

Chapitre 22 : Couples de variables aléatoires.

PTSI B Lycée Eiffel

14 juin 2016

*Cette chose plus compliquée et plus confondante
que l'harmonie des sphères : un couple.*

JULIEN GRACQ.

Introduction

Dans ce dernier chapitre de probabilités de l'année, nous allons introduire l'étude de couples de variables aléatoires, c'est-à-dire l'étude simultanée de deux variables aléatoires. Rien de très nouveau au niveau des techniques utilisées, le but est de présenter un peu de vocabulaire et faire quelques calculs sur trois exemples détaillés.

Objectifs du chapitre :

- bien comprendre la différence entre lois marginales, lois conditionnelles et loi de couple.
- savoir utiliser des lois de couples pour étudier des variables aléatoires.

1 Loi d'un couple de variables aléatoires

Définition 1. Un couple de variables aléatoires (X, Y) est la donnée de deux variables aléatoires définies sur le même espace probabilisé Ω . Une façon plus technique de voir les choses est de dire qu'un couple est une application $(X, Y) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^2$.

Exemple 1 : On lance simultanément deux dés (ça faisait longtemps), et on note X le plus grand des deux chiffres obtenus et Y le plus petit (au sens large).

Exemple 2 : Une urne contient 3 boules blanches, 4 boules vertes et 2 boules bleues. On tire 3 boules simultanément dans l'urne et on note X le nombre de boules blanches obtenues et Y le nombre de boules vertes.

Exemple 3 : On effectue une suite de lancers avec une pièce non équilibrée pour laquelle la probabilité d'obtenir Pile vaut $\frac{3}{4}$ (et celle d'obtenir face vaut donc $\frac{1}{4}$). On note X la longueur de la première chaîne obtenue, c'est-à-dire le nombre de tirages initiaux donnant le même résultat que le premier tirage. On note Y la longueur de la deuxième chaîne. Ainsi, si les premiers tirages donnent *PPPPFFP* (peu importe la suite), on aura $X = 4$ et $Y = 2$.

Définition 2. La loi d'un couple de variables aléatoires (X, Y) est la donnée des probabilités $P((X = i) \cap (Y = j))$, pour $i \in X(\Omega)$ et $j \in Y(\Omega)$. Cette loi est aussi appelée **loi conjointe** du couple (X, Y) .

Remarque 1. Certaines des probabilités $P((X = i) \cap (Y = j))$ peuvent être nulles, même si $P(X = i)$ et $P(Y = j)$ sont toutes les deux non nulles.

Remarque 2. Cette loi est souvent présentée sous forme d'un tableau à double entrée, les valeurs prises par X apparaissant par exemple en ligne et celles prises par Y en colonne.

Exemple 1 : On a $X(\Omega) = \{1; 2; 3; 4; 5; 6\}$; $Y(\Omega) = \{1; 2; 3; 4; 5; 6\}$, et la loi conjointe se calcule sans difficulté : $P((X = i) \cap (Y = j)) = 0$ si $i < j$ (le plus grand nombre ne peut pas être inférieur au plus petit), $P((X = i) \cap (Y = y_j)) = \frac{1}{36}$ si $i = j$ (le seul tirage favorable sur les 36 possibles est le tirage (i, i) , et $P((X = i) \cap (Y = y_j)) = \frac{1}{18}$ si $i > j$ (les deux tirages (i, j) et (j, i) sont possibles), ce qu'on peut résumer par le tableau suivant (X en ligne, Y en colonne) :

| | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ |
| 2 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ |
| 3 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ |
| 4 | 0 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ |

Exemple 2 : On a ici $X(\Omega) = \{0; 1; 2; 3\}$ et $Y(\Omega) = \{0; 1; 2; 3\}$. On ne peut bien sûr avoir $X + Y > 3$ puisqu'on ne tire que trois boules. Lorsque cela a un sens, on a $P((X = i) \cap (Y = j)) = \frac{\binom{3}{i} \binom{4}{j} \binom{2}{3-i-j}}{\binom{9}{3}}$, ce qui donne le tableau suivant :

| | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| $Y \setminus X$ | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 0 | $\frac{3}{84}$ | $\frac{6}{84}$ | $\frac{1}{84}$ |
| 1 | $\frac{4}{84}$ | $\frac{2}{84}$ | $\frac{12}{84}$ | 0 |
| 2 | $\frac{12}{84}$ | $\frac{18}{84}$ | 0 | 0 |
| 3 | $\frac{4}{84}$ | 0 | 0 | 0 |

Remarque 3. On note parfois l'événement $(X = i) \cap (Y = j)$ sous la forme $(X, Y) = (i, j)$.

Proposition 1. Les événements $(X = i) \cap (Y = j)$ pour i parcourant $X(\Omega)$ et j parcourant $Y(\Omega)$ forment un système complet d'événements. On a donc $\sum_{i \in X(\Omega); j \in Y(\Omega)} P((X = i) \cap (Y = j)) = 1$.

Démonstration. La preuve est la même que dans le cas où on n'a qu'une variable aléatoire. Les événements sont manifestement disjoints, et leur union vaut Ω . \square

Définition 3. Si (X, Y) est un couple de variables aléatoires, les lois de X et de Y sont appelées **lois marginales** du couple.

Proposition 2. Si (X, Y) est un couple de variables aléatoires discrètes, on peut obtenir les lois marginales à partir de la loi conjointe : $\forall i \in X(\Omega), P(X = i) = \sum_{j \in Y(\Omega)} P((X = i) \cap (Y = j))$ (et symétriquement pour la loi de Y).

Démonstration. Cela découle immédiatement du fait que les événements $Y = j$ forment un système complet d'événements. \square

Exemple 1 : Pour connaître les lois marginales à partir du tableau précédemment établi, c'est très simple, il suffit de faire les sommes des lignes du tableau (pour la loi Y) ou des colonnes (pour celle X) :

| | | | | | | | |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | $P(Y = j)$ |
| 1 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{11}{36}$ |
| 2 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{9}{36}$ |
| 3 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{7}{36}$ |
| 4 | 0 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{5}{36}$ |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{18}$ | $\frac{3}{36}$ |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\frac{1}{36}$ | $\frac{1}{36}$ |
| $P(X = i)$ | $\frac{1}{36}$ | $\frac{3}{36}$ | $\frac{5}{36}$ | $\frac{7}{36}$ | $\frac{9}{36}$ | $\frac{11}{36}$ | |

Exemple 2 : De façon tout à fait similaire :

| | | | | | |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | $P(Y = j)$ |
| 0 | 0 | $\frac{3}{84}$ | $\frac{6}{84}$ | $\frac{1}{84}$ | $\frac{10}{84}$ |
| 1 | $\frac{4}{84}$ | $\frac{24}{84}$ | $\frac{12}{84}$ | 0 | $\frac{40}{84}$ |
| 2 | $\frac{12}{84}$ | $\frac{18}{84}$ | 0 | 0 | $\frac{30}{84}$ |
| 3 | $\frac{4}{84}$ | 0 | 0 | 0 | $\frac{4}{84}$ |
| $P(X = i)$ | $\frac{20}{84}$ | $\frac{45}{84}$ | $\frac{18}{84}$ | $\frac{1}{84}$ | |

Remarque 4. On vient de voir qu'on pouvait déduire les lois marginales de la loi conjointe. Le contraire n'est pas possible en général.

Définition 4. La loi conditionnelle de X sachant $Y = j$ est la loi de la variable Z définie par $\forall i \in X(\Omega), P(Z = i) = P_{Y=j}(X = i)$. On définit de même les lois conditionnelles de Y sachant $X = i$.

Exemple 3 : Dans le cas de variables infinies, on ne peut naturellement plus écrire la loi sous forme de tableau, et les calculs de lois marginales ou conditionnelles sont un peu plus formels. La loi de X se calcule assez aisément : $X(\Omega) = \mathbb{N}^*$ et on aura $X = k$ si la suite de lancers commence par k Pile suivi d'une face ou par k face suivis d'un Pile, cas incompatibles qui donnent $P(X = k) = \left(\frac{3}{4}\right)^k \times \frac{1}{4} + \left(\frac{1}{4}\right)^k \times \frac{3}{4} = \frac{3^k + 3}{4^{k+1}}$.

Pour déterminer la loi de Y , le plus simple est de passer par la loi de couple : on aura $(X, Y) = (i, j)$ si on débute par i Pile, puis j Face et à nouveau un Pile, ou bien i Face, j Pile et un Face, soit une probabilité de $P((X = i) \cap (Y = j)) = \left(\frac{3}{4}\right)^i \left(\frac{1}{4}\right)^j \times \frac{3}{4} + \left(\frac{1}{4}\right)^i \left(\frac{3}{4}\right)^j \times \frac{1}{4} = \frac{3^{i+1} + 3^j}{4^{i+j+1}}$. On

utilise ensuite la formule des probabilités totales pour obtenir la loi de Y , avec le système complet d'évènements $(X = i)_{i \geq 1}$: $P(Y = j) = \sum_{i=1}^{+\infty} P(X = i) \times P_{X=i}(Y = j) = \sum_{i=1}^{+\infty} P((X = i) \cap (Y = j)) = \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{3^{i+1} + 3^j}{4^{i+j+1}} = \frac{1}{4^j} \sum_{i=1}^{+\infty} \left(\frac{3}{4}\right)^{i+1} + \left(\frac{3}{4}\right)^j \sum_{i=1}^{+\infty} \frac{1}{4^{i+1}} = \frac{1}{4^j} \left(\frac{3}{4}\right)^2 \frac{1}{1 - \frac{3}{4}} + \left(\frac{3}{4}\right)^j \frac{1}{4^2} \frac{1}{1 - \frac{1}{4}} = \frac{3^2 + 3^{j-1}}{4^{j+1}}$. On constate que la loi de Y n'est pas la même que celle de X (ce qui n'était pas vraiment évident a priori).

Si on souhaite voir à quoi ressemblent les lois conditionnelles, on a par exemple comme loi conditionnelle à $Y = j$ fixé : $P_{Y=j}(X = i) = \frac{P((X = i) \cap (Y = j))}{P(Y = j)} = \frac{3^{i+1} + 3^j}{4^{i+j+1}} \times \frac{4^{j+1}}{3^2 + 3^{j-1}} = \frac{3^{i+1} + 3^j}{4^i(3^2 + 3^{j-1})}$.

2 Indépendance de variables aléatoires

Définition 5. Deux variables aléatoires sont dites **indépendantes** si tous les couples d'évènements $X = i, Y = j$ sont indépendants. Autrement dit, $\forall i \in X(\Omega), \forall j \in Y(\Omega), P((X = i) \cap (Y = j)) = P(X = i)P(Y = j)$.

Exemple : Un exemple idiot pour illustrer. Si on tire deux dés simultanément et qu'on note X le résultat du premier dé et Y celui du deuxième dé, X et Y sont des variables aléatoires indépendantes. On a $P((X = i) \cap (Y = j)) = \frac{1}{36}$ pour tout $1 \leq i \leq 6$ et $1 \leq j \leq 6$.

Exemple : Par contre, toujours dans le cas de l'inépuisable lancer de deux dés, si on prend pour X la somme des deux dés et pour Y leur produit, les deux variables ne sont pas indépendantes. On a par exemple $P(X = 8) = \frac{5}{36}$; $P(Y = 15) = \frac{1}{18}$, et $P((X = 8) \cap (Y = 15)) = \frac{1}{18}$.

Remarque 5. Deux variables aléatoires sont indépendantes si et seulement si toutes les lois conditionnelles de X sachant $Y = j$ sont identiques à la loi de X .

Remarque 6. Dans le cas où X et Y sont des variables aléatoires indépendantes, on peut obtenir la loi conjointe du couple (X, Y) à partir des deux lois marginales.

Exemples : Dans nos deux premiers exemples, on constate sans difficulté et sans surprise que les variables X et Y ne sont pas indépendantes (le fait qu'on ait des 0 dans la tableau de la loi conjointe suffit à imposer qu'il n'y ait pas indépendance).

Le troisième exemple est moins intuitif. Le calcul des lois conditionnelles, qui sont distinctes de la loi marginale de X , prouve qu'il n'y a pas non plus indépendance. Une autre façon de voir les choses est de trouver un contre-exemple à l'indépendance des événements $X = i$ et $Y = j$. On peut ici calculer simplement $P(X = 1) = \frac{3+3}{4^2} = \frac{3}{8}$; $P(Y = 1) = \frac{3^2+1}{4^2} = \frac{5}{8}$; et $P((X = 1) \cap (Y = 1)) = \frac{3^2+3}{4^3} = \frac{3}{16} \neq \frac{3}{8} \times \frac{5}{8}$. Les courageux vérifieront qu'en effectuant la même expérience avec une pièce équilibrée, on obtiendrait deux variables aléatoires indépendantes.

Un autre calcul intéressant sur cette expérience (quoique ne faisant pas vraiment intervenir le fait qu'on travaille sur un couple) est celui des espérances de X et de Y : on a (sous réserve d'existence)

$$E(X) = \sum_{k=1}^{+\infty} k \times \frac{3^k + 3}{4^{k+1}} = \frac{3}{4^2} \sum_{k=1}^{+\infty} k \left(\frac{3}{4}\right)^{k-1} + \frac{3}{4^2} \sum_{k=1}^{+\infty} k \left(\frac{1}{4}\right)^{k-1} = \frac{3}{4^2} \left(\frac{1}{(1 - \frac{3}{4})^2} + \frac{1}{(1 - \frac{1}{4})^2} \right) = 3 + \frac{1}{3} = \frac{10}{3}.$$

Pour Y , on a $E(Y) = \sum_{k=1}^{+\infty} k \times \frac{3^2 + 3^{k-1}}{4^{k+1}} = \frac{3^2}{4^2} \sum_{k=1}^{+\infty} k \left(\frac{1}{4}\right)^{k-1} + \frac{1}{4^2} \sum_{k=1}^{+\infty} k \left(\frac{3}{4}\right)^{k-1} = \frac{3^2}{4^2} \times \frac{1}{(1 - \frac{1}{4})^2} + \frac{1}{4^2} \times \frac{1}{(1 - \frac{3}{4})^2} = 1 + 1 = 2$. Encore une fois, les courageux pourront faire le calcul avec une pièce équilibrée et constater que dans ce cas les deux variables ont pour espérance 2.

Proposition 3. Si X et Y sont deux variables aléatoires indépendantes, on a $V(X + Y) = V(X) + V(Y)$.

Remarque 7. On peut calculer facilement la variance d'une loi binomiale à partir de la proposition précédente. En effet une loi binomiale de paramètre (n, p) est la somme de n variables aléatoires indépendantes de paramètre p , qui ont chacune pour variance $p(1 - p)$. La variance de la binomiale vaut donc $np(1 - p)$. Pour l'hypergéométrique, c'est plus compliqué, puisque la loi pour chaque tirage dépend des résultats des tirages précédents.

Proposition 4. Si X et Y sont deux variables aléatoires indépendantes, la loi de leur somme $X + Y$ est donné par $P(X + Y = k) = \sum P(X = i)P(Y = k - i)$ (la somme portant sur les valeurs de i pour lesquelles $P(X = i)$ et $P(Y = k - i)$ sont toutes deux non nulles).

Démonstration. On a via la formule des probabilités totales $P(X + Y = k) = \sum_{i \in X(\Omega)} P(X = i) P_{X=i}(X + Y = k)$. Or, $P_{X=i}(X + Y = k) = P_{X=i}(Y = k - i)$ donc $P(X + Y = k) = \sum_{i \in X(\Omega)} P((X = i) \cap (Y = k - i))$. □

Exemple : Deux variables aléatoires X et Y suivant des lois uniformes respectivement sur $\{1; 2; \dots; 6\}$ et sur $\{1; 2; 3; 4\}$ (par exemple les résultats d'un lancer de dés à six faces et à quatre faces). La loi de $X + Y$ se calcule aisément :

| | | | | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| i | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $P(X + Y = i)$ | $\frac{1}{24}$ | $\frac{1}{12}$ | $\frac{1}{8}$ | $\frac{1}{6}$ | $\frac{1}{6}$ | $\frac{1}{6}$ | $\frac{1}{8}$ | $\frac{1}{12}$ | $\frac{1}{24}$ |

Proposition 5. Soient X et Y deux variables aléatoires indépendantes suivant des lois binomiales $\mathcal{B}_{m,p}$ et $\mathcal{B}_{n,p}$ alors $X + Y$ suit une loi binomiale de paramètre $\mathcal{B}_{m+n,p}$.

Démonstration. D'après la propriété précédente, on a $P(X + Y = k) = \sum_{i=0}^{i=k} P(X = i)P(Y = k - i) = \sum_{i=0}^{i=k} \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \binom{m}{k-i} p^{k-i} (1-p)^{m-k+i} = p^k (1-p)^{n+m-k} \sum_{i=0}^{i=k} \binom{n}{i} \binom{m}{k-i} = \binom{n+m}{k} p^k (1-p)^{n+m-k}$ en utilisant la formule de Vandermonde (cette démonstration n'est donc pas au programme!). On reconnaît bien une loi binomiale de paramètre $(n + m, p)$. \square