

Chapter 10

Transformation de Fourier, fonction caractéristique

10.1 Introduction et notations

La notion de série de Fourier permet d'analyser les fonctions définies d'un compact $[a, b]$ de \mathbb{R} dans \mathbb{R} (ou \mathbb{C}). La notion de transformée de Fourier permet d'analyser les fonctions définies de \mathbb{R} (ou \mathbb{R}^N) dans \mathbb{R} (ou \mathbb{C}). La transformée de Fourier est une notion employée par exemple en théorie du signal, en théorie des probabilités et pour l'analyse des équations aux dérivées partielles.

Dans toute la suite, on considèrera l'espace mesuré $(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ et on notera $d\lambda_N(x) = dx$. Soit $N \geq 1$, les espaces $\mathcal{L}_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ et $L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ ont été définis dans la section 4.10 et les espaces $\mathcal{L}_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ et $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ ont été définis dans la section 6.2. On rappelle aussi que si f est une fonction définie de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C} , la fonction f est mesurable si et seulement si ses parties réelle et imaginaire sont mesurables (chaque ensemble, \mathbb{R}^N , \mathbb{R} ou \mathbb{C} , étant muni de sa tribu borélienne). On peut, bien sûr, aussi définir les espaces $\mathcal{L}_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ et $L_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ pour tout $p \in [1, \infty]$.

Définition 10.1 (Espaces $L_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$) Soit $N \geq 1$, $p \in [1, \infty]$ et f une fonction mesurable de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C} (c'est-à-dire $f^{-1}(A) \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^N)$ pour tout $A \in \mathcal{B}(\mathbb{C})$). On dit que $f \in \mathcal{L}_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ si $|f| \in \mathcal{L}_{\mathbb{R}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ et on définit $\|f\|_p$ par $\|f\|_p = \||f|\|_p$ où $\||f|\|_p$ est la norme de $|f|$ dans $\mathcal{L}_{\mathbb{R}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ (vue au chapitre 6). L'espace $L_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ est l'espace $\mathcal{L}_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ quotienté par la relation d'équivalence " $= p.p.$ ". C'est un espace de Banach (complexe), c'est-à-dire un e.v.n. (sur \mathbb{C}) complet.

Remarque 10.1 Soit $N \geq 1$, $p \in [1, \infty]$ et f une fonction définie de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C} . Il est facile de voir que $f \in \mathcal{L}_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ si et seulement si ses parties réelle et imaginaire sont dans $\mathcal{L}_{\mathbb{R}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$.

10.2 Transformation de Fourier dans L^1

10.2.1 Définitions et premières propriétés

Soit $N \geq 1$. Pour $x = (x_1, \dots, x_N)^t \in \mathbb{R}^N$ et $t = (t_1, \dots, t_N)^t \in \mathbb{R}^N$, on note $x \cdot t$ le produit scalaire euclidien de x et t , c'est-à-dire $x \cdot t = \sum_{i=1}^N x_i t_i$. Dans ce chapitre, On note aussi $L_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N)$ l'espace

$L_{\mathbb{C}}^p(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$, pour $p \in [1, \infty]$.

Définition 10.2 (Transformée de Fourier dans L^1)

Soit $N \geq 1$ et $f \in L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N)$. Pour $t \in \mathbb{R}^N$, l'application $x \mapsto e^{-ix \cdot t} f(x)$ (définie de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C}) appartient à $L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N)$. On définit alors $\hat{f}(t)$ par :

$$\hat{f}(t) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int f(x) e^{-ix \cdot t} dx. \quad (10.1)$$

La fonction \hat{f} (définie de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C}) s'appelle transformée de Fourier de f .

On note $C_0(\mathbb{R}^N, \mathbb{C}) = \{g \in C(\mathbb{R}^N, \mathbb{C}) \text{ t.q. } g(t) \rightarrow 0 \text{ quand } |t| \rightarrow +\infty\}$. On rappelle que $C_0(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ est un espace de Banach quand il est muni de la norme de la convergence uniforme, c'est-à-dire :

$$\|\varphi\|_u = \max_{x \in \mathbb{R}^N} |\varphi(x)|.$$

Proposition 10.1 Soit $N \geq 1$. Soit F l'application qui à f (appartenant à $L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N)$) associe sa transformée de Fourier. F est une application linéaire continue de $L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N)$ dans $C_0(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$.

DÉMONSTRATION :

- Le théorème de continuité sous le signe \int (théorème 4.9) appliqué à la fonction $(x, t) \mapsto e^{-ix \cdot t} f(x)$ entraîne immédiatement que \hat{f} est continue.
- On montre maintenant que $\hat{f} \in C_0(\mathbb{R}, \mathbb{R})$.

- Cas $N = 1$. On remarque que pour $t \neq 0$, on a, comme $e^{i\pi} = -1$,

$$\hat{f}(t) = -(2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int e^{-i(x - \frac{\pi}{t})t} f(x) dx,$$

et donc avec un changement de variable simple,

$$\hat{f}(t) = -(2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int e^{-iyt} f(y + \frac{\pi}{t}) dy.$$

On en déduit que

$$2\hat{f}(t) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int e^{-ixt} (f(x) - f(x + \frac{\pi}{t})) dx$$

et donc que $|\hat{f}(t)| \leq \frac{1}{2} (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \|f(\cdot) - f(\cdot + \frac{\pi}{t})\|_1$. Le théorème de continuité en moyenne dans L^1 (théorème 5.6) donne alors le fait que $\hat{f}(t) \rightarrow 0$ quand $|t| \rightarrow \infty$.

- Cas $N > 1$. On reprend la même méthode. Pour $t \neq 0$, $t = (t_1, \dots, t_N)^t$, il existe $j \in \{1, \dots, N\}$ t.q. $|t_j| = \max_{k=1, \dots, N} |t_k|$. On a alors, comme $e^{i\pi} = -1$, en notant e_j le j -ième vecteur de base de \mathbb{R}^N ,

$$\hat{f}(t) = -(2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int e^{-i(x - \frac{\pi}{t_j} e_j) \cdot t} f(x) dx,$$

et donc avec un changement de variable simple,

$$\hat{f}(t) = -(2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int e^{-iy \cdot t} f(y + \frac{\pi}{t_j} e_j) dy.$$

On en déduit que $|\hat{f}(t)| \leq \frac{1}{2} (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \|f(\cdot) - f(\cdot + \frac{\pi}{t_j} e_j)\|_1$. Le théorème de continuité en moyenne dans L^1 (théorème 8.2) donne alors le fait que $\hat{f}(t) \rightarrow 0$ quand $|t| \rightarrow \infty$.

La transformée a la propriété intéressante de transformer la convolution en produit. Ceci est montré dans la proposition suivante.

Proposition 10.2 Soient f et $g \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N)$, alors $\widehat{f \star g} = (2\pi)^{\frac{N}{2}} \hat{f} \hat{g}$.

DÉMONSTRATION : Par la proposition 7.9, on $f \star g \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N)$ et pour p.p. $x \in \mathbb{R}^N$, $f \star g(x) = \int f(x-y)g(y)dy$. On a donc, pour tout $t \in \mathbb{R}^N$,

$$\widehat{f \star g}(t) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int \left(\int f(x-y)g(y)dy \right) e^{-ix \cdot t} dx = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int \left(\int f(x-y)g(y)e^{-i(x-y) \cdot t} e^{-iy \cdot t} dy \right) dx.$$

En appliquant le théorème de Fubini (théorème 7.3) à la fonction $(x, y) \mapsto f(x-y)g(y)e^{-i(x-y) \cdot t} e^{-iy \cdot t}$ (qui est bien intégrable sur \mathbb{R}^{2N} car son module est la fonction $(x, y) \mapsto |f(x-y)g(y)|$ dont l'intégrale sur \mathbb{R}^{2N} est égale à $\|f\|_1 \|g\|_1$), on obtient :

$$\widehat{f \star g}(t) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int \left(\int f(x-y)e^{-i(x-y) \cdot t} dx \right) g(y)e^{-iy \cdot t} dy.$$

Comme, pour tout $y \in \mathbb{R}^N$, $\int f(x-y)e^{-i(x-y) \cdot t} dx = \int f(z)e^{-iz \cdot t} dz = (2\pi)^{\frac{N}{2}} \hat{f}(t)$, on en déduit :

$$\widehat{f \star g}(t) = \hat{f}(t) \int g(y)e^{-iy \cdot t} dy = (2\pi)^{\frac{N}{2}} \hat{f}(t) \hat{g}(t),$$

ce qui est le résultat annoncé. ■

10.2.2 Théorème d'inversion

Il est naturel de se poser les deux questions suivantes :

- (i) La transformée de Fourier d'une fonction f caractérise-t-elle la fonction f (c'est-à-dire si $\hat{f} = \hat{g}$, a-t-on $f = g$ p.p.)?
- (ii) peut-on retrouver la fonction à partir de sa transformée de Fourier ?

Les réponses à ces questions sont fournies par le théorème d'inversion de Fourier :

Théorème 10.1 (Inversion partielle de la transformée de Fourier) Soit $N \geq 1$ et $f \in L^1_{\mathbb{C}}$ t.q. $\hat{f} \in L^1_{\mathbb{C}}$. On a alors $f = \widehat{\hat{f}(\cdot)}$ p.p., c'est-à-dire :

$$f(t) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int \hat{f}(x)e^{ix \cdot t} dx, \text{ pour presque tout } t \in \mathbb{R}^N.$$

DÉMONSTRATION : La démonstration fait l'objet de l'exercice 10.1. ■

Une conséquence de ce théorème est l'injectivité de l'application F , qui fournit donc une réponse positive à la question (i). En effet, soient f et $g \in L^1_{\mathbb{C}}$ t.q. $\hat{f} = \hat{g}$; alors par linéarité, $\widehat{f-g} = 0$ et donc $\widehat{f-g} \in L^1_{\mathbb{C}}$. En appliquant le théorème d'inversion, on a donc $f = g$ p.p..

Ce théorème apporte aussi une réponse partielle à la question (ii) : on peut calculer f à partir de \hat{f} dès que $\hat{f} \in L^1$. Il faut remarquer à ce propos que L^1 n'est pas stable par transformation de Fourier (voir exercice 10.2).

10.2.3 Régularité et décroissance à l'infini

Proposition 10.3 (Différentiabilité, dimension 1)

1. Soit $f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}) \cap C^1(\mathbb{R}, \mathbb{C})$ t.q. $f' \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R})$ (où f' est la dérivée de f). Alors, pour tout $t \in \mathbb{R}$, $\widehat{f}'(t) = (it)\widehat{f}(t)$.
2. Soit $f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R})$ t.q. $(\cdot)f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R})$ (où $(\cdot)f$ est l'application qui à $x \in \mathbb{R}$ associe $xf(x)$). Alors, $\widehat{f} \in C^1(\mathbb{R}, \mathbb{C})$ et, pour tout $t \in \mathbb{R}$, $\widehat{f}'(t) = \widehat{(-i \cdot)f}(t)$.

DÉMONSTRATION : La démonstration du premier item consiste à faire une intégration par parties sur l'intervalle $[-n, n]$ puis à faire tendre n vers l'infini (en remarquant que $f(\pm n) \rightarrow 0$, quand $n \rightarrow \infty$, voir l'exercice 5.8).

Le deuxième item est une conséquence immédiate du théorème 4.10 (théorème de dérivation sous le signe \int). ■

La transformation de Fourier “transforme” donc la dérivation en multiplication par la fonction $(i \cdot)$, et la multiplication par $(-i \cdot)$ en dérivation. Cette propriété est utilisée, par exemple, pour la résolution d'équations différentielles (qui sont ainsi transformées en équations algébriques).

Cette propriété se généralise au cas de la dimension N et pour un ordre k de dérivation quelconque. On introduit pour ce faire les notations suivantes : soient $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)^t \in \mathbb{N}^N$ un “multi-indice” et f une fonction de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C} . On définit $|\alpha| = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N$ et :

$$D^\alpha f = \left(\frac{\partial^{\alpha_1}}{\partial x_1^{\alpha_1}} \frac{\partial^{\alpha_2}}{\partial x_2^{\alpha_2}} \cdots \frac{\partial^{\alpha_N}}{\partial x_N^{\alpha_N}} \right) f.$$

Proposition 10.4 (Différentiabilité, dimension N)

1. Soit $N \geq 1$ et $k \geq 1$. Soit $f \in C^k(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ t.q. $D^\alpha f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N)$ pour tout $\alpha \in \mathbb{N}^N$ t.q. $|\alpha| \leq k$. Alors, $\widehat{D^\alpha f}(t) = (it)^\alpha \widehat{f}(t)$ pour tout $t \in \mathbb{R}$ et pour tout $\alpha \in \mathbb{N}^N$ t.q. $|\alpha| \leq k$, avec $(it)^\alpha = (it_1)^{\alpha_1} (it_2)^{\alpha_2} \dots (it_N)^{\alpha_N}$.
2. Soit f t.q. $(\cdot)^\alpha f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N)$ pour tout $\alpha \in \mathbb{N}^N$ tel que $|\alpha| \leq k$. Alors, $\widehat{f} \in C^k(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ et $D^\alpha \widehat{f} = \widehat{(-i \cdot)^\alpha f}$ pour tout $\alpha \in \mathbb{N}^N$ tel que $|\alpha| \leq k$.

La proposition 10.4 montre que la dérivabilité de f entraîne la décroissance de \widehat{f} à l'infini (“plus f est dérivable, plus \widehat{f} décroît vite à l'infini”), et réciproquement. Cette remarque incite à définir l'espace des fonctions à décroissance rapide (souvent appelé “espace de Schwartz”), noté $\mathcal{S}(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ ou \mathcal{S}_N en abrégé.

$$\mathcal{S}(\mathbb{R}^N, \mathbb{C}) = \{f \in C^\infty(\mathbb{R}^N, \mathbb{C}) \text{ t.q. pour tout } \alpha \text{ et } \beta \in \mathbb{N}^N, \sup_{x \in \mathbb{R}^N} |(x)^\alpha D^\beta f(x)| < +\infty\}.$$

On va montrer l'invariance par transformation de Fourier de cet espace. On commence par remarquer que $\mathcal{S}_N \subset L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N)$. En effet, si $f \in \mathcal{S}_N$, en prenant des choix convenables de α et β dans la définition de \mathcal{S}_N , on remarque qu'il existe $C \in \mathbb{R}$ t.q. $(1 + |x|^{N+1})|f(x)| \leq C$. On en déduit que $f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N)$. Plus généralement, si $f \in \mathcal{S}_N$, on remarque que $(\cdot)^\beta D^\alpha f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N)$ pour tout $\alpha, \beta \in \mathbb{N}^N$. On obtient alors la proposition 10.5.

Proposition 10.5 Soit $N \geq 1$ et $f \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$. Pour tout $\alpha, \beta \in \mathbb{N}^N$ on a :

$$D^\alpha \widehat{((-i \cdot)^\beta f)} = (i \cdot)^\alpha \widehat{(-i \cdot)^\beta f} = (i \cdot)^\alpha D^\beta \hat{f}, \quad (10.2)$$

$$\widehat{(-i \cdot)^\alpha D^\beta f} = D^\alpha \widehat{D^\beta f} = D^\alpha [(i \cdot)^\beta \hat{f}]. \quad (10.3)$$

DÉMONSTRATION : La démonstration est une adaptation simple de celle de la proposition 10.4. ■

La proposition 10.5 et le théorème 10.1 nous permettent alors de remarquer que la transformée de Fourier est une bijection de \mathcal{S}_N dans \mathcal{S}_N .

Proposition 10.6 Soit $N \geq 1$. L'application F qui à f associe sa transformée de Fourier est une bijection de \mathcal{S}_N dans \mathcal{S}_N . De plus, pour tout $f \in \mathcal{S}_N$, on a $f = \widehat{\hat{f}}(-\cdot)$.

DÉMONSTRATION : En utilisant la proposition 10.5, on montre facilement que F envoie \mathcal{S}_N dans \mathcal{S}_N . Le théorème d'inversion (théorème 10.1) donne alors que f est injective et que $f = \widehat{\hat{f}}(-\cdot)$ pour tout $f \in \mathcal{S}_N$. De cette dernière formule, on déduit que F est surjective (et donc bijective) de \mathcal{S}_N dans \mathcal{S}_N . ■

10.3 Transformée de Fourier d'une mesure signée

Il est facile d'étendre la définition de la transformation de Fourier à une mesure signée sur les boréliens de \mathbb{R}^N . Plus précisément, si m est une mesure signée sur les boréliens de \mathbb{R}^N ($N \geq 1$), la définition 10.3 définit la fonction \hat{m} (continue et bornée de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C}) et, si $m = f\lambda_N$, avec $f \in L^1_{\mathbb{R}}(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$ (c'est-à-dire que m est la mesure signée de densité f par rapport à la mesure de Lebesgue sur les boréliens de \mathbb{R}^N), on a $\hat{m}(t) = \hat{f}(t)$ pour tout $t \in \mathbb{R}^N$.

Définition 10.3 (Transformée de Fourier d'une mesure signée)

Soit $N \geq 1$ et m une mesure signée sur les boréliens de \mathbb{R}^N . Soit $t \in \mathbb{R}^N$, l'application $x \mapsto e^{-ix \cdot t}$ (définie de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C}) appartient à $L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), m)$ (car elle est continue, donc borélienne, et bornée). On définit alors $\hat{m}(t)$ par :

$$\hat{m}(t) = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int e^{-ix \cdot t} dm(x). \quad (10.4)$$

La fonction \hat{m} (définie de \mathbb{R}^N dans \mathbb{C}) s'appelle transformée de Fourier de m .

On rappelle que $C_b(\mathbb{R}^N, \mathbb{C}) = \{g \in C(\mathbb{R}^N, \mathbb{C}) \text{ t.q. } \sup_{t \in \mathbb{R}^N} |g(t)| < \infty\}$ et que $C_b(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ est un espace de Banach quand il est muni de la norme de la convergence uniforme.

Proposition 10.7 Soit $N \geq 1$. Soit m une mesure signée sur les boréliens de \mathbb{R}^N . La fonction \hat{m} appartient à $C_b(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$.

DÉMONSTRATION : Le fait que \hat{m} est bornée est simple. On utilise la décomposition de Hahn (proposition 2.6), c'est-à-dire le fait que $m = m^+ - m^-$, où m^\pm sont deux mesures finies étrangères. On remarque alors que, pour tout $t \in \mathbb{R}^N$, on a $|\hat{m}(t)| \leq |m|(\mathbb{R}^N) < +\infty$, où $|m| = m^+ + m^-$.

La fait que \hat{m} est continue est une conséquence immédiate du théorème de continuité sous le signe \int (théorème 4.9) appliqué à la fonction $(x, t) \mapsto e^{-ix \cdot t}$ (et avec les mesures finies m^\pm). ■

Comme pour la transformation de Fourier dans L^1 , on peut se demander si \hat{m} caractérise la mesure signée m et si on peut retrouver m à partir de \hat{m} . La proposition suivante s'intéresse à ces deux questions.

Proposition 10.8 Soit $N \geq 1$.

1. Soit m et μ deux mesures signées sur les boréliens de \mathbb{R}^N . On suppose que $\hat{m} = \hat{\mu}$. alors, $m = \mu$.
2. Soit m une mesure signée sur les boréliens de \mathbb{R}^N . On suppose que $\hat{m} \in \mathcal{L}_\mathbb{C}^1(\mathbb{R}^N)$. Alors, $m = f\lambda_N$ avec $f = \hat{m}(-\cdot)$ p.p. (c'est-à-dire p.p. pour la mesure λ_N).

DÉMONSTRATION : La démonstration de cette proposition fait l'objet de l'exercice 10.5. ■

10.4 Transformation de Fourier dans L^2

On aimerait ici définir la transformée de Fourier d'un élément de $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N) = L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N, \mathcal{B}(\mathbb{R}^N), \lambda_N)$. On rappelle que l'espace $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ est un espace de Hilbert et que le produit scalaire sur $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ est défini par (en notant $dt = d\lambda_N(t)$) :

$$(f/g)_2 = \int f(t)\overline{g(t)}dt.$$

Il est clair que la définition de \hat{f} qu'on a donnée pour $f \in L_\mathbb{C}^1(\mathbb{R}^N)$ ne s'applique pas pour un élément de $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$. Pour définir la transformée de Fourier d'un élément de $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$, on va utiliser la densité de \mathcal{S}_N dans $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ (on peut montrer que $\mathcal{S}_N \subset L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$, comme on a montré que $\mathcal{S}_N \subset L_\mathbb{C}^1(\mathbb{R}^N)$). On va d'abord remarquer que la transformée de Fourier envoie \mathcal{S}_N dans $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ et que c'est une isométrie pour la norme de $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$. On utilisera ensuite la densité de \mathcal{S}_N dans $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ pour définir la transformée de Fourier des éléments de $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$.

Proposition 10.9 Soit $N \geq 1$ et $f, g \in \mathcal{S}_N$ (on a donc, en particulier, $f, g \in L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$). Alors $\hat{f}, \hat{g} \in L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ et $(f/g)_2 = (\hat{f}/\hat{g})_2$. En particulier, $\|f\|_2 = \|\hat{f}\|_2$.

DÉMONSTRATION : Soit $f, g \in \mathcal{S}_N$. Comme $f, \hat{f} \in \mathcal{S}_N \subset L_\mathbb{C}^1(\mathbb{R}^N)$, on peut appliquer le théorème d'inversion (théorème 10.1). Il donne $f = \widehat{\hat{f}}(-\cdot)$ et donc :

$$(f/g)_2 = \int \widehat{\hat{f}}(-t)\overline{\hat{g}(t)}dt = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int \left(\int e^{ix \cdot t} \hat{f}(x) dx \right) \overline{\hat{g}(t)} dt.$$

On utilise maintenant le théorème de Fubini (théorème 7.3). Il s'applique car $\hat{f}, \hat{g} \in L_\mathbb{C}^1(\mathbb{R}^N)$. On obtient :

$$(f/g)_2 = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \int \left(\int e^{ix \cdot t} \overline{\hat{g}(t)} dt \right) \hat{f}(x) dx = \int \overline{\hat{g}(t)} \hat{f}(t) dt = (\hat{f}/\hat{g})_2,$$

ce qui termine la démonstration. ■

La proposition 10.9 permet de définir, par un argument de densité, la transformée de Fourier dans $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$.

Théorème 10.2 Soit $N \geq 1$. Il existe une application linéaire continue \bar{F} de $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ dans $L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$ t.q. :

1. Si $f \in L_\mathbb{C}^1(\mathbb{R}^N) \cap L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$, on a alors $\bar{F}(f) = \hat{f}$ p.p..
2. Pour tout $f, g \in L_\mathbb{C}^2(\mathbb{R}^N)$, on a $(f/g)_2 = (\bar{F}(f)/\bar{F}(g))_2$.

3. Pour tout $f \in L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$, on a $f = \bar{F}(\bar{F}(f))(-\cdot)$.

4. \bar{F} est une bijection de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$.

Pour $f \in L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$, $\bar{F}(f)$ s'appelle la transformée de Fourier de f . Compte tenu du premier item, on notera en général, \hat{f} la transformée de Fourier de f si $f \in L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N)$ (et alors $\hat{f} \in C_0(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$) ou si $f \in L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ (et alors $\hat{f} \in L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$).

DÉMONSTRATION : L'application $f \mapsto \hat{f}$ est définie sur \mathcal{S}_N , qui est un sous espace de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$, et prend ses valeurs dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ (car $\mathcal{S}_N \subset L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$, en confondant, comme d'habitude, un élément de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ avec l'un de ses représentants). Comme cette application est linéaire, continue pour la norme de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$, et que \mathcal{S}_N est dense dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ (car $\mathcal{S}_N \supset C_c^\infty(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ et $C_c^\infty(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ est dense dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$, voir le théorème 8.4), on en déduit que cette application se prolonge en une application, notée \bar{F} , de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$.

Plus précisément, soit $f \in L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. Il existe $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{S}_N$ t.q. $f_n \rightarrow f$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ quand $n \rightarrow \infty$. La suite $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est donc de Cauchy dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. La proposition 10.9 donne alors que la suite $(\hat{f}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est donc aussi de Cauchy dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. Elle converge donc dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. On aimerait définir $\bar{F}(f)$ comme étant la limite (dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$) de la suite $(\hat{f}_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Ceci est possible à condition que cette limite ne dépende que de f et pas du choix de la suite $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ convergeant dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ vers f . Or, ce dernier point est facile car si $(g_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une autre suite convergeant dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ vers f , on a $\|\hat{f}_n - \hat{g}_n\|_2 = \|f_n - g_n\|_2 \rightarrow 0$ quand $n \rightarrow \infty$. On a ainsi défini \bar{F} de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ dans lui même.

La linéarité de \bar{F} découle immédiatement du fait que l'application $f \mapsto \hat{f}$ est linéaire de \mathcal{S}_N dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. Enfin, soit $f \in L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ et $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{S}_N$ t.q. $f_n \rightarrow f$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. La proposition 10.9 donne que $\|\hat{f}_n\|_2 = \|f_n\|_2$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. En passant à la limite quand $n \rightarrow \infty$, on en déduit $\|\bar{F}(f)\|_2 = \|f\|_2$. Ce qui prouve la continuité de \bar{F} de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. On montre maintenant les 4 items du théorème.

1. Soit $f \in L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N) \cap L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. En reprenant la démonstration du théorème 8.4, il est facile de voir qu'il existe une suite $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset C_c^\infty(\mathbb{R}^N, \mathbb{C})$ t.q. $f_n \rightarrow f$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ et $L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N)$ lorsque $n \rightarrow +\infty$ (car dans la démonstration du théorème 8.4, la suite construite pour converger vers f dans L^p ne dépend pas de p). On en déduit que $\hat{f}_n \rightarrow \hat{f}$ uniformément sur \mathbb{R}^N lorsque $n \rightarrow +\infty$ (car $f_n \rightarrow f$ dans $L_{\mathbb{C}}^1(\mathbb{R}^N)$) et que $\hat{f}_n \rightarrow \bar{F}(f)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ lorsque $n \rightarrow +\infty$ (car $f_n \rightarrow f$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$) et donc que, après extraction éventuelle d'une sous suite, on peut supposer que $\hat{f}_n \rightarrow \bar{F}(f)$ p.p. quand $n \rightarrow \infty$. On en déduit bien que $\hat{f} = \bar{F}(f)$ p.p..
2. Soit $f, g \in L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. Il existe deux suites $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{S}_N$ et $(g_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{S}_N$ t.q. $f_n \rightarrow f$, $g_n \rightarrow g$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$. La proposition 10.9 donne $(\hat{f}_n/\hat{g}_n)_2 = (f_n/g_n)_2$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. En passant à la limite quand $n \rightarrow \infty$ on obtient bien $(\bar{F}(f)/\bar{F}(g))_2 = (f/g)_2$.
3. Soit $f \in L^2$. Soit $(f_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathcal{S}_N$ t.q. $f_n \rightarrow f$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ quand $n \rightarrow \infty$. On a donc $\hat{f}_n \rightarrow \bar{F}(f)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$, ce qui donne aussi $\hat{f}_n(-\cdot) \rightarrow \bar{F}(f)(-\cdot)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ et donc $\hat{\hat{f}_n}(-\cdot) \rightarrow \bar{F}(\bar{F}(f))(-\cdot)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ quand $n \rightarrow +\infty$. La proposition 10.6 donne $f_n = \hat{\hat{f}_n}(-\cdot)$ pour tout $n \in \mathbb{N}$. On en déduit donc (par unicité de la limite dans L^2) que $f = \bar{F}(\bar{F}(f))(-\cdot)$ p.p..
4. L'injectivité de \bar{F} (de $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$ dans $L_{\mathbb{C}}^2(\mathbb{R}^N)$) découle du fait que $\|\bar{F}(f)\|_2 = \|f\|_2$ et que \bar{F} est linéaire. La surjectivité est une conséquence immédiate du troisième item.

■

10.5 Résolution d'une EDO ou d'une EDP

On donne ici deux exemples simples d'utilisation de la transformation de Fourier pour la résolution d'une équation différentielle (souvent notée EDO pour Equation Différentielle Ordinaire) ou d'une équation aux dérivées partielles (souvent notée EDP pour Equation aux Dérivées Partielles).

Soit $N \geq 0$, $(a_0, \dots, a_N) \in \mathbb{R}^{N+1}$ et $g \in \mathcal{S}_1$ (donnés). On cherche $f \in \mathcal{S}_1$ qui vérifie :

$$a_N f^{(N)}(x) + \dots + a_1 f'(x) + a_0 f(x) = g(x), \text{ pour tout } x \in \mathbb{R}. \quad (10.5)$$

Si $f \in \mathcal{S}_1$ vérifie (10.5), elle vérifie nécessairement, par transformation de Fourier :

$$a_N \widehat{f^{(N)}}(t) + \dots + a_1 \widehat{f'}(t) + a_0 \widehat{f}(t) = \widehat{g}(t), \text{ pour tout } t \in \mathbb{R}. \quad (10.6)$$

c'est-à-dire :

$$a_N (it)^N \widehat{f}(t) + \dots + a_1 it \widehat{f}(t) + a_0 \widehat{f}(t) = \widehat{g}(t), \text{ pour tout } t \in \mathbb{R}. \quad (10.7)$$

En posant $p(t) = a_N (it)^N + \dots + a_1 it + a_0$ et en supposant que p ne s'annule pas sur \mathbb{R} , on a alors :

$$\widehat{f}(t) = \frac{\widehat{g}(t)}{p(t)}. \quad (10.8)$$

Comme $g \in \mathcal{S}_1$ et que p ne s'annule pas sur \mathbb{R} , on peut montrer que $\frac{\widehat{g}}{p} \in \mathcal{S}_1$. En utilisant maintenant le théorème d'inversion, ou la proposition 10.6, on obtient :

$$f(t) = \widehat{\widehat{f}}(-t) = \widehat{\left(\frac{\widehat{g}}{p}\right)}(-t), \text{ pour tout } t \in \mathbb{R}. \quad (10.9)$$

On a donc montré que f est nécessairement donnée par (10.9). Réciproquement, il est facile de voir que la fonction donnée par (10.9) est solution de (10.5), c'est donc l'unique solution dans \mathcal{S}_1 de (10.5) (en supposant que p ne s'annule pas sur \mathbb{R}).

Soit $N \geq 1$, on cherche $u : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$, de classe C^2 (c'est-à-dire deux fois continûment dérivable) t.q.

$$-\Delta u(x) = 0, \text{ pour tout } x \in \mathbb{R}^N. \quad (10.10)$$

Cherchons $u \in \mathcal{S}_N$ (et donc $\Delta u \in \mathcal{S}_N$) solution de (10.10). On a donc $\widehat{\Delta u} = 0$ (partout sur \mathbb{R}^N), c'est-à-dire $|t|^2 \widehat{u}(t) = 0$ et donc $\widehat{u}(t) = 0$, pour tout $t \neq 0$. Comme \widehat{u} est continue, ceci entraîne que $\widehat{u} = 0$ (partout sur \mathbb{R}^N), et donc $u = 0$. La fonction identiquement égale à 0 est donc la seule solution de (10.10) dans \mathcal{S}_N .

On peut effectuer un raisonnement analogue si on cherche u de classe C^2 et dans $L^2_{\mathbb{R}}(\mathbb{R}^N)$ (on peut aussi le faire si u est seulement dans $L^2_{\mathbb{R}}(\mathbb{R}^N)$, il faut alors convenablement définir Δu). On obtient encore que la seule solution de (10.10) est $u = 0$.

Par contre, ce résultat d'unicité n'est plus vrai si on ne demande pas à u d'être de carré intégrable. En effet, les fonctions constantes sont toutes solutions de (10.10) (et on peut montrer que ce sont les seules fonctions, de classe C^2 et bornées, solutions de (10.10)).

10.6 Fonction caractéristique d'un vecteur aléatoire

Définition 10.4 Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, $d \geq 1$ et X un v.a. de dimension d . On appelle fonction caractéristique de X la fonction de \mathbb{R}^d dans \mathbb{C} définie par :

$$\varphi_X(u) = \int_{\Omega} e^{iX \cdot u} dP = E(e^{iX \cdot u}), \text{ pour } u \in \mathbb{R}^d.$$

Dans la définition précédente, la fonction $e^{iX \cdot u}$ est bien intégrable sur Ω (pour tout $u \in \mathbb{R}^d$) car la fonction $x \mapsto e^{ix \cdot u}$ est continue bornée de \mathbb{R}^d dans \mathbb{C} . En notant p_X la loi de X , on remarque également que $\varphi_X = (2\pi)^{d/2} \hat{p}_X(\cdot)$. La section 10.3 donne alors quelques propriétés élémentaires de la fonction caractéristique d'un v.a..

Proposition 10.10 Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, $d \geq 1$ et X un v.a. de dimension d . La fonction caractéristique de X vérifie alors les propriétés suivantes :

1. $\varphi_X \in C_b(\mathbb{R}^d, \mathbb{C})$.
2. La loi de X est entièrement déterminée par φ_X (c'est-à-dire que si Y est un autre v.a. de dimension d et que $\varphi_X = \varphi_Y$, on a nécessairement $p_X = p_Y$).
3. Si $\varphi_X \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d), \lambda_d)$, la loi de X a une densité par rapport à la mesure de Lebesgue sur $\mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$, c'est-à-dire $p_X = f\lambda_d$, et :

$$f(x) = (2\pi)^{-d} \int_{\mathbb{R}^d} e^{-ix \cdot u} \varphi_X(u) du, \text{ } \lambda_d\text{-p.s. en } x \in \mathbb{R}^d.$$

DÉMONSTRATION : Comme $\varphi_X = (2\pi)^{d/2} \hat{p}_X(\cdot)$, le premier item est donnée par la proposition 10.7 (qui donne $\hat{p}_X \in C_b(\mathbb{R}^d, \mathbb{C})$).

Le deuxième item est donnée par le premier item de la proposition 10.8.

Pour le troisième item, on remarque que le deuxième item de la proposition 10.8 donne $p_X = f\lambda_d$ avec $f = \hat{p}_X(\cdot)$, ce qui donne λ_d -p.s. en $x \in \mathbb{R}^d$:

$$f(x) = (2\pi)^{-\frac{d}{2}} \int_{\mathbb{R}^d} e^{ix \cdot t} \hat{p}_X(t) dt = (2\pi)^{-d} \int_{\mathbb{R}^d} e^{-ix \cdot t} \varphi_X(t) dt.$$

■

Les fonctions caractéristiques peuvent être utilisées pour montrer l'indépendance de v.a.r. (ou de v.a.). on donne un exemple dans la proposition suivante.

Proposition 10.11 Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, $d > 1$ et X_1, \dots, X_d d v.a.r.. Alors, les v.a.r X_1, \dots, X_d sont indépendantes si et seulement si on a $\varphi_X(u) = \prod_{j=1}^d \varphi_{X_j}(u_j)$ pour tout $u = (u_1, \dots, u_d)^t \in \mathbb{R}^d$, où X est le v.a. de composantes X_1, \dots, X_d .

DÉMONSTRATION : D'après le théorème 9.2 les v.a.r. X_1, \dots, X_d sont indépendantes si et seulement $p_X = p_{X_1} \otimes \dots \otimes p_{X_d}$. Par la proposition 10.8, ces deux mesures sont égales si et seulement si leurs transformées de Fourier sont égales, c'est-à-dire si et seulement si :

$$\varphi_X(u) = \int_{\mathbb{R}^d} e^{ix \cdot u} d(p_{X_1} \otimes \dots \otimes p_{X_d}) \text{ pour tout } u \in \mathbb{R}^d.$$

Comme $e^{ix \cdot u} = \prod_{j=1}^d e^{ix_j u_j}$ pour tout $x = (x_1, \dots, x_d)^t$ et tout $u = (u_1, \dots, u_d)^t$, la définition de la mesure produit donne

$$\int_{\mathbb{R}^d} e^{ix \cdot u} d(p_{X_1} \otimes \dots \otimes p_{X_d}) = \prod_{j=1}^d \varphi_{X_j}(u_j),$$

ce qui termine la démonstration de cette proposition. ■

Il est intéressant aussi de connaître le lien entre convergence en loi et convergence simple des fonctions caractéristiques, que nous donnons maintenant, sans démonstration.

Proposition 10.12 *Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, $d > 1$, $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de v.a. de dimension d et X un v.a. de dimension d . Alors, $X_n \rightarrow X$ en loi, quand $n \rightarrow \infty$, si et seulement si $\varphi_{X_n}(u) \rightarrow \varphi_X(u)$, quand $n \rightarrow \infty$, pour tout $u \in \mathbb{R}^d$.*

On termine cette section en donnant la fonction caractéristique d'un vecteur gaussien.

Proposition 10.13 *Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé.*

1. *Soit X une v.a.r. gaussienne. On note m son espérance (donc, $m = E(X) \in \mathbb{R}$) et σ^2 sa variance (donc, $\sigma^2 = E((X - m)^2) \geq 0$) de sorte que $X \sim \mathcal{N}(m, \sigma^2)$. On a alors :*

$$\varphi_X(u) = e^{imu} e^{-\frac{\sigma^2}{2} u^2}, \text{ pour tout } u \in \mathbb{R}.$$

2. *Soit $d \geq 1$ et X une v.a. gaussienne de dimension d . On note $m = E(X) \in \mathbb{R}^d$ et D sa matrice de covariance (donc, D est une matrice symétrique, semi-définie positive, son terme à la ligne j et la colonne k est donné par la covariance des composantes d'indices j et k de X) de sorte que $X \sim \mathcal{N}(m, D)$ (proposition 9.9). On a alors :*

$$\varphi_X(u) = e^{im \cdot u} e^{-\frac{1}{2} D u \cdot u}, \text{ pour tout } u \in \mathbb{R}^d.$$

DÉMONSTRATION : Soit X une v.a.r. gaussienne, $X \sim \mathcal{N}(m, \sigma^2)$. On suppose tout d'abord que $\sigma^2 = 0$, on a alors $X = m$ p.s. et donc, pour tout $u \in \mathbb{R}$, $\varphi_X(u) = e^{imu}$, ce qui est bien la formule annoncée. On suppose maintenant que $\sigma > 0$, on a alors, pour tout $u \in \mathbb{R}$:

$$\varphi_X(u) = \int_{\mathbb{R}} e^{ixu} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) dx.$$

Avec le changement de variable $y = \frac{x-m}{\sigma}$, on obtient :

$$\varphi_X(u) = e^{imu} \int_{\mathbb{R}} e^{iy\sigma u} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy,$$

ce qui donne $\varphi_X(u) = e^{imu} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \psi(\sigma u)$ avec $\psi(t) = \int_{\mathbb{R}} e^{iyt} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$ pour tout $t \in \mathbb{R}$. Comme la fonction $y \mapsto e^{y^2}$ est paire, on a aussi :

$$\psi(t) = \int_{\mathbb{R}} \cos(yt) e^{-\frac{y^2}{2}} dy, \text{ pour tout } t \in \mathbb{R}.$$

Pour calculer $\psi(t)$, on remarque que le théorème de dérivabilité sous le signe \int s'applique (théorème 4.10) et donne que ψ est de classe C^1 et $\psi'(t) = \int_{\mathbb{R}} (-y) \sin(yt) e^{-\frac{y^2}{2}} dy$. En intégrant par parties cette dernière intégrale (en fait, on intègre par parties sur $[-n, n]$ puis on fait tendre n vers l'infini), on obtient :

$$\psi'(t) = - \int_{\mathbb{R}} t \cos(yt) e^{-\frac{y^2}{2}} dy = -t\psi(t), \text{ pour tout } t \in \mathbb{R},$$

ce qui donne $\psi(t) = \psi(0)e^{-\frac{t^2}{2}}$. Comme $\psi(0) = \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy = \sqrt{2\pi}$, on en déduit que $\psi(t) = \sqrt{2\pi}e^{-\frac{t^2}{2}}$ (pour tout $t \in \mathbb{R}$) et donc que $\varphi_X(u) = e^{imu} e^{-\frac{\sigma^2 u^2}{2}}$, ce qui est bien la formule annoncée.

On suppose maintenant que $d > 1$ et que X est un v.a. gaussien. Soit $u \in \mathbb{R}^d$. On a $\varphi_X(u) = E(e^{iX \cdot u}) = \varphi_{X \cdot u}(1)$. Pour connaître $\varphi_X(u)$, il suffit donc de connaître la fonction caractéristique de la v.a.r. $X \cdot u$. Comme X est un v.a. gaussien, la v.a.r. $X \cdot u$ est une v.a.r. gaussienne. Sa moyenne est $E(X \cdot u) = E(X) \cdot u = m \cdot u$ et sa variance est (voir l'exercice 164) :

$$\sigma^2 = E((X \cdot u - m \cdot u)^2) = E(u^t (X - m)(X - m)^t u) = u^t \text{Cov}(X) u = u^t D u.$$

On a donc, d'après la première partie de cette démonstration (c'est-à-dire le cas $d = 1$),

$$\varphi_X(u) = \varphi_{X \cdot u}(1) = e^{im \cdot u} e^{-\frac{u^t D u}{2}},$$

ce qui est bien la formule annoncée (car $u^t D u = D u \cdot u$). ■

10.7 Exercices

10.7.1 Transformation de Fourier dans L^1

Exercice 10.1 (Résultat partiel d'inversion de Fourier dans L^1) *Corrigé 171 page 491*

Soit $H(t) = e^{-|t|}$, $t \in \mathbb{R}$. On pose, pour $\lambda > 0$:

$$h_\lambda(x) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} H(\lambda t) e^{itx} dt, x \in \mathbb{R}. \quad (10.11)$$

1. Montrer que $h_\lambda(x) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda}{\lambda^2 + x^2}$, et $\int_{\mathbb{R}} h_\lambda(x) dx = (2\pi)^{\frac{1}{2}}$.
2. Soit $f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \lambda)$, montrer que pour tout $x \in \mathbb{R}$, on a :

$$f \star h_\lambda(x) = \int_{\mathbb{R}} H(\lambda t) \hat{f}(t) e^{ixt} dt. \quad (10.12)$$

3. Soit g une fonction mesurable bornée de \mathbb{R} dans \mathbb{C} , continue en 0. Montrer que $g \star h_\lambda(0) \rightarrow \sqrt{2\pi}g(0)$ quand $\lambda \rightarrow 0$. [Utiliser 1. et le théorème de convergence dominée.]
4. Soit $f \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \lambda)$, montrer que :

$$\|f \star h_\lambda - \sqrt{2\pi}f\|_1 \rightarrow 0 \text{ lorsque } \lambda \rightarrow 0. \quad (10.13)$$

[Utiliser la continuité en moyenne et la question précédente avec $g(y) = \int |f(x-y) - f(x)| dx$.]

5. Dédurre de ce qui précède le théorème d'inversion de Fourier, théorème 10.1.

Exercice 10.2 1. Calculer la transformée de Fourier de $1_{[-a,a]}$, $a \in \mathbb{R}_+$. En déduire que L^1 n'est pas stable par transformation de Fourier.

2. On pose $g_n = 1_{[-n,n]}$. Calculer $f \star g_n$, et montrer qu'il existe $h_n \in L^1$ t.q. $\hat{h}_n = f \star g_n$. Montrer que la suite $f \star g_n$ est bornée dans $C_0(\mathbb{R}, \mathbb{R})$ alors que la suite h_n n'est pas bornée dans L^1 . En déduire que la transformée de Fourier n'est pas surjective de L^1 dans C_0 .

Exercice 10.3 Soit $f \in \mathcal{S}$, on pose $L(f)(x) = f''(x) + xf(x)$.

1. Montrer que $L(f) = 0$ entraîne $f = 0$.
2. Soit $k \in \mathcal{S}$, montrer que l'équation différentielle $h'(t) = k(t)$ a une solution dans \mathcal{S} si et seulement si $\int k(t)dt = 0$.
3. Soit $g \in \mathcal{S}$, étudier l'existence et l'unicité des solutions dans \mathcal{S} de l'équation $L(f) = g$. On pourra remarquer que pour $h \in \mathcal{S}$, on a :

$$i \frac{d}{dt} (he^{-i\frac{t^3}{3}}) - t^2 (he^{-i\frac{t^3}{3}}) = ih'(t)e^{-i\frac{t^3}{3}}.$$

Exercice 10.4 On note L^p l'espace $L^p_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \lambda)$.

1. Soient $f, g \in L^1$, montrer que $f\hat{g} \in L^1$, $g\hat{f} \in L^1$ et $\int f\hat{g}d\lambda = \int g\hat{f}d\lambda$.
2. Soit $B = [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$. Montrer que $1_B \star 1_B(t) = (1 - |t|)^+$.
3. On pose $\theta_n = (1 - \frac{|t|}{n})^+$, $n \in \mathbb{N}^*$. Dédurre de la question précédente que:

$$\hat{\theta}_n(y) = \frac{4}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sin^2(\frac{ny}{2})}{ny^2}, \forall y \in \mathbb{R}.$$

[Se ramener à θ_1 ...]

4. Soit $f \in L^1 \cap L^\infty$ t.q. $\hat{f}(t) \in \mathbb{R}_+$ pour tout $t \in \mathbb{R}$. On se propose de montrer que $\hat{f} \in L^1$ (et donc que le théorème d'inversion s'applique)
 - (a) On note $\varphi_n = \theta_n \hat{f}$; montrer que $\varphi_n \uparrow \hat{f}$ et $\int \varphi_n d\lambda \uparrow \int \hat{f} d\lambda$ lorsque $n \rightarrow +\infty$.
 - (b) Montrer qu'il existe $\alpha \geq 0$ indépendant de n tel que $\int \hat{\theta}_n(y) dy = \alpha, \forall n \in \mathbb{N}^*$. En déduire que $\hat{f} \in L^1$.

10.7.2 Transformée de Fourier d'une mesure signée

Exercice 10.5 (Une mesure est caractérisée par sa transformée de Fourier) *Corrigé 172 page 493*

Soit $d \geq 1$.

1. Soit m et μ deux mesures signées sur les boréliens de \mathbb{R}^d . On suppose que $\hat{m} = \hat{\mu}$.
 - (a) Soit $\varphi \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d), \lambda_d)$. Montrer que $\int \hat{\varphi} dm = \int \hat{\varphi} d\mu$.

- (b) Montrer que $\int \varphi dm = \int \varphi d\mu$ pour tout $\varphi \in \mathcal{S}(\mathbb{R}^d, \mathbb{C})$ (et donc pour tout $\varphi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^d, \mathbb{R})$).
- (c) Montrer que $m = \mu$ (On rappelle qu'une fonction de $\varphi \in C_c(\mathbb{R}^d, \mathbb{R})$ est limite uniforme de fonctions de $\varphi \in C_c^\infty(\mathbb{R}^d, \mathbb{R})$).
2. Soit m une mesure signée sur les boréliens de \mathbb{R}^d . On suppose que $\hat{m} \in L^1_c(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}(\mathbb{R}^d), \lambda_d)$. Montrer que m est la mesure de densité f par rapport à la mesure de Lebesgue avec $f = \hat{m}(-\cdot)$.

10.7.3 Transformation de Fourier dans L^2

Exercice 10.6 On note ici \hat{f} la transformée de Fourier, pour $f \in L^1$ ou L^2 .

- Soient $f, g \in \mathcal{S}$, Montrer que $\widehat{fg} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \hat{f} \star \hat{g}$.
- Soient $f, g \in L^2$, Montrer que $\widehat{fg} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \hat{f} \star \hat{g}$.

10.7.4 Fonction Caractéristique d'une v.a.r.

Exercice 10.7 (Calcul de fonctions caractéristiques)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités et X une v.a. réelle. Calculer la fonction caractéristique φ_X de X dans les cas suivants :

- $X = a$ p.s. ($a \in \mathbb{R}$).
- $X \sim \mathcal{B}(p)$ (loi de Bernoulli de paramètre $p : \mathcal{P}[X = 1] = p = 1 - \mathcal{P}[X = 0]$).
- X suit une loi exponentielle de paramètre λ (avec $\lambda > 0$).

Exercice 10.8 (Loi normale et vecteur gaussien)

Soit (Ω, \mathcal{A}, p) un espace probabilisé, $d \geq 1$ et X un v.a. de dimension d . Soit $m \in \mathbb{R}^d$ et D une matrice s.d.p. (de taille $d \times d$). Si $X \sim \mathcal{N}(m, D)$, où $\mathcal{N}(m, D)$ est définie par la définition 9.3, montrer que X est un vecteur gaussien.

Exercice 10.9 (Vecteurs gaussiens et densité)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités, $d \geq 1$ et $X = (X_1, \dots, X_d)$ un v.a. de dimension d .

On suppose que $X = (X_1, \dots, X_d)$ est un vecteur gaussien (c'est-à-dire que $\sum_{i=1}^d a_i X_i$ suit une loi gaussienne pour tout $a_1, \dots, a_d \in \mathbb{R}$). On note m la moyenne de X et D la matrice de covariance de X . Montrer que la loi de X est de densité par rapport à la mesure de Lebesgue (sur \mathbb{R}^d) si et seulement si D est inversible. Si D est inversible, montrer que la loi de X est la loi $\mathcal{N}(m, D)$ donnée dans la définition 9.3.

Exercice 10.10 (Vecteurs gaussiens, indépendance, covariance) *Corrigé 173 page 494*

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités, $d \geq 1$ et $X = (X_1, \dots, X_d)$ un v.a. de dimension d .

- On suppose ici que $d = 2$.
 - On suppose que X_1 et X_2 suivent des lois gaussiennes et sont indépendantes, montrer que X est un vecteur gaussien et que $\text{Cov}(X_1, X_2) = 0$.
 - On suppose que X est un vecteur gaussien et que $\text{Cov}(X_1, X_2) = 0$. Montrer que X_1 et X_2 sont indépendantes.

- On suppose toujours $d = 2$. Donner un exemple pour lequel X_1 et X_2 sont gaussiennes mais X n'est pas un vecteur gaussien. [On pourra, par exemple, choisir (Ω, \mathcal{A}, P) et X_1, X_2 de manière à avoir $\text{Cov}(X_1, X_2) = 0$ sans que X_1, X_2 soient indépendantes, voir l'exercice 4.44.]
- On suppose que X est un vecteur gaussien et que les composantes de X sont indépendantes deux à deux. Montrer que X_1, \dots, X_d sont indépendantes.

Exercice 10.11 (Suite de v.a.r.i.i.d. de Poisson) *Corrigé 174 page 495*

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité et X une v.a. de Poisson de paramètre λ ($\lambda > 0$). On rappelle que, $P[X = k] = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$, pour tout $k \in \mathbb{N}$ et que $E[X] = \lambda$, $\text{Var}[X] = \lambda$.

- Calculer la fonction caractéristique φ_X de X .
- Soit $(X_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ une suite de v.a. indépendantes et de Poisson de paramètre λ .
 - Soit $n > 1$. Dédire de la première question la loi de la v.a. $Y_n = \sum_{p=1}^n X_p$.
 - Utiliser le théorème central limite pour démontrer que

$$e^{-n} \sum_{k=0}^n \frac{n^k}{k!} \rightarrow \frac{1}{2} \text{ quand } n \rightarrow \infty.$$

Exercice 10.12 (Sur les lois forte et faible des grands nombres) *Corrigé 175 page 496*

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et X une v.a.r. dont la loi est la loi de Cauchy c'est-à-dire que $P_X = f\lambda$, avec $f(x) = \frac{1}{\pi(1+x^2)}$ pour $x \in \mathbb{R}$ (on rappelle que λ désigne la mesure de Lebesgue sur les boréliens de \mathbb{R}).

- Montrer que X n'est pas une v.a.r. intégrable.
- Soit $n \in \mathbb{N}^*$, montrer que $P(\{|X| > n\}) \geq \frac{1}{n\pi}$, où $\{|X| > n\} = \{\omega \in \Omega, |X(\omega)| > n\}$. [On pourra remarquer que $\frac{2}{1+x^2} \geq \frac{1}{x^2}$ pour tout $x \geq 1$.]
- Pour $x \in \mathbb{R}$, on pose $g(x) = e^{-|x|}$. Montrer que

$$\frac{2}{1+u^2} = \int_{\mathbb{R}} e^{iux} g(x) dx = \sqrt{2\pi} \hat{g}(u) \text{ pour tout } u \in \mathbb{R}.$$

En déduire que la fonction caractéristique de X , notée φ_X vérifie $\varphi_X(u) = e^{-|u|}$ pour tout $u \in \mathbb{R}$. [On pourra utiliser de théorème d'inversion de Fourier qui donne $\hat{\hat{g}} = g(-\cdot)$ p.p. si $g, \hat{g} \in L^1_{\mathbb{C}}(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \lambda)$.]

On se donne maintenant une suite $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$ de v.a.r.i.i.d. et on suppose que la loi de X_1 (et donc de tous les X_n) est la loi de Cauchy. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on pose :

$$Z_n = \frac{1}{n} \left(\sum_{p=1}^n X_p \right).$$

- Soit $n \in \mathbb{N}^*$.

(a) Montrer que

$$\varphi_{Z_n}(u) = \varphi_{X_1}^n\left(\frac{u}{n}\right) \text{ pour tout } u \in \mathbb{R}.$$

(b) Donner la loi de Z_n .

5. Pour $n \in \mathbb{N}^*$, on pose $A_n = \{|X_n| > n\}$ et $B_n = \cup_{p \geq n} A_p$. on pose aussi $B = \cap_{n \in \mathbb{N}^*} B_n$.

(a) Soit $n \in \mathbb{N}^*$. En utilisant la question 2, montrer que

$$P(B_n^c) = \prod_{p \geq n} P(A_p^c) \leq \prod_{p \geq n} \left(1 - \frac{1}{p^\pi}\right).$$

En déduire que $P(B_n^c) = 0$ et donc que $P(B_n) = 1$.

(b) Montrer que $P(B) = 1$. [Cette question est une conséquence de la question (a) mais elle peut aussi être faite directement en appliquant le lemme de Borel-Cantelli et la question 2.]

(c) Soit $\omega \in B$. Montrer que $\frac{X_n(\omega)}{n} \not\rightarrow 0$ quand $n \rightarrow \infty$.

(d) Soit $\omega \in \Omega$. Montrer que $\frac{X_n(\omega)}{n} \rightarrow 0$ (quand $n \rightarrow \infty$) si la suite $(Z_n(\omega))_{n \in \mathbb{N}^*}$ converge vers une limite finie. [Ecrire X_n en fonction de Z_n et Z_{n-1} .]

(e) Déduire des trois questions précédentes que la suite $(Z_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ ne converge pas p.s. vers une limite finie quand $n \rightarrow \infty$.

6. Pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, montrer que

$$Z_{2n} - Z_n = \frac{U_n + V_n}{2},$$

où U_n et V_n sont deux v.a.r. indépendantes, de loi de Cauchy.

En déduire que la suite $(Z_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ ne converge pas en probabilité.

7. Pour quelles raisons ne peut-on appliquer, à la suite $(Z_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$, les lois forte et faible des grands nombres ?

Exercice 10.13 (Sur la loi d'un vecteur aléatoire)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité et X un v.a. de dimension d . Montrer que la loi de X est uniquement déterminée par la donnée des lois de toutes les v.a.r. $a \cdot X$, $a \in \mathbb{R}^d$, $|a| = 1$. [On pourra utiliser la fonction caractéristique de X .]

Exercice 10.14 (Un exemple...)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité et (X, Y) un couple de variables aléatoires réelles, à valeurs dans $[-1, 1]^2$. On suppose que la loi de ce couple a une densité f par rapport à la mesure de Lebesgue (sur $\mathcal{B}(\mathbb{R}^2)$) avec :

$$f(x, y) = \frac{1 + xy(x^2 - y^2)}{4} 1_{[-1, 1]^2}(x, y), \quad (x, y)^t \in \mathbb{R}^2.$$

1. Montrer que les lois des v.a. X et Y ont des densités par rapport à la mesure de Lebesgue (sur $\mathcal{B}(\mathbb{R})$). Calculer ces densités. X et Y sont-elles indépendantes ?
2. Calculer les espérances de X , Y et XY . Que vaut $cov(X, Y)$?
3. Calculer les fonctions caractéristiques de X , Y et $X + Y$.

Chapter 11

Espérance conditionnelle et martingales

11.1 Espérance conditionnelle

Nous commençons par définir l'espérance conditionnée par une tribu.

Définition 11.1 Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, X une v.a.r. intégrable et \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} . On appelle "Espérance, conditionnée par \mathcal{B} , de X " ou "Espérance conditionnelle de X par rapport à \mathcal{B} " l'ensemble des applications Z de Ω dans \mathbb{R} , \mathcal{B} -mesurable, intégrable et t.q. :

$$E(ZU) = E(XU) \text{ pour toute application } U \text{ de } \Omega \text{ dans } \mathbb{R}, \mathcal{B}\text{-mesurable, bornée.} \quad (11.1)$$

On note $E(X|\mathcal{B})$ cette espérance conditionnelle (c'est donc un ensemble de fonctions). (Noter que dans (11.1), les applications ZU et XU sont bien des v.a.r. intégrables).

Cette définition peut sembler un peu abrupte. On montrera dans la proposition 11.1 que, sous les hypothèses de la définition 11.1, l'espérance conditionnelle existe, c'est-à-dire que l'ensemble $E(X|\mathcal{B})$ est non vide, et que $E(X|\mathcal{B})$ est "unique", ceci signifiant que si $Z_1, Z_2 \in E(X|\mathcal{B})$, on a nécessairement $Z_1 = Z_2$ p.s..

L'ensemble $E(X|\mathcal{B})$, défini dans la définition 11.1, est une ensemble de v.a.r. (car Z \mathcal{B} -mesurable implique Z \mathcal{A} -mesurable) mais, en pratique, on confond cet ensemble avec l'un de ces éléments (comme on confond un élément de L^p avec l'un de ses représentants). Si Z est une v.a.r. \mathcal{B} -mesurable intégrable et t.q. $E(ZU) = E(XU)$ pour toute v.a.r. U \mathcal{B} -mesurable bornée, on écrira donc $Z = E(X|\mathcal{B})$ p.s. au lieu d'écrire $Z \in E(X|\mathcal{B})$.

Avant de démontrer l'existence et l'unicité de l'espérance conditionnelle, donnons quelques exemples simples. Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et X une v.a.r. intégrable. Prenons tout d'abord $\mathcal{B} = \{\emptyset, \Omega\}$. Il est alors facile de voir (exercice 11.1) que $E(X|\mathcal{B})$ est réduit à un seul élément et que cet élément est la fonction constante et égale à $E(X)$.

Soit maintenant $A \in \mathcal{A}$ t.q. $0 < P(A) < 1$ et $\mathcal{B} = \{\emptyset, A, A^c, \Omega\}$ (qui est bien une tribu incluse dans \mathcal{A}). On peut ici montrer (exercice 11.1) que $E(X|\mathcal{B})$ est aussi réduit à un seul élément et cet élément est la fonction Z définie par :

$$Z = \frac{E(X1_A)}{P(A)}1_A + \frac{E(X1_{A^c})}{P(A^c)}1_{A^c}.$$

La quantité $\frac{E(X1_A)}{P(A)}$ s'appelle "espérance de X sachant A ". On a ainsi fait le lien entre "espérance de X sachant un événement" et "espérance de X par rapport à une tribu" (ou "selon une tribu").

Dans les deux exemples précédents, l'ensemble $E(X|\mathcal{B})$ était réduit à un seul élément. Voici maintenant un exemple où $E(X|\mathcal{B})$ n'est pas réduit à un seul élément. On prend $B \in \mathcal{A}$ t.q. $P(B) = 1$ et $B^c \neq \emptyset$ (c'est le cas, par exemple, si P est une mesure diffuse, que \mathcal{A} contient les singletons et que B^c est formé d'un nombre fini ou dénombrable de points de Ω). On prend encore $\mathcal{B} = \{\emptyset, B, B^c, \Omega\}$. Pour $a \in \mathbb{R}$, on pose $Z_a = E(X)1_B + a1_{B^c}$. On peut alors montrer (exercice 11.2) que $E(X|\mathcal{B}) = \{Z_a, a \in \mathbb{R}\}$. L'ensemble $E(X|\mathcal{B})$ n'est donc pas réduit à un élément.

On montre maintenant l'existence et l'unicité de l'espérance, conditionnée par une tribu, d'une v.a.r. intégrable.

Proposition 11.1 *Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} . Soit X une v.a.r. intégrable. Alors :*

1. (Existence) $E(X|\mathcal{B}) \neq \emptyset$.
2. (Unicité) $Z_1, Z_2 \in E(X|\mathcal{B}) \Rightarrow Z_1 = Z_2$ p.s..

DÉMONSTRATION : On démontre d'abord l'unicité de $E(X|\mathcal{B})$. Puis, on démontre l'existence de $E(X|\mathcal{B})$ si X est de carré intégrable, puis l'existence si X est positive (et intégrable) et enfin l'existence si X est seulement intégrable. En fait, la partie "existence si X est de carré intégrable" est inutile. Elle n'est pas utilisée pour la suite de la démonstration mais elle est éventuellement intéressante pour la compréhension de l'espérance conditionnelle.

Unicité. Soit $Z_1, Z_2 \in E(X|\mathcal{B})$. On pose $U = \text{sign}(Z_1 - Z_2)$ (on rappelle que la fonction sign est définie par $\text{sign}(s) = -1$ si $s < 0$, $\text{sign}(s) = 1$ si $s > 0$ et (par exemple) $\text{sign}(0) = 0$). Comme la fonction sign est borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R} et que $(Z_1 - Z_2)$ est \mathcal{B} -mesurable, la fonction U est bien \mathcal{B} -mesurable. Elle est aussi bornée, on a donc en utilisant 11.1 avec $Z = Z_1$ et $Z = Z_2$, $E(XU) = E(Z_1U)$ et $E(XU) = E(Z_2U)$. Ceci donne $E((Z_1 - Z_2)U) = 0$ et donc $E(|Z_1 - Z_2|) = 0$. On en déduit $Z_1 = Z_2$ p.s..

Existence si X est de carré intégrable. On note $P_{\mathcal{B}}$ la restriction de P (qui est une mesure sur \mathcal{A}) à \mathcal{B} (tribu incluse dans \mathcal{A}). La mesure $P_{\mathcal{B}}$ est donc une probabilité sur \mathcal{B} . On note H l'espace de Hilbert $L^2_{\mathbb{R}}(\Omega, \mathcal{B}, P_{\mathcal{B}})$ et, pour $V \in H$, on pose :

$$T(V) = \int_{\Omega} XV dP.$$

Il est clair que $T(V)$ est bien définie. En étant précis, on remarque que $T(V) = \int_{\Omega} Xv dP$, où $v \in \mathcal{L}^2_{\mathbb{R}}(\Omega, \mathcal{B}, P_{\mathcal{B}})$ est un représentant de V (et cette quantité ne dépend pas du représentant choisi). C'est pour définir T que nous avons besoin que X soit de carré intégrable.

L'application T est linéaire continue de H dans \mathbb{R} (et on a $\|T\| \leq \|X\|_2$). On peut donc appliquer le théorème de Riesz dans les espaces de Hilbert (théorème 6.8), il donne l'existence de $Z \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{B}, P_{\mathcal{B}})$ t.q. :

$$T(V) = \int_{\Omega} ZV dP \text{ pour tout } V \in H. \tag{11.2}$$

Comme $Z \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{B}, P_{\mathcal{B}})$, la fonction Z est bien \mathcal{B} -mesurable et intégrable (elle est même de carré intégrable). On montre maintenant que Z vérifie (11.1) (et donc que $Z \in E(X|\mathcal{B})$). Soit U une

application \mathcal{B} -mesurable bornée de Ω dans \mathbb{R} . On a $U \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{B}, P_{\mathcal{B}})$, on peut donc utiliser (11.2) avec pour V la classe de U et on obtient

$$E(XU) = T(V) = \int_{\Omega} ZV dP = E(ZU).$$

L'application Z vérifie donc (11.1). ce qui prouve que $Z \in E(X|\mathcal{B})$.

Plus précisément, un développement du raisonnement ci avant (que les courageux peuvent faire) permet d'interpréter l'application $X \mapsto E(X|\mathcal{B})$ comme l'opérateur de projection orthogonale de $L^2(\Omega, \mathcal{A}, P)$ dans le sous espace vectoriel fermé formé à partir de $L^2(\Omega, \mathcal{B}, P_{\mathcal{B}})$.

Existence si X est positive et intégrable. On utilise ici le théorème de Radon-Nikodym (théorème 6.10, qui se démontre d'ailleurs avec le théorème de Riesz dans les espaces de Hilbert, théorème 6.8). On note toujours $p_{\mathcal{B}}$ la restriction de P à \mathcal{B} (de sorte que $P_{\mathcal{B}}$ est une probabilité sur \mathcal{B}).

Pour $B \in \mathcal{B}$, on pose $m(B) = \int_{\Omega} X1_B dP$. On définit ainsi une mesure finie, m , sur \mathcal{B} (la σ -additivité de m est immédiate). Cette mesure est absolument continue par rapport à la mesure $P_{\mathcal{B}}$ (car $B \in \mathcal{B}$, $P_{\mathcal{B}}(B) = 0$ implique que $P(B) = 0$ et donc $X1_B = 0$ p.s. et donc $m(B) = 0$). Le théorème de Radon-Nikodym (théorème 6.10) donne alors l'existence de Z , \mathcal{B} -mesurable positive, t.q. $m = ZP_{\mathcal{B}}$ (c'est-à-dire que m est la mesure sur \mathcal{B} de densité Z par rapport à $P_{\mathcal{B}}$).

La fonction Z est intégrable car $\int_{\Omega} Z dP = \int_{\Omega} Z dP_{\mathcal{B}} = (ZP_{\mathcal{B}})(\Omega) = m(\Omega) = E(X) < +\infty$. Il reste à montrer que Z vérifie (11.1) (ce qui donnera que $Z \in E(X|\mathcal{B})$). Soit U une application \mathcal{B} -mesurable bornée de Ω dans \mathbb{R} . On a $ZU \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{B}, P_{\mathcal{B}})$, et donc (voir la remarque 6.22) $U \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{B}, m)$ et :

$$E(ZU) = \int_{\Omega} ZU dP = \int_{\Omega} ZU dP_{\mathcal{B}} = \int_{\Omega} U dm.$$

Mais, comme m est la restriction à \mathcal{B} de la mesure sur \mathcal{A} de densité X par rapport à P (notée XP), on a aussi (toujours par la remarque 6.22) $U \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{A}, XP)$ et :

$$\int_{\Omega} U dm = \int_{\Omega} UX dP = E(XU).$$

On a donc, finalement, $E(ZU) = E(XU)$. L'application Z vérifie donc (11.1). Ce qui prouve que $Z \in E(X|\mathcal{B})$.

Existence si X est seulement intégrable. Comme les fonctions X^+ et X^- sont positives et intégrables, il existe $Z_1 \in E(X^+|\mathcal{B})$ et $Z_2 \in E(X^-|\mathcal{B})$. On pose $Z = Z_1 - Z_2$. L'application Z est \mathcal{B} -mesurable et intégrable (car Z_1 et Z_2 le sont) et, pour tout fonction U \mathcal{B} -mesurable bornée, on a :

$$E(ZU) = E(Z_1U) - E(Z_2U) = E(X^+U) - E(X^-U) = E(XU).$$

L'application Z vérifie donc (11.1). Ce qui prouve que $Z \in E(X|\mathcal{B})$. ■

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} . On a défini l'espérance, conditionnée par \mathcal{B} , d'une v.a.r. intégrable. On va maintenant montrer qu'on peut étendre la définition à des v.a.r. qui ne sont pas intégrables mais qui sont positives (la démonstration est déjà essentiellement dans la démonstration de la proposition 11.1). Pour cela, on va commencer par donner une "p.s.-caractérisation" de $E(X|\mathcal{B})$ lorsque X est une v.a.r. positive et intégrable. Cette caractérisation n'utilisant pas l'intégrabilité de X on aura ainsi une définition de $E(X|\mathcal{B})$ lorsque X est une v.a.r. positive. Ceci est fait dans la proposition 11.2 et la définition 11.2.

Proposition 11.2 Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} .

1. Soit X une v.a.r. intégrable positive. Alors, $Z \in E(X|\mathcal{B})$ si et seulement si Z est \mathcal{B} -mesurable, intégrable, ≥ 0 p.s. et t.q. :

$$E(ZU) = E(XU) \text{ pour toute application } U \text{ de } \Omega \text{ dans } \mathbb{R}, \mathcal{B}\text{-mesurable et positive.} \quad (11.3)$$

2. Soit X une v.a.r. positive. On note $\bar{E}(X|\mathcal{B})$ l'ensemble des applications \mathcal{B} -mesurable, ≥ 0 et vérifiant (11.3). On a alors :

(a) (Existence) $\bar{E}(X|\mathcal{B}) \neq \emptyset$.

(b) (Unicité) $Z_1, Z_2 \in \bar{E}(X|\mathcal{B}) \Rightarrow Z_1 = Z_2$ p.s..

DÉMONSTRATION : On commence par montrer le premier item. Si $Z \in E(X|\mathcal{B})$, la fonction Z est bien \mathcal{B} -mesurable intégrable et vérifie (11.1). Elle vérifie donc (11.3) en ajoutant “ U bornée”. Pour montrer que $Z \geq 0$ p.s., on prend $U = 1_B$ avec $B = \{Z < 0\}$ (U est bien \mathcal{B} -mesurable bornée). On obtient $E(ZU) = E(XU) \geq 0$. Comme $ZU \leq 0$, on a donc $ZU = 0$ p.s. et donc $Z \geq 0$ p.s.. Enfin, pour montrer que Z vérifie (11.3) (c'est-à-dire avec U \mathcal{B} -mesurable positive mais non nécessairement bornée), il suffit d'utiliser le théorème de convergence monotone (théorème 4.2) en introduisant $U_n = U1_{B_n}$ avec, pour $n \in \mathbb{N}$, $B_n = \{U \leq n\}$.

Réciproquement, si Z est \mathcal{B} -mesurable, intégrable, ≥ 0 p.s. et vérifie (11.3), il est facile de voir que Z vérifie (11.1). En effet, si U est \mathcal{B} -mesurable bornée, on utilise (11.3) avec les parties positive et négative de U pour obtenir (11.1). Donc, $Z \in E(X|\mathcal{B})$.

On montre maintenant le deuxième item de la proposition.

Existence. On reprend la démonstration de la proposition 11.1. On rappelle que $p_{\mathcal{B}}$ la restriction de P à \mathcal{B} . Pour $B \in \mathcal{B}$, on pose $m(B) = \int_{\Omega} X1_B dP$. La mesure m est absolument continue par rapport à la mesure $P_{\mathcal{B}}$. Le théorème de Radon-Nikodym donne alors l'existence de Z , \mathcal{B} -mesurable positive, t.q. $m = ZP_{\mathcal{B}}$. Il reste à montrer que Z vérifie (11.3) (ce qui donnera que $Z \in \bar{E}(X|\mathcal{B})$). Soit U une application \mathcal{B} -mesurable positive de Ω dans \mathbb{R} . On a $E(ZU) = \int_{\Omega} ZU dP = \int_{\Omega} ZU dP_{\mathcal{B}} = \int_{\Omega} U dm$. Mais, comme m est la restriction à \mathcal{B} de la mesure sur \mathcal{A} de densité X par rapport à P (notée XP), on a aussi $\int_{\Omega} U dm = \int_{\Omega} UX dP = E(XU)$. On a donc, finalement, $E(ZU) = E(XU)$. L'application Z vérifie donc (11.3). Ce qui prouve que $Z \in \bar{E}(X|\mathcal{B})$.

Unicité. Soit $Z_1, Z_2 \in \bar{E}(X|\mathcal{B})$. prenons $U = (\text{sign}(Z_1 - Z_2))^+$ (qui est bien \mathcal{B} -mesurable et positive). On a donc, par (11.3), $E(Z_1U) = E(Z_2U) = E(XU)$, mais on ne peut rien en déduire car il est possible que $E(XU) = +\infty$. On va donc modifier légèrement U . Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On pose $B_n = \{Z_1 \leq n\} \cap \{Z_2 \leq n\}$ et $U_n = U1_{B_n}$. La fonction U_n est encore \mathcal{B} -mesurable et positive et (11.3) donne $E(Z_1U_n) = E(Z_2U_n)$. Comme $0 \leq E(Z_1U_n) = E(Z_2U_n) \leq n$, on en déduit $E((Z_1 - Z_2)U_n) = 0$. Mais, $(Z_1 - Z_2)U_n \geq 0$. En faisant tendre n vers l'infini, le théorème de convergence monotone (théorème 4.1) donne $E((Z_1 - Z_2)U) = 0$, c'est-à-dire $E((Z_1 - Z_2)^+) = 0$ et donc $Z_1 \leq Z_2$ p.s.. En changeant les rôles de Z_1 et Z_2 on a aussi $Z_2 \leq Z_1$ p.s.. D'où $Z_1 = Z_2$ p.s.. ■

Définition 11.2 Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, X une v.a.r. positive et \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} . On appelle “Espérance, conditionnée par \mathcal{B} , de X ” ou “Espérance conditionnelle de X par rapport à \mathcal{B} ” l'ensemble des applications Z de Ω dans \mathbb{R} , \mathcal{B} -mesurable, positive et t.q. :

$$E(ZU) = E(XU) \text{ pour toute application } U \text{ de } \Omega \text{ dans } \mathbb{R}, \mathcal{B}\text{-mesurable et positive.} \quad (11.4)$$

On note $\bar{E}(X|\mathcal{B})$ cette espérance conditionnelle (c'est donc un ensemble de fonctions). (Noter que dans (11.1), les applications ZU et XU sont bien des v.a.r. positives, leur intégrale sur Ω est donc bien définie et appartient à \bar{R}_+).

La proposition 11.2 nous donne l'existence et l'unicité (p.s.) de l'espérance conditionnelle lorsque X est une v.a.r. positive. Sous les hypothèses de la définition 11.2, si X est de plus intégrable, on a donc deux définitions de l'espérance conditionnelle de X par rapport à \mathcal{B} , notée $E(X|\mathcal{B})$ et $\bar{E}(X|\mathcal{B})$. La proposition 11.2 montre que $Z_1 \in E(X|\mathcal{B})$ et $Z_2 \in \bar{E}(X|\mathcal{B})$ implique $Z_1 = Z_2$ p.s.. En pratique, comme on confond $E(X|\mathcal{B})$ avec l'un de ces éléments et $\bar{E}(X|\mathcal{B})$ avec l'un de ces éléments, on a donc $E(X|\mathcal{B}) = \bar{E}(X|\mathcal{B})$ p.s.. Il est donc inutile de conserver la notation $\bar{E}(X|\mathcal{B})$ et on conservera la notation $E(X|\mathcal{B})$ dans les deux cas, c'est-à-dire "X v.a.r. intégrable" et "X v.a.r. positive".

Nous donnons maintenant quelques propriétés de l'espérance conditionnelle.

Proposition 11.3 Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} et X une v.a.r.. Soit $p \in]1, \infty]$ et q le nombre conjugué de p (i.e. $q = p/(p-1)$ si $p < +\infty$ et $q = 1$ si $p = \infty$). On suppose que $X \in \mathcal{L}_{\mathbb{R}}^p(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Soit $Z \in E(X|\mathcal{B})$. Alors, $Z \in \mathcal{L}_{\mathbb{R}}^q(\Omega, \mathcal{A}, P)$ et $E(ZU) = E(XU)$ pour toute application U (de Ω dans \mathbb{R}) \mathcal{B} -mesurable t.q. $|U|^q$ soit intégrable.

DÉMONSTRATION : La démonstration fait partie de l'exercice 11.5. En fait, le cas $p = 2$ a déjà été vu dans la démonstration de la proposition 11.1. ■

Proposition 11.4 (Inégalité de Jensen généralisée)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} et X une v.a.r. de carré intégrable. Soit φ une fonction convexe de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . On suppose que $\varphi(X)$ est intégrable. On a alors $E(\varphi(X)|\mathcal{B}) \geq \varphi(E(X|\mathcal{B}))$ p.s..

DÉMONSTRATION : D'après le lemme 11.1, comme φ est convexe, il existe c , fonction croissante de \mathbb{R} dans \mathbb{R} (et donc fonction borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R}) t.q., pour tout $x, a \in \mathbb{R}$, $\varphi(x) - \varphi(a) \geq c(a)(x - a)$.

Soit $Z \in E(X|\mathcal{B})$. On a donc pour tout $\omega \in \Omega$:

$$\varphi(X(\omega)) - \varphi(Z(\omega)) \geq c(Z(\omega))(X(\omega) - Z(\omega)). \tag{11.5}$$

On aimerait intégrer cette inégalité sur un élément (bien choisi) de \mathcal{B} mais cela n'est pas possible car les v.a.r. $\varphi(Z)$ et $c(Z)(X - Z)$ peuvent ne pas être intégrables (bien que Z et X soient intégrables). Pour $p \in \mathbb{N}^*$, on introduit donc $A_p = \{|Z| \leq p\}$ de sorte que les v.a.r. $1_{A_p}c(Z)(X - Z)$ et $1_{A_p}\varphi(Z)$ sont intégrables (noter que $c(Z)$ est bornée sur A_p car c est croissante). On pose aussi $A = \{E(\varphi(X)|\mathcal{B}) - \varphi(Z) < 0\}$ et $B_p = A_p \cap A$. Soit $p \in \mathbb{N}^*$, l'inégalité (11.5) donne $1_{B_p}(\varphi(X) - \varphi(Z)) \geq 1_{B_p}c(Z)(X - Z)$ et donc, en intégrant sur Ω :

$$\int_{B_p} (\varphi(X) - \varphi(Z))dP \geq \int_{B_p} c(Z)(X - Z)dP. \tag{11.6}$$

Comme Z et $E(\varphi(X)|\mathcal{B})$ sont \mathcal{B} -mesurables, on a $B_p \in \mathcal{B}$ (et donc 1_{B_p} est \mathcal{B} -mesurable). On a aussi $c(Z)$ \mathcal{B} -mesurable (car c est borélienne) et donc $1_{B_p}c(Z)$ \mathcal{B} -mesurable. On en déduit :

$$\int_{B_p} c(Z)(X - Z)dP = E(1_{B_p}c(Z)(X - Z)) = 0 \text{ (car } Z \in E(X|\mathcal{B})),$$

et

$$\int_{B_p} (\varphi(X) - \varphi(Z))dP = E(1_{B_p}(\varphi(X) - \varphi(Z))) = E(1_{B_p}(E(\varphi(X)|\mathcal{B}) - \varphi(Z))).$$

Avec (11.6), on en déduit :

$$\int_{B_p} (E(\varphi(X)|\mathcal{B}) - \varphi(Z))dP \geq 0.$$

Comme $E(\varphi(X)|\mathcal{B}) - \varphi(Z) < 0$ sur B_p (car $B_p \subset A$), on a donc $P(B_p) = 0$ et donc $P(A) = P(\cup_{p \in \mathbb{N}^*} B_p) = 0$. Ce qui donne bien $E(\varphi(X)|\mathcal{B}) \geq \varphi(Z)$ p.s.. ■

Lemme 11.1 *Soit φ une fonction convexe de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , il existe alors c , fonction croissante de \mathbb{R} dans \mathbb{R} (et donc fonction borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R}) t.q., pour tout $x, a \in \mathbb{R}$, $\varphi(x) - \varphi(a) \geq c(a)(x - a)$.*

DÉMONSTRATION : Si φ est dérivable sur \mathbb{R} , la fonction c existe et est unique, elle est donnée par $c = \varphi'$. L'existence de c est légèrement plus difficile si φ n'est pas dérivable sur tout \mathbb{R} (et on perd l'unicité de c).

Soit $a \in \mathbb{R}$, on considère le fonction $h_a : x \mapsto \frac{\varphi(x) - \varphi(a)}{x - a}$ qui est définie sur $\mathbb{R} \setminus \{a\}$. La convexité de φ permet de montrer que h_a est croissante (c'est-à-dire que $x, y \in \mathbb{R} \setminus \{a\}$, $x > y \Rightarrow h_a(x) \geq h_a(y)$). La fonction h_a a donc une limite à gauche (et à droite) en tout point, y compris au point a . On pose (par exemple) :

$$c(a) = \lim_{x \rightarrow a, x < a} h_a(x).$$

Il est facile de vérifier que la fonction c ainsi définie est croissante de \mathbb{R} dans \mathbb{R} et vérifie, pour tout $x, a \in \mathbb{R}$, $\varphi(x) - \varphi(a) \geq c(a)(x - a)$. ■

On définit maintenant l'espérance conditionnelle par rapport à une v.a.r. ou un v.a.

Définition 11.3 *Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et X une v.a.r. (ou un v.a. de dimension d , $d \geq 1$). Soit Y une v.a.r. intégrable ou une v.a.r. positive. On appelle "Espérance, conditionnée par X , de Y " ou "Espérance conditionnelle de Y par rapport à X " (ou "Espérance conditionnelle de Y sachant X ") l'ensemble $E(Y|\sigma(X))$, où $\sigma(X)$ est la tribu engendrée par X . On note $E(Y|X)$ cette espérance conditionnelle, de sorte que $E(Y|X) = E(Y|\sigma(X))$. (L'ensemble $E(Y|X)$ est donc un ensemble de v.a.r. et, comme d'habitude, on confond $E(Y|X)$ avec l'un de ces éléments.)*

Pour caractériser $E(Y|X)$ (sous les hypothèses de la définition 11.3) et pour calculer cette espérance conditionnelle, on utilise, en général, le théorème 3.1 que nous rappelons sous une forme légèrement plus précise (donnée dans la démonstration du théorème 3.1).

Théorème 11.1 (***Y mesurable par rapport à X***) *Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et X, Y deux v.a.r.. On note $\sigma(X)$ la tribu engendrée par X . Alors :*

- *La v.a.r. Y est $\sigma(X)$ -mesurable si et seulement si il existe f , fonction borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , t.q. $Y = f(X)$.*
- *La v.a.r. Y est $\sigma(X)$ -mesurable bornée si et seulement si il existe f , fonction borélienne bornée de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , t.q. $Y = f(X)$.*
- *La v.a.r. Y est $\sigma(X)$ -mesurable positive si et seulement si il existe f , fonction borélienne positive de \mathbb{R} dans \mathbb{R} , t.q. $Y = f(X)$.*

DÉMONSTRATION : La démonstration de ce théorème est donnée dans la démonstration du théorème 3.1. ■

Voici une conséquence immédiate de ce théorème, utilisée pour calculer $E(Y|X)$

Proposition 11.5 (Calcul de $E(Y|X)$) Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et X, Y deux v.a.r.. Soit Z une application de Ω dans \mathbb{R} .

1. On suppose que Y est intégrable. Alors, $Z \in E(Y|X)$ si et seulement si il existe ψ application borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R} t.q. $Z = \psi(X)$, $\psi(X)$ est intégrable et

$$E(\psi(X)\varphi(X)) = E(Y\varphi(X)) \text{ pour toute application } \varphi \text{ de } \mathbb{R} \text{ dans } \mathbb{R}, \text{ borélienne bornée.} \quad (11.7)$$

2. On suppose que Y est positive. Alors, $Z \in E(Y|X)$ si et seulement si il existe ψ application borélienne positive de \mathbb{R} dans \mathbb{R} t.q. $Z = \psi(X)$ et

$$E(\psi(X)\varphi(X)) = E(Y\varphi(X)) \text{ pour toute application } \varphi \text{ de } \mathbb{R} \text{ dans } \mathbb{R}, \text{ borélienne positive.} \quad (11.8)$$

DÉMONSTRATION : La démonstration est une conséquence immédiate du théorème 11.1. ■

La conséquence de la proposition 11.5 est que (sous les hypothèses de la proposition) l'on cherche $E(Y|X)$ sous la forme d'une fonction $\psi(X)$ (avec ψ de \mathbb{R} dans \mathbb{R}) vérifiant (11.7) (ou (11.8)). On raisonne, en général, par "condition nécessaire sur ψ " et, comme on sait que $E(X|Y)$ existe, il est même inutile de vérifier que la fonction $\psi(X)$ que l'on trouve (qui est, en général, définie p.s.) est bien intégrable (ou positive).

La proposition 11.5 montre également que (sous les hypothèses de la proposition 11.5) la fonction Y est une fonction de X (c'est-à-dire $Y = \psi(X)$ pour un certain ψ de \mathbb{R} dans \mathbb{R}) si et seulement si $E(Y|X) = Y$. Pour montrer que la v.a.r. Y est une fonction d'une autre v.a.r. X , il suffit donc de montrer que $E(Y|X) = Y$. En comparaison, le calcul de la covariance entre X et Y (après "normalisation") s'intéresse seulement à l'existence ou non d'une dépendance affine de Y en fonction de X . Voir, à ce propos, l'exercice 11.13.

11.2 Martingales

Définition 11.4 (Filtration et processus) Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé

1. On appelle "filtration" une suite de tribus $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ t.q. $\mathcal{B}_n \subset \mathcal{B}_{n+1} \subset \mathcal{A}$, pour tout $n \in \mathbb{N}$.
2. On appelle "processus réel" une suite de v.a.r..
3. Soit $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une filtration et $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ un processus réel. On dit que $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est adapté à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ si, pour tout $n \in \mathbb{N}$, X_n est \mathcal{B}_n -mesurable.

Définition 11.5 (Martingale) Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une filtration et $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ un processus réel (c'est-à-dire une suite de v.a.r.).

1. (Martingale) la suite $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une martingale par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ si on a, pour tout $n \in \mathbb{N}$,
 - (a) X_n est \mathcal{B}_n -mesurable et intégrable,
 - (b) $E(X_{n+1}|\mathcal{B}_n) = X_n$ p.s..
2. (Sous et sur martingale) la suite $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une sous-martingale [resp. sur-martingale] par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ si on a, pour tout $n \in \mathbb{N}$,
 - (a) X_n est \mathcal{B}_n -mesurable et intégrable,

(b) $E(X_{n+1}|\mathcal{B}_n) \geq X_n$ p.s. [resp. $E(X_{n+1}|\mathcal{B}_n) \leq X_n$ p.s.].

Définition 11.6 (Temps d'arrêt) Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une filtration et T une v.a. à valeurs dans $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$ (c'est-à-dire une application mesurable de Ω , muni de la tribu \mathcal{A} , dans $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$, muni de la tribu la plus fine). L'application T s'appelle un temps d'arrêt si, pour tout $n \in \mathbb{N}$, $\{T = n\} \in \mathcal{B}_n$.

On conclut cette section par un théorème, sans démonstration, sur la convergence des martingales.

Théorème 11.2 (Convergence p.s. d'une martingale)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une filtration et $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de v.a.r. positives. On suppose que $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une martingale par rapport à $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Alors, il existe une v.a.r. intégrable, X , t.q. $X_n \rightarrow X$ p.s., quand $n \rightarrow \infty$.

11.3 Exercices

11.3.1 Espérance conditionnelle

Exercice 11.1 (Espérance conditionnelle selon une tribu) Corrigé 176 page 498

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et Y une variable aléatoire réelle intégrable. Dans les trois cas suivants, montrer que $E[Y|\mathcal{B}]$ est réduit à un élément et déterminer $E[Y|\mathcal{B}]$ (en fonction de Y et \mathcal{B}).

1. La tribu \mathcal{B} la tribu grossière, c'est-à-dire $\mathcal{B} = \{\emptyset, \Omega\}$.
2. Soit $B \in \mathcal{A}$ t.q. $0 < P[B] < 1$. On prend pour \mathcal{B} la tribu engendrée par B .
3. Soit $(B_n)_{n \in \mathbb{N}^*} \subset \mathcal{A}$ t.q. $B_n \cap B_m = \emptyset$ si $n \neq m$, $\Omega = \cup_{n \in \mathbb{N}^*} B_n$ et $0 < P(B_n) < 1$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. On prend pour \mathcal{B} la tribu engendrée par $(B_n)_{n \in \mathbb{N}^*}$ (c'est-à-dire $\mathcal{B} = \{\cup_{n \in J} B_n, J \subset \mathbb{N}^*\}$).

Exercice 11.2 (Espérance conditionnelle selon une tribu (2))

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et X une v.a.r. intégrable. Soit $B \in \mathcal{A}$ t.q. $P(B) = 1$ et $B^c \neq \emptyset$ (c'est le cas, par exemple, si P est une mesure diffuse, que \mathcal{A} contient les singletons et que B^c est formé d'un nombre fini ou dénombrable de points de Ω). On pose $\mathcal{B} = \{\emptyset, B, B^c, \Omega\}$. Pour $a \in \mathbb{R}$, on pose $Z_a = E(X)1_B + a1_{B^c}$. Montrer que $E(X|\mathcal{B}) = \{Z_a, a \in \mathbb{R}\}$.

Exercice 11.3 (Espérance conditionnelle selon une v.a.r.) Corrigé 177 page 499

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, X une variable aléatoire réelle et Y une variable aléatoire réelle intégrable.

1. On suppose qu'il existe $a \in \mathbb{R}$ t.q. $X = a$ p.s.. Donner un élément de $E[Y|X]$.
2. On suppose que X prend p.s. deux valeurs x_1 ou x_2 avec $x_1 \neq x_2$. Donner un élément de $E[Y|X]$.
3. On suppose que X est une v.a. prenant p.s. ses valeurs dans un ensemble dénombrable $\{x_n, n \in \mathbb{N}^*\}$ avec $P(X = x_n) \neq 0$ pour tout $n \in \mathbb{N}^*$. Donner un élément de $E[Y|X]$.

Exercice 11.4 (Egalité d'espérances conditionnelles)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, \mathcal{B} une sous-tribu de \mathcal{A} , $B \in \mathcal{B}$ un événement et X une v.a.r. intégrable t.q. $X1_B = Y1_B$ p.s.. Montrer que $E[X|\mathcal{B}]1_B = E[Y|\mathcal{B}]1_B$ p.s..

Exercice 11.5 (Espérance conditionnelle d'une v.a.r. appartenant à \mathcal{L}^p)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé, \mathcal{B} une tribu incluse dans \mathcal{A} et X une v.a.r.. Soit $p \in]1, \infty[$ et q le nombre conjugué de p (c'est-à-dire $q = p/(p-1)$ si $p < +\infty$ et $q = 1$ si $p = \infty$). On suppose que $X \in \mathcal{L}^p_{\mathbb{R}}(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Soit $Z \in E(X|\mathcal{B})$. Montrer que $Z \in \mathcal{L}^q_{\mathbb{R}}(\Omega, \mathcal{A}, P)$ et que $E(ZU) = E(XU)$ pour toute application U (de Ω dans \mathbb{R}) \mathcal{B} -mesurable de puissance q -ième intégrable.

Exercice 11.6 (Calcul de $E(\exp(XY)|X)$ si Y est gaussienne) Corrigé 178 page 500

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités et X, Y deux v.a. réelles indépendantes. On suppose que Y suit une loi gaussienne centrée réduite et que $E[\exp(X^2/2)] < \infty$. Montrer que $\exp(XY)$ est intégrable et déterminer $E[\exp(XY)|X]$.

Exercice 11.7 (Espérance selon une somme de v.a.r.i.i.d)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités, $n \in \mathbb{N}^*$ et X_1, \dots, X_n des variables aléatoires indépendantes, de même loi et intégrables. On note $S_n = \sum_{k=1}^n X_k$. Calculer $E(X_1|S_n)$.

Exercice 11.8 (Une condition nécessaire pour avoir $X = Y$ p.s.)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités et X, Y deux variables aléatoires réelles intégrables et t.q.

$$E[X|Y] = Y \text{ p.s. et } E[Y|X] = X \text{ p.s..}$$

1. Montrer que pour tout réel c , $E[(X - Y)1_{X>c, Y>c}] = E[(Y - X)1_{X>c \geq Y}] \leq 0$ p.s..
2. En déduire que pour tout réel c , $P[X > c \geq Y] = 0$ p.s..
3. Montrer que $X = Y$ p.s..

Exercice 11.9 (Espérance du produit et produit des espérances) Corrigé 179 page 501

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités et X, Y deux v.a. intégrables t.q. XY est intégrable et $E[X|Y] = E(X)$ p.s.. Montrer que $E(XY) = E(X)E(Y)$.

Exercice 11.10 (Égalité de lois donne égalité d'espérances conditionnelles)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités et X, Y, Z trois variables aléatoires réelles t.q. $(X, Z) \sim (Y, Z)$. Montrer que pour toute fonction f borélienne positive, $E[f(X)|Z] = E[f(Y)|Z]$ p.s..

Exercice 11.11 (Convergence faible \Rightarrow convergence faible des espérances conditionnelles)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités, \mathcal{B} une sous-tribu de \mathcal{A} , X une v.a. intégrable et $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de v.a. intégrables. On suppose que $X_n \rightarrow X$ faiblement dans $L^1(\Omega, \mathcal{A}, P)$ quand $n \rightarrow \infty$ (ce qui est équivalent à dire que, pour tout v.a. U bornée, on a $\lim_{n \rightarrow \infty} E[X_n U] = E[XU]$).

1. Montrer que pour toute v.a. U , \mathcal{B} -mesurable et bornée, on a

$$\lim_{n \rightarrow \infty} E[E[X_n|\mathcal{B}]U] = E[E[X|\mathcal{B}]U].$$

2. Montrer que $E[X_n|\mathcal{B}] \rightarrow E[X|\mathcal{B}]$ faiblement dans $L^1(\Omega, \mathcal{A}, P)$ quand $n \rightarrow \infty$.

Exercice 11.12 (Minoration d'une espérance conditionnelle)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité, \mathcal{B} une sous-tribu de \mathcal{A} et Y est une v.a.r. positive. Soit U une v.a.r. positive, \mathcal{B} -mesurable et t.q. pour toute v.a.r. positive \mathcal{B} -mesurable Z on ait $E(YZ) \geq E(UZ)$. Montrer que $E(Y|\mathcal{B}) \geq U$ p.s..

Exercice 11.13 (Dépendance linéaire et dépendance non linéaire)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité et X, Y deux v.a.r. non constantes.

1. (Dépendance linéaire.) On pose $\bar{X} = \frac{X-E(X)}{\sqrt{\text{Var}(X)}}$ et $\bar{Y} = \frac{Y-E(Y)}{\sqrt{\text{Var}(Y)}}$.
 - (a) Montrer que $|\text{Cov}(\bar{X}, \bar{Y})| \leq 1$.
 - (b) Montrer que $|\text{Cov}(\bar{X}, \bar{Y})| = 1$ si et seulement si il existe $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, $\alpha \neq 0$, t.q. $Y = \alpha X + \beta$.
 - (c) Donner un exemple pour lequel $Y = f(X)$ (avec f fonction borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R}) et $\text{Cov}(\bar{X}, \bar{Y}) = 0$.
2. (Dépendance.)
 - (a) On suppose que X et Y sont indépendantes. Montrer que $E(Y|X) = E(Y)$.
 - (b) Montrer qu'il existe f (fonction borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R}) t.q. $Y = f(X)$ si et seulement $E(Y|X) = Y$.

Exercice 11.14 (Lorsque $E(Y|X) = X$ p.s...) *Corrigé 180 page 502*

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace probabilisé et X, Y deux v.a.r. de carré intégrable.

On suppose que $E(Y|X) = X$ p.s..

1. (a) Soit φ une fonction borélienne de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . On suppose que la v.a.r. $\varphi(X)$ est de carré intégrable. Montrer que $\int_{\Omega} Y\varphi(X)dP = \int_{\Omega} X\varphi(X)dP$.
 - (b) Montrer que $E(Y) = E(X)$ et $E(XY) = E(X^2)$.
2. (a) Montrer que $E(X^2) \leq E(Y^2)$.
 - (b) Montrer que $Y = X$ p.s. si et seulement si $E(Y^2) = E(X^2)$.

Exercice 11.15 (Convergence d'une suite d'espérance conditionnelles)

Soient (E, T, p) un espace probabilisé et $(T_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une famille de tribus sur E t.q. $T_n \subset T_{n+1}$, pour tout $n \in \mathbb{N}$, et $\cup_{n \in \mathbb{N}} T_n = T$. Soit $X \in L^2_{\mathbb{R}}(E, T, p)$ et $E(X|T_n)$ l'espérance conditionnelle de X par rapport à la tribu T_n . Nous allons montrer que $E(X|T_n)$ converge vers X dans $L^2_{\mathbb{R}}(E, T, p)$ lorsque $n \rightarrow +\infty$.

1. Montrer qu'il existe $e \in L^2_{\mathbb{R}}(E, T, p)$ et une sous-suite de la suite $(E(X|T_n))_{n \in \mathbb{N}}$, encore notée $(E(X|T_n))_{n \in \mathbb{N}}$, qui converge faiblement vers e dans $L^2_{\mathbb{R}}(E, T, p)$.
2. Montrer que $\int XYdp = \int eYdp$, pour tout $Y \in F = \overline{\cup_{n \in \mathbb{N}} L^2_{\mathbb{R}}(E, T_n, p)}$.
3. Montrer que $F = L^2_{\mathbb{R}}(E, T, p)$ et en déduire que $e = X$ p.s..
4. Montrer que $\|E(X|T_n)\|_2 \leq \|X\|_2$ et en déduire que la suite $(e(X, T_n))_{n \in \mathbb{N}}$ converge vers X dans $L^2_{\mathbb{R}}(E, T, p)$.

Exercice 11.16 (Projection sur $L^2(\Omega, \tau(X), P)$ versus projection sur $\text{ev}(X)$)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilités. Si \mathcal{B} est une sous-tribu de \mathcal{A} , on note encore P la restriction de P à \mathcal{B} , de sorte que (Ω, \mathcal{B}, P) est encore un espace de probabilités. On rappelle que $\mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{B}, P) \subset \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{A}, P)$ et que l'on peut considérer $L^2(\Omega, \mathcal{B}, P)$ comme un s.e.v. de $L^2(\Omega, \mathcal{A}, P)$. L'espace $L^2(\Omega, \mathcal{B}, P)$ est donc un s.e.v. fermé de $L^2(\Omega, \mathcal{A}, P)$.

Soit $X \in L^2(\Omega, \mathcal{A}, P)$ (en choisissant un représentant de X , X est donc une v.a.). On note $\text{ev}(X)$ le s.e.v. engendré par X (noter que $\text{ev}(X)$ est un s.e.v. fermé de $L^2(\Omega, \mathcal{A}, P)$).

Si V est un s.e.v. fermé de $L^2(\Omega, \mathcal{A}, P)$, on note P_V l'opérateur de projection orthogonale sur V .

1. On suppose que X est constante et non nulle (c'est-à-dire qu'il existe $a \in \mathbb{R}^*$ t.q. $X = a$ p.s.). Montrer que $P_{\text{ev}(X)} = P_{L^2(\Omega, \tau(X), P)}$ (i.e. $\text{ev}(X) = L^2(\Omega, \tau(X), P)$).
2. On suppose que X n'est pas constante. Montrer que pour toute sous-tribu \mathcal{B} de \mathcal{A} , $P_{\text{ev}(X)} \neq P_{L^2(\Omega, \mathcal{B}, P)}$ (i.e. $\text{ev}(X) \neq L^2(\Omega, \mathcal{B}, P)$).

Remarque : Si Y est une v.a. de carré intégrable, on a $E[Y|X] = E[Y|\tau(X)] = P_{L^2(\Omega, \tau(X), P)} Y$.

11.3.2 Martingales

Exercice 11.17 (Quelques propriétés des martingales) *Corrigé 181 page 502*

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité muni d'une filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ (c'est-à-dire d'une suite croissante de sous tribus de \mathcal{A}) et $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de v.a.r. (c'est-à-dire un processus réel). On suppose que X_n est intégrable pour tout $n \in \mathbb{N}$.

1. On suppose que $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une sous-martingale (par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$) Montrer que la suite $(E(X_n))_{n \in \mathbb{N}}$ est croissante.
2. On suppose que $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une martingale (par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$) Montrer que $E(X_{n+m}|\mathcal{B}_n) = X_n$ p.s. pour tout $m \geq 0$.
3. Soit φ une fonction convexe de \mathbb{R} dans \mathbb{R} . On suppose que $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une martingale (par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$) et que $\varphi(X_n)$ est intégrable pour tout $n \in \mathbb{N}$ (on rappelle que $\varphi(X_n)$ est une notation pour désigner $\varphi \circ X_n$). Montrer que $(\varphi(X_n))_{n \in \mathbb{N}}$ est une sous-martingale (par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$).

Exercice 11.18 (Séries de Fourier et martingales)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité et \mathcal{B} une sous tribu de \mathcal{A} . Montrer que

$$X \in L^2(\Omega, \mathcal{B}, P) \Rightarrow X^+ \in L^2(\Omega, \mathcal{B}, P).$$

$$(L^2(\Omega, \mathcal{B}, P) = L^2_{\mathbb{R}}(\Omega, \mathcal{B}, P).)$$

On prend maintenant $\Omega =]0, 1[$, $\mathcal{A} = \mathcal{B}(]0, 1[)$ et $P = \lambda$ (la mesure de Lebesgue sur $\mathcal{B}(]0, 1[)$). On pose $H = L^2_{\mathbb{C}}(\Omega, \mathcal{A}, P)$. Pour $p \in \mathbb{Z}$, on définit $e_p \in H$ par $e_p(x) = \exp(2i\pi px)$ pour $x \in]0, 1[$. On rappelle que $\{e_p, p \in \mathbb{Z}\}$ est une base hilbertienne de H . pour $n \in \mathbb{N}$, on pose $V_n = \text{ev}\{e_p, -n \leq p \leq n\}$ (c'est un s.e.v. fermé de H).

Soit $X \in H$. On sait que $X_n \rightarrow X$ dans H , quand $n \rightarrow \infty$, avec $X_n = P_{V_n} X$ où P_{V_n} désigne l'opérateur de projection orthogonale sur V_n (X_n est donc une somme partielle de la série de Fourier de X).

1. Montrer que $P_{V_n}(X_{n+1}) = X_n$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.
2. Soit $n \in \mathbb{N}^*$, montrer qu'il n'existe pas de sous-tribu \mathcal{B} de \mathcal{A} t.q. $V_n = L^2_{\mathbb{C}}(\Omega, \mathcal{B}, P)$. [On pourra, par exemple, commencer par remarquer que V_n est formé de fonctions analytiques.]
3. Soit $n \in \mathbb{N}^*$. On pose $\mathcal{B}_n = \tau(e_p, -n \leq p \leq n)$. A-t-on $V_n \subset L^2_{\mathbb{C}}(\Omega, \mathcal{B}_n, P)$ ou $L^2_{\mathbb{C}}(\Omega, \mathcal{B}_n, P) \subset V_n$?

Exercice 11.19 (Quelques questions sur les temps d'arrêt)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité muni d'une filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$.

1. Soit $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de v.a.r., adaptée à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Soit $E \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ et τ défini de Ω dans \mathbb{R} par

$$\tau(\omega) = 1 \text{ si } X_1(\omega) \in E \text{ et } \tau = 5 \text{ si } X_1(\omega) \notin E.$$

Montrer que τ est un temps d'arrêt.

2. Soit ν et τ deux temps d'arrêt par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Montrer que $\nu + \tau$ est encore un temps d'arrêt (par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$).
3. Soit ν et τ deux temps d'arrêt, par rapport à la filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$, et t.q. $\nu \leq \tau$ p.s.. Soit \mathcal{B}_ν et \mathcal{B}_τ les deux tribus associées. Montrer que $\mathcal{B}_\nu \subset \mathcal{B}_\tau$. [Si T est un temps d'arrêt, on note $\mathcal{B}_T = \{A \in \mathcal{A} \text{ t.q., pour tout } n \in \mathbb{N}, A \cap \{T = n\} \in \mathcal{B}_n\}$.]

Exercice 11.20 (Martingale construite avec les espérances d'une v.a.)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité muni d'une filtration $(\mathcal{B}_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Soit X une v.a.r. intégrable. Montrer que la suite $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ définie par $X_n = E[X | \mathcal{B}_n]$ (pour tout $n \in \mathbb{N}$) est une martingale par rapport à la filtration (\mathcal{B}_n) .

Montrer que $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est aussi une martingale pour la filtration $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ définie par $\mathcal{F}_n = \tau(X_1, \dots, X_n)$ (pour tout $n \in \mathbb{N}$).

Exercice 11.21 (Il est temps de s'arrêter)

Soit (Ω, \mathcal{A}, P) un espace de probabilité muni d'une filtration $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ et $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de v.a.r., adaptée à la filtration $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$. On suppose aussi que $E[|X_n|] < \infty$ pour tout $n \in \mathbb{N}$.

1. Montrer que pour tout temps d'arrêt (par rapport à $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$) τ borné,

$$E[|X_\tau|] < \infty.$$

On suppose dans la suite que pour tout temps d'arrêt (par rapport à $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$) τ borné,

$$E[X_\tau] = E[X_0].$$

2. Soit $n \in \mathbb{N}$ et $\Lambda_n \in \mathcal{F}_n$. On définit σ_n par

$$\sigma_n(\omega) = n \text{ si } \omega \in \Lambda_n \text{ et } \sigma_n(\omega) = n + 1 \text{ si } \omega \notin \Lambda_n.$$

Montrer que σ_n est un temps d'arrêt (par rapport à $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$).

3. Soit $n \in \mathbb{N}$ et ν_n défini par $\nu_n(\omega) = n + 1$ pour tout $\omega \in \Omega$. Montrer que ν_n est aussi un temps d'arrêt (par rapport à $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$).
4. En remarquant que $X_\tau = X_\tau 1_A + X_\tau 1_{A^c}$ (pour tout temps d'arrêt τ et tout événement A), montrer que $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une martingale.