

ANALYSE FONCTIONNELLE ET DISTRIBUTIONS

Michel ROULEUX

2023-2024

TABLE DES MATIÈRES

1	Espaces localement convexes	5
1.1	Rappels de topologie	5
1.1.1	Axiomes	5
1.1.2	Cas particulier d'espaces topologiques : espaces métriques	5
1.1.3	Comparaison des topologies	6
1.1.4	Espaces vectoriels topologiques	8
1.2	Semi-normes et espaces localement convexes	8
1.2.1	Semi-normes sur X espace vectoriel	8
1.3	Pourquoi "localement convexe" ?	10
1.3.1	Théorème de Hahn-Banach	12
1.4	Espaces localement convexes métrisables, espaces de Fréchet	14
1.4.1	Topologies définies par une distance	14
1.4.2	Espace de Schwarz $\mathcal{S}(\mathbb{R}^d) \subset \mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}^d)$	18
1.5	Topologie forte et topologie faible sur les espaces de Banach	18
1.5.1	Comparaison des topologies $(E, \ \cdot\)$ et $\sigma(E, E')$	18
1.5.2	Théorème de Banach-Steinhaus, suites faiblement et fortement convergentes	20
1.5.3	Suites faiblement et fortement convergentes	21
1.5.4	Topologie faible $*$	21
2	Théorie de distributions	25
2.1	Espaces de Lebesgue	25
2.1.1	Mesure de Lebesgue	25
2.1.2	Intégrale des fonctions positives	26
2.2	Espaces L^p ($1 \leq p \leq +\infty$) comme espaces de Banach	28
2.2.1	Les espaces L^p , $1 \leq p < \infty$	28
2.2.2	Espace L^∞	30
2.2.3	Espace L^2	30
2.3	Espaces L^p comme ELC	31
2.3.1	$L^1(\Omega)$, avec Ω ouvert de \mathbb{R}^d	31
2.3.2	$E = L^\infty$	31
2.3.3	Espaces duaux de L^p	32
2.4	Exemple fondamental : convergence d'une suite de L^1 vers la mesure de Dirac	33

CHAPITRE 1

ESPACES LOCALEMENT CONVEXES

1.1 Rappels de topologie

J. Dieudonné 1 et 2.
Reed-Simon 1, 2 et 4.
Brézis, “Analyse fonctionnelle”

Soit X ensemble. Soit (X, \mathcal{T}) espace topologique où $\mathcal{T} \subset \mathcal{P}(X)$.
 \mathcal{T} parcourt l'ensemble des voisinages de x où x est un point quelconque de X .

1.1.1 Axiomes

1. Soient $x \in X$ et V' voisinage de x . Si $V \supset V'$ alors V est un voisinage de x .
2. $\bigcap_{\text{finie}} V_i$ est un voisinage de x , $\bigcap_{\text{finie}} V_i \in \mathcal{T}$, mais $\bigcap_{\varepsilon > 0} V_\varepsilon \neq \emptyset$ n'est pas un voisinage de x .
3. $\bigcap_{i \in I} V_i$ est un voisinage de x .

Définition 1.1.1 (Ouvert). Ω ouvert si et seulement si Ω est voisinage de chacun de ses points.

Exemple. $(-1, 1)$ ouvert tandis que $[-1, 1)$ non ouvert car -1 n'a pas de voisinage.

$V(x) = (x - \varepsilon, x + \varepsilon)$ est une base de voisinage pour la topologie usuelle de \mathbb{R} .

Exercice 1. On peut définir axiomatiquement \mathcal{T} à partir de ses ouverts.

Définition 1.1.2 (Fermé). On dit que F est un fermé si et seulement si F^C est un ouvert.

1.1.2 Cas particulier d'espaces topologiques : espaces métriques

Définition 1.1.3 (Espace métrique, distance).

X est un ensemble, $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}^+$ distance sur X si et seulement si :

1. $d(x, y) = 0$ si et seulement si $x = y$;
Remarque. Si on a seulement $x = y \implies d(x, y) = 0$, alors d est un écart.
2. $d(x, y) = d(y, x)$ (symétrie) ;
3. $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ (inégalité triangulaire). De ce fait, $|d(x, z) - d(y, z)| \leq d(x, y)$.

Exemple. 1. Dans \mathbb{R}^n , $d(x, y) = \|x - y\|$.
 2. X ensemble. On définit d de la façon suivante :

$$\forall x, y \in X, d(x, y) = \begin{cases} d(x, y) = 0 & \text{si } x = y \\ d(x, y) = 1 & \text{si } x \neq y. \end{cases}$$

Il s'agit de la distance triviale.

Si x, y, z distincts alors $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$.

1.1.3 Comparaison des topologies

Soient X un ensemble et $\mathcal{T}, \mathcal{T}'$ des topologies sur X .

Définition 1.1.4 (Plus fine). On dit que \mathcal{T}' est plus fine que \mathcal{T} et on note $\mathcal{T}' \prec \mathcal{T}$ si et seulement si $\mathcal{T} \subset \mathcal{T}'$.

On dit aussi que \mathcal{T}' est plus forte que \mathcal{T} .

Remarque. Si $\mathcal{T}' \prec \mathcal{T}$, il y a plus d'ouverts dans \mathcal{T}' que dans \mathcal{T} (idem pour les fermés).

Démonstration. Soit Ω ouvert dans X . On a $\Omega \in \mathcal{T} \implies \Omega \in \mathcal{T}'$.

Soit F un fermé dans X . On a $F \in \mathcal{T}$, mais $\Omega = F^C \in \mathcal{T} \implies F^C \in \mathcal{T}'$, donc $F \in \mathcal{T}'$. □

Formulations équivalentes

1. On suppose que $\mathcal{T}' \prec \mathcal{T}$. Si $\forall x \in X$, U est un voisinage de x pour \mathcal{T} , alors U voisinage de x pour \mathcal{T}' , car si U est un ouvert de \mathcal{T} , alors U est un ouvert de \mathcal{T}' .
2. Pour l'application identité définie comme suit

$$id : (X, \mathcal{T}') \longrightarrow (X, \mathcal{T}),$$

on a $\mathcal{T}' \prec \mathcal{T}$ si et seulement si id est continue.

Par exemple, prenons $X = \{f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}\}$. On prend \mathcal{T} topologie de la convergence simple, i. e. f_n converge vers f simplement si $\forall x \in [0, 1], f_n(x) \rightarrow f(x)$.

Ouverts de Ω

$$\Omega_{a, \varepsilon} = \{f \in X \mid \sup_{i=1, \dots, k} |f(a_i)| < \varepsilon\},$$

avec $a = a_0, \dots, a_k \in [0, 1]$ et $\varepsilon > 0$.

$\Omega_{a, \varepsilon}$ est un voisinage de 0 (la fonction nulle) dans X .

Pour $f_0 \in X$, $\Omega_{a, \varepsilon} + f_0$ est une base de voisinage de f_0 , car X est un espace vectoriel (on agit par translation).

On considère maintenant la topologie de la convergence uniforme \mathcal{T}' .

$\Omega_\varepsilon = \{f \in X, \sup_{x \in [0, 1]} |f(x)| < \varepsilon\}$ est un voisinage de 0 (la fonction nulle).

Proposition 1.1.1. \mathcal{T}' est plus fine que \mathcal{T} , ie $\mathcal{T} \subset \mathcal{T}'$.

Démonstration. Soit $\Omega_{a,\varepsilon} \in \mathcal{T}$.

Si $f \in \Omega_{a,\varepsilon}$, alors

$$\forall x \in [0, 1], |f(x)| < \varepsilon,$$

ce qui implique que

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, |f(a_i)| < \varepsilon \text{ (car c'est vrai pour tout } x \text{)}.$$

Donc $\Omega_{a,\varepsilon}$ est un voisinage de 0 dans \mathcal{T} . On a ainsi démontré que \mathcal{T}' est plus fine que \mathcal{T} . \square

On considère l'espace des fonctions continues \mathcal{C}^0 avec la norme

$$\|f\|_0 = \sup |f(x)|$$

et l'espace des fonctions de classe \mathcal{C}^1 avec la norme

$$\|f\|_1 = \sup |f(x)| + \sup |f'(x)|.$$

La topologie sur \mathcal{C}^1 est plus fine que celle sur \mathcal{C}^0 .

Démonstration. On a pour tout f ,

$$\|f\|_0 \leq \|f\|_1.$$

Ainsi si

$$\|f\|_1 < \varepsilon,$$

alors

$$\|f\|_0 < \varepsilon.$$

Par conséquent, $\{f, \|f\|_1 < \varepsilon\} \subset \{f, \|f\|_0 < \varepsilon\}$.

Donc $\mathcal{T}' \prec \mathcal{T}$.

On sait également que si U est un voisinage de 0 pour \mathcal{T} , alors U est un voisinage de 0 pour \mathcal{T}' . \square

Topologie métrisable (exemples)

1. Topologie grossière $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$. C'est la topologie la moins fine.

Remarque. $\mathcal{T}' = \mathcal{P}(X)$ est la topologie la plus fine.

Vérifions si la topologie grossière est métrisable dans différents cas.

- Si $X = \{a\}$, on a $d(a, a) = 0$. Le seul voisinage de a est $X = \{a\}$. Donc \mathcal{T} est métrisable.
- Supposons que $X = \{a, b\}$. Mais \mathcal{T} n'est plus métrisable, avec $d(a, b) = 1$ (distance triviale).
Raisonnons par l'absurde. Si \mathcal{T} était métrisable, \mathcal{T} devrait contenir un ouvert Ω tel que $a \in \Omega$ et $b \notin \Omega$. Or $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$, donc c'est impossible.

Pour \mathcal{T}' , on choisit la distance d telle que $d(x, y) = 0$ ou 1. Est-ce que \mathcal{T}' est métrisable?

2. Prenons \mathcal{T} telle que $\mathcal{T} = \{\emptyset, \{a\}, X\}$.

On suppose que X contient au moins deux éléments. Dans ce cas, \mathcal{T} est une topologie sur X non métrisable, car si $d(a, b) = 1$, avec $b \neq a$, alors dans \mathcal{T} il n'existe pas de boule ouverte qui contient $\{b\}$ sans contenir $\{a\}$.

3. Considérons $X = \{a, b\}$ muni de la topologie $\mathcal{T} = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, X\} = \mathcal{P}(X)$.

On a $d(a, b) = 1$, car $a \neq b$.

De ce fait :

$\{a\}$ voisinage de a qui ne contient pas b ($\{a\} = \{x \text{ tel que } d(x, a) < 1\}$);

$\{b\}$ voisinage de b qui ne contient pas a .

1.1.4 Espaces vectoriels topologiques

Dans le cas où (X, \mathcal{T}) est un espace vectoriel topologique, il suffit de connaître les voisinages de 0 et on agit par translation pour déterminer les voisinages de n'importe quel $x \in X$.

Définition 1.1.5 (Continuité). Soient X, Y deux espaces vectoriels topologiques et $f : X \rightarrow Y$ une application. On considère :

$$(U_a)_{a \in A} \text{ voisinage de 0 dans } X$$

$$(V_b)_{b \in B} \text{ voisinage de 0 dans } Y$$

f est continue si pour tout $V = V_b + f(x_0)$ dans Y , il existe $U = \bigcap_{\text{finie}} (U_a + x_0)$ voisinage de x dans X tel que $x \in U \implies f(x) \in V$.

Définition 1.1.6 (Norme). $\|\cdot\|$ est une norme sur X si

1. $\|x\| = 0 \iff x = 0$ (séparation) ;
2. $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$ (absolue homogénéité) ;
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ (inégalité triangulaire).

Cas particulier : X normé De cette norme, on construit la distance d telle que

$$\forall x, y \in X, d(x, y) = \|x - y\|.$$

Voisinages de 0.

$$(U_a) = B(0, a)$$

$$A = \mathbb{R}^+.$$

— $f : X \rightarrow Y$ continue en x_0 , $\forall V = V_b + f(x_0)$, $\exists U = B(0, \delta) + x_0$, $f(U) \subset V$.

— X, Y EVN.

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0, f(B(0, \delta) + x_0) \subset B(f(x_0), \varepsilon).$$

15-09-2023

1.2 Semi-normes et espaces localement convexes

1.2.1 Semi-normes sur X espace vectoriel

Définition 1.2.1 (Semi-norme). L'application $\rho : X \rightarrow \mathbb{R}^+$ est une semi-norme si :

1. $\rho(0) = 0$;
2. $\rho(\lambda x) = |\lambda| \rho(x)$;
3. $\rho(x + y) \leq \rho(x) + \rho(y)$.

X est un espace vectoriel \mathbb{R} ou \mathbb{C} .

Remarque. \triangle On n'a pas forcément $\rho(x) = 0 \implies x = 0$.

Exemple. 1. Si ρ est une norme, c'est aussi une semi-norme.

2. $X = \mathcal{C}^0([0, 1], \mathbb{R} \text{ (ou } \mathbb{C}))$. On prend $a = (a_0, \dots, a_k) \subset [0, 1]$. On définit

$$\rho_a(f) = \sup_{0 \leq i \leq k} |f(a_i)|.$$

3. Topologie faible. X est un espace vectoriel et X' est son dual (espace contenant les formes linéaires sur X).

Soit l une forme linéaire dans X' . Alors

$$p(x) = |\langle l, x \rangle|.$$

Définition 1.2.2 (Famille de semi-normes séparée). Soit $(\rho_a)_{a \in A}$ une famille de semi-normes. On dit que $(\rho_a)_{a \in A}$ sépare les points (ou est séparée) si et seulement si

$$\forall a \in A, \rho_a(x) = 0 \implies x = 0.$$

Définition 1.2.3 (Espace localement convexe (ELC)). L'espace vectoriel topologique X est un **espace localement convexe** si et seulement si X est **muni d'une famille de semi-normes qui séparent les points**.

Proposition 1.2.1. Si X est un espace localement convexe, alors X est un espace vectoriel topologique pour la topologie définie par ρ_a .

Démonstration. On note \mathcal{T} la topologie définie par la famille de semi-normes $(\rho_a)_{a \in A}$.

Remarque (Personnelle). On cherche à montrer que les $\mathcal{O}_{a,\varepsilon}$ forment une topologie. On va vérifier les axiomes de topologie.

Dans ce cas, les ouverts $\mathcal{O} \in \mathcal{T}$ sont $\mathcal{O} = \mathcal{O}_{a,\varepsilon}$, $a \in A, \varepsilon > 0$ définis ci-dessous :

$$\mathcal{O}_{a,\varepsilon} = \{x \mid \rho_a(x) < \varepsilon\}$$

$\mathcal{O}_{a,\varepsilon}$ une base de voisinages de 0.

Les voisinages de x sont donnés par translation :

$$x + \mathcal{O}_{a,\varepsilon} = \{x + y, y \in \mathcal{O}_{a,\varepsilon}\}.$$

On montre facilement que $\bigcap_{\text{finie}} \mathcal{O}_{a,\varepsilon} \in \mathcal{T}$ et $\bigcup_{\text{quelconque}} \mathcal{O}_{a,\varepsilon} \in \mathcal{T}$. □

Proposition 1.2.2. \mathcal{T} est la topologie la moins fine sur X qui rend continues

$$(x, y) \mapsto x + y \text{ et } (\lambda, x) \mapsto \lambda x.$$

Il y a donc une compatibilité avec la structure des espaces vectoriels.

Démonstration. 1. \mathcal{T} rend continues les deux opérations de X . On a en effet

$$\rho_a(x + y) \leq \rho_a(x) + \rho_a(y).$$

Il suffit de prendre $\rho_a(x) < \frac{\varepsilon}{2}$ et $\rho_a(y) < \frac{\varepsilon}{2}$, on obtient $\rho_a(x + y) < \varepsilon$.

On a $\rho(\lambda x) = |\lambda|\rho(x)$ et on démontre ce résultat par analogie.

2. La moins fine (en exercice).

□

Théorème 1.2.1. *La topologie de X espace localement convexe est Hausdorff, i. e. elle sépare les points.*

Définition 1.2.4 (Hausdorff). (X, \mathcal{T}) est de Hausdorff si et seulement si pour tout $x, y \in X$ tel que $x \neq y$, il existe \mathcal{O}_x et \mathcal{O}_y voisinages de x et de y tels que

$$\mathcal{O}_x \cap \mathcal{O}_y = \emptyset.$$

Exemple. On prend $X = \{a, b\}$, $\mathcal{T} = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, X\}$. On a $\{a\} \cap \{b\} = \emptyset$. Donc (X, \mathcal{T}) est séparée.

Démonstration du théorème 1.2.1. Par contraposée, on prend $y \neq 0$ et $x = 0$.

Si X est un espace localement convexe, alors il existe $a \in A$ tel que $\rho_a(y) = \varepsilon > 0$.

On pose

$$V_x = \left\{ z, \rho_a(z) < \frac{\varepsilon}{2} \right\} \text{ et } V_y = \left\{ z, \rho_a(z - y) < \frac{\varepsilon}{2} \right\}. \quad (1.1)$$

Par l'inégalité triangulaire, on obtient $V_x \cap V_y = \emptyset$, car

$$\rho_a(x - y) > |\rho_a(x) - \rho_a(y)| > \left| \frac{\varepsilon}{2} - \varepsilon \right| = \frac{\varepsilon}{2} > 0.$$

□

1.3 Pourquoi “localement convexe” ?

Définition 1.3.1. Soit X un \mathbb{R} ou \mathbb{C} espace vectoriel.

1. On dit que $C \subset X$ est convexe si

$$\forall x, y \in C, \forall t \in [0, 1], z = tx + (1 - t)y \in C.$$

2. On dit que $B \subset X$ est balancé (sur \mathbb{R}) ou cerclé (sur \mathbb{C}) si

$$\forall \lambda \in \mathbb{R}, |\lambda| = 1 \implies \forall x \in B, \lambda x \in B.$$

3. On dit que $E \subset X$ est équilibré si

$$\forall \lambda \in \mathbb{R} \text{ ou } \mathbb{C}, |\lambda| \leq 1 \implies \forall x \in E, \lambda x \in E.$$

4. On dit que A est absorbant si

$$\bigcup_{t>0} tA = X.$$

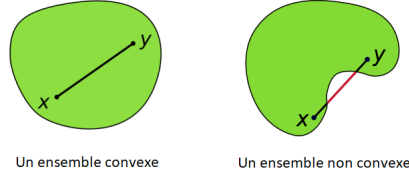


FIGURE 1.1 – Ensemble convexe

Exemple. 1. Si X est un espace vectoriel normé, $A = B(0, 1)$ et $x \in X$, on a $\frac{x}{\|x\|} \in B(0, 1)$. Alors $x \in \|x\|B(0, 1)$.
 2. Si $0 \in C$ convexe, alors C est équilibré si et seulement si C est balancé.

Démonstration. On suppose que C est balancé. Pour $x \in C \implies -x \in C$, donc $[-x, x] \in C$ par convexité. \square

Théorème 1.3.1. Soit X un espace vectoriel topologique. Les assertions suivantes sont équivalentes :

1. X est un espace localement convexe (réel ou complexe) ;
2. Il existe une base de voisinages de $0 \in X$ qui sont convexes, balancés (cerclés), absorbants.

19-09-2023

Démonstration. 1. Si X est un espace localement convexe, alors une base de voisinages de 0 est donnée par

$$\mathcal{O}_{a,\varepsilon} = \{x \in X \mid \rho_a(x) < \varepsilon\}$$

Les $\mathcal{O}_{a,\varepsilon}$ sont convexes, balancés et absorbants (TD).

2. On utilise la jauge de Minkowski 1.3.2.

On pose

$$\rho_C(x) = \mu_C(x).$$

et on vérifie que ρ_C est une semi-norme. Grâce au lemme 1.3, on obtient les résultats suivants :

- (a) $\rho_C(x + y) \leq \rho_C(x) + \rho_C(y)$, car C est convexe ;
- (b) $\rho_C(\lambda x) = \lambda \rho_C(x)$ si $\lambda > 0$ et $\rho_C(\lambda x) = |\lambda| \rho_C(x)$, car C est cerclé.

X muni de ρ_C est un espace localement convexe.

\square

Définition 1.3.2 (Jauge de Minkowski). Soit X espace vectoriel réel ou complexe. On suppose que C tel que $0 \in C$ est absorbant. Alors la jauge de Minkowski est définie comme suit :

$$\mu_C(x) = \inf\{\alpha > 0, x \in \alpha C\}.$$

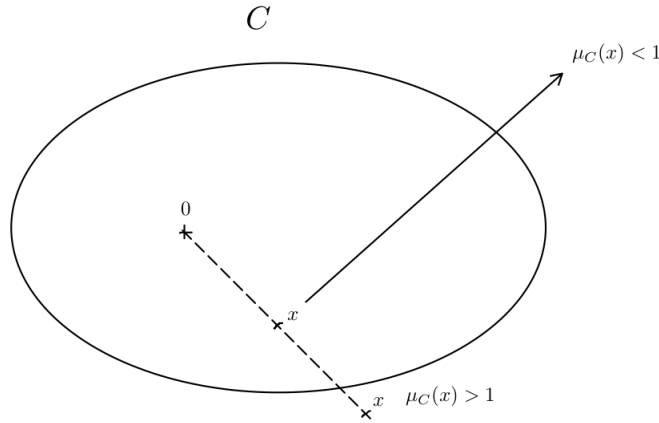


FIGURE 1.2 – La jauge de Minkowski

Remarque. Si C est absorbant, alors $\forall x \in X, \mu_C(x) < \infty$.

Lemme. Soit $C \subset X$ absorbant tel que $0 \in C$.

1. Si $\lambda \geq 0$, $\mu_C(\lambda x) = \lambda \mu_C(x)$;
2. Si C est convexe, alors $\mu_C(x + y) \leq \mu_C(x) + \mu_C(y)$;
3. Si C est cerclé, alors $\mu_C(\lambda x) = |\lambda| \mu_C(x)$;
4. $\{x \in X, \mu_C(x) < 1\} \subset C \subset \{x \in X, \mu_C(x) \leq 1\}$.

1.3.1 Théorème de Hahn-Banach

Il y a la forme analytique et la forme géométrique de ce théorème.

Théorème 1.3.2 (De Hahn-Banach, forme analytique). Pour simplifier, on prend X espace vectoriel sur \mathbb{R} . Soit $p : X \rightarrow \mathbb{R}$ qui vérifie :

- ★ $\forall x \in X, \forall \lambda > 0, p(\lambda x) = \lambda p(x)$;
- ★ $\forall x, y \in X, p(x + y) \leq p(x) + p(y)$.

Soient Y un sous espace vectoriel de X et l une forme linéaire sur Y qui vérifie

$$\forall x \in Y, l(x) \leq p(x), \forall x \in Y.$$

Alors (prolongement) il existe L forme linéaire sur X telle que $L|_Y = l$ et

$$\forall x \in X, L(x) \leq p(x).$$

On l'applique aux espaces vectoriels normés, espaces localement convexes,...

Théorème 1.3.3 (Norme sur un espace dual). *Soit X espace vectoriel normé, X' formes linéaires continues sur X , X' est un espace vectoriel normé. La norme sur X' est définie de la façon suivante :*

$$\|L\|_{X'} \stackrel{\text{déf}}{=} \sup_{\substack{x \in X \\ \|x\|=1}} |\langle L, x \rangle| = \sup_{x \in X \setminus \{0\}} \left| \left\langle L, \frac{x}{\|x\|} \right\rangle \right| = \sup_{x \in X \setminus \{0\}} \frac{|\langle L, x \rangle|}{\|x\|}.$$

Exercice 2. Montrer que $\|\cdot\|_{X'}$ est une norme.

Si X est un espace vectoriel normé complet (de Banach), alors X' l'est aussi.

Corollaire (Prolongement isométrique de l sur Y). *Soit X espace vectoriel normé, $Y \subset X$ sous espace vectoriel de X et $l \in Y'$ avec*

$$\|l\| = \sup_{\substack{\|y\| \leq 1 \\ y \in Y}} |\langle l, y \rangle|.$$

Alors il existe un prolongement L de l de même norme

$$\sup_{\substack{x \in X \\ \|x\| \leq 1}} |\langle l, x \rangle| = \sup_{\substack{y \in Y \\ \|y\| \leq 1}} |\langle l, y \rangle|.$$

Démonstration. Par le théorème de Hahn-Banach, on pose p telle que $p(x) = \|l\|_{Y'} \|x\|$ (l'application définie ainsi vérifie les propriétés de p nécessaires à l'application du théorème).

Par Hahn-Banach, il existe L une forme linéaire sur X telle que

$$L(x) = \langle L, x \rangle \leq p(x) = \|l\|_{Y'} \|x\|.$$

Mais

$$\langle L, -x \rangle \leq \|l\|_{Y'} \|-x\|,$$

donc

$$|\langle L, x \rangle| \leq \|l\|_{Y'} \|x\|.$$

Ainsi, en divisant par $\|x\|$, on obtient le résultat suivant :

$$\forall x \in X, \left| \left\langle L, \frac{x}{\|x\|} \right\rangle \right| \leq \|l\|_{Y'}.$$

Or si on prend $x \in Y$,

$$\left| \left\langle L, \frac{x}{\|x\|} \right\rangle \right| \leq \|l\|_{Y'} = \sup_{y \in Y \setminus \{0\}} \left| \left\langle L, \frac{y}{\|y\|} \right\rangle \right|.$$

Comme $Y \subset X$ (ce qui entraîne que $\sup_{y \in Y \setminus \{0\}} \left| \left\langle L, \frac{y}{\|y\|} \right\rangle \right| \leq \sup_{x \in X \setminus \{0\}} \left| \left\langle L, \frac{x}{\|x\|} \right\rangle \right|$), on a donc égalité, d'où l'isométrie. \square

Corollaire. $\forall x_0 \in X$ espace vectoriel réel, il existe $L_0 \in X'$, $\|L_0\|_{X'} = \|x_0\|_X$.

Démonstration. $Y = \mathbb{R}x_0$. Soit $l(tx_0) \stackrel{\text{déf}}{=} t\|x_0\|^2$ forme linéaire continue sur Y .

Alors, en posant $t = 1$, on obtient

$$\|l\|_{Y'} = \|x_0\|$$

et, par le théorème de Hahn-Banach,

$$\|L_0\|_{X'} = \|x_0\|_X.$$

□

Exercice 3. Traduire Hahn-Banach dans le cas où X est un espace localement convexe.

Théorème 1.3.4 (De Hahn-Banach, forme géométrique). *Soit X espace vectoriel normé (ou espace localement convexe). Soient $A, B \subset X$ convexes et disjoints.*

1. *On suppose que A est ouvert. Alors il existe un hyperplan affine (d'équation $\langle L, x \rangle = \text{constante}$) \mathcal{H} qui sépare au sens large A et B .*
2. *Si A est fermé, B est compact, alors il existe \mathcal{H} hyperplan qui sépare A et B au sens strict.*

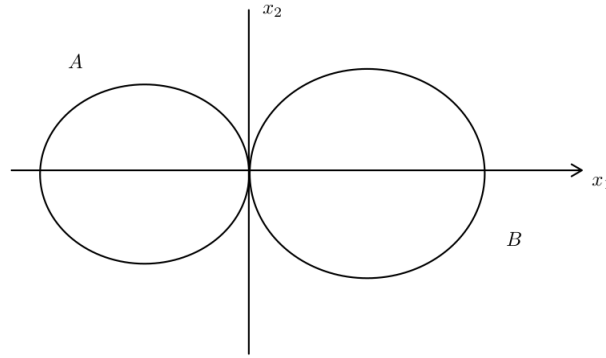


FIGURE 1.3 – $A = \{x_1 < 0\}$, $B = \{x_2 \geq 0\}$, $\mathcal{H} = \{x_1 = 0\}$.

1.4 Espaces localement convexes métrisables, espaces de Fréchet

26-09-2023 1.4.1 Topologies définies par une distance

On rappelle la définition 1.1.3.

Définition 1.4.1 (Distances équivalentes). On dit que d_1 est équivalente à d_2 si et seulement si il existe $C > 0$ tel que

$$\frac{1}{C}d_1(x, y) \leq d_2(x, y) \leq Cd_1(x, y).$$

$d_1 \sim d_2 \implies (X, d_1) \simeq (X, d_2)$, mais la réciproque est fausse.

Exemple. On prend un espace métrique (X, d) avec les distances

$$\delta(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)} \text{ et } \delta'(x, y) = \inf(1, d(x, y)).$$

Ces distances sont équivalentes entre elles.

Démonstration.

1. Montrons que $(X, d) \sim (X, \delta')$. On remarque d'abord que

$$\delta(x, y) = \frac{d(x, y)}{1 + d(x, y)} \leq d(x, y),$$

ce qui veut dire que $(X, d) \prec (X, \delta)$ (car si \mathcal{O} est un ouvert pour δ , alors il le sera forcément pour d).

Prenons

$$f(t) = \frac{t}{1+t}. \quad (1.2)$$

La fonction f est une bijection de \mathbb{R}^+ dans $[0, 1]$. En effet, montrons qu'il existe $g : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^+$ telle que $g \circ f = f \circ g = \text{id}$.

On a

$$\frac{t}{1+t} = s \implies t = ts + s \implies t = \frac{s}{1-s}.$$

Donc $d(x, y) = \frac{\delta(x, y)}{1-\delta(x, y)}$. Donc si $d(x, y) < \varepsilon$, alors $\delta(x, y) < \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}$. Donc $(X, \delta) \prec (X, d)$.

2. Montrons que $\delta \sim \delta'$.

On a

$$\delta = \frac{d}{1+d} \leq \begin{cases} 1 \\ \delta. \end{cases}$$

En effet, cela vient du fait que $\frac{d(x, y)}{1+d(x, y)} \xrightarrow{d(x, y) \rightarrow \infty} 1$. Donc

$$\delta(x, y) \leq \delta'(x, y).$$

Mais $\delta' \leq 2\delta$. En effet, on distingue deux cas :

(a) Si $\delta \leq 1$ et $\delta' = d$, alors $d \leq 2d$,

(b) Si $\delta \geq 1$ et $\delta' = 1$, alors $1 \leq 2d$.

3. Montrons que δ est une distance.

(a) Montrons l'inégalité triangulaire. Si $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$, montrons que $\delta(x, y) \leq \delta(x, z) + \delta(z, y)$.

Est-ce que $f(d(x, y)) \leq f(d(x, z)) + f(d(z, y))$, avec f définie dans 1.2 ?

i. f est croissante, donc $f(d(x, y)) \leq f[d(x, z) + d(z, y)]$. Il suffit de voir que $f(t) \leq f(u) + f(v)$.

ii. Montrons la sous-additivité de f . Posons

$$v \mapsto \varphi(v) = f(u+v) - f(u) - f(v).$$

On a $\varphi(0) = 0$, car $f(0) = 0$ et $\varphi(v) = f'(u+v) - f'(v) < 0$, car f est une fonction croissante.

□

Sous quelles conditions un espace localement convexe est métrisable ?

On remarque par exemple que $\mathcal{F}([0, 1], \mathbb{R})$ muni de la topologie de la convergence simple n'est pas métrisable. Plus généralement, les topologies faibles ne sont pas métrisables, sauf si on travaille en dimension finie. Par ailleurs, X muni de la topologie grossière n'est pas métrisable (non séparée).

Proposition 1.4.1. Soit X un espace localement convexe (donc séparé). Alors les assertions suivantes sont équivalentes.

1. X est métrisable.
2. Il existe une base dénombrable de voisinages de 0 dans X , et ce pour tout $x \in X$.
3. La topologie de X est engendrée par une famille dénombrable de semi-normes.

Démonstration. 1. (1) \implies (2). La topologie sur X est équivalente à (X, d) . Soit (X, d) un espace métrique. Il suffit de poser

$$\mathcal{O}_{\frac{1}{n}} = \left\{ x \mid d(x, 0) < \frac{1}{n} \right\} \quad (\mathbb{R} \text{ est archimédien}).$$

Alors $\forall \varepsilon > 0, \exists n$ tel que $\mathcal{O}_{\frac{1}{n}} \subset \mathcal{O}_\varepsilon$. Donc $x + \mathcal{O}_{\frac{1}{n}}$ est une base dénombrable de voisinages de x .

2. (2) \implies (3). On sait que \mathcal{T} topologie de X est donnée par une famille de semi-normes. Les voisinages de 0 dans X sont donnés par

$$\mathcal{O}_{a, \varepsilon} = \bigcap_{i=1}^n \mathcal{O}_{\varepsilon, a_i}, \text{ avec } i \in \{1, \dots, n\}.$$

On rappelle que $\mathcal{O}_{\varepsilon, a_i} = \{x \mid \rho_{a_i} < \varepsilon\}$.

On peut choisir $\varepsilon = \frac{1}{n}$. On sait qu'il existe une base dénombrable de voisinages de 0 dans X . Soit U_n une base de voisinages dénombrable de 0. On pose

$$\rho_n(x) = \mu_{U_n}(x).$$

On prend les U_n convexes, balancés, absorbants comme dans le théorème 1.3.1 (c'est possible, car X est un espace localement convexe).

3. (3) \implies (1).

(a) Soit (ρ_n) une famille dénombrable de semi-normes sur X . On pose

$$d(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} \frac{\rho_n(x - y)}{1 + \rho_n(x - y)}.$$

Montrons que $(X, \text{ELC}) \prec (X, d)$. Soit $U \in \mathcal{T}$ (la topologie ELC). On se ramène aux voisinages de 0. On a

$$U = \bigcap_{\text{finie}} \mathcal{O}_{\varepsilon, a}, a \in A.$$

Comme il existe une base dénombrable de voisinages, on peut choisir

$$U_\varepsilon = \bigcap_{j=1}^N \{x \mid \rho_j(x - 0) < \varepsilon\}, \text{ avec } A = \mathbb{N}.$$

Ce voisinage est inclus dans $\{x \mid \sum \rho_j(x - 0) \leq N\varepsilon\}$.

Montrons que U est un voisinage de x pour la topologie métrique (X, d) .

Soit $\varepsilon > 0$. On pose $d(x, 0) = \left(\sum_1^N + \sum_{N+1}^{\infty} \right) \frac{\rho_n}{1 + \rho_n}$. Or N est tel que

$$\sum_{N+1}^{\infty} 2^{-n} < \varepsilon \implies \sum_{N+1}^{\infty} 2^{-n} \frac{\rho_n}{1 + \rho_n} < \varepsilon.$$

De plus,

$$d(x, y) \leq \varepsilon + \sum_{n=1}^N \frac{d_n}{1 + d_n} < \varepsilon + \sum_{n=1}^N d_n(x, y). \quad (1.3)$$

Or $\rho_n(x - y) < \varepsilon$, car $x \in y + U_\varepsilon$.

Donc 1.3 devient

$$d(x, y) \leq \varepsilon + N\varepsilon \text{ avec } N \text{ fixé.}$$

Donc $\mathcal{T} \prec (X, d)$.

(b) Montrons que $(X, d) \prec \mathcal{T}$. On doit majorer $\rho_m(x - y)$.

Or

$$d(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} \frac{\rho_n(x - y)}{1 + \rho_n(x - y)} \geq 2^{-m} \frac{\rho_m(x - y)}{1 + \rho_m(x - y)}.$$

Et

$$2^m d(x, y) \geq \frac{\rho_m(x - y)}{1 + \rho_m(x - y)} \geq f(t).$$

Donc on a $\rho_m(x, y) \leq g(2^m d(x, y))$, où g est la réciproque de $t \mapsto \frac{1}{1+t}$.

□

Proposition 1.4.2. Soit X un espace localement convexe qui vérifie l'une des propriétés énoncées dans la proposition 1.4.1 (i. e. métrisable). On note la topologie de X ELC par \mathcal{T} . Alors X est complet pour \mathcal{T} si et seulement si (X, d) est complet.

Démonstration. Cette proposition se démontre exactement comme 1.4.1. □

Définition 1.4.2. Soit X un espace localement convexe. On dit que X est un **espace de Fréchet** si X est **métrisable et complet**.

Exemple.

1. *Les espaces localement convexes qui ne sont pas des Fréchet.*
 - (a) *Non métrisables.* $\mathcal{F}([0, 1], \mathbb{R})$ muni de la topologie de la convergence simple, les topologies faibles, ...
2. *Les espaces localement convexes qui sont des Fréchet.* Les espaces de Banach, par exemple $\mathcal{F}([0, 1], \mathbb{R})$ muni de la topologie de la convergence uniforme, $\mathcal{C}_0^\infty(K)$, ...

1.4.2 Espace de Schwarz $\mathcal{S}(\mathbb{R}^d) \subset \mathcal{C}^\infty(\mathbb{R}^d)$

$$\varphi \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^d) \iff \rho_{\alpha,\beta}(\varphi) = \sup_{\mathbb{R}} |x^\alpha D_\varphi^\beta| < \infty.$$

Montrons que $\mathcal{S}(\mathbb{R})$ est complet. On va regarder $\rho_{0,0}, \rho_{0,1}, \rho_{1,0}, \rho_{1,1}, \dots$

1. $\rho_{0,0}(\varphi_{p+q} - \varphi_p) < \varepsilon$, donc $\varphi_p \rightarrow \varphi$, donc

$$\sup_{\mathbb{R}} |\varphi_{p+q}(x) - \varphi_p(x)| < \varepsilon.$$

En particulier pour tout $K \subset \mathbb{R}$, φ_n est de Cauchy dans $\mathcal{C}^0(K)$. Or $\mathcal{C}^0(K)$ est complet, donc $\varphi_n \xrightarrow{\text{uniformément}} \varphi$. Comme K est arbitraire, elle converge localement sur tout \mathbb{R} . On a

$$\rho_{0,0}(\varphi_{p+q} - \varphi_p) < \varepsilon,$$

donc

$$\rho_{0,0}(\varphi - \varphi_p) < \varepsilon.$$

Donc φ_p converge pour $\rho_{0,0}$.

2. On a besoin de rappeler le lemme suivant :

Lemme. Si $\varphi' \rightarrow \psi$ uniformément et $\varphi_n \rightarrow \varphi$ simplement, alors $\psi = \varphi'$.

1.5 Topologie forte et topologie faible sur les espaces de Banach

10-10-2023 Soient $(E, \|\cdot\|)$ un espace de Banach (réel ou complexe) et $(E', \|\cdot\|')$ son dual topologique. On rappelle que

$$E' = \{l \in \mathcal{L}(E, \mathbb{R}), \exists C > 0, \forall x \in E, |\langle l, x \rangle| \leq C \|x\|^2\},$$

avec la norme sur le dual définie dans 1.3.3.

$(E', \|\cdot\|')$ est un espace de Banach, un cas particulier de $\mathcal{L}(E, F)$, avec pour $u \in \mathcal{L}(E, F)$,

$$\|u\|_{\mathcal{L}(E, F)} = \sup_{\substack{x \in E \\ \|x\|_E \leq 1}} \|u(x)\|_F.$$

On affaiblit $(E, \|\cdot\|)$. Alors $\sigma(E, E')$ est la topologie la moins fine qui rend continue toutes les formes linéaires sur E . $X \sim \sigma(E, E')$ est muni des semi-normes $|\langle l, x \rangle| = \rho_l(x)$. Un voisinage de 0 est défini de la manière suivante :

$$\mathcal{O}_{l, \varepsilon} = \{x \in E : \sup_{1 \leq i \leq n} \langle l_i, x \rangle < \varepsilon\}, l = (l_1, \dots, l_n).$$

1.5.1 Comparaison des topologies $(E, \|\cdot\|)$ et $\sigma(E, E')$

Lemme. Soit E un espace de Banach. Alors la norme définie

$$x = \sup_{\substack{l \in E' \\ \|l\|' \leq 1}} |\langle l, x \rangle| = \langle l_0, x \rangle.$$

est telle que le sup est atteint. On a $\sup = \max$.

Démonstration. On a $x \neq 0$ par la définition de $\|\cdot\|'$. Alors

$$\left| \left\langle l, \frac{x}{\|x\|} \right\rangle \right| \leq \|l\|' \leq 1.$$

Alors

$$|\langle l, x \rangle| \leq \|x\| \text{ pour tout } l \in E' \text{ tel que } \|l\|' \leq 1.$$

Soit x_0 et F tel que $F = \mathbb{R}x_0$. Alors $\forall \lambda \in \mathbb{R}, l_0(\lambda x_0) = \lambda$ et $\|l_0\| = \|x_0\|$. Par Hahn-Banach, on peut prolonger l_0 en L_0 sur tout l'espace de Banach. \square

Proposition 1.5.1.

$$(E, \|\cdot\|) \prec \sigma(E, E').$$

Donc $X \sim \sigma(E, E')$ est un espace localement convexe.

Démonstration. On a

$$\rho_l(x) = |\langle l, x \rangle| \leq \|l\|' \|x\|.$$

\square

Autre démonstration. Montrons que $\mathcal{O}_{l,\varepsilon}$ est un ouvert de $(E, \|\cdot\|)$, i. e. $\|x\| < \delta$. On prend n formes linéaires $l_i, i \in \{1, \dots, n\}$ et on considère

$$\|x\| = \sup_{\|l\|' \leq 1} |\langle l, x \rangle|.$$

Or $|\langle l_i, x \rangle| < \varepsilon \dots$ (à suivre). \square

Démonstration. Montrons que $\sigma(E, E')$ est séparé. Soient x_1, x_2 distincts. Montrons qu'il existe \mathcal{O}_1 et \mathcal{O}_2 de $\sigma(E, E')$ tels que $\mathcal{O}_1 \cap \mathcal{O}_2 = \emptyset$.

Par le théorème de Hahn-Banach 1.3.4, pour $A = \{x_1\}, B = \{x_2\}$ compacts et convexes, pour tout $(x, y) \in A \times B$, on a

$$\langle l, x \rangle < \alpha < \langle l, y \rangle.$$

Donc

$$\langle l, x_1 \rangle < \alpha < \langle l, x_2 \rangle.$$

On a $x_1 \in \mathcal{O}_{\alpha, l}^1 = \{x : \langle l, x \rangle < \alpha\}$ et $\mathcal{O}_{\alpha, l}^2 = \{y : \langle l, y \rangle > \alpha\}$, ces ouverts séparent x_1 et x_2 . \square

Théorème 1.5.1. $(E, \|\cdot\|)$ est strictement plus fine que $\sigma(E, E')$ sauf en dimension finie.

Démonstration. On considère $S = \{\|x\| = 1\}$. Alors $S = \overline{S}$, son adhérence.

Soit x_0 de norme plus petite que 1. Montrons que pour tout V voisinage de 0 dans \mathcal{T} , $V \cap S \neq \emptyset$. On a

$$V = \{x : |\langle l_i, x - x_0 \rangle| < \varepsilon, 1 \leq i \leq n\}.$$

Comme $\dim(E) = \infty$, il existe $y_0 \neq 0$ tel que $\langle l_i, y_0 \rangle = 0, \forall i$. On a

$$g(t) = \|x_0 + ty_0\|.$$

On a $g(0) = \|x_0\| < 1$ et $g(\infty) = +\infty$. La fonction g est continue, donc il existe $t_0 \in (0, \infty)$ tel que $\|x_0 + t_0 y_0\| = 1$. Donc $x_0 + t_0 y_0 \in S$ et $x_0 + t_0 y_0 \in V$, car

$$|\langle l_i, (x_0 + t_0 y_0) - x_0 \rangle| = |\langle l_i, t_0 y_0 \rangle| = |t_0 \langle l_i, y_0 \rangle| = 0 < \varepsilon.$$

□

Remarque. $\forall t \in \mathbb{R}, \langle l_i, x_0 + t y_0 \rangle = 0$. Alors V contient toute une droite.

Remarque. Pour E Banach séparable, B_E boule unité fermée de $(E, \|\cdot\|)$ est métrisable pour $\sigma(E, E')$.

Si E est réflexif (c'est-à-dire que l'injection naturelle dans son bidual est surjective), alors $B_E = \{\|x\| \leq 1\}$ est un espace métrique compact pour $\mathcal{O}(E, E')$.

1.5.2 Théorème de Banach-Steinhaus, suites faiblement et fortement convergentes

Théorème 1.5.2. Soient E, F espaces de Banach et $(T_a)_{a \in A} \in \mathcal{L}(E, F)$ telle que

$$\forall x \in E, \sup_{a \in A} \|T_a x\|_F < +\infty.$$

Alors

$$\sup_{a \in A} \|T_a\| < +\infty \text{ (bornée en norme),}$$

$$\text{i. e. } \exists C > 0, \forall x \in E, \forall a \in A, \|T_a(x)\| \leq C \|x\|.$$

Corollaire. Soit $T_n \in \mathcal{L}(E, F)$ avec $\|T_n\| < +\infty$ avec $\forall x \in E, T_n x \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} y \in F$. On note $y = Tx$. Alors $T \in \mathcal{L}(E, F)$ et $T = \liminf T_n$.

Démonstration. Montrons que T_n est linéaire. En effet,

$$T_n(\lambda x + \lambda' x') = \lambda T_n(x) + \lambda' T_n(x').$$

Par passage à la limite, on obtient $T(\lambda x + \lambda' x') = \lambda T(x) + \lambda' T(x')$.

Montrons l'autre partie du corollaire. Par Banach-Steinhaus, si on considère $A = \mathbb{N}$, pour tout $x \in E$, $T_n x$ est convergente, donc bornée, i. e. $\|T_n x\| < \infty$, donc $\sup_n \|T_n x\| \leq C$ comme $\|T_n x\| \leq \|T_n\| \|x\|$.

Par passage à la limite, on obtient $\|Tx\| \leq C \|x\|$, avec $C = \liminf \|T_n\|$. □

Définition 1.5.1. Soit E espace de Banach. $B \subset E$ est bornée si et seulement si

$$\exists C \geq 0, \forall x \in B, \|x\| \leq C.$$

Corollaire. $B \subset E$ est bornée si et seulement si $\forall l \in E', l(B) \subset \mathbb{R}$ est borné.

1.5.3 Suites faiblement et fortement convergentes

Définition 1.5.2 (Suite fortement convergente). Soit x_n une suite de E . On dit que x_n est fortement convergente lorsque $x_n \longrightarrow x \iff \|x_n - x\| \longrightarrow 0$.

Définition 1.5.3 (Suite faiblement convergente). Soit x_n une suite de E . On dit que x_n est faiblement convergente lorsque $x_n \longrightarrow x \iff \forall l \in E', \langle l, x_n \rangle \longrightarrow \langle l, x \rangle$.

On note alors $x_n \xrightarrow{w} x$ (avec *weak* qui signifie faible en anglais) ou $x_n \rightharpoonup x$.

Corollaire.

1. Si $x_n \longrightarrow x$ dans $(E, \|\cdot\|)$, alors $x_n \longrightarrow x$ dans $\sigma(E, E')$.
2. Si $x_n \longrightarrow x$, alors x_n est bornée dans E et $\|x\|_E \leq \liminf \|x_n\|$.
3. Si $x_n \longrightarrow x$ et $l_n \longrightarrow l$, alors $\langle l_n, x_n \rangle \longrightarrow \langle l, x \rangle$.

Démonstration.

1. Soit $l \in E'$. Alors

$$|\langle l, x_n - x \rangle| \leq \|l\|' \|x_n - x\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

2. $T_n : E \longrightarrow \mathbb{R}$. Alors on définit

$$T_n l = \langle l, x_n \rangle \longrightarrow \langle l, x \rangle = Tl,$$

car x_n tend faiblement vers x . Alors d'après le corollaire, $\sup \|T_n\| < \infty$, avec $T \in (E')' = E''$ et $\|T\|'' \leq \liminf \|x_n\|$, donc $|Tl| = |\langle l, x \rangle|$ par passage à la limite.

- 3.

$$\langle l_n, x_n \rangle - \langle l, x \rangle = \langle l, x_n - x \rangle + \langle l_n - l, x \rangle.$$

Or $\langle l, x_n - x \rangle \longrightarrow 0$, car $x_n \longrightarrow x$ et $\langle l_n - l, x \rangle \longrightarrow 0$, car $|\langle l_n - l, x \rangle| \leq \|l_n - l\| \|x\| \longrightarrow 0$.

□

1.5.4 Topologie faible *

On considère E espace de Banach avec $(E, \|\cdot\|) \prec \sigma(E, E')$. On construit la topologie $*\sigma(E', E)$ une topologie sur E' . 13-10-2023

La topologie forte sur $E' = F$ est donnée par la norme

$$\|l\|' = \sup_{\|x\| \leq 1} |\langle l, x \rangle|.$$

Sur E , on a aussi $\sigma(F, F') = \sigma(E', E'')$. Si $E = E''$ (i. e. E est réflexif), alors la topologie $\sigma(E', E'')$ se confond avec la topologie faible $\sigma(E, E')$. Par contre, si E s'injecte dans E'' , on a besoin de définir une autre topologie $*\sigma(E', E)$ moins fine que $\sigma(E', E'')$.

Proposition 1.5.2. Il existe une isométrie $J : E \hookrightarrow E''$.

Démonstration. On définit une application $J : E \longrightarrow E''$ telle que

$$\langle Jx, x' \rangle \stackrel{\text{déf}}{=} \langle x', x \rangle.$$

Montrons que $\|Jx\|' = \|x\|$.

On a besoin d'introduire le résultat suivant :

Lemme.

$$\|x\| = \sup_{\|l\|' \leq 1} |\langle l, x \rangle| = \max_{\|l\|' \leq 1} |\langle l, x \rangle|.$$

Donc $\|Jx\| = \|x\|$ en prenant

$$\sup_{\substack{x' \in E' \\ \|x'\| \leq 1}} |\langle x', x \rangle| = \|x\|.$$

□

Remarque. J n'est pas unitaire (non surjectif si E n'est pas réflexif).

Exemple. On considère $E = L^1$. Soit $f \in L^1$, alors $Jf \in L^\infty$ et on a :

$$\langle Jf, g \rangle = \langle g, f \rangle = \int g(x)f(x)dx \quad (f : \mathbb{R}^d \longrightarrow \mathbb{R}).$$

Mais $g(0)$ ne peut pas s'écrire comme une intégrale $\int g(x)f(x)dx, \forall f \in L^1$ si $g \in C_0^0(\mathbb{R}^d) \subset L^\infty$.

Proposition 1.5.3. $*\sigma(E', E)$ est séparée.

Démonstration. Soient $l_1, l_2 \in E'$ tels que $l_1 \neq l_2$, alors il existe $x \in E$ tel que $l_1(x) \neq l_2(x)$, donc

$$\langle l_1, x \rangle \neq \langle l_2, x \rangle,$$

ce qui implique que $\langle l_1, x \rangle < \alpha < \langle l_2, x \rangle$.

On a $\mathcal{O}_1 = \{l \in E' : \langle l, x \rangle < \alpha\}$ ouvert de E' et $\mathcal{O}_2 = \{l \in E', \langle l, x \rangle > \alpha\}$. □

Remarque. Pour x fixé, l'application $l \mapsto |\langle l, x \rangle|$ semi-norme de E' .

Proposition 1.5.4 (Autres propriétés). $*\sigma(E', E)$ n'est pas métrisable.

Remarque. E est séparable et réflexif si et seulement si E' est séparable et réflexif.

Théorème 1.5.3. Si E est un Banach séparable, alors la boule unité fermée

$$B_E = \{\|l\| \leq 1\}$$

est métrisable pour $*\sigma$.

Proposition 1.5.5. Soit $\xi : E' \longrightarrow \mathbb{R}$ avec $(\xi \in E'')$. Si ξ est continue pour ${}^*\sigma(E, E')$, il existe $x \in E, \xi = Jx$ et

$$\langle \xi, l \rangle = \langle l, x \rangle.$$

Théorème 1.5.4 (De représentation de Rieczy). Si $\xi \in \mathcal{H}' = \mathcal{H}$, alors

$$\forall l \in \mathcal{H}, \langle \xi, l \rangle = \langle l, x \rangle.$$

CHAPITRE 2

THÉORIE DE DISTRIBUTIONS

La théorie de distributions utilise une grande variété des fonctions test.

17-10-2023

Ainsi une mesure de Radon μ sur un espace localement compact Ω (par exemple un ouvert de \mathbb{R}^d) est une distribution d'ordre 0 agissant \mathcal{C}_0^0 (noté encore $\mathcal{K}(\Omega)$) notamment par

$$\langle \mu, f \rangle = \int_{\Omega} f(x) d\mu(x).$$

Sur $\Omega = \mathbb{R}^d$, il suffit de prendre l'espace de Schwarz $\mathcal{S}(\mathbb{R}^d)$ qui est un espace de Fréchet. Par contre si Ω est un ouvert borné, il y a des problèmes sur les bords de Ω .

On cherche aussi les fonctions test dans $\mathcal{K}(\Omega)$ ou \mathcal{C}_0^1 qui ne sont ni des espaces de Banach, ni des espaces de Fréchet. On choisit généralement $\mathcal{C}_0^0(\Omega)$.

Les espaces fonctionnels sont rangés en deux catégories :

- Les espaces de Lebesgue ;
- Les espaces de fonctions différentiables.

△

2.1 Espaces de Lebesgue

2.1.1 Mesure de Lebesgue

Il est important de rappeler la notion d'espace mesuré.

Définition 2.1.1 (Rappel : tribu). Soit X un ensemble. On dit qu'une collection d'ensembles \mathcal{T} est une tribu si

1. $X \in \mathcal{T}$ et $\emptyset \in \mathcal{T}$;
2. Si $A \in \mathcal{T}$, alors $A^C \in \mathcal{T}$;
3. Si $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une suite de \mathcal{T} , alors

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{T}.$$

On dit que (X, \mathcal{T}) est un espace mesurable.

Remarque. \mathcal{T} est aussi stable par intersection dénombrable, l'intersection étant complémentaire à la réunion...

Définition 2.1.2 (Mesure). Soit (X, \mathcal{T}) un espace mesurable. On dit qu'une application $\mu : X \rightarrow [0, \infty)$ est une mesure si :

1. $\mu(\emptyset) = 0$;
2. Pour toute suite (A_n) de \mathcal{T} disjointe, on a

$$\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n).$$

On dit alors que (X, \mathcal{T}, μ) est un espace mesuré.

Exemple. Pour \mathbb{R}^d , \mathcal{T} est la tribu borélienne engendrée par les pavés $\prod_{i=1}^d [a_i, b_i)$, avec $a_i, b_i \in \mathbb{R}$. On

peut aussi l'engendrer par les “quadrants” $\prod_{i=1}^d [a_i, \infty)$.

La mesure de Lebesgue se calcule comme suit. Si $d = 1$, alors $\mu([a, b]) = b - a$. Pour les pavés, on aura :

$$\mu\left(\prod_{i=1}^d [a_i, b_i)\right) = \prod_{i=1}^d (b_i - a_i).$$

Elle se caractérise par le fait d'être stable par translation.

Pour avoir une théorie cohérente, il faut compléter $B(\mathbb{R}^d) \rightarrow \overline{\mathcal{T}}$ (la tribu borélienne) en ajoutant des ensembles négligeables. Ainsi $\overline{\mathcal{T}}$ est la plus petite tribu contenant \mathcal{T} et les ensembles négligeables.

Définition 2.1.3. $A \in \mathbb{R}^d$, i. e. A est mesurable si et seulement si $A \in \overline{\mathcal{T}}$.

Remarque. A toute fin utile, on considérera que tous les ensemble sont mesurables.

Comment mesurer les fonctions $\mu(F)$?

On peut utiliser :

- L'intégrale de Riemann ;
- L'intégrale de Lebesgue.

2.1.2 Intégrale des fonctions positives

Soit (X, \mathcal{T}, μ) un espace normé mesuré.

Définition 2.1.4 (Fonction mesurable). On dit que $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ est mesurable si pour tout borélien B de \mathbb{R} , on a $f^{-1}(B) \in \mathcal{T}$.

Proposition 2.1.1 (Axiomes). Il existe une application définie sur l'ensemble mesurable des fonctions mesurables positives de \mathbb{R}^d , à valeurs dans \mathbb{R} , notée $f \mapsto \int f(x)dx$ qui réalise les propriétés suivantes :

1. *Linéarité* : pour tous $\alpha, \beta \geq 0$, on a

$$\int (\alpha f(x) + \beta g(x)) dx = \alpha \int f(x) dx + \beta \int g(x) dx.$$

2. *Croissance* : si $\forall x, f(x) \leq g(x)$, alors

$$\int f(x) dx \leq \int g(x) dx.$$

3. *Normalisation* : pour tout pavé $A = \prod_{i=1}^d [a_i, b_i]$, on a

$$\int \mathbf{1}_A(x) dx = \mu(A).$$

4. *Théorème de Beppo-Levi* : si (f_n) est une suite croissante de fonctions mesurables, alors

$$\underbrace{\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(x) dx}_{\int f(x) dx} = \lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(x) dx \leq +\infty. \quad (2.1)$$

Au lieu d'intégrer f sur tout \mathbb{R} , on peut l'intégrer seulement sur la partie où elle est mesurable en posant :

$$\int_A f(x) dx = \int f(x) \mathbf{1}_A(x) dx.$$

Théorème 2.1.1. On peut calculer l'intégrale $\int_A f(x) dx$ de toute fonction mesurable positive par :

$$\int_A f(x) dx = \sup \sum_{i=0}^{n-1} (t_{i+1} - t_i) \mu(A \cap \{f_i \geq t_i\})$$

où le sup est pris sur toutes les subdivisions finies sur l'axe des y , $t_0 < t_1 < \dots < t_n, n \in \mathbb{N}$ et dont le pas tend vers 0.

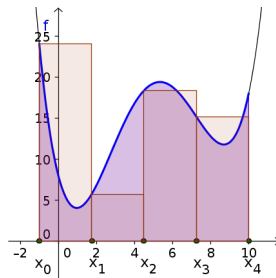


FIGURE 2.1 – Subdivisions et sommes de Riemann

Proposition 2.1.2. Si f est à valeurs positives, alors

$$\int f(x) dx = 0 \text{ si et seulement si } f = 0 \text{ p.p.}$$

Démonstration. Posons $A = \{x \in X, f(x) \neq 0\}$. Alors $f(x) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \mathbf{1}_A(x)$ si $\mu(A) = 0$. On obtient par 2.1 :

$$\int f(x) dx \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A dx = 0.$$

Réciproquement, si $\int f(x) dx = 0$, alors on remarque que $\mathbf{1}_A(x) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n f_n(x)$ et on a encore par 2.1 :

$$\mu(A) = \int_A \mathbf{1}_A(x) dx \leq \lim_{n \rightarrow \infty} n \int f(x) dx = 0.$$

□

25-10-2023

Théorème 2.1.2 (\triangleleft De convergence dominée). Soit $(f_n) \in \mathcal{L}^1(\Omega)$ une suite de fonctions (avec $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ un ouvert). Pour tout $n \in \mathbb{N}$, f_n est définie presque partout sauf sur $E = (\bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n)$ de mesure nulle. S'il existe $h \in \mathcal{L}^1(\Omega)$ telle que $|f_n| \leq h$ et si $f_n \rightarrow f$ presque partout sur Ω , alors

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n(x) dx = \int f(x) dx,$$

ce qui équivaut à dire que $\|f_n - f\|_{\mathcal{L}^1} \rightarrow 0$.

Remarque. Si f_n est continue sur $K \subset \Omega$ et $f_n \rightarrow f$ quand $n \rightarrow \infty$, alors

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n = \int \lim_{n \rightarrow \infty} f_n.$$

2.2 Espaces L^p ($1 \leq p \leq +\infty$) comme espaces de Banach

On définit l'espace $\mathcal{L}^1 \rightarrow L^1$. On dit que $f \sim g$ si et seulement si $f = g$ presque partout (i. e. $\mu(\{x : f(x) \neq g(x)\}) = 0$). C'est une relation d'équivalence. On définit l'espace quotient $L^1 = \mathcal{L}^1 / \sim$. On montre que L^1 est complet.

On note $\dot{f} \in L^1$, \dot{f} est un représentant de la classe de f . Ainsi on peut définir la transformée de Fourier d'une fonction de L^1 par :

$$\widehat{\dot{f}}(\xi) = \int e^{-ix\xi} f(x) dx,$$

mais la même écriture n'a pas de sens dans L^2 .

2.2.1 Les espaces L^p , $1 \leq p < \infty$

Théorème 2.2.1. L'espace L^1 est complet, muni de la norme

$$\|f\|_1 = \int |f(x)| dx.$$

Cela veut dire que c'est un espace de Banach.

Démonstration. Soit f_n une suite de Cauchy dans L^1 . On peut lui associer une série

$$f_n = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(f_{i+1} - f_i).$$

Montrons que f_n converge. Il suffit de montrer qu'il existe une sous-suite f_{n_k} qui converge. On peut toujours écrire :

$$f_n - f = \underbrace{f_n - f_{n_k}}_{< \varepsilon} + \underbrace{f_{n_k} - f}_{< \varepsilon}.$$

Donc

$$\forall \varepsilon > 0, \exists N \in \mathbb{N}, p \geq N, q \geq 0, \|f_{p+q} - f_p\|_{L^1} < \varepsilon.$$

A extraction près d'une sous-suite, on peut supposer que

$$\|f_{n+1} - f_n\|_{L^1} < \varepsilon.$$

On pose $g_m(x) = \sum_{n=1}^{m-1} |f_{n+1}(x) - f_n(x)|$. Pour tout x , la suite $(g_m(x))_m$ est croissante (car on rajoute un terme positif) et elle est définie presque partout. Par Beppo-Levi, on a

$$\int g(x) dx = \int \lim_{m \rightarrow \infty} g_m = \lim_{m \rightarrow \infty} \int g_m(x) dx.$$

Or on a

$$\int g_m(x) dx = \sum_{n=1}^{m-1} \int |f_{n+1}(x) - f_n(x)| dx.$$

C'est une série absolument convergente, car $\|f_{n+1} - f_n\| < 2^{-n}$. On a alors

$$\int g(x) dx < +\infty$$

et en particulier $g(x) < +\infty$ presque partout.

Donc $f_m(x) = f_1(x) + \sum_{n=1}^{m-1} f_{n+1}(x) - f_n(x)$ définit une série numérique absolument convergente, donc $f_m(x) \xrightarrow[p.p.]{} f(x)$. Il reste à montrer que $f \in L^1$. On a :

$$|f_m(x)| \leq |f_1(x)| + g_m(x) \leq |f_1(x)| + g(x) = h(x) \in L^1.$$

Par Lebesgue, on a $\lim \int f_m = \int f$, avec $f \in L^1$. On a donc $\|f_m - f\|_{L^1} \rightarrow 0$. □

Théorème 2.2.2. L^p est aussi un Banach et ce pour tout $p \in [1, \infty)$.

Démonstration. On utilise l'inégalité de Minkowski :

$$\|f + g\|_{L^p} \leq \|f\|_{L^p} + \|g\|_{L^p}. \quad (2.2)$$

La démonstration est la même que pour L^1 . □

Corollaire. SI $f_n \rightarrow f$ dans L^p , alors il existe une sous-suite f_{n_k} qui converge presque partout vers f .

Démonstration. Comme avant, on peut supposer que $\|f_{n+1} - f_n\| < 2^{-n}$. On pose

$$f_m(x) = f_1(x) + \sum_{n=1}^{m-1} f_{n+1}(x) - f_n(x).$$

C'est une série normalement convergente dans L^p . Par le raisonnement précédent, on détermine que $f_m(x) \xrightarrow[p.p.]{} f$. \square

Théorème 2.2.3. Soit $\mathcal{K}(\Omega)$, l'espace de fonctions continues à support compact dans Ω . Alors $\mathcal{K}(\Omega)$ est dense dans $L^p(\Omega)$ pour tout $p \in [1, \infty)$.

Démonstration. Brézis, théorème 4.12. \square

2.2.2 Espace L^∞

Théorème 2.2.4. $L^\infty(\Omega)$ est un espace de Banach.

Définition 2.2.1. On définit la norme dans l'espace L^∞ de la façon suivante :

$$\|f\|_\infty = \text{supess } |f|.$$

Pour tout $C > \text{supess}(f)$, on a $\mu(\{x : f(x) > C\}) = 0$. Si f est continue, on a $\text{supess } f = \sup f$.

Démonstration. Soit f_n une suite de Cauchy dans $L^\infty(\Omega)$. On prend $\varepsilon = \frac{1}{k}$. Pour tout k , il existe $N(k)$ tel que $\forall n, m \geq N(k)$, on a $\|f_n - f_m\|_\infty < \frac{1}{k}$.

Montrons que f_n converge vers $f \in L^\infty$. Donc il existe E_k négligeable tel que $|f_n(x) - f_m(x)| < \frac{1}{k}$ pour tout $x \notin E_k$. On a que $E = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} E_k$ est de mesure nulle. Pour tout $x \in E$, la suite numérique $f_n(x)$ est de Cauchy, donc elle converge vers $f(x)$ (partout). On a donc

$$|f_n(x) - f_m(x)| < \frac{1}{k},$$

donc

$$|f_n(x) - f(x)| < \frac{1}{k},$$

donc $\|f_n - f\|_\infty < \frac{1}{k}$ avec $f \in L^\infty$. \square

2.2.3 Espace L^2

Théorème 2.2.5. $\mathcal{H} = L^2$ est un espace de Hilbert muni du produit scalaire suivant :

$$(u | v) = \int_{\Omega} f(x) \overline{g(x)} dx.$$

L'espace L^2 est engendrée par une base orthonormée (*base hilbertienne*), i.e. il existe une suite $(e_j)_j$ telle que, pour tout $f \in L^2$, on a

$$f = \sum_j f_j e_j, f_j \in \mathbb{C}.$$

Proposition 2.2.1 (Egalité de Parseval). On a pour tout $f \in L^2$:

$$\|f\|_2^2 = \sum_j |f_j|^2.$$

2.3 Espaces L^p comme ELC

2.3.1 $L^1(\Omega)$, avec Ω ouvert de \mathbb{R}^d

C'est un espace de Banach muni de la norme $\|f\|_{L^1}$. C'est aussi un espace localement convexe muni de la famille de semi-normes $(\rho_{a,r})_{a \in \Omega, r > 0}$ définies par

$$\rho_{a,r}(f) = \int_{B(a,r)} |f(x)| dx.$$

Proposition 2.3.1. $(E, (\rho_{a,r}))$ est séparé.

Démonstration. Si $f \neq g$ presque partout, alors

$$\rho_{a,r}(f - g) = \int_{B(a,r)} |f(x) - g(x)| dx \neq 0.$$

Donc il existe E de mesure strictement positive tel que $\forall x \in E, g(x) \neq f(x)$. Or E est partout dense dans Ω pour la mesure de Lebesgue. On a alors

$$\int_{B(a,r)} |f - g| = \int_{E \cap B(a,r)} |f - g| > 0.$$

□

2.3.2 $E = L^\infty$

On le munit de la famille de semi-normes

$$\rho_{a,r}(f) = \sup_{B(a,r)} (|f|).$$

Proposition 2.3.2. $E = L^\infty(\Omega)$ est séparé, mais non séparable.

2.3.3 Espaces duaux de L^p

Théorème 2.3.1 (De Riesz). *On a $(L^2)' = L^2$ (l'espace dual de L^2 est lui-même), i. e. toute forme linéaire $l \in (L^2)'$ s'écrit comme $\langle l, u \rangle = (v | u)$ où $v \in L^2$.*

Théorème 2.3.2 (Riesz-Fischer). *Le dual de L^1 est L^∞ .*

Démonstration. Brézis, p. 63. □

Remarque. Par contre on n'a pas $(L^\infty)' \neq L^1$.

27-10-2023

Corollaire. *Soit $f \in L^p$. Si pour tout $\varphi \in K(\Omega)$, $\int f(x)\varphi(x)dx = 0$, alors $f = 0$ presque partout.*

Théorème 2.3.3. *L'espace L^1 est séparable. Plus généralement, L^p est séparable pour tout $1 \leq p < +\infty$.*

Démonstration. On prend un représentant \dot{f} de $f \in L^1$. Si f est positive, on a

$$\int_A f(x)dx = \sup_{t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n} (t_{i+1} - t_i) \mu(A \cap \{x : f(x) \leq t_i\}),$$

où μ est la mesure de Lebesgue. On a alors

$$f = \lim \sum_i c_i \mathbb{1}_{\{f \leq t_i\}} = \lim \sum_t (t_{i+1} - t_i) \mathbb{1}_{B_i}(t).$$

On peut prendre $t_i \in \mathbb{Q}$. Alors la famille

$$\sum_i (t_{i+1} - t_i) \mathbb{1}_{B_i}(t)$$

est partout dense dans L^1 , avec B_i des boréliens de Ω . Ceci achève la démonstration. □

Théorème 2.3.4. *L'espace $L^1(\Omega)$ n'est pas réflexif.*

Démonstration. On raisonne par l'absurde. On pose $E = L^1$ et on suppose qu'il est réflexif. On a alors, par le théorème 2.3.2, $E' = L^\infty$.

Soit B_E la boule unité de E (pour la topologie de Banach, mais aussi valable pour $\sigma(E, E')$). Comme L^1 est séparable, la boule unité B_E pour la topologie faible est compacte. Donc de toute suite de B_E on peut extraire une suite convergente (pour la topologie faible). On prend

$$f_n(x) = \frac{1}{|B(a, \frac{1}{n})|} \mathbb{1}_{B(a, \frac{1}{n})}.$$

On a $\int f_n = 1$ pour $f_n \in B_E$. On extrait f_{n_k} convergeant vers $f \in B_E$. Alors pour tout $\phi \in L^\infty = E'$, on a $\int f_{n_k} \phi \longrightarrow \int f \phi$. On choisit $\phi \in K(\Omega \setminus \{a\})$. Donc

$$\int f_{n_k}(x)\phi(x)dx = 0.$$

Par le corollaire 2.3.3, $f = 0$ p. p. dans $\Omega \setminus \{a\}$. Donc $f = 0$ p. p. dans Ω , car $\mu(\{a\}) = 0$. Cela aboutit à une contradiction, car pour $\phi = \mathbf{1}_\Omega \in L^\infty$, on a

$$0 = \int f \phi = \int \frac{1}{|B(a, \frac{1}{n})|} \mathbf{1}_{B(a, \frac{1}{n})} = 1.$$

□

Remarque. E est réflexif et séparable si et seulement si E' est réflexif et séparable. Comme $E = L^1$ n'est pas réflexif, $E' = L^\infty$ n'est pas réflexif. En fait il n'est ni réflexif ni séparable.

Proposition 2.3.3. L^∞ n'est pas séparable.

Lemme. Soit E un espace de Banach. S'il existe $(\mathcal{O}_i)_{i \in I}$, I non dénombrable, \mathcal{O}_i ouverts deux-à-deux disjoints, alors E n'est pas séparable.

Démonstration. Une fois de plus on raisonne par l'absurde. Soit (u_n) une suite partout dense dans E telle que $\forall i \in I, (u_n)_{n \in \mathbb{N}} \cap \mathcal{O}_i \neq \emptyset$ (on utilise l'axiome du choix $u_n \in \mathcal{O}_i$). Comme les \mathcal{O}_i sont disjoints, $i \longmapsto n(i)$ est injective, donc I est dénombrable, ce qui aboutit à une contradiction. □

Théorème 2.3.5. Soit Ω un ouvert de \mathbb{R}^d . Alors

1. $L^\infty(\Omega)$ n'est pas séparable ;
2. $L^\infty(\Omega)$ n'est pas réflexif ;
3. La boule unité de $L^\infty(\Omega)$ est métrisable est compacte pour $*(L^\infty, L^1)$.

2.4 Exemple fondamental : convergence d'une suite de L^1 vers la mesure de Dirac

Théorème 2.4.1. Il existe $f_n \in L^1$ telle que $\forall \phi \in K(\Omega)$,

$$\int f_n(x)\phi(x)dx \longrightarrow \phi(x_0).$$