

Stochastic Process and Applications

Paul Lehaut

October 30, 2025

Contents

1	Chapitre 1: Rappels	3
1.1	Mesure	3
1.2	Fonctions Mesurables	3
1.3	Théorème de convergence pour l'intégration	4
1.4	Espaces L^p	4
1.5	Espérance, Variance et Inégalités	5
2	Espérance Conditionnelle	5
2.1	Espérance Conditionnelle	5
2.2	Espérance Conditionnée par une VA	7
3	Chaînes de Markov Discrètes	7
3.1	Définitions et Propriétés	7
4	Points A Retenir	9
4.1	Fonctions Mesurables	9
4.2	Espaces L^p	9
4.3	Espérance	9
4.3.1	Espérance Conditionnelle	9
4.4	Chaînes de Markov discrètes	10

1 Chapitre 1: Rappels

1.1 Mesure

Soit (Ω, \mathcal{F}) un espace mesurable.

Définition:

Une fonction $\mu : \mathcal{F} \rightarrow [0, +\infty]$ est dite σ -additive si pour toute collection dénombrable $(A_i, i \in I)$ d'ensembles mesurables deux à deux disjoints, on a:

$$\mu\left(\bigcup_{i \in I} A_i\right) = \sum_{i \in I} \mu(A_i).$$

Une mesure μ sur (Ω, \mathcal{F}) est σ -additive, à valeur dans $[0, +\infty]$, définie sur \mathcal{F} telle que: $\mu(\emptyset) = 0$. On dit que $(\Omega, \mathcal{F}, \mu)$ est un espace mesuré, $A \in \mathcal{F}$ est de mesure nulle si $\mu(A) = 0$.

μ est dite σ -finie si il existe $(\Omega_n, n \in \mathbb{N})$ telle que:

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} \Omega_n = \Omega \text{ et } \forall n \in \mathbb{N}, \mu(\Omega_n) < +\infty.$$

Une mesure de probabilité \mathbb{P} est une mesure telle que $\mathbb{P}(\Omega) = 1$.

Soit donc μ une mesure sur (Ω, \mathcal{F}) .

Proposition:

On a les propriétés suivantes:

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

$$A \subset B \implies \mu(A) \leq \mu(B)$$

Convergence monotone: pour $(A_n, n \in \mathbb{N})$ telle que $\forall n \in \mathbb{N}, A_{n+1} \subset A_n$, alors $\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$

Si $(A_i, i \in I)$ est une collection dénombrable d'ensembles mesurables, alors il vient: $\mu\left(\bigcup_{i \in I} A_i\right) \leq \sum_{i \in I} \mu(A_i)$.

Définition:

Les événements $(A_i, i \in I)$ sont indépendants si, pour tout sous-ensemble fini $J \subset I$, on a:

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{j \in J} A_j\right) = \prod_{j \in J} \mathbb{P}(A_j).$$

1.2 Fonctions Mesurables

Soient (S, \mathcal{S}) et (E, \mathcal{E}) deux espaces mesurables. Soit f une fonction de S dans E , alors:

$$\{f^{-1}(A), A \in \mathcal{E}\} = \sigma(f)$$

est une σ -algèbre.

Définition: Fonction mesurable

La fonction f est dite mesurable si $\sigma(f) \subset \mathcal{S}$.

Si μ est une mesure sur (E, \mathcal{E}) et que f est mesurable, alors $\mu_f = \mu \circ f^{-1}$ est une mesure sur (S, \mathcal{S}) .

Une fonction continue définie sur un espace topologique et prenant ses valeurs dans un espace topologique est mesurable au sens de la σ -algèbre borélienne.

Pour f et g des fonctions mesurables à valeurs réelles définies sur le même espace mesurable, alors les fonction fg

et $\max(f, g)$ sont mesurables. Si par ailleurs ses fonctions ne prennent pas de valeurs infinies, alors la fonction $f + g$ est mesurable.

La composition de fonctions mesurables est également mesurable.

Proposition:

Soit (f_n) une suite de fonctions réelles mesurables, alors les fonctions $\liminf f_n$ et $\limsup f_n$ sont mesurables, en particulier, si (f_n) converge simplement, alors sa limite est mesurable.

Définition: Variable Aléatoire

Une variable aléatoire X définie de Ω dans E est une fonction mesurable définie sur (Ω, \mathcal{F}) à valeurs dans (E, \mathcal{E}) . X est dite indépendante de la σ -algèbre \mathcal{H} si, pour tout $(A, B) \in \mathcal{E} \times \mathcal{H}$, les événements $\{X \in A\}$ et B sont indépendants.

1.3 Théorème de convergence pour l'intégration

Soit (f_n) une suite de fonctions mesurables à valeurs réelles. Cette suite converge presque partout si

$$\liminf f_n = \limsup f_n \text{ presque partout.}$$

On rappelle que la limite de cette suite de fonction est alors mesurable.

Théorème: Convergence monotone

Soit $(f_n, n \in \mathbb{N})$ une suite de fonctions mesurables à valeurs réelles telle que pour tout $n \in \mathbb{N}$, $0 \leq f_n \leq f_{n+1}$ presque partout, alors il vient:

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

Le lemme de Fatou donne, pour (f_n, n) une suite de fonctions mesurables et positives presque partout, alors il vient:

$$\liminf \int f_n d\mu \geq \int \liminf f_n d\mu.$$

Théorème: Convergence dominée de Lebesgue

Soient f, g deux fonctions à valeurs réelles mesurables, soit (f_n) une suite de fonctions à valeurs réelles mesurables. On suppose que, pour tout $n \in \mathbb{N}$, on a presque partout $|f_n| \leq g$, que f désigne la limite de (f_n) et que g est intégrable, alors:

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

1.4 Espaces L^p

On commence par rappeler les inégalités suivantes pour f et g des fonctions mesurables à valeurs réelles:

Inégalité de Hölder: Soient $p, q \in (1, +\infty)$ tels que $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, supposons que $|f|^p$ et $|g|^q$ soient intégrables, alors fg est intégrable et on a:

$$\int |fg| d\mu \leq \left(\int |f|^p d\mu \right)^{1/p} \left(\int |g|^q d\mu \right)^{1/q}.$$

Inégalité de Cauchy-Schwarz: Supposons que f et g soient de carré intégrable, alors fg est intégrable et on a:

$$\int |fg| d\mu \leq \left(\int f^2 d\mu \right)^{1/2} \left(\int g^2 d\mu \right)^{1/2}$$

on a égalité si et seulement si f et g sont proportionnelles presque partout.

Inégalité de Minkowski: Soit $p \in [1, +\infty)$, supposons que $|f|^p$ et $|g|^p$ soient intégrables, alors on a:

$$(\int |f + g|^p d\mu)^{1/p} \leq (\int |f|^p d\mu)^{1/p} + (\int |g|^p d\mu)^{1/p}.$$

Proposition:

Soit $p \in [1, +\infty)$, l'espace-vectoriel normé $(L^p, \|\cdot\|_p)$ est complet.

Théorème: Fubini

Soient ν et μ deux mesures σ -finies respectivement sur (E, \mathcal{E}) et (S, \mathcal{S}) , alors:

-il existe une unique mesure sur $(E \times S, \mathcal{E} \otimes \mathcal{S})$, notée $\nu \otimes \mu$, telle que:

$$\forall (A, B) \in \mathcal{E} \times \mathcal{S}, \nu \otimes \mu(A \times B) = \nu(A)\mu(B)$$

c'est la mesure produit

-Soit f une fonction à valeurs réelles définie sur $E \times S$, alors:

$$\int f(x, y) \nu \otimes \mu(dx, dy) = \int \int f(x, y) \mu(dy) \nu(dx) = \int \int f(x, y) \nu(dx) \mu(dy).$$

1.5 Espérance, Variance et Inégalités

Soit X une variable aléatoire, soit f une fonction à valeurs réelles, si $\mathbb{E}(f(X))$ est bien définie, alors on a:

$$\mathbb{E}(f(X)) = \int f(x) \mathbb{P}_X(dx).$$

Inégalité de Tchebychev: Soit X une $VA_{\mathbb{R}}$, soit, $a > 0$, alors:

$$\mathbb{P}(|X| \geq a) \leq \frac{\mathbb{E}(X^2)}{a^2}.$$

Inégalité de Jensen: Soit X une $VA_{\mathbb{R}^d}$ intégrable, soit f une fonction à valeurs réelles convexe définie sur \mathbb{R}^d , alors $\mathbb{E}(f(X))$ est bien définie et:

$$f(\mathbb{E}(X)) \leq \mathbb{E}(f(X)).$$

2 Espérance Conditionnelle

2.1 Espérance Conditionnelle

On s'intéresse à une $VA_{\mathbb{R}}$ définie sur (E, \mathcal{F}) dont l'espérance est bien définie ainsi qu'à $\mathcal{H} \subset \mathcal{F}$ une σ -algèbre.

Définition: Espérance conditionnelle

On dit qu'une variable aléatoire Z , mesurable pour \mathcal{H} telle que $\mathbb{E}(Z)$ soit bien définie, est l'espérance conditionnelle de X par rapport à \mathcal{H} si:

$$\mathbb{E}(X1_A) = \mathbb{E}(Z1_A), \forall A \in \mathcal{H}.$$

Pour Z et Z' deux variables aléatoires \mathcal{H} mesurables telles que leurs espérances soient bien définies et que:

$$\mathbb{E}(Z1_A) = \mathbb{E}(Z'1_A), \forall A \in \mathcal{H}$$

alors $Z = Z'$ presque partout.

Théorème: Radon-Nikodym

Soient μ et ν deux mesures σ -finie sur (Ω, \mathcal{H}) telles que: $\nu(A) = 0 \implies \mu(A) = 0$, alors il existe une fonction mesurable f positive telle que:

$$\int_A f d\nu = \mu(A)$$

on note alors: $f = \frac{d\mu}{d\nu}$ et on l'appelle dérivée de Radon-Nikodym.

Proposition:

Pour X et Y des VAR de carré intégrable alors:

-Si X est positive presque partout, alors l'espérance conditionnelle de X est positive presque partout.

-On a presque partout: $\mathbb{E}(aX + bY|\mathcal{H}) = a\mathbb{E}(X|\mathcal{H}) + b\mathbb{E}(Y|\mathcal{H})$.

-Soit $(X_n, n \in \mathbb{N})$ une suite croissante de VAR positives de carré intégrable alors on a presque partout:

$$\lim \mathbb{E}(X_n|\mathcal{H}) = \mathbb{E}(\lim X_n|\mathcal{H}).$$

Proposition:

L'espérance conditionnelle de X par rapport à \mathcal{H} existe toujours, par ailleurs on a:

$$\mathbb{E}(\mathbb{E}(X|\mathcal{H})) = \mathbb{E}(X)$$

donc l'intégrabilité de X entraîne celle de $\mathbb{E}(X|\mathcal{H})$.

Proposition:

-Si X est positive presque partout alors son espérance conditionnelle l'est également.

-Si X et Y sont intégrables, alors, pour tout réels a et b , on a :

$$\mathbb{E}(aX + bY|\mathcal{H}) = a\mathbb{E}(X|\mathcal{H}) + b\mathbb{E}(Y|\mathcal{H})$$

et, si $X \leq Y$ presque partout, alors $\mathbb{E}(X|\mathcal{H}) \leq \mathbb{E}(Y|\mathcal{H})$ presque partout.

-Soit $(X_n, n \in \mathbb{N})$ une suite croissante de VAR positives presque partout, alors on a presque partout:

$$\lim \mathbb{E}(X_n|\mathcal{H}) = \mathbb{E}(\lim X_n|\mathcal{H}).$$

-Le lemme de Fatou s'écrit: Soit $(X_n, n \in \mathbb{N})$ une suite de VAR positives presque partout, alors on a presque partout:

$$\mathbb{E}(\liminf X_n|\mathcal{H}) \leq \liminf \mathbb{E}(X_n|\mathcal{H}).$$

-La convergence dominée de Lebesgue s'écrit: Soient $X, Y, (X_n)$ des VAR telles que (X_n) converge vers X presque partout et $|X_n| \leq Y$ avec Y intégrable, alors on a :

$$\lim \mathbb{E}(X_n|\mathcal{H}) = \mathbb{E}(X|\mathcal{H}).$$

Par ailleurs, les inégalités de Hölder, Cauchy-Schwarz, Minkowski et Jensen restent valables pour l'espérance conditionnelle.

De plus, pour X et Y deux VAR telles que $\mathbb{E}(X)$ et $\mathbb{E}(XY)$ soient bien définies et que Y soit \mathcal{H} mesurable, alors on a:

$$\mathbb{E}(XY) = \mathbb{E}(\mathbb{E}(X|\mathcal{H})Y).$$

Proposition:

On suppose X intégrable, alors:

- Si X est \mathcal{H} mesurable, alors: $\mathbb{E}(X|\mathcal{H}) = X$.
- Si X est indépendante de \mathcal{H} alors: $\mathbb{E}(X|\mathcal{H}) = \mathbb{E}(X)$.
- Si Y est une VA \mathcal{H} mesurable telle que $\mathbb{E}(XY)$ soit bien définie, alors: $\mathbb{E}(YX|\mathcal{H}) = Y\mathbb{E}(X|\mathcal{H})$.
- Si $\mathcal{G} \subset \mathcal{H}$ est une σ -algèbre, alors: $\mathbb{E}(\mathbb{E}(X|\mathcal{H})|\mathcal{G}) = \mathbb{E}(X|\mathcal{G})$.
- Si $A \in \mathcal{H}$, alors: $\mathbb{E}(X|A) = \mathbb{E}(X1_A)\mathbb{P}(A)$.

2.2 Espérance Conditionnée par une VA

Soit V une variable aléatoire définie sur (E, \mathcal{E}) , on note $\mathbb{E}(X|V) = \mathbb{E}(X|\sigma(V))$, si $\mathbb{E}(X)$ est bien définie, alors il existe une fonction mesurable g définie sur E telle que: $\mathbb{E}(X|V) = g(V)$.

Si V est discrète, alors:

$$g(v) = \frac{\mathbb{E}(X1_{V=v})}{\mathbb{P}(V=v)} = \mathbb{E}(X|V=v) \text{ si } \mathbb{P}(V=v) > 0, \text{ et } g(v) = 0 \text{ sinon.}$$

3 Chaînes de Markov Discrètes

Une chaîne de Markov est une suite de variables aléatoires $X = (X_n)$ qui représente l'évolution dynamique d'un système stochastique. La propriété fondamentale des chaînes de Markov est que l'état du système à l'instant n ne dépend des états précédents qu'à travers X_n . C'est-à-dire que, conditionnellement à X_n , (X_1, \dots, X_n) et $(X_{n+k})_k$ sont indépendants.

Dans ce qui suit on considère l'espace probabilisé $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ et l'espace (E, \mathcal{E}) où E est au plus dénombrable, sans précisions supplémentaires les VAs seront définies de \mathcal{F} dans \mathcal{E} .

3.1 Définitions et Propriétés

Soit $X = (X_n)$ une chaîne de Markov, on définit l'ensemble des informations disponibles à l'instant n par la σ -algèbre \mathcal{F}_n

Définition: Filtre

Un filtre $\mathbb{F} = (\mathcal{F}_n)$ est une suite croissante de σ -algèbres incluses dans \mathcal{F} . Une suite de VAs (X_n) est adaptée pour \mathbb{F} si X_n est \mathcal{F}_n mesurable pour tout n .

Définition:

Le processus $X = (X_n)$ est une chaîne de Markov qui respecte le filtre \mathbb{F} si elle est adaptée pour ce filtre et si elle vérifie la propriété de Markov: pour tout n , conditionnellement à X_n , \mathcal{F}_n et $(X_{n+k})_{k \in \mathbb{N}}$ sont indépendants.

Proposition: Définitions équivalentes

On suppose que (X_n) est adaptée au filtre \mathbb{F} , alors on a les équivalences suivantes:

- (X_n) est une chaîne de Markov
- Pour tout n et $B \in \sigma(X_k)_{k \geq n}$ on a $\mathbb{P}(B|\mathcal{F}_n) = \mathbb{P}(B|X_n)$
- Pour tout n et $y \in E$ on a $\mathbb{P}(X_{n+1} = y|\mathcal{F}_n) = \mathbb{P}(X_{n+1} = y|X_n)$.

La proposition précédente nous permet d'introduire le lemme suivant:

Lemme:

Soient un espace mesurable (S, \mathcal{S}) et (U_n) une suite de VAs indépendantes à valeurs dans S . Soient X_0 une variable aléatoire à valeurs dans E indépendante de (U_n) et f une fonction mesurable définie de $E \times S$ dans E , on peut alors définir le système dynamique stochastique suivant: $X_{n+1} = f(X_n, U_{n+1})$ qui est une chaîne de Markov.

Définition: Matrices de transition

Une chaîne de Markov X sur E a les matrices de transition $(P_n)_n$ si c'est une suite de matrices stochastiques sur E telle que: $\mathbb{P}(X_{n+1} = y | X_n) = P_{n+1}(X_n, y)$.

Une chaîne de Markov est homogène si (P_n) est constante.

Proposition:

La distribution d'une chaîne de Markov homogène est caractérisée par sa matrice de transition P et la distribution initiale de probabilité μ_0 pour X_0 .

De plus, pour tout $n \in \mathbb{N}^*$, $x_1, \dots, x_n \in E$, alors:

$$\mathbb{P}(X_0 = x_0, \dots, X_n = x_n) = \mu_0(x_0) \prod_{k=1}^n P(x_{k-1}, x_k).$$

4 Points A Retenir

4.1 Fonctions Mesurables

On rappelle, pour f de (S, \mathcal{S}) dans (E, \mathcal{E}) : $\sigma(f) = \{f^{-1}(A), A \in \mathcal{E}\}$.

La fonction f est alors dite mesurable si $\sigma(f) \in \mathcal{S}$.

En général le produit, le max et la somme de fonction mesurable est mesurable.

La limite simple d'une suite de fonctions mesurables est mesurable.

Le théorème de convergence monotone donne, pour (f_n) une suite de fonctions mesurables à valeurs réelles telle que $0 \leq f_n \leq f_{n+1}$ presque partout, alors il vient:

$$\lim \int f_n d\mu = \int \lim f_n d\mu.$$

4.2 Espaces L^p

Inégalités:

- Hölder: pour $p, q \in (1, +\infty)$ tels que $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$, supposons que $f \in L^p$ et $g \in L^q$, alors fg est intégrable et:

$$\int |fg| d\mu \leq \left(\int |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \left(\int |g|^q d\mu \right)^{\frac{1}{q}}.$$

- CS: supposons désormais que f et g soient de carré intégrable, alors:

$$\int |fg| d\mu \leq \left(\int |f|^2 d\mu \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int |g|^2 d\mu \right)^{\frac{1}{2}}.$$

- Minkowski: soit $p \in [1, +\infty)$, on suppose que $f, g \in L^p$, alors:

$$\left(\int |f + g|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \leq \left(\int |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int |g|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}}.$$

Pour $p \in [1, +\infty)$, l'espace-vectoriel normé $(L^p, \|\cdot\|_p)$ est complet.

4.3 Espérance

Inégalité de Tchebychev: pour $a > 0$, on a: $\mathbb{P}(|X| \geq a) \leq \frac{\mathbb{E}(X^2)}{a^2}$. Inégalité de Jensen: pour f convexe: $f(\mathbb{E}(X)) \leq \mathbb{E}(f(X))$.

4.3.1 Espérance Conditionnelle

On rappelle la définition: une variable aléatoire Z , mesurable pour \mathcal{H} telle que son espérance soit bien définie, est l'espérance conditionnelle de X par rapport à \mathcal{H} si:

$$\mathbb{E}(X1_A) = \mathbb{E}(Z1_A), \forall A \in \mathcal{H}.$$

L'espérance conditionnelle de X par rapport à \mathcal{H} existe toujours et, par ailleurs: $\mathbb{E}(\mathbb{E}(X|\mathcal{H})) = \mathbb{E}(X)$.

La convergence dominée de Lebesgue s'écrit ici: soient $X, Y, (X_n)$ des VAR telles que (X_n) converge vers X presque partout et $|X_n| \leq Y$ avec Y intégrable, alors on a :

$$\lim \mathbb{E}(X_n|\mathcal{H}) = \mathbb{E}(X|\mathcal{H}).$$

De plus, pour X et Y deux VAR telles que $\mathbb{E}(X)$ et $\mathbb{E}(XY)$ soient bien définies et que Y soit \mathcal{H} mesurable, alors il vient;

$$\mathbb{E}(XY) = \mathbb{E}(\mathbb{E}(X|\mathcal{H})Y).$$

Propriétés importantes:

- Si X est \mathcal{H} mesurable, alors: $\mathbb{E}(X|\mathcal{H}) = X$
- Si X est indépendante de \mathcal{H} , alors: $\mathbb{E}(X|\mathcal{H}) = \mathbb{E}(X)$
- Si Y est une VA \mathcal{H} mesurable telle que $\mathbb{E}(XY)$ soit bien définie, alors: $\mathbb{E}(YX|\mathcal{H}) = Y\mathbb{E}(X|\mathcal{H})$
- Si $\mathcal{G} \subset \mathcal{H}$ est une σ -algèbre, alors: $\mathbb{E}(\mathbb{E}(X|\mathcal{H})|\mathcal{G}) = \mathbb{E}(X|\mathcal{G})$
- Si $A \in \mathcal{H}$, alors: $\mathbb{E}(X|A) = \mathbb{E}(X1_A)\mathbb{P}(A)$.

4.4 Chaînes de Markov discrètes

Propriété fondamentale: conditionnellement à X_n , les événements X_1, \dots, X_{n-1} et $(X_{n+k})_{k \geq 0}$ sont indépendants.

Le processus (X_n) est une chaîne de Markov qui respecte le filtre \mathbb{F} si elle est adaptée pour ce filtre et si elle vérifie: pour tout n , conditionnellement à X_n , les événements \mathcal{F}_n et (X_{n+k}) sont indépendants.

On a les équivalences pour (X_n) adaptée à \mathbb{F} : (X_n) est une chaîne de Markov ssi pour tout $B \in \sigma((X_k)_{k \geq n})$, $\mathbb{P}(B|\mathcal{F}_n) = \mathbb{P}(B|X_n)$ pour tout n ssi $\mathbb{P}(X_{n+1} = y|\mathcal{F}_n) = \mathbb{P}(X_{n+1} = y|X_n)$ pour tout n et $y \in E$.