

Mesure et intégration

1. Tribus et boréliens
2. Mesures
3. Fonctions mesurables
4. Intégrales
5. Les grands théorèmes
6. Mesures produit
7. Changements de variables

§1 Tribus et boréliens

X un ensemble

Définition

Un **clan** de X est un ensemble \mathcal{C} de parties de X tel que

1. $\emptyset \in \mathcal{C}$
2. Si $A \in \mathcal{C}$ alors $A^c \in \mathcal{C}$ ($A^c = X \setminus A$)
3. \mathcal{C} stable par union finie

Une **tribu** est un clan aussi stable par union dénombrable.

Soit \mathcal{T} une tribu de X et soit $Y \subseteq X$. Alors $\mathcal{T}_Y = \{A \cap Y : A \in \mathcal{T}\}$ est une tribu de Y (idem pour un clan). C'est la **tribu induite** par \mathcal{T} sur Y .

Soit \mathcal{T} une tribu fixée de X . Une partie A de X est **mesurable** si $A \in \mathcal{T}$.

Proposition

Soit \mathcal{T} une tribu de X alors

- ▶ $X \in \mathcal{T}$
- ▶ \mathcal{T} est stable par intersection dénombrable
- ▶ Si $A, B \in \mathcal{T}$, alors $A \setminus B \in \mathcal{T}$

Définition

Une **classe monotone** \mathcal{M} de X est un ensemble de parties de X tel que pour toute suite (A_n) d'éléments de \mathcal{M}

- ▶ Si (A_n) est une suite croissante (ie $A_n \subseteq A_{n+1}$) alors $\cup A_n \in \mathcal{M}$
- ▶ Si (A_n) est une suite décroissante (ie $A_{n+1} \subseteq A_n$) alors $\cap A_n \in \mathcal{M}$

Résultat. Clan + classe monotone \implies tribu

Définition

Soit $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$. Alors il existe une plus petite tribu contenant \mathcal{A} , on l'appelle la **tribu engendrée par \mathcal{A}** , dénotée $\mathcal{T}(\mathcal{A})$. (De même pour clan et classe monotone dénotés $\mathcal{C}(\mathcal{A})$ et $\mathcal{M}(\mathcal{A})$ respectivement)

Résultat. On a $\mathcal{C}(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{T}(\mathcal{A})$ et $\mathcal{M}(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{T}(\mathcal{A})$

Théorème (Classe monotone)

Soit \mathcal{C} un clan, alors $\mathcal{M}(\mathcal{C}) = \mathcal{T}(\mathcal{C})$ (et donc c'est une tribu)

Le but de cet exercice est de montrer qu'une réunion *arbitraire* d'ensembles mesurables n'est pas forcément un ensemble mesurable. Soit

$$\mathcal{I} = \{A \subseteq \mathbb{R} \text{ avec } A \text{ au plus dénombrable ou } A^c \text{ au plus dénombrable}\}.$$

1. Montrer que \mathcal{I} est une tribu.
2. Montrer que $\mathcal{I} \neq \mathcal{P}(\mathbb{R})$.
3. Conclure.

Définition

Soit X un espace métrique, la **tribu des boréliens** de X , dénotée \mathcal{B}_X , est la tribu engendrée par les ouverts de X . Les éléments de cette tribu sont les **boréliens** de X .

Résultat. Soit Y sous-espace métrique de X alors \mathcal{B}_Y est la tribu de Y induite par \mathcal{B}_X sur Y

Résultat. Les intervalles ouverts et fermés de \mathbb{R} sont des boréliens de \mathbb{R}

Proposition

Soit X espace métrique. On a

- ▶ \mathcal{B}_X est la tribu engendré par les fermés de X
- ▶ $\mathcal{B}_{\mathbb{R}}$ est la tribu engendré par les intervalles de \mathbb{R} et même uniquement les intervalles de la forme $]a; +\infty[$ avec $a \in \mathbb{R}$
- ▶ $\mathcal{B}_{\mathbb{R}^n}$ est la tribu engendré par les pavés $I_1 \times \cdots \times I_n$ avec I_j intervalle ouvert de \mathbb{R}

Remarque. Quand X est un espace métrique, la tribu considérée sur X est par défaut la tribu des boréliens

§2 Mesures

Définition

Soit \mathcal{T} une tribu de X . Une **mesure** (positive) sur X est une application $\mu : \mathcal{T} \rightarrow [0; +\infty]$ telle que

- ▶ $\mu(\emptyset) = 0$
- ▶ Si (A_n) est une suite d'éléments de \mathcal{T} d.d.d. (deux à deux disjoints) alors $\mu(\cup A_n) = \sum \mu(A_n)$ (propriété de **σ -additivité**)

Exemple

On prend $\mathcal{T} = \mathcal{P}(X)$ l'ensemble des parties de X

$$\mu(A) = \begin{cases} \text{card}(A) & \text{si } A \text{ est finie} \\ +\infty & \text{sinon} \end{cases}$$

C'est la **mesure de comptage**

Définition

Une **espace mesurable** est un couple (X, \mathcal{T}) avec \mathcal{T} tribu de X et un **espace mesuré** est un triplet (X, \mathcal{T}, μ) avec, de plus, μ une mesure sur \mathcal{T}

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

Proposition

- ▶ Soient A et B deux mesurables avec $A \subseteq B$, alors $\mu(A) \leq \mu(B)$ (*monotonie*). Si, de plus, $\mu(B) < +\infty$ alors $\mu(B) = \mu(A) + \mu(B \setminus A)$
- ▶ Soient A_1, \dots, A_k des mesurables, alors $\mu(\cup_i A_i) \leq \sum_i \mu(A_i)$ avec égalité si les A_i sont d.d.d. (deux à deux disjoints)
- ▶ Soient A et B deux mesurables alors

$$\mu(A \cup B) + \mu(A \cap B) = \mu(A) + \mu(B)$$

- ▶ Soit (A_n) une suite de mesurables
 - ▶ Alors $\mu(\cup_i A_i) \leq \sum_i \mu(A_i)$ (*sous-additivité*)
 - ▶ Si $(A_n) \nearrow A$ alors $\mu(A_n) \rightarrow \mu(A)$
 - ▶ Si $(A_n) \searrow A$ et $\mu(A_0) < \infty$ alors $\mu(A_n) \rightarrow \mu(A)$

Définition

- ▶ La mesure μ est **finie** si $\mu(X) < +\infty$
- ▶ La mesure μ est **σ -finie** s'il existe une suite (A_n) de mesurables avec
$$\bigcup_n A_n = X \quad \text{et} \quad \mu(A_n) < +\infty \quad \forall n$$
- ▶ La mesure μ est une **mesure de probabilité** si $\mu(X) = 1$
- ▶ Si X est métrique et \mathcal{T} est la tribu des boréliens, la mesure μ est **borélienne**
- ▶ Si $X = \mathbb{R}^n$ alors μ est une **mesure de Radon** si μ est borélienne et $\forall K$ compact de X , $\mu(K) < +\infty$

Définition

Une partie A de X (non nécessairement mesurable) est **négligeable** s'il existe un mesurable B avec $A \subseteq B$ et $\mu(B) = 0$. Une mesure est **complète** si toutes les parties négligeables sont mesurables. Si ce n'est pas le cas, on peut construire une **extension** de μ en une (unique) mesure complète $\bar{\mu}$ en ajoutant les négligeables à \mathcal{T} pour obtenir la **tribu complétée** $\bar{\mathcal{T}}$.

Une propriété $P(x)$ définie pour $x \in X$ est **vraie presque partout** ou **vraie p.p.** si l'ensemble $\{x \in X : P(x) \text{ est faux}\}$ est négligeable.

Théorème

Il existe une unique mesure ν_n sur \mathbb{R}^n telle que, pour chaque pavé $P = I_1 \times \cdots \times I_n$ avec I_j intervalle, on a

$$\nu_n(P) = \text{vol}(P) = \text{produit des longueurs de } I_j$$

On note λ_n la complétée de ν_n et on l'appelle la *mesure de Lebesgue* dans \mathbb{R}^n . On note \mathcal{L}_n la complétée de $\mathcal{B}_{\mathbb{R}^n}$ pour cette mesure et on l'appelle la *tribu de Lebesgue* de \mathbb{R}^n .

On a les propriétés suivantes

- ▶ ν_n est unique
- ▶ ν_n est une mesure de Radon et est σ -finie
- ▶ ν_n est invariante par translation, $\forall A \in \mathcal{B}_{\mathbb{R}^n}, \forall x \in \mathbb{R}^n$
 $\nu_n(x + A) = \nu_n(A)$
- ▶ ν_1 est donnée par la formule suivante pour $A \in \mathcal{B}_{\mathbb{R}}$

$$\nu_1(A) = \inf \left\{ \sum_j (b_j - a_j) : A \subseteq \bigcup_j]a_j, b_j[\right\}$$

Le but de cet exercice est d'aboutir à l'existence d'une partie $A \subseteq \mathbb{R}$ qui n'est pas Lebesgue-mesurable. En particulier, A n'est pas borélienne.

1. Soit B une partie de \mathbb{R} telle que, pour tout $x \in \mathbb{R}$, il existe $b \in B$ tel que $x - b \in \mathbb{Q}$. Montrer que si B est Lebesgue-mesurable alors $\lambda(B) > 0$.
2. Soit B une partie de $[0, 1]$ telle que $\forall x, y \in B, x \neq y \implies x - y \notin \mathbb{Q}$. Montrer qu'il existe une infinité de translatés de B inclus dans $[0, 2]$ et deux à deux disjoints. En déduire que si B est Lebesgue-mesurable alors $\lambda(B) = 0$.
3. Que peut-on dire d'une partie de \mathbb{R} vérifiant les deux propriétés ci-dessus ? De quelle façon peut-on obtenir une telle partie de \mathbb{R} ?

§3 Fonctions mesurables et intégrales

Soit (X, \mathcal{T}) un espace mesurable.

Définition

Une **fonction étagée** est une fonction $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ de la forme

$$f = \sum_{i=1}^k a_i \chi_{A_i}$$

avec $k \geq 0$, $a_i \in \mathbb{R}$, $A_i \in \mathcal{T}$ et χ_A est la fonction caractéristique de A

Une fonction $f : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ est **mesurable** si elle est la limite (simple) de fonctions étagées. Si X métrique et \mathcal{T} tribu des boréliens, on dit que f est **borélienne**

On dit que la fonction $f : X \rightarrow \mathbb{R}^n$ donnée par $f = (f_1, \dots, f_n)$ est **mesurable** si chaque f_i est mesurable

Résultat. Si f est mesurable et positive, on peut trouver une suite croissante de fonctions étagées de limite f

Remarque. Convention de calcul : $0 \cdot (\pm\infty) = 0$ donc le produit est toujours défini dans $\bar{\mathbb{R}}$ (mais pas la somme)

Définition

Soit A une partie de X et $f : A \rightarrow \mathbb{R}$. On dit que f est **mesurable** si A est mesurable et si $f\chi_A$ ($= f$ étendue à X par 0 sur A^c) est mesurable

Résultat. La fonction χ_A est mesurable ssi A est mesurable

Théorème

Soit A un mesurable de X . La fonction $f : A \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ est mesurable ssi on a : $f^{-1}(+\infty) \in \mathcal{T}$, $f^{-1}(-\infty) \in \mathcal{T}$ et, $\forall B \in \mathcal{B}_{\mathbb{R}}$, $f^{-1}(B) \in \mathcal{T}$.

Proposition

- ▶ Si X est métrique alors les fonctions continues sont boréliennes
- ▶ Une limite simple de fonctions mesurables est mesurable
- ▶ Soient $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^k$ borélienne et $f : X \rightarrow \mathbb{R}^n$ mesurable alors $g \circ f$ mesurable
- ▶ Soient $f, g : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ mesurables alors fg est mesurable, λf est mesurable ($\lambda \in \mathbb{R}$) et $f + g$ mesurable là où elle est définie

Proposition

- ▶ Soient f_1, \dots, f_n mesurables alors $\max(f_1, \dots, f_n)$ et $\min(f_1, \dots, f_n)$ sont mesurables
- ▶ Soit (f_n) une suite de fonctions mesurables alors $\sup f_n$, $\inf f_n$, $\limsup f_n$ et $\liminf f_n$ sont mesurables

Théorème

Soit (f_n) une suite de fonctions mesurables. On pose

$$A = \{x \in \mathbb{R} : \text{la suite } (f_n(x)) \text{ converge dans } \bar{\mathbb{R}}\}.$$

Alors la partie A est mesurable et la fonction $f : A \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ définie par $f(x) = \lim_n f_n(x)$ est mesurable

Exercice. Soient (X, \mathcal{T}) un espace mesurable et $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de fonctions mesurables $f_n : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$. Démontrer que l'ensemble des points $x \in X$ tels que la suite $(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ admet une limite est un ensemble mesurable.

Indication : On rappelle que $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ converge ssi $\liminf_{n \rightarrow +\infty} a_n = \limsup_{n \rightarrow +\infty} a_n$.

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

Définition

Soit (f_n) une suite de fonctions mesurables.

- ▶ (f_n) est **de Cauchy en mesure** si, $\forall \epsilon > 0$

$$\lim_{m,n} \mu(\{x \in X : |f_n(x) - f_m(x)| \geq \epsilon\}) = 0$$

- ▶ (f_n) est **de Cauchy presque uniformément** si, $\forall \epsilon > 0$, $\exists A \in \mathcal{T}$ avec $\mu(A) < \epsilon$ et (f_n) de Cauchy uniforme sur $X \setminus A$

Soit f mesurable.

- ▶ $f_n \rightarrow f$ **en mesure** si, $\forall \epsilon > 0$,

$$\lim_n \mu(\{x : |f_n(x) - f(x)| \geq \epsilon\}) = 0$$

- ▶ $f_n \rightarrow f$ **presque uniformément** si, $\forall \epsilon > 0$, $\exists A \in \mathcal{T}$ avec $\mu(A) < \epsilon$ et $f_n \rightarrow f$ uniformément sur $X \setminus A$

Soit $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction Lebesgue-mesurable. Le but de cet exercice est de montrer le résultat suivant : pour tout $\epsilon > 0$, il existe un borélien $B \subseteq [0, 1]$ tel que $\nu_1(B) < \epsilon$ et la restriction de f à $[0, 1] \setminus B$ est continue.

1. Soient F et G deux fermés non vides et disjoints d'un espace métrique (X, d) . Montrer que la fonction

$$x \mapsto \frac{d(x, G)}{d(x, F) + d(x, G)}$$

est une fonction continue sur X qui vaut 1 sur F et 0 sur G .

(On rappelle que $d(x, A)$ est la plus petite distance entre x et les points de A)

2. Soit A un Lebesgue-mesurable. On admet le résultat suivant : il existe F fermé et U ouvert tels que $F \subseteq A \subseteq U$ et $\nu_1(U \setminus F) < \epsilon$. En déduire le résultat pour f la fonction caractéristique de A .
3. Montrer le résultat pour f une fonction étagée.
4. En utilisant le résultat suivant, déduire des questions précédentes le résultat en général :

Théorème d'Egoroff. Soit (X, \mathcal{T}, μ) un espace mesuré. Soit (f_n) une suite de fonctions qui tend simplement vers f . Alors, pour tout $\epsilon > 0$, il existe $A \in \mathcal{T}$ avec $\mu(A) \leq \epsilon$ et (f_n) converge unif. vers f sur $X \setminus A$.

§4 Intégrales

Définition

Soit une **fonction étagée** $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ de représentation $f = \sum_i a_i \chi_{A_i}$. On dit que la représentation est **admissible** si $\forall i \ a_i \geq 0$ (et donc $f \geq 0$). Elle est **canonique** si les a_i sont deux à deux distincts et les A_i sont d.d.d.

Résultat. Une fonction étagée admet une unique représentation canonique (à l'ordre près) et elle est admissible ssi $f \geq 0$.

Définition

Soit f étagée et positive de représentation canonique $f = \sum_i a_i \chi_{A_i}$, on définit l'**intégrale** de f sur X par rapport à μ par

$$\int_X f(x) d\mu(x) = \int_X f d\mu = \int f = \sum_i a_i \mu(A_i) \in [0; \infty]$$

Résultat. Si f étagée et positive de représentation admissible $f = \sum_i b_i \chi_{B_i}$ alors on a $\int f = \sum_i b_i \mu(B_i)$

Définition

Soit $f : X \rightarrow [0; +\infty]$ mesurable. On définit l'intégrale de f sur X par rapport à μ par

$$\int_X f(x) d\mu(x) = \int_X f d\mu = \int f = \sup \left\{ \int u : u \text{ étagée, positive et } u \leq f \right\}$$

On dit que f est intégrable si $\int f$ est finie.

Soit $f : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ mesurable, on dit que f a une intégrale si $\int f_+ - \int f_-$ a un sens où $f_+ = \max(f, 0)$ et $f_- = \max(-f, 0)$ sont mesurables, positives telles que $f = f_+ - f_-$. Dans ce cas, on pose

$$\int_X f d\mu = \int_X f_+ d\mu - \int_X f_- d\mu \in \bar{\mathbb{R}}$$

On dit que f est intégrable si f_+ et f_- sont intégrables. On note $\mathcal{L}^1(X; \mu)$ l'ensemble des fonctions intégrables

Remarque. f intégrable $\iff f$ a une intégrale finie $\iff \int f_+ < +\infty$
et $\int f_- < +\infty \iff \int |f| < +\infty$

Proposition

Soient f et g mesurables ayant une intégrale.

- ▶ Si $f \leq g$ alors $\int f \leq \int g$
- ▶ Si $\lambda \in \mathbb{R}$ alors $\int (f + \lambda g) = \int f + \lambda \int g$

Définition

Soit $A \subseteq X$ mesurable et $f : A \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ mesurable. On dit que f a une **intégrale** si $f\chi_A$ (= extension de f à X en prenant 0 sur A^c) a une intégrale. On pose

$$\int_A f d\mu = \int_X f\chi_A d\mu$$

Résultat. Si A est négligeable alors $\forall f : A \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ mesurable, on a $\int_A f = 0$. De même, si $f : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ mesurable et $f = 0$ p.p. alors $\int f = 0$.

Exercice. Soient (X, μ) un espace mesuré et $f : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ une fonction μ -intégrable.

1. Montrer que f est finie μ -presque partout.
2. Montrer que si $\int_X |f| d\mu = 0$ alors f est nulle μ -presque partout.

Résultat. Soit f mesurable alors f a une intégrale pour μ ssi f a une intégrale pour $\bar{\mu}$ et, dans ce cas, les deux sont égales.

Résultat. Soient f, g mesurables et $f = g$ p.p. Si f a une intégrale alors g a une intégrale et, dans ce cas, les deux sont égales.

Proposition

Soit $f : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ intégrable. On pose $A = f^{-1}(\{\pm\infty\})$. Alors $\mu(A) = 0$.
On pose $g : X \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ définie par $g(x) = f(x)$ si $x \notin A$ et $g(x) = 0$. Alors $\int |f - g| = 0$ et donc $\int f = \int g$.

Remarque. Il suit qu'on peut toujours modifier f intégrable pour qu'elle ne prenne que des valeurs finies sans changer son intégrale.

Définition

Soit $f = (f_1, \dots, f_n) : X \rightarrow \mathbb{R}^n$ mesurable. f est **intégrable** ssi chaque f_i est intégrable et $\int f = (\int f_i)_i$. En particulier, si $f : X \rightarrow \mathbb{C}$ alors $\int f = \int \operatorname{Re}(f) + i \int \operatorname{Im}(f)$

Théorème (Beppo-Levi)

Soit (f_n) une suite croissante de fonctions mesurables positives. On suppose que (f_n) est convergente. Alors, on a $\lim \int f_n = \int \lim f_n$.

Résultat. Si f et g ont une intégrale et les sommes $f + g$ et $\int f + \int g$ existent. Alors, $f + g$ a une intégrale et $\int(f + g) = \int f + \int g$.

Proposition

- ▶ Si f mesurable alors $|f|$ mesurable
- ▶ Si f a une intégrale alors $|\int f| \leq \int |f|$
- ▶ Si f mesurable et g intégrable avec $|f| \leq g$ alors f intégrable
- ▶ Si f intégrable et $\int |f| = 0$ alors $f = 0$ p.p.
- ▶ Si f et g intégrables, $f \leq g$ et $\int f = \int g$ alors $f = g$ p.p.

Proposition (Inégalité de Markov)

Soit f mesurable. Soient $1 \leq p < +\infty$ et $t > 0$. Alors

$$\mu(\{x \in X : |f(x)| > t\}) \leq \frac{1}{t^p} \int |f|^p$$

Notation. L'intégrale de Riemann est dénotée par $\int_a^b f(x) dx$

Théorème

- ▶ Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ continue alors f est Lebesgue-intégrable sur $[a, b]$ et $\int_a^b f(x) dx = \int_{[a,b]} f d\nu_1$
- ▶ Dans le cas $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ continue avec I non compact d'extrémités $a, b \in \bar{\mathbb{R}}$
 - ▶ f est Lebesgue-intégrable ssi l'intégrale $\int_a^b f(x) dx$ converge absolument et dans ce cas $\int_a^b f(x) dx = \int_I f d\nu_1$
 - ▶ Si $f \geq 0$ alors $\int_a^b f(x) dx = \int_I f d\nu_1$
 - ▶ Si $\int_I f d\nu_1$ existe alors on a $\int_a^b f(x) dx = \int_I f d\nu_1$

Remarque. Dans le cas I non compact d'extrémités $a, b \in \bar{\mathbb{R}}$, il est possible que $\int_a^b f(x) dx$ existe mais pas $\int_I f d\nu_1$

Notation. Pour $I \subseteq \mathbb{R}$ intervalle, on notera parfois $\int_I f(x) dx$ plutôt que $\int_I f d\nu_1$ (s'il n'y a pas de risque de confusion)

Théorème (Critère de Lebesgue)

Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$. Alors f est Riemann-intégrable sur $[a, b]$ ssi f est bornée et l'ensemble des discontinuités de f est ν_1 -négligeable.

Résultat. Si $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ est Riemann-intégrable alors f est Lebesgue-intégrable et $\int_a^b f(x) dx = \int_{[a,b]} f d\nu_1$.

Théorème

Soit $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ Lebesgue-intégrable. On pose $F(x) = \int_{[a,x]} f d\nu_1$. Alors F est dérivable ν_1 -p.p. et pour $F'(x) = f(x)$ ν_1 -p.p.

Théorème (Leibniz-Newton pour l'intégrale de Lebesgue)

Soit $F : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ continue, dérivable sur $]a, b[$ avec F' ν_1 -intégrable. Alors, $\forall x \in [a, b]$, $F(x) = F(a) + \int_{[a,x]} F'(t) d\nu_1(t)$.

Remarque. Ce résultat n'est pas forcément vraie si on suppose juste F dérivable ν_1 -p.p (exemple : $F(x) = 0$ sur $[0, 1/2]$ et $= 1$ sur $]1/2, 1]$) et même avec F continue (on peut construire F continue avec $F' = 0$ p.p.)

Exercice. On considère la fonction $f : \left[0; \frac{\pi}{2}\right] \longrightarrow \mathbb{R}$, définie par

$$f(x) = \begin{cases} \sin(x) & \text{si } \cos(x) \in \mathbb{Q} \\ \sin^2(x) & \text{si } \cos(x) \notin \mathbb{Q} \end{cases}$$

1. Montrer que la fonction f est Lebesgue-intégrable sur $\left[0; \frac{\pi}{2}\right]$.
2. Calculer l'intégrale de Lebesgue $\int_{[0; \pi/2]} f(x) d\nu_1(x)$.

§5 Les grands théorèmes

Théorème (Lemme de Fatou)

Soit (f_n) suite de fonctions mesurables ≥ 0 , alors $\int \liminf f_n \leq \liminf \int f_n$

Théorème (Convergence dominée)

Soit (f_n) suite de fonctions mesurables avec $f_n \rightarrow f$ et telle qu'il existe g intégrable avec $\forall n, |f_n| \leq g$. Alors f est intégrable et $\int |f_n - f| \rightarrow 0$ et donc $\int \lim f_n = \lim \int f_n$.

Proposition (Réciproque de la convergence dominée)

Soit (f_n) suite de fonctions mesurables et f mesurable tels que $\int |f_n - f| \rightarrow 0$. Alors il existe une suite extraite (f_{n_k}) et une fonction intégrable g tels que $\forall k, |f_{n_k}| \leq g$ et $f_{n_k} \rightarrow f$ p.p.

Théorème (Convergence dominée p.p.)

Soit (f_n) suite de fonctions mesurables telle qu'il existe g intégrable avec $\forall n, |f_n| \leq g$ p.p et il existe f mesurable avec $f_n \rightarrow f$ p.p. Alors f est intégrable, $\int |f_n - f| \rightarrow 0$ et $\int f_n \rightarrow \int f$.

Intégrales dépendant d'un paramètre

Notation. $f : X \times \Lambda \rightarrow \mathbb{R}$ (avec $\Lambda \subseteq Y$ espace métrique). Pour $\lambda \in \Lambda$, $f(\cdot, \lambda) : X \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto f(x, \lambda)$. De même avec $f(x, \cdot)$ pour $x \in X$.

Théorème

Supposons que

1. *Pour tout $\lambda \in \Lambda$, $f(\cdot, \lambda)$ est mesurable*
2. *Pour presque tout $x \in X$, $f(x, \cdot)$ est continue*
3. *Il existe $g : X \rightarrow \mathbb{R}$ intégrable telle, $\forall \lambda \in \Lambda$, $|f(\cdot, \lambda)| \leq g$ p.p.*

Alors $F : \Lambda \rightarrow \mathbb{R}$ définie par $F(\lambda) = \int f(\cdot, \lambda) d\mu$ est continue.

Proposition

Dans le cas où Λ est un ouvert de $Y = \mathbb{R}^n$, on peut remplacer la condition 3 par

- 3'. *Pour toute boule fermée $\bar{B}(\lambda_0, r) \subseteq \Lambda$, il existe une fonction intégrable g telle que $\forall \lambda \in \bar{B}(\lambda_0, r)$, $|f(\cdot, \lambda)| \leq g$ p.p.*

On suppose Λ ouvert de $Y = \mathbb{R}^n$. Pour la variable $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \Lambda$, on dénote par $\partial_j = \frac{\partial}{\partial \lambda_j}$ la dérivée partielle

Théorème

Soit $j \in \{1, \dots, n\}$. Supposons que

1. Pour tout $\lambda \in \Lambda$, la fonction $f(\cdot, \lambda)$ est intégrable
Donc la fonction $F(\lambda) = \int f(\cdot, \lambda) d\mu$ existe
2. Pour tout $x \in X$, la fonction $\partial_j f(x, \cdot)$ existe
3. Pour toute boule fermée $\bar{B}(\lambda_0, r) \subseteq \Lambda$, il existe une fonction intégrable g telle que $\forall \lambda \in \bar{B}(\lambda_0, r), |\partial_j f(\cdot, \lambda)| \leq g$ p.p.

Alors $\partial_j F$ existe et $\partial_j F(\lambda) = \int \partial_j f(\cdot, \lambda) d\mu$

Théorème

Soit (f_n) une suite de fonctions intégrables telles que $\sum_n \int |f_n| < +\infty$. Alors $\sum_n f_n(x)$ converge p.p. et $\sum_n \int f_n = \int f$ avec

$$f(x) = \begin{cases} \sum_n f_n(x) & \text{si la série converge} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Exercice.

1. Montrer que $f: x \mapsto \frac{\sin x}{e^x - 1}$ est Lebesgue-intégrable sur $[0, \infty[$.
2. Montrer que, pour tout $x > 0$, on peut écrire $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nx} \sin x$. Et pour $x = 0$?
3. En déduire que $\int_0^{\infty} \frac{\sin x}{e^x - 1} dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + 1}$.

Exercice. Pour $y \geq 0$, on pose $F(y) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x^2 y}}{1 + x^2} dx$.

1. Montrer que F est continue sur \mathbb{R}_+ .
2. Calculer $F(0)$ et déterminer $\lim_{y \rightarrow \infty} F(y)$.
3. Montrer que F est dérivable sur \mathbb{R}_+^* .
4. Montrer que F est solution sur \mathbb{R}_+^* d'une équation différentielle du premier ordre s'exprimant à l'aide du nombre $I = \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx$.
5. En déduire, sous forme intégrale, une expression de $F(y)$ pour $y > 0$.
6. En déduire la valeur de I .

§6 Mesures produit

Soient (X, \mathcal{T}, μ) et (Y, \mathcal{S}, ν) deux espaces mesurés.

Définition

La **tribu produit** $\mathcal{T} \otimes \mathcal{S}$ est la tribu de $X \times Y$ engendrée par les **pavés** $A \times B$ avec $A \in \mathcal{T}$ et $B \in \mathcal{S}$.

Pour $E \in \mathcal{T} \otimes \mathcal{S}$, la **coupe** de E en $x \in X$ est $E_x = \{y \in Y : (x, y) \in E\}$ et la **coupe** de E en $y \in Y$ est $E^y = \{x \in X : (x, y) \in E\}$.

Résultat. $\mathcal{B}_{\mathbb{R}^n} \otimes \mathcal{B}_{\mathbb{R}^m} = \mathcal{B}_{\mathbb{R}^{n+m}}$

Résultat. Soit $E \in \mathcal{T} \otimes \mathcal{S}$ alors $\forall x, E_x \in \mathcal{S}$ et $\forall y, E^y \in \mathcal{T}$

Proposition

*Supposons μ et ν σ -finies alors il existe une unique mesure $\mu \otimes \nu$ sur $\mathcal{T} \otimes \mathcal{S}$, appelée **mesure produit**, telle que $\mu \otimes \nu(A \times B) = \mu(A) \nu(B)$, pour $A \in \mathcal{T}$ et $B \in \mathcal{S}$. De plus, on a $\forall E \in \mathcal{T} \otimes \mathcal{S}$*

$$\mu \otimes \nu(E) = \int_X \nu(E_x) d\mu(x) = \int_Y \mu(E^y) d\nu(y).$$

Résultat. Si seulement une des deux mesures est σ -finie, on a bien l'existence mais pas l'unicité (ni la deuxième propriété)

Remarque. Pour μ et ν σ -finies, on a $\bar{\mu} \otimes \bar{\nu} = \overline{\mu \otimes \nu}$.

Théorème (Tonelli)

Soit $f : X \times Y \rightarrow [0, +\infty]$ fonction $\mathcal{T} \otimes \mathcal{S}$ -mesurable. Alors les fonctions

$$y \mapsto \int_X f(\cdot, y) d\mu \quad \text{et} \quad x \mapsto \int_Y f(x, \cdot) d\nu$$

sont mesurables (pour \mathcal{S} et \mathcal{T} respectivement) et

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

Corollaire

Soit $f : X \times Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ mesurable. Alors f est intégrable ssi

$$\int_X \left(\int_Y |f(x, y)| d\nu(y) \right) d\mu(x) < +\infty$$

ce qui est bien sûr équivalent à $\int_Y \left(\int_X |f(x, y)| d\mu(x) \right) d\nu(y) < +\infty$

Théorème (Fubini)

Soit $f : X \times Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ intégrable. Alors

- Pour presque tout $y \in Y$, la fonction $f(\cdot, y)$ est μ -intégrable
- La fonction g est ν -intégrable avec

$$g(y) = \begin{cases} \int_X f(\cdot, y) d\mu & \text{si l'intégrale existe} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

► On a
$$\int_{X \times Y} f d\mu \otimes \nu = \int_Y g d\nu$$

(Et un énoncé analogue avec x et y échangés)

Notation. Si $B \subseteq \mathbb{R}^n$ est un borélien et $f : B \rightarrow \mathbb{R}$ a une intégrale pour la mesure de Lebesgue λ_n , on note par abus (s'il n'y pas de risque de confusion) $\int_B f d\lambda_n = \int_B f(x) dx = \int_B f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \cdots dx_n$.

Pour $B = \mathbb{R}^n$, on a

$$\int_{\mathbb{R}^n} f d\lambda_n = \int_{\mathbb{R}} \left(\cdots \int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \right) dx_2 \cdots \right) dx_n$$

Théorème (Tonelli et Fubini, versions locales)

Soit $E \subseteq X \times Y$ mesurable et $f : E \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ mesurable.

- (Tonelli) Supposons $f \geq 0$. Alors, $y \mapsto \int_{E^y} f(\cdot, y) d\mu$ est mesurable et

$$\int_E f d\mu \otimes \nu = \int_Y \left(\int_{E^y} f d\mu \right) d\nu = \int_Z \left(\int_{E^y} f d\mu \right) d\nu$$

pour Z mesurable avec $Z \supseteq \{y \in Y : \exists x \in X \text{ avec } (x, y) \in E\}$
(Et un énoncé analogue avec x et y échangés)

- (Fubini) Supposons f intégrable. Alors, pour presque tout y , $f(\cdot, y)$ est intégrable sur E^y , la fonction g est ν -intégrable avec

$$g(y) = \begin{cases} \int_{E^y} f(\cdot, y) d\mu & \text{si l'intégrale existe} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

et

$$\int_E f d\mu \otimes \nu = \int_Y g d\nu = \int_Z g d\nu$$

pour Z mesurable avec $Z \supseteq \{y \in Y : \exists x \in X \text{ avec } (x, y) \in E\}$
(Et un énoncé analogue avec x et y échangés)

Exercice.

Soit μ la mesure de comptage sur $([0, 1], \mathcal{B}([0, 1]))$.

1. Soit $\Delta = \{(x, x) ; x \in [0, 1]\}$. Est-ce que Δ est un borélien de \mathbb{R}^2 ? de $[0, 1]^2$?
2. Justifier l'existence des intégrales itérées suivantes et les calculer :

$$I_1 = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} \chi_{\Delta}(x, y) d\lambda(x) \right) d\mu(y)$$
$$I_2 = \int_{[0,1]} \left(\int_{[0,1]} \chi_{\Delta}(x, y) d\mu(y) \right) d\lambda(x).$$

3. Quelle conclusion peut-on tirer de cet exercice ?

§7 Changements de variables

Proposition

Soit $A \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$ et soit $E \subseteq \mathbb{R}^n$. Alors, $A(E)$ est borélien ssi E est borélien et, dans ce cas, $\lambda_n(A(E)) = |\det(A)| \lambda_n(E)$.

Résultat. Si A est non inversible alors $\forall E \subseteq \mathbb{R}^n$, $A(E)$ est négligeable

Définition

Soient U et V deux ouverts de \mathbb{R}^n . Une application $\Phi : U \rightarrow V$ est un \mathcal{C}^1 -diffeomorphisme si

- ▶ $\Phi = (\Phi_1, \dots, \Phi_n)$ a des dérivées partielles continues,
- ▶ Φ est bijective,
- ▶ Le **déterminant jacobien** de Φ est non nul en tout point de U

$$\det J_\Phi = \det \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial x_j} \right)_{i,j} = \det \begin{pmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \Phi_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \Phi_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \Phi_n}{\partial x_1} & \frac{\partial \Phi_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \Phi_n}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

Théorème (changement de variables)

Soit $\Phi : U \rightarrow V$ un \mathcal{C}^1 -diffeomorphisme et soient $f : V \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$. On pose $g = |\det J_\Phi| (f \circ \Phi) : U \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$. Alors, on a

- ▶ g est borélienne ssi f est borélienne,
- ▶ g est Lebesgue-mesurable ssi f est Lebesgue-mesurable,
- ▶ g a une intégrale ssi f a une intégrale et on a

$$\int_V f \, d\lambda_n = \int_U g \, d\lambda_n = \int_{\Phi^{-1}(V)} |\det J_\Phi| (f \circ \Phi) \, d\lambda_n$$

Corollaire

Supposons Φ continue sur U_1 ouvert avec $U_1 \supseteq U$ (et toujours $\Phi : U \rightarrow V$ un \mathcal{C}^1 -diffeomorphisme). Soit $E \subseteq U_1 \setminus U$ fermé et négligeable, $f : V \cup \Phi(E) \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$. On pose $g = |\det J_\Phi| (f \circ \Phi) : U \cup E \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$. Alors, on a les mêmes résultats et

$$\int_{V \cup \Phi(E)} f \, d\lambda_n = \int_{\Phi^{-1}(V \cup \Phi(E))} |\det J_\Phi| (f \circ \Phi) \, d\lambda_n = \int_{\Phi^{-1}(V)} |\det J_\Phi| (f \circ \Phi) \, d\lambda_n$$

Remarque. En général, on prendra $E = \partial U$ (frontière)

Coordonnées polaires

$\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ avec $\Phi(r, \theta) = (r \cos(\theta), r \sin(\theta))$

$U =]0, +\infty[\times]0, 2\pi[, V = \mathbb{R}^2 \setminus [0, \infty[\times \{0\}$

$$\int_{\mathbb{R}^2} f(x, y) d\lambda_2(x, y) = \int_{[0, +\infty[\times [0, 2\pi[} f(r \cos(\theta), r \sin(\theta)) \cdot r d\lambda_2(r, \theta)$$

Coordonnées sphériques

$\Phi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ avec $\Phi(r, \phi, \theta) = (r \cos(\phi) \cos(\theta), r \cos(\phi) \sin(\theta), r \sin(\phi))$

$U =]0, +\infty[\times]-\pi/2, \pi/2[\times]0, 2\pi[$

$V = \mathbb{R}^3 \setminus (((0, 0) \times \mathbb{R}) \cup (]0, \infty[\times \{0\} \times \mathbb{R}))$

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^3} f(x, y, z) d\lambda_3(x, y, z) = \\ \int_{[0, +\infty[\times [-\pi/2, \pi/2] \times [0, 2\pi[} f(r \cos(\phi) \cos(\theta), r \cos(\phi) \sin(\theta), r \sin(\phi)) \cdot r^2 \cos(\phi) d\lambda_3(r, \phi, \theta) \end{aligned}$$

Coordonnées cylindriques

$\Phi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ avec $\Phi(r, \theta, z) = (r \cos(\theta), r \sin(\theta), z)$

$U =]0, +\infty[\times]0, 2\pi[\times \mathbb{R}$, $V = \mathbb{R}^3 \setminus ([0, \infty[\times \{0\} \times \mathbb{R})$

$$\int_{\mathbb{R}^3} f(x, y, z) d\lambda_3(x, y, z) = \int_{[0, +\infty[\times [0, 2\pi[\times \mathbb{R}} f(r \cos(\theta), r \sin(\theta), z) \cdot r d\lambda_3(r, \phi, z)$$

Proposition (Comparaison avec des fonctions classiques)

Soient $a, b \in \mathbb{R}$. On se place dans l'espace métrique \mathbb{R}^n . Alors

- ▶ $x \mapsto 1/\|x\|^a$ est intégrable sur $B(0, 1) \setminus \{0\}$ ssi $a < n$
- ▶ $x \mapsto 1/\|x\|^a$ est intégrable sur $\mathbb{R}^n \setminus B(0, 1)$ ssi $a > n$
- ▶ $x \mapsto 1/(\|x\|^a |\ln \|x\||^b)$ est intégrable sur $B(0, 1/2) \setminus \{0\}$ ssi $a < n$ ou ($a = n$ et $b > 1$)
- ▶ $x \mapsto 1/(\|x\|^a |\ln \|x\||^b)$ est intégrable sur $\mathbb{R}^n \setminus B(0, 2)$ ssi $a > n$ ou ($a = n$ et $b > 1$)

Fonction Gamma d'Euler.

On rappelle la définition de la fonction Gamma d'Euler :

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} e^{-t} dt.$$

1. Montrer que, $\forall x > 0, \forall y > 0$, l'application $t \mapsto t^{x-1}(1-t)^{y-1}$ est λ_1 -intégrable sur $]0; 1[$.

Pour $x > 0, y > 0$, on pose

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1}(1-t)^{y-1} dt \quad (\text{fonction Bêta d'Euler})$$

2. Soient $x > 0, y > 0$ et $I = \int_{\mathbb{R}_+^* \times \mathbb{R}_+^*} t^{x-1} s^{y-1} e^{-(t+s)} ds dt$, calculer I en utilisant le changement de variables dans \mathbb{R}^2 : $u = t$ et $v = t + s$.
3. En calculant I d'une autre manière, établir pour $x, y > 0$, l'identité

$$B(x, y) = \frac{\Gamma(x)\Gamma(y)}{\Gamma(x+y)}.$$