

**BONJOUR**

# Méthodes Statistiques pour l'Informatique

Cours de N. SAHEB

# Table des Matières

- **Probabilités discrètes**
- **Probabilités continues**
- **Inférences statistiques**
- **Applications en Informatique**
- **Génération aléatoire**

# Références

- R. GRAHAM, D. KNUTH, O. PATASHNIK, *Mathématiques Concrètes*, International Thomson Publishing, 1998.
- F. DRESS, *Probabilités Statistique*, Dunod, 1997.
- J. ISTAS, *Probabilités et Statistiques*, Elipses, 1999.

# Probabilités Discrètes

**Exemple.** On lance deux dés.

$$\Omega = D \times D = \left\{ \begin{array}{c} \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \end{array} \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \end{array} , \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \end{array} \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} , \dots , \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} \end{array} \right\}$$

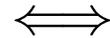
avec

$$D = \left\{ \begin{array}{c} \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \end{array} , \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} , \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} , \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} , \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} , \quad \square \begin{array}{c} \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{array} \end{array} \right\}$$

L'espace  $\Omega$  contient  $6 \times 6 = 36$  éléments.

## Distribution uniforme :

tous les éléments de  $\Omega$  sont de même probabilité  $\frac{1}{36}$



tous les éléments de  $D$  sont de même probabilité  $\frac{1}{6}$ .

\*\*\*\*\*

**Définitions.** Un *espace probabilisé discret* est un couple  $(\Omega, Pr)$ , où  $\Omega$  est un ensemble non vide au plus dénombrable et  $Pr$  une application de  $\Omega$  dans  $[0, 1]$  telle que :

$$\sum_{\omega \in \Omega} Pr(\omega) = 1.$$

- $\Omega$  : espace des événements élémentaires
- $A \subset \Omega$  : événement
- $Pr$  : une loi (ou distribution) de probabilité sur  $\Omega$
- On prolonge  $Pr$  sur  $\mathcal{P}(\Omega)$  par :

$$Pr(A) = \sum_{\omega \in A} Pr(\omega), \quad \forall A \subset \Omega$$

$Pr(A)$  : probabilité de  $A$

## Proposition

- $Pr(\emptyset) = 0$
- $Pr(\bar{A}) = 1 - Pr(A)$
- $Pr(\cup_{i \in I} A_i) = \sum_{i \in I} Pr(A_i)$  , pour toute famille au plus dénombrable  $A_i, i \in I$  d'éléments de  $\mathcal{P}(\Omega)$  2-à-2 disjoints.

**Exemple.** On peut adopter une hypothèse non uniforme en posant :

$$Pr_2(\text{□} \cdot \text{□}) = Pr_2(\text{□} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \text{□}) = \frac{1}{4}$$

$$Pr_2(\text{□} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \text{□}) = Pr_2(\text{□} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \text{□}) = Pr_2(\text{□} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \text{□}) = Pr_2(\text{□} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \text{□}) = \frac{1}{8}$$

Sur  $\Omega = D \times D$ , nous pouvons définir la distribution produite :

$$Pr_{22}(dd') = Pr_2(d)Pr_2(d')$$

Dans le cas où les deux dés sont pipés, nous avons

$$Pr_{22}(\text{□} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \text{□} \begin{array}{|c|} \hline \cdot \\ \hline \end{array} \text{□}) = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{8} = \frac{1}{32}.$$

On démontrera facilement que  $Pr_{22}$  est bien une distribution de probabilité sur  $\Omega$ .

A titre d'exemple, on peut définir l'événement "double" par :

$$A = \left\{ \begin{array}{c} \boxed{\cdot} \quad \boxed{\cdot} , \quad \boxed{\cdot \cdot} \quad \boxed{\cdot \cdot} , \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot} \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot} , \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} , \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} , \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} , \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} \quad \boxed{\cdot \cdot \cdot \cdot} \end{array} \right\}$$

Or nous avons par définition :

$$Pr(A) = \sum_{\omega \in A} Pr(\omega)$$

Pour la distribution uniforme, cette probabilité vaut

$$\frac{1}{36} + \frac{1}{36} + \frac{1}{36} + \frac{1}{36} + \frac{1}{36} + \frac{1}{36} = \frac{1}{6}.$$

Alors que, pour  $Pr_{22}$ , elle vaut

$$\frac{1}{16} + \frac{1}{64} + \frac{1}{64} + \frac{1}{64} + \frac{1}{64} + \frac{1}{16} = \frac{3}{16}.$$

**Définition.** Soit  $(\Omega, Pr)$  un espace probabilisé discret et soit  $\Omega'$  un ensemble non vide au plus dénombrable. Une *variable aléatoire* (v.a.)  $X$  à valeurs dans  $\Omega'$  est une application de  $\Omega$  dans  $\Omega'$ . Nous prenons souvent pour  $\Omega'$  un sous-ensemble de  $\mathbb{N}$  ou de  $\mathbb{R}$ . On pourra munir  $\Omega'$  d'une loi de probabilité  $Pr_X$  en posant, pour tout  $\omega' \in \Omega'$  :

$$Pr_X(\omega') = Pr(X^{-1}(\{\omega'\}))$$

**Proposition.**  $Pr_X$  est une loi de probabilité sur  $\Omega'$ , i.e.

$$\sum_{\omega' \in \Omega'} Pr_X(\omega') = 1.$$

Nous avons de plus, pour tout  $A' \subset \Omega'$  :

$$Pr_X(A') = Pr(X^{-1}(A'))$$



Lorsqu'il n'y a pas le danger de confusion,  $Pr_X$  sera désignée par  $Pr$ .

**Exemple.** Soit  $S(\omega)$  la v.a. qui est la somme des points des deux dés, par exemple  $S(\begin{array}{|c|} \hline \bullet \\ \bullet \\ \hline \end{array}, \begin{array}{|c|} \hline \bullet \\ \bullet \\ \bullet \\ \hline \end{array}) = 3 + 6 = 9$ . Le tableau ci-dessous caractérise la loi de probabilité pour la v.a.  $S$  par rapport à chacune des distributions (uniforme et biaisée) :

$s$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Pr_{11}(S = s)$	$\frac{1}{36}$	$\frac{2}{36}$	$\frac{3}{36}$	$\frac{4}{36}$	$\frac{5}{36}$	$\frac{6}{36}$	$\frac{5}{36}$	$\frac{4}{36}$	$\frac{3}{36}$	$\frac{2}{36}$	$\frac{1}{36}$
$Pr_{22}(S = s)$	$\frac{4}{64}$	$\frac{4}{64}$	$\frac{5}{64}$	$\frac{6}{64}$	$\frac{7}{64}$	$\frac{12}{64}$	$\frac{7}{64}$	$\frac{6}{64}$	$\frac{5}{64}$	$\frac{4}{64}$	$\frac{4}{64}$

## Espérance Mathématique et Variance

Une variable aléatoire admet un certain nombre de valeurs typiques. Nous considérons dans la suite les v.a. à valeurs dans  $\mathbb{R}$ .

**Définition.** En arithmétique usuelle la valeur moyenne de  $n$  nombres est définie comme leur somme divisée par  $n$ . En calcul des probabilités, l'*espérance* d'une v.a. est définie comme la somme des valeurs prises pondérées par les probabilités respectives, c'est-à-dire :

$$\mathbb{E}X = \sum_{x \in X(\Omega)} x \cdot Pr(X = x)$$

lorsque cette somme converge absolument. ( $X(\Omega)$  est l'ensemble des valeurs prises par la v.a.  $X$ ). Sinon, on dit que  $X$  n'admet pas d'espérance.

**Exemple.** Revenons au cas de la v.a.  $S$ , désignant la somme des deux dés, et calculons son espérance pour chacune des distributions  $Pr_{11}$  et  $Pr_{22}$  :

- $\mathbb{E}_{11}S = 2 \cdot \frac{1}{36} + 3 \cdot \frac{2}{36} + \dots + 12 \cdot \frac{1}{36} = 7.$
- $\mathbb{E}_{22}S = 2 \cdot \frac{4}{64} + 3 \cdot \frac{4}{64} + 4 \cdot \frac{5}{64} + \dots + 12 \cdot \frac{4}{64} = 7.$

Etant donné que l'espérance de la v.a.  $X$ , désignant le point obtenu par un seul dé, vaut :

- $\mathbb{E}_1X = \frac{1}{6} \cdot (1 + 2 + \dots + 6) = 3.5$  (pour le dé uniforme)
- $\mathbb{E}_2X = \frac{1}{4} \cdot (1 + 6) + \frac{1}{8} \cdot (2 + 3 + 4 + 5) = 3.5$  (pour le dé pipé)

on peut se demander s'il y a un lien entre l'espérance d'une somme de v.a. et la somme des espérances.

## Linéarité de l'espérance

**Proposition.** Soient  $X_1$  et  $X_2$  deux v.a. définies sur le même espace probabilisé discret  $(\Omega, Pr)$  et admettant toutes deux une espérance. Soit  $\alpha \in \mathbb{R}$ . Alors :

$$\begin{aligned}\mathbb{E}(\alpha X_1) &= \alpha \mathbb{E}X_1 \\ \mathbb{E}(X_1 + X_2) &= \mathbb{E}X_1 + \mathbb{E}X_2\end{aligned}$$

Que peut-on dire de l'espérance d'un produit de v.a. ?

**Définitions.** On peut considérer plusieurs v.a. sur le même espace probabilisé discret. Soient les v.a.  $X$  et  $Y$  définies sur  $(\Omega, Pr)$ . La loi (ou distribution) *conjointe* est la donnée de :

$$Pr_{XY}(X = x, Y = y) = Pr(\{\omega \in \Omega | X(\omega) = x, Y(\omega) = y\})$$

pour tout  $x$  et tout  $y$  possibles.

$X$  et  $Y$  sont dites *indépendantes*, si pour tout  $x$  et tout  $y$  possibles, on a  $Pr_{XY}(X = x, Y = y) = Pr_X(X = x)Pr_Y(Y = y)$ .

**Proposition.** Si  $X$  et  $Y$  sont deux v.a. *indépendantes* admettant une espérance, alors la v.a. produite  $XY$  admet une espérance et

$$\mathbb{E}(XY) = \mathbb{E}X\mathbb{E}Y$$

.

**Exemple.** Soient  $X$  et  $Y$  les points obtenus en lançant deux dés (nous considérons les cas des dés uniformes et celui des dés pipés). Ces deux v.a. sont indépendantes (par la définition de  $Pr_{11}$  ou de  $Pr_{22}$ ). Soient  $S = X + Y$  et  $P = XY$ . Nous avons :

- $\mathbb{E}S = \frac{7}{2} + \frac{7}{2} = 7, \mathbb{E}P = \frac{7}{2} \cdot \frac{7}{2} = \frac{49}{4}$ . (un calcul direct fondé sur les probabilités des différentes valeurs de  $P$  aboutit au même résultat dans les deux cas.)
- Mais  $S$  et  $P$  ne sont pas indépendantes. Nous avons toutefois  $\mathbb{E}(S + P) = \mathbb{E}S + \mathbb{E}P = 7 + \frac{49}{4}$ . Un calcul des probabilités des valeurs de  $SP$  permet d'obtenir son espérance :  $\mathbb{E}(SP) = \frac{637}{6}$  dans le cas des dés uniformes et 112 dans le cas des pipés ; qui sont différentes, dans les deux cas de

$$\mathbb{E}S \cdot \mathbb{E}P = 7 \cdot \frac{49}{4} = \frac{343}{4}.$$

**Définitions.** Un paramètre important qui vient tout de suite après l'espérance est la variance. Elle mesure la dispersion d'une v.a. Si  $X$  est une v.a. définie sur  $(\Omega, Pr)$ , sa *variance* est définie par :

$$\mathbb{V}X = \mathbb{E}((X - \mathbb{E}X)^2)$$

lorsque celle-ci existe.

**Un exemple.** La probabilité d'un gain égal à 100 millions d'euros pour un billet de loterie est de  $\frac{1}{100}$ . Nous disposons de deux choix pour acheter deux billets de loterie : nous pouvons acheter soit deux billets distincts, soit deux billets quelconques.

Les espérances dans les deux alternatives sont égales et valent chacune 2 millions d'euros. Comparons-les en fonction de leur variances.

Dans la première alternative (billets distincts), on peut gagner 0 ou 100 millions d'euros avec les probabilités respectives 0.98 et 0.02. Dans la deuxième (billets quelconques), on peut gagner 0, 100 ou 200 millions d'euros avec les probabilités respectives 0.9801, 0.0198 et 0.0001.

Pour la première alternative, nous avons donc la variance suivante (en  $10^{12}$  euros<sup>2</sup> !) :

$$0.98(0 - 2)^2 + 0.02(100 - 2)^2 = 196.$$

Et pour la deuxième :

$$0.9801(0 - 2)^2 + 0.0198(100 - 2)^2 + 0.0001(200 - 2)^2 = 198.$$

On en déduit que la seconde alternative est légèrement plus risquée que la première.

**Définition.** La racine carrée de la variance est appelée *écart-type* et est notée par  $\sigma$  :

$$\sigma X = \sqrt{\mathbb{V}X}.$$

**Proposition.** Nous avons :

$$\mathbb{V}X = \mathbb{E}(X^2) - (\mathbb{E}X)^2.$$

**Proposition.** Si  $X$  et  $Y$  sont deux v.a. **indépendantes** admettant chacune une variance, alors la v.a.  $X + Y$  admet une variance qui est la somme des deux variances.