

III - Probabilités

Préliminaire : Séries convergentes (H. P.)

Définition 1 - Série

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de réels. Pour tout n entier naturel, on pose

$$S_n = \sum_{k=0}^n u_k = u_0 + u_1 + \cdots + u_n.$$

- La suite $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est la *série de terme général* u_n .
- Le réel $S_n = \sum_{k=0}^n u_k$ est la *somme partielle* d'ordre n .

On note $\sum u_n$ la suite $\left(\sum_{k=0}^n u_k \right)_{n \in \mathbb{N}}$.

Exemple 1 - Série géométrique

Soit $q \neq 1$. On peut déterminer explicitement les sommes partielles de la série de terme général q^n car

$$\sum_{k=0}^n q^k = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}.$$

Définition 2 - Série convergente, Série divergente

Soit $(u_n)_{n \in \mathbb{N}}$ une suite de réels.

- Si $\left(\sum_{k=0}^n u_k \right)_{n \in \mathbb{N}}$ est convergente, alors la série de terme général u_n *converge*. Sinon, la série de terme général u_n *diverge*.

- Si la série de terme général u_n converge, la limite de $\left(\sum_{k=0}^n u_k \right)_{n \in \mathbb{N}}$ est la *somme* de cette série. On note

$$\sum_{k=0}^{+\infty} u_k = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{k=0}^n u_k.$$

Théorème 1 - Série géométrique

- Si $q \in]-1, 1[$, alors la série $\sum q^n$ converge et

$$\sum_{n=0}^{+\infty} q^n = \frac{1}{1 - q}.$$

- Si $q \geq 1$ ou $q \leq -1$, alors la série $\sum q^n$ diverge.

Théorème 2 - Série exponentielle

$$\sum \frac{1}{k!} \text{ converge.}$$

Exemple 2 - Série exponentielle

Pour tout $n \in \mathbb{N}$, on note $T_n = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!}$.

- D'après les propriétés de la somme,

$$T_{n+1} - T_n = \sum_{k=0}^{n+1} \frac{1}{k!} - \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} = \frac{1}{(n+1)!} \geq 0.$$

Ainsi, (T_n) est croissante.

- De plus, pour tout $k \geq 2$,

$$k(k-1)(k-2) \cdots 2 \geq 2 \times 2 \times 2 \times \cdots \times 2$$

$$k! \geq 2^{k-1}$$

$$\frac{1}{k!} \leq \frac{1}{2^{k-1}}$$

$$\sum_{k=2}^n \frac{1}{k!} \leq \sum_{k=2}^n \frac{1}{2^{k-1}}$$

$$T_n - 2 \leq \sum_{k=2}^n \frac{1}{2^{k-1}}$$

$$T_n \leq \sum_{\ell=1}^{n-1} \frac{1}{2^\ell} + 2$$

$$\leq \frac{1}{2} \times \frac{1 - \frac{1}{2^{n-1}}}{1 - \frac{1}{2}} + 2$$

$$\leq 1 - \frac{1}{2^{n-1}} + 2 \leq 3.$$

Donc (T_n) est majorée par 3.

- Ainsi, (T_n) est croissante et majorée donc convergente. On peut montrer que sa limite vaut $e = \exp(1)$.

On peut généraliser ce résultat en montrant que pour tout x réel, la série $\sum \frac{x^k}{k!}$ converge et sa somme vaut e^x .

I - L'univers

Définition 3 - Expérience aléatoire

Une *expérience aléatoire* est une expérience dont on ne peut prédire avec certitude le résultat.

Exemple 3 - Expériences aléatoires

Sont des expériences aléatoires les résultats obtenus...

- ... à l'issue de deux lancers successifs d'un dé à 6 faces.
- ... en tirant une carte d'un paquet de 32 cartes.
- ... en lançant successivement et une infinité de fois une pièce de monnaie.

Définition 4 - Univers

L'*univers*, généralement noté Ω , est l'ensemble des résultats possibles pour une expérience.

Exemple 4 - Modélisations d'univers

- Si l'expérience consiste à effectuer 2 lancers consécutifs d'un dé à 6 faces :

$$\Omega = \{(i, j), 1 \leq i, j \leq 6\} = \llbracket 1, 6 \rrbracket^2.$$

- Si l'expérience consiste à tirer une carte d'un paquet de 32 cartes, l'univers Ω est :

$$\{1, 7, 8, 9, 10, \text{valet, dame, roi}\} \times \{\text{cœur, pique, trèfle, carreau}\}.$$

- Si l'expérience consiste à effectuer une infinité de lancers d'une pièce de monnaie et à noter le premier lancer qui permet d'obtenir Pile, alors $\Omega = \mathbb{N} \cup \{+\infty\}$.

Définition 5 - Tribu

Une partie \mathcal{F} de $\mathcal{P}(\Omega)$ est une *tribu* sur Ω si :

- $\Omega \in \mathcal{F}$,
- pour tout $A \in \mathcal{F}$, alors $\bar{A} \in \mathcal{F}$,
- pour tout $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ famille d'éléments de \mathcal{F} , $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{F}$.

Le couple (Ω, \mathcal{F}) est un *espace probabilisable*.

Exemple 5 - Exemple de tribu

- L'ensemble $\mathcal{P}(\Omega)$ des parties de Ω est une tribu sur Ω . C'est cette tribu qui est généralement choisie dès que Ω est un ensemble fini.
- L'ensemble $\{\emptyset, \Omega\}$ est une tribu sur Ω . Cette tribu est très grossière et contient peu d'événements (voir la définition suivante). Elle sera peu utilisée en pratique.

Définition 6 - Événement

Un *événement* est un élément de la tribu.

Exemple 6 - Lancers de dé

Un dé à 6 faces est lancé successivement 2 fois et la tribu est l'ensemble des parties de $\llbracket 1, 6 \rrbracket^2$. On peut considérer les événements suivants :

- A : « Obtenir un nombre pair lors du premier lancer » ;
 B : « La somme des résultats obtenus vaut 7 ».

Définition 7 - Incompatibilité

Deux événements A et B sont *incompatibles* si $A \cap B = \emptyset$.

Exemple 7 - Lancers de dé

Un dé à 6 faces est lancé successivement 2 fois. On considère les événements :

- A : « Obtenir un nombre pair lors du premier lancer » ;
 B : « La somme des deux lancers vaut 2 ».

Alors, les événements A et B sont incompatibles.

Définition 8 - Événement contraire

Soit A un événement. L'événement *contraire* de A , noté \overline{A} , est l'ensemble des expériences de Ω qui ne sont pas dans A .

Exemple 8 - Lancers de dé

Un dé à 6 faces est lancé successivement 2 fois. Si A est l'événement « Obtenir un nombre pair lors du premier lancer », alors \overline{A} est l'événement « Obtenir un nombre impair lors du premier lancer ».

Définition 9 - Système complet d'événements

Un *système complet d'événements* est une famille d'événements A_1, \dots, A_n tels que

$$\begin{cases} A_i \cap A_j = \emptyset, & \forall 1 \leq i \neq j \leq n \\ \bigsqcup_{i=1}^n A_i = \Omega \end{cases}$$

Cette définition peut être étendue à une famille infinie $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ d'événements.

Exemple 9 - Lancers de dé

Un dé à 6 faces est lancé successivement 2 fois.

- On considère, pour tout $i \in \llbracket 2, 12 \rrbracket$, l'événement :
 A_i : « La somme des deux résultats vaut i ».
Alors, (A_2, \dots, A_{12}) est un système complet d'événements.
- On considère les événements :
 A : « Le premier dé renvoie un nombre pair » ;
 B : « Le premier dé renvoie un nombre impair ».
Alors, (A, B) est un système complet d'événements.

II - Probabilités

II.1 - Mesures de probabilités

Définition 10 - Probabilité

Soit (Ω, \mathcal{F}) un espace probabilisable. Une *probabilité* est une application $\mathbf{P} : \mathcal{F} \rightarrow [0, 1]$ telle que

- $\mathbf{P}(\Omega) = 1$,
- pour toute famille $(A_i)_{i \in \mathbb{N}} \in \mathcal{F}^{\mathbb{N}}$ d'événements deux à deux incompatibles, $\mathbf{P}\left(\bigsqcup_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) = \sum_{i=0}^{+\infty} \mathbf{P}(A_i)$.

$(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ est un espace probabilisé.

Exemple 10 - Équiprobabilité sur un ensemble fini

L'*équiprobabilité* est la probabilité définie (lorsque Ω est fini) sur $\mathcal{P}(\Omega)$ par $\mathbf{P}(A) = \frac{|A|}{|\Omega|}$.

Un dé équilibré est lancé successivement 2 fois. On note A l'événement « Le résultat du premier lancer est pair ».

$$A = \{(2i, j), 1 \leq i \leq 3, 1 \leq j \leq 6\}.$$

$$\mathbf{P}(A) = \frac{3 \times 6}{6 \times 6} = \frac{1}{2}.$$

Proposition 1 - Propriétés des probabilités

Soient $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ un espace probabilisé et A, B deux événements.

- $\mathbf{P}(\emptyset) = 0$.
- $\mathbf{P}(A \cup B) = \mathbf{P}(A) + \mathbf{P}(B) - \mathbf{P}(A \cap B)$.
- Si $A \subset B$, alors $\mathbf{P}(A) \leq \mathbf{P}(B)$.

Exemple 11 - Lancers de dé

Un dé équilibré à 6 faces est lancé successivement 2 fois. On note :

A : « Le résultat du premier lancer est pair » ;

C : « Le résultat du second lancer est pair ».

Alors, $A \cup C$ est l'événement « Le résultat d'un des lancers est pair ». On obtient ainsi :

$$\mathbf{P}(A) = \frac{1}{2}, \quad \mathbf{P}(C) = \frac{1}{2},$$

$$A \cap C = \{(2i, 2j), 1 \leq i, j \leq 3\},$$

$$\mathbf{P}(A \cap C) = \frac{3 \times 3}{6 \times 6} = \frac{1}{4},$$

$$\mathbf{P}(A \cup C) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{4} = \frac{3}{4}.$$

Théorème 3 - Loi de probabilité sur un ensemble fini

On suppose que $\Omega = \{x_1, \dots, x_n\}$ est un ensemble fini et que la tribu est $\mathcal{P}(\Omega)$.

- (i). Si \mathbf{P} est une probabilité sur $(\Omega, \mathcal{P}(\Omega))$. En notant, pour tout $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$, $p_i = \mathbf{P}(\{x_i\})$, alors $\sum_{i=1}^n p_i = 1$.
- (ii). Si $(p_i)_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ est une famille de réels positifs tels que $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. En posant, pour tout $A \subset \Omega$, $\mathbf{P}(A) = \sum_{i : x_i \in A} p_i$, l'application \mathbf{P} est une probabilité sur $(\Omega, \mathcal{P}(\Omega))$.

Théorème 4 - Loi de probabilité sur \mathbb{N}

On suppose que $\Omega = \mathbb{N}$ et que la tribu est $\mathcal{P}(\mathbb{N})$.

- (i). Si \mathbf{P} est une probabilité sur $(\mathbb{N}, \mathcal{P}(\mathbb{N}))$. En posant, pour tout $i \in \mathbb{N}$, $p_i = \mathbf{P}(\{i\})$, alors $\sum_{i=0}^{+\infty} p_i = 1$.
- (ii). Si $(p_i)_{i \in \mathbb{N}}$ est une famille de réels positifs tels que $\sum_{i=0}^{+\infty} p_i = 1$. Alors, en posant, pour tout $A \subset \mathbb{N}$, $\mathbf{P}(A) = \sum_{i : x_i \in A} p_i$, l'application \mathbf{P} est une probabilité sur $(\mathbb{N}, \mathcal{P}(\mathbb{N}))$.

II.2 - Probabilités conditionnelles

Définition 11 - Probabilité conditionnelle

Soient A, B deux événements tels que $\mathbf{P}(A) \neq 0$. La *probabilité conditionnelle* de A sachant B est

$$\mathbf{P}_B(A) = \frac{\mathbf{P}(A \cap B)}{\mathbf{P}(B)}.$$

Exemple 12 - Lancers de dé

Un dé équilibré à 6 faces est lancé successivement 2 fois. On note :

A : « Le résultat du premier lancer est pair » ;

B : « Le résultat du premier lancer est un 2 ».

Alors,

$$A \cap B = B, \quad \mathbf{P}(A) = \frac{1}{2}, \quad \mathbf{P}(A \cap B) = \frac{1}{6}.$$

$$\mathbf{P}_A(B) = \frac{\frac{1}{6}}{\frac{1}{2}} = \frac{1}{3}.$$

Proposition 2 - Formule des probabilités composées

Soient A_1, \dots, A_n des événements tels que $\mathbf{P}(A_1 \cap \dots \cap A_{n-1}) \neq 0$. Alors,

$$\mathbf{P}\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = \mathbf{P}(A_1) \mathbf{P}_{A_1}(A_2) \mathbf{P}_{A_1 \cap A_2}(A_3) \cdots \mathbf{P}_{A_1 \cap \dots \cap A_{n-1}}(A_n).$$

Exemple 13 - Tirages dans une urne

Une urne contient 10 boules rouges et 5 boules noires. On effectue 4 tirages successifs sans remise. Quelle est la probabilité d'avoir tiré 2 boules rouges puis 2 boules noires ?

On note :

R_1 : « La première boule tirée est rouge » ;

R_2 : « La seconde boule tirée est rouge » ;

N_3 : « La troisième boule tirée est noire » ;

N_4 : « La quatrième boule tirée est noire ».

Alors,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(R_1 \cap R_2 \cap N_3 \cap N_4) &= \mathbf{P}(R_1) \times \mathbf{P}_{R_1}(R_2) \times \cdots \\ &\quad \cdots \times \mathbf{P}_{R_1 \cap R_2}(N_3) \times \mathbf{P}_{R_1 \cap R_2 \cap N_3}(N_4) \\ &= \frac{10}{15} \times \frac{9}{14} \times \frac{5}{13} \times \frac{4}{12} \\ &= \frac{5}{13 \times 7} = \frac{5}{91}. \end{aligned}$$

Proposition 3 - Formule des probabilités totales

Soient (A_1, \dots, A_n) un système complet d'événements et A un événement. Alors,

$$\mathbf{P}(A) = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}(A \cap A_i) = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_{A_i}(A) \mathbf{P}(A_i).$$

Cette propriété peut être étendue à toute famille infinie $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ qui forme un système complet d'événements.

Exemple 14 - Tirages dans une urne

On reprend l'exemple précédent. Quelle est la probabilité que la deuxième boule tirée soit rouge ?

Comme $(R_1, \overline{R_1})$ est un système complet d'événements,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(R_2) &= \mathbf{P}(R_2 \cap R_1) + \mathbf{P}(R_2 \cap \overline{R_1}) \\ &= \frac{10}{15} \times \frac{9}{14} + \frac{5}{15} \times \frac{10}{14} \\ &= \frac{10 \times 14}{15 \times 14} = \frac{2}{3}. \end{aligned}$$

Proposition 4 - Formule de Bayes

Soient A, B deux événements. Si $\mathbf{P}(A) \neq 0$ et $\mathbf{P}(B) \neq 0$, alors

$$\mathbf{P}_A(B) = \frac{\mathbf{P}_B(A) \mathbf{P}(B)}{\mathbf{P}(A)}.$$

Exemple 15 - Tirages dans une urne

On reprend l'exemple précédent. L'expérimentateur tire successivement 2 boules et cache le résultat de son premier tirage. Sachant que le second tirage est une boule rouge, quelle est la probabilité que le premier tirage soit également une boule rouge ?

$$\mathbf{P}_{R_2}(R_1) = \frac{\mathbf{P}_{R_1}(R_2) \times \mathbf{P}(R_1)}{\mathbf{P}(R_2)} = \frac{\frac{9}{14} \times \frac{10}{15}}{\frac{2}{3}} = \frac{9}{14}.$$

III - Indépendance**Définition 12 - Indépendance**

Deux événements A et B sont *indépendants* si

$$\mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}(A) \times \mathbf{P}(B).$$

Exemple 16 - Lancer de dé

Un dé équilibré équilibré à 6 faces est lancé une fois. On pose

A : « Le résultat est pair » ;

C : « Le résultat est un multiple de 3 ».

$$C = \{3, 6\}, \mathbf{P}(A) = \frac{1}{2}, \mathbf{P}(C) = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}$$

$$A \cap C = \{6\}, \mathbf{P}(A \cap C) = \frac{1}{6}.$$

Ainsi, $\mathbf{P}(A \cap C) = \mathbf{P}(A) \times \mathbf{P}(C)$. Les événements A et C sont indépendants.

Définition 13 - Indépendance mutuelle

Soit $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ une famille d'événements. Les événements $(A_i)_{i \in \mathbb{N}}$ sont *mutuellement indépendants* si pour toute partie finie J de \mathbb{N} ,

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

Exemple 17 - Lancers d'une pièce

On lance deux fois une pièce équilibrée. On note A l'événement « Le premier lancer renvoie pile », B l'événement « Le second lancer renvoie face » et C l'événement « Les deux lancers renvoient le même résultat ». Les événements A, B et C sont-ils mutuellement indépendants ?

L'univers est ici $\{P, F\}^2$, muni de la tribu $\mathcal{P}(\Omega)$ et de l'équiprobabilité. Ainsi,

$$\mathbf{P}(A) = \mathbf{P}(\{(P, P), (P, F)\}) = \frac{2}{4} = \frac{1}{2},$$

$$\mathbf{P}(B) = \mathbf{P}(\{(P, F), (F, F)\}) = \frac{2}{4} = \frac{1}{2},$$

$$\mathbf{P}(C) = \mathbf{P}(\{(P, P), (F, F)\}) = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}.$$

De plus,

- $\mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}(\{(P, F)\}) = \frac{1}{4} = \mathbf{P}(A) \times \mathbf{P}(B)$. Les événements A et B sont indépendants.
- $\mathbf{P}(A \cap C) = \mathbf{P}(\{(P, P)\}) = \frac{1}{4} = \mathbf{P}(A) \times \mathbf{P}(C)$. Les événements A et C sont indépendants.
- $\mathbf{P}(B \cap C) = \mathbf{P}(\{(F, F)\}) = \frac{1}{4} = \mathbf{P}(B) \times \mathbf{P}(C)$. Les événements B et C sont indépendants.
- $\mathbf{P}(A \cap B \cap C) = \mathbf{P}(\emptyset) = 0 \neq \mathbf{P}(A) \times \mathbf{P}(B) \times \mathbf{P}(C)$. Les événements A, B et C ne sont pas mutuellement indépendants.