

On ne peut pas formuler ces questions en termes de probabilités associées à des valeurs ponctuelles des paramètres qui déterminent l'événement. Nous sommes alors ramené à emprunter d'autres outils que la somme de probabilités (ou d'une série de probabilités).

Dans le cas des espaces continus, le calcul de la probabilité d'un événement par une somme (employé dans le cas des espaces discrets) doit être remplacée par une intégrale. On peut avoir aussi un espace qui n'est ni continu ni discret. Une intégration au sens de Lebesgue peut fournir un encadrement universel uniforme pour tous les espaces probabilisés.

Dans la suite, nous introduisons un fondement élémentaire du calcul des probabilités, en supprimant les preuves de certaines constructions, qui peuvent se trouver dans les ouvrages sur le calcul des probabilités ou sur la théorie de la mesure.

2

## Probabilités Continues

Dans le cas où l'espace des événements élémentaires n'est pas dénombrable les probabilités ne peuvent pas être caractérisées ponctuellement. En effet, il se peut que ces probabilités soient nulles et, donc, leur connaissance n'apporte aucune information sur la probabilité des événements contenant une infinité indénombrable d'événements élémentaires. Considérons à titre d'exemple, les problèmes suivants :

- **(Aiguille de Buffon).** On lance une aiguille de longueur 1 sur un parquet dont les lames sont parallèles de distance 1. Quelle est la probabilité que l'aiguille chevauche une lame du parquet ?
- Une procédure a généré uniformément trois réels aléatoires dans l'intervalle (réel)  $[0, 1]$ . Quelle est la probabilité pour que ces grands soient les mesures des côtés d'un triangle ?

1

**Exemple.** Pour  $\Omega = \{a, b, c\}$ , les  $\sigma$ -algèbres possibles sur  $\Omega$  sont :

- $\{\emptyset, \Omega\}$
- $\{\emptyset, \Omega, \{a\}, \{b, c\}\}$  et deux autres familles obtenues par les permutations  $b \leftrightarrow a$  et  $c \leftrightarrow a$ .
- $\mathcal{P}(\Omega) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \Omega\}$ .

\*\*\*\*\*

**Propriétés.** On démontre facilement que :

- Toute  $\sigma$ -algèbre est fermée pour une intersection dénombrable.
- L'intersection d'une classe de  $\sigma$ -algèbres est encore une  $\sigma$ -algèbre
- Soit  $\mathcal{C}$  un sous-ensemble de  $\mathcal{P}(\Omega)$ . Il y a une plus petite  $\sigma$ -algèbre qui contient  $\mathcal{C}$ .

4

## Espace Probabilisé

**Définition.** Soit  $\Omega$  un ensemble non vide quelconque. Une famille  $\mathcal{A}$  de sous-ensembles de  $\Omega$  (i.e.  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(\Omega)$ ) est appelée  $\sigma$ -algèbre ou *tribu*, si elle contient  $\Omega$  et est fermée pour la complémentation et la réunion dénombrable :

- $\Omega \in \mathcal{A}$
- $A \in \mathcal{A} \Rightarrow \bar{A} \in \mathcal{A}$
- Si pour tout  $i \in \mathbb{N}$ ,  $A_i \in \mathcal{A}$ , alors  $\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \mathcal{A}$ .

3

**Définition.** Un espace probabilisé est un triplet  $(\Omega, \mathcal{A}, Pr)$ , où  $\Omega$  est un ensemble non vide,  $\mathcal{A}$  une  $\sigma$ -algèbre sur  $\Omega$  et  $Pr$  une application de  $\mathcal{A}$  dans  $[0, 1]$  telle que :

- $Pr(\Omega) = 1$
- pour toute suite  $A_i, i \in \mathbb{N}$ , d'éléments de  $\mathcal{A}$  2-à-2 disjoints :

$$Pr \left( \bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i \right) = \sum_{i \in \mathbb{N}} Pr(A_i). \quad (\sigma\text{-additivité})$$

$Pr$  est appelée une loi (ou mesure ou distribution) de probabilité sur  $\mathcal{A}$ , et pour tout  $A \in \mathcal{A}$ ,  $Pr(A)$  s'appelle probabilité de  $A$ .

6

## Propriétés Élémentaires

Soit  $(\Omega, \mathcal{A}, Pr)$  un espace probabilisé. Nous avons :

- $Pr(\emptyset) = 0$ .
- Pour tout  $A \in \mathcal{A}$ ,  $Pr(\bar{A}) = 1 - Pr(A)$ .
- Pour tout  $A, B \in \mathcal{A}$  :

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

et donc :

$$Pr(A \cup B) \leq Pr(A) + Pr(B).$$

8

**Définitions.** La plus petite  $\sigma$ -algèbre contenant  $\mathcal{C}$  est appelée  $\sigma$ -algèbre engendrée par  $\mathcal{C}$ . Dans le cas de  $\mathbb{R}$  (ou  $\mathbb{R}^k$  en général), on prend pour  $\mathcal{C}$  la classe des intervalles (ou des pavés) ouverts, fermés, à droite et/ou à gauche (pour  $\mathbb{R}^k$ ,  $\mathcal{C}$  est la classe des pavés du type  $\prod_1^k \langle a_i, b_i \rangle$ , où  $\langle \text{ et } \rangle$  prennent les valeurs  $[$  et  $]$ ). La  $\sigma$ -algèbre engendrée par  $\mathcal{C}$  est alors appelée tribu des boréliens de  $\mathbb{R}$  (ou de  $\mathbb{R}^k$ ). Cette Tribu est notée par  $\mathcal{B}$  (ou  $\mathcal{B}_k$ ).

**Exemple.** Soit  $\Omega = \{a, b, c, d\}$ . Quelle est la  $\sigma$ -algèbre engendrée par  $\{\{a\}, \{c, d\}\}$  ?

**Solution.** On vérifie facilement que l'ensemble :

$$\mathcal{D} = \{\emptyset, \Omega, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}, \{c, d\}, \{a, c, d\}, \{b, c, d\}\}$$

est la plus petite  $\sigma$ -algèbre contenant l'ensemble donné.

5

En ce qui concerne les tribus des boréliens, nous admettons le théorème suivant, dont la démonstration dépasse le cadre que nous nous sommes fixé ici.

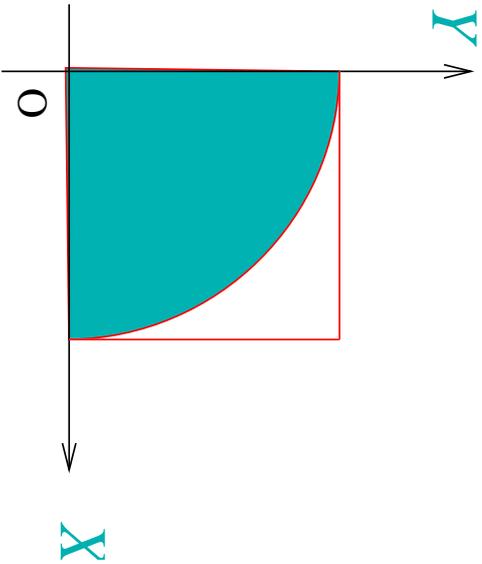
**Théorème.** Soit  $Pr$  une application de l'ensemble des pavés de  $\mathbb{R}^k$  dans  $[0, 1]$  satisfaisant :

- $Pr(\mathbb{R}^k) = 1$
- si  $A$  est un pavé de  $\mathbb{R}^k$  qui est la réunion d'une suite  $A_i, i \in \mathbb{N}$  de pavés, 2-à-2 disjoints, de  $\mathbb{R}^k$  alors :

$$Pr(A) = \sum_{i \in \mathbb{N}} Pr(A_i).$$

Alors  $Pr$  se prolonge de façon unique en une mesure de probabilité sur  $\mathcal{B}_k$ .

7



$$Pr(\text{Zone Hachurée}) = \frac{\pi}{4} \approx 0.78539816$$

10

### Quelques Exemples Simples

**Exemple 1.** Une procédure a généré deux réels  $X$  et  $Y$  uniformément et indépendamment dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Définir l'espace probabilisé et calculer la probabilité pour que la distance (euclidienne) du point  $(X, Y)$  de l'origine ne dépasse pas 1.

**Solution.** On prend pour  $\Omega$  le carré  $[0, 1] \times [0, 1]$ . La  $\sigma$ -algèbre  $\mathcal{A}$  est engendrée par l'ensemble des pavés (ou ici rectangles) contenus dans  $\Omega$ . La mesure de probabilité  $Pr$  est le prolongement unique de l'application qui associe à tout rectangle contenu dans  $\Omega$  son aire.

La distance du point  $(X, Y)$  de l'origine ne dépasse pas 1 si et seulement si il se trouve à l'intérieur du premier quadrant délimité par le cercle d'origine  $(0, 0)$  et de rayon 1. Or cette région est d'aire  $\frac{\pi}{4}$ . D'où la probabilité recherchée vaut  $\frac{\pi}{4}$ .

9

## Fonction de Répartition

Dans la suite, nous introduisons la fonction de répartition et la densité (lorsqu'elle existe) pour les mesures de probabilités définies sur  $(\mathbb{R}, \mathcal{B})$ .

Soit  $Pr$  une mesure de probabilité. Sa fonction de répartition (f.r.)  $F$  est définie par :

$$F(t) = Pr(] - \infty, t]) , \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

### Propriétés

Nous admettons les deux propositions suivantes sur les f.r.

12

**Exemple 2.** Une procédure génère les réels  $X$  et  $Y$  uniformément et indépendamment dans l'intervalle  $[a, b]$ , où  $a < b$ , et en retourne le maximum. Quelle la probabilité pour la valeur retournée soit  $\leq z \in [a, b]$  ? Pour qu'elle appartienne à l'intervalle  $[c, d] \subset [a, b]$  ?

**Solution.** Soit  $Z = \max\{X, Y\}$ . On a  $Z \leq z$  si et seulement si  $X \leq z$  et  $Y \leq z$ , pour tout  $z \in [a, b]$ . La probabilité de chacun de ces deux événements est  $\frac{z-a}{b-a}$ . Ils sont de plus indépendants et, donc :

$$Pr(Z \leq z) = \frac{(z-a)^2}{(b-a)^2}.$$

On en déduit :

$$Pr(c < Z \leq d) = \frac{(d-a)^2}{(b-a)^2} - \frac{(c-a)^2}{(b-a)^2}.$$

11

## Densité

Soit  $F$  la f.r. de la distribution  $Pr$ . S'il existe une fonction  $f$  telle que :

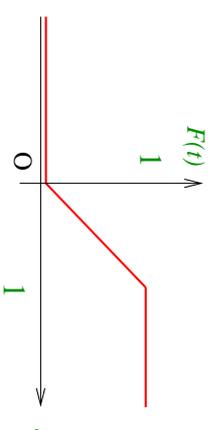
$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx, \quad \forall t \in \mathbb{R},$$

alors cette fonction  $f$  s'appelle la *densité* de  $Pr$ . La f.r. étant croissante, si la densité  $f$  existe, son intégrale de  $-\infty$  à  $t$ , doit valoir  $F(t)$ . Donc, on peut définir la densité  $f$  comme la dérivée de de la f.r., si cette dernière en admet une.

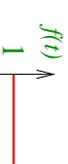
### Quelques Exemples Simples

**Exemple 1.** Soit  $Pr$  la distribution uniforme sur  $[0, 1]$ , donnée par  $Pr(\langle a, b \rangle) = l(\langle 0, 1 \rangle \cap \langle a, b \rangle)$ , pour tout intervalle  $\langle a, b \rangle$ , où l'application  $l$  désigne la *longueur* d'un intervalle.

14



Fonction de répartition de la loi uniforme



Densité de la loi uniforme

16

**Proposition.** La f.r.  $F$  est croissante, à valeur dans  $[0, 1]$ , continue à droite et telle que  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$  et  $\lim_{t \rightarrow -\infty} F(t) = 0$ .

La Proposition suivante permet de caractériser une loi de probabilité en termes de sa f.r.

**Proposition.** Soit  $F : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$  croissante, continue à droite et telle que  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$  et  $\lim_{t \rightarrow -\infty} F(t) = 0$ . Alors il existe une mesure de probabilité unique  $Pr$  sur  $(\mathbb{R}, \mathcal{B})$  dont la f.r. est  $F$ .

13

La f.r. est donnée par :

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ t & \text{si } 0 \leq t < 1 \\ 1 & \text{si } t \geq 1. \end{cases}$$

Elle admet la densité :

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ 1 & \text{si } 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{si } t \geq 1. \end{cases}$$

15

**Exemple 2.** Soient  $Z$  la valeur maximale de deux réalisations indépendantes de la loi uniforme dans  $[0, 1]$ , fournie par l'exemple précédent. Nous avons :

$$Pr(Z \leq t) = Pr(X \leq t \text{ et } Y \leq t) = t^2, \quad \forall t \in [0, 1].$$

On en déduit :

$$F_Z(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ t^2 & \text{si } 0 \leq t < 1 \\ 1 & \text{si } t \geq 1. \end{cases}$$

Cette f.r. admet la densité :

$$f_Z(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < 0 \\ 2t & \text{si } 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{si } t \geq 1. \end{cases}$$