

Dual de L_p

Avec les propriétés hilbertiennes de L_2 couplées à certaines propriétés des espaces L_p , on montre que le dual d'un espace L_p est L_q pour $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, dans le cas où $p \in]1, 2[$ et où l'espace est de mesure finie.

Soit $(X, \mathcal{A}, \mu)$ un espace mesuré de mesure finie.

NOTATION 1

On note $\forall p \in]1, 2[, L_p = L_p(X, \mathcal{A}, \mu)$.

LEMME 2

Soient $p \in]1, 2[$ et $f \in L_2$. Alors $f \in L_p$ telle que $\|f\|_p \leq M \|f\|_2$ où $M \geq 0$.

Démonstration. Comme $p \in]1, 2[$, on a $\frac{2}{p} > 1$. Soit r tel que $\frac{p}{2} + \frac{1}{r} = 1$. On applique l'inégalité de Hölder à $g = |f|^p \mathbb{1}_X$ de sorte que

$$\int_X |f|^p d\mu = \| |f|^p \mathbb{1}_X \|_1 \leq \| |f|^p \|_{\frac{2}{p}} \| \mathbb{1}_X \|_r \leq \mu(X)^{\frac{1}{r}} \|f\|_2^p$$

d'où le résultat. □

LEMME 3

Soit $p \in]1, 2[$. Alors L_2 est dense dans L_p pour la norme $\|\cdot\|_p$.

Démonstration. Soit $f \in L_p$. On considère la suite de fonction (f_n) définie par

$$\forall n \in \mathbb{N}, f_n = f \mathbb{1}_{|f| \leq n}$$

Clairement, (f_n) est une suite de L_2 . On va chercher à appliquer le théorème de convergence dominée à la suite de fonctions (g_n) définie pour tout $n \in \mathbb{N}$ par $g_n = |f_n - f|^p$:

- $\forall n \in \mathbb{N}, g_n$ est mesurable.
- (g_n) converge presque partout vers la fonction nulle.
- Par convexité de la fonction $x \mapsto x^p$, on a

$$|f_n - f|^p = 2^p \left| \frac{f_n}{2} - \frac{f}{2} \right|^p \leq 2^{p-1} (|f|^p + |f_n|^p) \leq 2^p |f|^p \in L_1$$

On peut donc conclure

$$\|f - f_n\|_p^p = \int_X |f - f_n|^p d\mu \longrightarrow 0$$

ce qu'il fallait démontrer. □

THÉORÈME 4

L'application

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

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

[Z-Q]
p. 222

Démonstration. Soient $g \in L_q$ et $f \in L_p$. L'inégalité de Hölder donne

$$|\varphi_g(f)| \leq \|g\|_q \|f\|_p$$

donc $\varphi_g \in (L_p)'$ et $\|\varphi_g\| \leq \|g\|_q$. De plus, si $g = 0$, alors $\|\varphi_g\| = \|g\|_q = 0$. On peut donc supposer $g \neq 0$.

Soit u une fonction mesurable de module 1, telle que $g = u|g|$. On pose $h = \bar{u}|g|^{q-1}$. Comme $q = p(q-1)$, on a

$$\int_X |h|^p \, d\mu = \int_X |g|^{(q-1)p} \, d\mu = \int_X |g|^q \, d\mu < +\infty$$

d'où $h \in L_p$ et $\|h\|_p^p = \|g\|_q^q = |\varphi_g(h)|$. Comme, $\frac{|\varphi_g(h)|}{\|h\|_p} \leq \|\varphi_g\|$, on a en particulier,

$$\underbrace{\int_X |g|^q \, d\mu}_{=|\varphi_g(h)|} \leq \|\varphi_g\| \underbrace{\left(\int_X |g|^q \, d\mu \right)^{\frac{1}{p}}}_{=\|h\|_p}$$

et ainsi,

$$\|\varphi_g\| \geq \left(\int_X |g|^q \, d\mu \right)^{1-\frac{1}{p}} = \left(\int_X |g|^q \, d\mu \right)^{\frac{1}{q}} = \|g\|_q$$

donc $\|\varphi_g\| = \|g\|_q$ et φ est une isométrie.

Montrons qu'elle est surjective. Soit $\ell \in (L_p)'$. D'après le Lemme 2, on a $L_2 \subseteq L_p$, donc on peut considérer la restriction $\tilde{\ell} = \ell|_{L_2}$.

$$\forall f \in L_2, \quad |\tilde{\ell}(f)| \leq \|\ell\| \|f\|_p \leq M \|\ell\| \|f\|_2 \implies \tilde{\ell} \in (L_2)'$$

Comme L_2 est un espace de Hilbert, on peut appliquer le théorème de représentation de Riesz à $\tilde{\ell}$. Il existe $g \in L_2$ telle que

$$\forall f \in L_2, \quad \tilde{\ell}(f) = \int_X f \bar{g} \, d\mu$$

Pour conclure, il reste à montrer que $g \in L_q$ et que l'égalité précédente est vérifiée sur L_p . Comme précédemment, on considère u de module 1 telle que $g = u|g|$ et on pose $f_n = \bar{u}|g|^{q-1} \mathbb{1}_{|g| \leq n} \in L_\infty \subseteq L_2$. On a

$$\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} \, d\mu = |\ell(f_n)| \leq \|\ell\| \|f_n\|_p = \|\ell\| \left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} \, d\mu \right)^{\frac{1}{p}}$$

D'où

$$\left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu \right)^{\frac{1}{q}} = \left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu \right)^{1 - \frac{1}{p}} \leq \|\ell\|$$

D'après le théorème de convergence monotone, on a

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(\int_X |g|^q \mathbb{1}_{|g| \leq n} d\mu \right)^{\frac{1}{q}} = \left(\int_X |g|^q d\mu \right)^{\frac{1}{q}} \leq \|\ell\|$$

Et en particulier, $g \in L_q$ de norme inférieure ou égale à $\|\ell\|$. Ainsi, on a $\forall f \in L_2$, $\ell(f) = \varphi_g(f)$. Les applications ℓ et φ_g sont continues sur L_p et L_2 est dense dans L_p (par le Lemme 3), donc on a bien $\ell = \varphi_g = \varphi(g)$. $\square$

• REMARQUE 5

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.

Bibliographie

Cours d'analyse fonctionnelle

[LI]

Daniel LI. *Cours d'analyse fonctionnelle. avec 200 exercices corrigés*. Ellipses, 3 déc. 2013.

<https://www.editions-ellipses.fr/accueil/6558-cours-danalyse-fonctionnelle-avec-200-exercices-corriges-9782729883058.html>.

Analyse pour l'agrégation

[Z-Q]

Claude ZUILY et Hervé QUEFFÉLEC. *Analyse pour l'agrégation. Agrégation/Master Mathématiques*. 5^e éd. Dunod, 26 août 2020.

<https://www.dunod.com/prepas-concours/analyse-pour-agregation-agregationmaster-mathematiques>.