X, t \mapsto f(t, x) \in \mathcal{C}^k(I)$. On notera $\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)^j f$ la j -ième dérivée définie presque partout pour $j \in \llbracket 0, k \rrbracket$.
- (iii) $\forall j \in \llbracket 0, k \rrbracket, \forall K \subseteq I$ compact, $\exists g_{j,K} \in L_1(X)$ positive telle que

$$\left| \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)^j f(t, x) \right| \leq g_{j,K}(x) \quad \forall t \in K, \text{ pp. en } x$$

Alors $\forall j \in \llbracket 0, k \rrbracket, \forall t \in I, x \mapsto \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)^j f(t, x) \in L_1(X)$ et $F \in \mathcal{C}^k(I)$ avec

$$\forall j \in \llbracket 0, k \rrbracket, \forall t \in I, F^{(j)}(t) = \int_X \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)^j f(t, x) d\mu(x)$$

EXEMPLE 41

La fonction Γ de l’Exemple 36 est $\mathcal{C}^\infty$ sur $\mathbb{R}_*^+$.

p. 318

EXEMPLE 42

On se place dans l’espace mesuré $(\mathbb{N}, \mathcal{P}(\mathbb{N}), \text{card})$ et on considère (f_n) une suite de fonctions dérivables sur I telle que

$$\forall x \in \mathbb{R}, \sum_{n \in \mathbb{N}} |f_n(x)| + \sup_{t \in I} |f'_n(t)| < +\infty$$

Alors $x \mapsto \sum_{n \in \mathbb{N}} f_n(x)$ est dérivable sur I de dérivée $x \mapsto \sum_{n \in \mathbb{N}} f'_n(x)$.

[B-P]
p. 149

APPLICATION 43

Transformée de Fourier d’une Gaussienne.

En résolvant une équation différentielle linéaire, on a

$$\forall \alpha > 0, \forall x \in \mathbb{R}, \int_{\mathbb{R}} e^{-\alpha t^2} e^{-itx} dt = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha}}$$

[GOU20]
p. 169

APPLICATION 44**Intégrale de Dirichlet.**

On pose $\forall x \geq 0$,

$$F(x) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} e^{-xt} dt$$

alors :

- (i) F est bien définie et est continue sur $\mathbb{R}^+$.
- (ii) F est dérivable sur $\mathbb{R}_*^+$ et $\forall x \in \mathbb{R}_*^+, F'(x) = -\frac{1}{1+x^2}$.
- (iii) $F(0) = \int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} dt = \frac{\pi}{2}$.

[G-K]
p. 107

c. Holomorphie

On suppose ici que E est un ouvert Ω de $\mathbb{C}$.

THÉORÈME 45**Holomorphie sous le signe intégral.**

On suppose :

- (i) $\forall z \in \Omega, x \mapsto f(z, x) \in L_1(X)$.
- (ii) pp. en $x \in X, z \mapsto f(z, x)$ est holomorphe dans Ω . On notera $\frac{\partial f}{\partial z}$ cette dérivée définie presque partout.
- (iii) $\forall K \subseteq \Omega$ compact, $\exists g_K \in L_1(X)$ positive telle que

$$|f(z, x)| \leq g_K(x) \quad \forall z \in K, \text{ pp. en } x$$

Alors F est holomorphe dans Ω avec

$$\forall z \in \Omega, F'(z) = \int_X \frac{\partial f}{\partial z}(z, x) d\mu(x)$$

[Z-Q]
p. 314

EXEMPLE 46

La fonction Γ de l'Exemple 36 est holomorphe dans l'ouvert $\{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Re}(z) > 0\}$.

p. 318

2. Intégration sur un espace produit

THÉORÈME 47

Théorème de Fubini-Tonelli.

Soient $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ un autre espace mesuré et $f : (X \times Y) \rightarrow \overline{\mathbb{R}^+}$. On suppose μ et ν σ -finies. Alors :

- (i) $x \mapsto \int_Y f(x, y) d\nu(y)$ et $y \mapsto \int_X f(x, y) d\mu(x)$ sont mesurables.
- (ii) Dans $\overline{\mathbb{R}^+}$,

$$\int_{X \times Y} f d(\mu \otimes \nu) = \int_X \left(\int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) = \int_Y \left(\int_X f(x, y) d\mu(x) \right)$$

THÉORÈME 48

Théorème de Fubini-Lebesgue.

Soient $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ un autre espace mesuré et $f \in \mathcal{L}_1(\mu \otimes \nu)$. Alors :

- (i) Pour tout $y \in Y$, $x \mapsto f(x, y)$ et pour tout $x \in X$, $y \mapsto f(x, y)$ sont intégrables.
- (ii) $x \mapsto \int_Y f(x, y) d\nu(y)$ et $y \mapsto \int_X f(x, y) d\mu(x)$ sont intégrables, les fonctions étant définies pp.
- (iii) On a :

$$\int_{X \times Y} f d(\mu \otimes \nu) = \int_X \left(\int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) = \int_Y \left(\int_X f(x, y) d\mu(x) \right)$$

CONTRE-EXEMPLE 49

On considère $f : (x, y) \mapsto 2e^{-2xy} - e^{-xy}$. Alors, $\int_{[0,1]} \left(\int_{\mathbb{R}^+} f(x, y) dx \right) dy = 0$, mais $\int_{\mathbb{R}^+} \left(\int_{[0,1]} f(x, y) dy \right) dx = \ln(2)$.

EXEMPLE 50

Soient $f : (x, y) \mapsto xy$ et $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x, y \geq 0 \text{ et } x + y \leq 1\}$. Alors,

$$\iint_D f(x, y) dx dy = \int_0^1 x \frac{(1-x)^2}{2} dx = \frac{1}{24}$$

[B-P]
p. 237

[GOU20]
p. 359

IV – L'espace L_2

1. Aspect hilbertien

DÉFINITION 51

L'application

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : (f, g) \mapsto \int_X f \overline{g} \, d\mu$$

définit un produit scalaire hermitien sur L_2 . Muni de ce produit scalaire précédent, L_2 est un espace de Hilbert.

[B-P]
p. 185

a. Conséquences

THÉORÈME 52

Projection orthogonale.

Soit F un sous-espace vectoriel fermé de L_2 . Alors,

$$L_2 = F \oplus F^\perp$$

COROLLAIRE 53

Théorème de représentation de Riesz.

Soit $\varphi \in L_2'$ une forme linéaire continue. Alors,

$$\exists ! g \in L_2 \text{ telle que } \forall f \in L_2, \varphi(f) = \int_X f \overline{g} \, d\mu$$

APPLICATION 54

Dual de L_p .

Soit $(X, \mathcal{A}, \mu)$ un espace mesuré de mesure finie. On note $\forall p \in]1, 2[$, $L_p = L_p(X, \mathcal{A}, \mu)$. L'application

$$\varphi : \begin{array}{ll} L_q & \rightarrow (L_p)' \\ g & \mapsto (\varphi_g : f \mapsto \int_X f g \, d\mu) \end{array} \quad \text{où } \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$$

est une isométrie linéaire surjective. C'est donc un isomorphisme isométrique.

[Z-Q]
p. 222

DEV

REMARQUE 55

Plus généralement, si l'on identifie g et φ_g :

- L_q est le dual topologique de L_p pour $p \in]1, +\infty[$.
- L_∞ est le dual topologique de L_1 si μ est σ -finie.

[L1]
p. 140b. Base hilbertienne de L_2

Soit I un intervalle de $\mathbb{R}$. On pose $\forall n \in \mathbb{N}, g_n : x \mapsto x^n$.

[BMP]
p. 110

DÉFINITION 56

On appelle **fonction poids** une fonction $\rho : I \rightarrow \mathbb{R}$ mesurable, strictement positive presque partout et telle que $\forall n \in \mathbb{N}, \rho g_n \in L_1(I)$.

Soit $\rho : I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction poids.

NOTATION 57

On note $L_2(I, \rho)$ l'espace des fonctions de carré intégrable pour la mesure de densité ρ par rapport à la mesure de Lebesgue.

PROPOSITION 58

Muni de

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : (f, g) \mapsto \int_I f(x) \overline{g(x)} \rho(x) dx$$

$L_2(I, \rho)$ est un espace de Hilbert.

THÉORÈME 59

Il existe une unique famille (P_n) de polynômes unitaires orthogonaux deux-à-deux telle que $\deg(P_n) = n$ pour tout entier n . C'est la famille de **polynômes orthogonaux** associée à ρ sur I .

EXEMPLE 60

Polynômes de Hermite.

Si $I = \mathbb{R}$ et si $\forall x \in I, \rho(x) = e^{-x^2}$, alors

$$\forall n \in \mathbb{N}, \forall x \in I, P_n(x) = \frac{(-1)^n}{2^n} e^{x^2} \frac{\partial}{\partial x^n} (e^{-x^2})$$

LEMME 61

On suppose que $\forall n \in \mathbb{N}$, $g_n \in L_1(I, \rho)$ et on considère (P_n) la famille des polynômes orthogonaux associée à ρ sur I . Alors $\forall n \in \mathbb{N}$, $g_n \in L_2(I, \rho)$. En particulier, l'algorithme de Gram-Schmidt a bien du sens et (P_n) est bien définie.

p. 140

APPLICATION 62

On considère (P_n) la famille des polynômes orthogonaux associée à ρ sur I et on suppose qu'il existe $a > 0$ tel que

$$\int_I e^{a|x|} \rho(x) dx < +\infty$$

alors (P_n) est une base hilbertienne de $L_2(I, \rho)$ pour la norme $\|\cdot\|_2$.

CONTRE-EXEMPLE 63

On considère, sur $I = \mathbb{R}_*^+$, la fonction poids $\rho : x \mapsto x^{-\ln(x)}$. Alors, la famille des g_n n'est pas totale. La famille des polynômes orthogonaux associée à ce poids particulier n'est donc pas totale non plus : ce n'est pas une base hilbertienne.

2. Application aux séries de Fourier

NOTATION 64

- Pour tout $p \in [1, +\infty]$, on note $L_p^{2\pi}$ l'espace des fonctions $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, 2π -périodiques et mesurables, telles que $\|f\|_p < +\infty$.
- Pour tout $n \in \mathbb{Z}$, on note e_n la fonction 2π -périodique définie pour tout $t \in \mathbb{R}$ par $e_n(t) = e^{int}$.

[Z-Q]
p. 73**PROPOSITION 65**

$L_2^{2\pi}$ est un espace de Hilbert pour le produit scalaire

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : (f, g) \mapsto \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \overline{g(t)} dt$$

THÉORÈME 66

La famille $(e_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ est une base hilbertienne de $L_2^{2\pi}$.

[BMP]
p. 123**COROLLAIRE 67**

Égalité de Parseval.

$$\forall f \in L_2^{2\pi}, f = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \langle f, e_n \rangle e_n$$

EXEMPLE 68

On considère $f : x \mapsto 1 - \frac{x^2}{\pi^2}$ sur $[-\pi, \pi]$. Alors,

$$\|f\|_2^2 = \frac{8}{9} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{16}{\pi^4 n^4} = \frac{16}{15} \implies \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{90}$$

[GOU20]
p. 272

REMARQUE 69

L'égalité du Corollaire 67 est valable dans $L_2^{2\pi}$, elle signifie donc que

$$\left\| \sum_{n=-N}^N \langle f, e_n \rangle e_n - f \right\|_2 \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0$$

[BMP]
p. 124