

Feuille d'exercices n° 23 : Variables aléatoires

MPSI Lycée Camille Jullian

5 mai 2022

Exercice 1 (*)

On joue au jeu suivant : on parie sur un nombre compris entre 1 et 6, puis on lance trois dés et on gagne 3 euros si le nombre sort 3 fois, 2 euros s'il sort deux fois, 1 euro s'il sort une fois. On perd 1 euro s'il ne sort pas. Déterminer la loi, l'espérance et la variance de la variable X représentant le gain du joueur.

Exercice 2 (* à **)

Dans une urne se trouvent six boules. Trois sont numérotées 1, deux sont numérotées 2 et la dernière est numérotée 3. On effectue des tirages successifs sans remise de toutes les boules de l'urne. Pour chacune des variables aléatoires suivantes, déterminer la loi, l'espérance et la variance :

1. X_1 est le nombre de boules numérotées 1 présentes dans l'urne à l'issue du troisième tirage.
2. X_2 est le nombre de tirages nécessaires avant de ne plus avoir de boules numérotées 1 dans l'urne.
3. X_3 est le rang du tirage de la boule numérotée 3.
4. X_4 est la somme des numéros tirés lors des trois premiers tirages.
5. X_5 est le nombre de tirages nécessaires avant que la somme des numéros obtenus n'atteigne (ou dépasse) 5.

Exercice 3 (*)

On lance des fusées vers Saturne. À chaque lancer, la probabilité de réussite est de 0.7. On effectue dix lancers successifs, quelle est la probabilité d'obtenir k lancers réussis ? Quel est le nombre moyen de lancers réussis ? Combien faudrait-il de lancers pour avoir 98% de chances qu'au moins un lancer ait réussi ?

Exercice 4 (*)

Dans une urne se trouvent 10 boules rouges et 5 vertes.

1. On pioche avec remise six boules dans l'urne et on note R le nombre de boules rouges obtenues et V le nombre de vertes. Donner la loi, l'espérance et la variance de R et de V (pas de calcul!).
2. Même question lorsque les tirages sont effectués sans remise (là il va falloir du calcul!).

Exercice 5 (**)

On lance simultanément quatre dés à 6 faces et on note X le plus grand chiffre obtenu. Déterminer la loi de X (on pourra commencer par calculer les probabilités $\mathbb{P}(X \leq k)$, ainsi que son espérance et sa variance.

Exercice 6 (*)

Est-il possible de truquer deux dés à six faces de la même façon, de façon à ce que, lorsqu'on lance ces deux dés, la variable X représentant la somme des deux chiffres obtenus suive une loi uniforme sur $\{2, 3, \dots, 12\}$?

Exercice 7 (***)

Une urne contient n boules numérotées de 1 à n . On effectue des tirages sans remise dans cette urne jusqu'à ce que le numéro tiré ait un numéro supérieur ou égal au numéro tiré juste avant (ce qui suppose qu'on effectue au moins deux tirages ; par exemple une suite de tirage possible est 7, 4, 2, 5 et on s'arrête après ce quatrième tirage). On note X le nombre de tirages effectués.

1. Quels sont les valeurs prises par la variable X ?
2. Déterminer la loi de X puis son espérance (on pourra commencer par traiter les cas $n = 3$ et $n = 5$).
3. Quelle est la limite de $\mathbb{E}(X)$ quand n tend vers $+\infty$?

Exercice 8 (**)

Un placard contient n paires de chaussures (donc $2n$ chaussures au total), on tire au hasard $2k$ chaussures dans le placard (avec $k \leq n$), et on note X le nombre de paires de chaussures complètes qu'on a tirées du placard (ainsi, pour $k = 1$, on aura $X = 1$ si et seulement si les deux chaussures tirées appartiennent à la même paire).

1. En notant X_i la variable indicatrice de l'évènement « On a tiré les deux chaussures de la paire numéro i » (en ayant numéroté au préalable les n paires de chaussures du placard), quelle est la loi de la variable X_i ? Préciser son espérance et sa variance.
2. Exprimer X en fonction des variables X_i , en déduire $\mathbb{E}(X)$.

Exercice 9 (**)

On désire analyser le sang d'une population de N individus pour détecter la présence d'un virus qui affecte les individus de la population avec une probabilité p . On a pour cela deux possibilités : soit on analyse le sang de chaque personne ; soit on regroupe les personnes en groupes de n , dont on analyse le sang en groupe. Si le test du groupe est positif, on analyse individuellement chaque individu du groupe.

1. On note X le nombre de groupes positifs. Donner la loi de X .
2. On note Y le nombre total d'analyses effectuées avec la seconde méthode. Calculer en fonction de N , n et p l'espérance de Y .
3. Comparez les deux méthodes dans le cas où $N = 1000$, $n = 10$ et $p = 0.01$.

Exercice 10 (**)

Une action est introduite en bourse avec une valeur initiale égale à 1. À partir de cet instant, tous les jours (et indépendamment d'un jour à l'autre), l'action a une probabilité p de voir sa valeur multipliée par un facteur $\alpha > 1$, et une probabilité $1 - p$ de la voir multipliée par un facteur $\beta < 1$ (les facteurs α et β sont fixés et identiques d'un jour sur l'autre, tout comme la probabilité p). On note X_n la valeur de l'action après n jours.

1. Calculer l'espérance et la variance de la variable X_n (on pourra introduire une variable auxiliaire égale au nombre de jours de hausse de la valeur de l'action).
2. On suppose dans cette question que $\beta = \frac{1}{\alpha}$. Quelle doit être la valeur de p pour avoir $\mathbb{E}(X_n) = 1$? Que pourra-t-on dire de la valeur à long terme de l'action si p est strictement inférieure (respectivement strictement supérieure) à la valeur calculée ?
3. On suppose dans cette question que $\alpha = 1 + h$ et $\beta = 1 - h$, où h est un réel strictement positif fixé. Quelle valeur doit-on donner à la probabilité p pour avoir $\mathbb{E}(X_n) = 1$? Que vaut alors $\mathbb{V}(X_n)$?

Exercice 11 (***)

Un joueur lance successivement n boules au hasard dans N cases numérotées de 1 à N (avec $N \geq 2$), chaque boule ayant probabilité $\frac{1}{N}$ de tomber dans chacune des N cases (et les tirages de boules étant indépendants les uns des autres). On cherche à étudier la variable aléatoire T_n égale au nombre de cases **non** vides après n lancers.

- Déterminer en fonction de n et de N les valeurs prises par T_n .
- Donner les lois de T_1 et de T_2 .
- Déterminer, lorsque $n \geq 2$, les probabilités $\mathbb{P}(T_n = 1)$, $\mathbb{P}(T_n = 2)$ et $\mathbb{P}(T_n = n)$ (en distinguant suivant que $n \leq N$ ou $n > N$).
- À l'aide de la formule des probabilités totales, prouver que si $1 \leq k \leq n$, alors $\mathbb{P}(T_{n+1} = k) = \frac{k}{N}\mathbb{P}(T_n = k) + \frac{N-k+1}{N}\mathbb{P}(T_n = k-1)$.
- On considère dans cette question le polynôme $G_n(x) = \sum_{k=1}^{k=n} \mathbb{P}(T_n = k)x^k$.
 - Quelle est la valeur de $G_n(1)$?
 - Exprimer $\mathbb{E}(T_n)$ en fonction de $G'_n(1)$.
 - En utilisant la relation démontrée à la question 4, montrer que $G_{n+1}(x) = \frac{1}{N}(x-x^2)G'_n(x) + xG_n(x)$.
 - Dériver l'expression précédente et en déduire que $\mathbb{E}(T_{n+1}) = \left(1 - \frac{1}{N}\right)\mathbb{E}(T_n) + 1$.
 - En déduire la valeur de $\mathbb{E}(T_n)$ et déterminer sa limite quand n tend vers $+\infty$.

Exercice 12 (***)

Une secrétaire effectue n appels pour tenter de joindre n correspondants distincts. Pour chaque appel, elle a une probabilité p d'obtenir son correspondant, et $q = 1 - p$ de ne pas le joindre.

- On note X le nombre de correspondants obtenus. Quelle est la loi de X ? Donner son espérance et sa variance.
- La secrétaire tente une deuxième fois de joindre les $n - X$ correspondants qu'elle n'a pas pu joindre la première fois. On note Y le nombre de correspondants joints à la deuxième tentative, et $Z = X + Y$. Quelles sont les valeurs que peut prendre Z ?
- Calculer $\mathbb{P}(Z = 0)$ et $\mathbb{P}(Z = 1)$ (pour cette dernière probabilité, on doit obtenir $npq^{2n-2}(1+q)$).
- Démontrer que $\mathbb{P}(Z = l) = \sum_{k=0}^l \mathbb{P}((X = k) \cap (Y = l - k))$.
- Calculer $\mathbb{P}_{X=k}(Y = h)$ pour les valeurs de k et h pour lesquelles cela a un sens, en déduire $\mathbb{P}(Z = l)$.
- Montrer que $\binom{n}{k} \binom{n-k}{l-k} = \binom{n}{l} \binom{l}{k}$. En déduire que $\mathbb{P}(Z = l) = \binom{n}{l} p^l (1+q)^l (q^2)^{n-l}$.
- En constatant que $p(1+q) = 1 - q^2$, reconnaître la loi suivie par Z .
- Retrouver ce résultat en calculant la probabilité qu'un correspondant donné soit joint à l'issue des deux appels.

Exercice 13 (***)

Soit n un entier supérieur ou égal à 2. On place dans une urne 2 boules numérotées 0 ainsi que 2^k boules numérotées k pour toutes les valeurs de k comprises entre 1 et n .

- (a) Calculer $(1-q) \sum_{k=1}^n kq^{k-1}$ et en déduire la valeur de $\sum_{k=1}^n k2^k$.
 - Montrer que pour $n \geq 1$, $\sum_{k=1}^n k^2 2^k = (n^2 - 2n + 3)2^{n+1} - 6$
- On tire une boule au hasard dans l'urne, et on note X le numéro de la boule tirée.
 - Déterminer la loi de probabilité de X (on distinguer $X = 0$ des autres valeurs).
 - Calculer l'espérance et la variance de X .

3. On définit une seconde variable aléatoire Y de la façon suivante : si $X = 0$ alors $Y = 0$, sinon on enlève de l'urne après le premier tirage toutes les boules dont le numéro est supérieur ou égal à k (où k est la valeur prise par X), et on effectue un second tirage, Y étant le numéro obtenu lors de ce second tirage.
 - (a) Déterminer pour k et i compris 0 et n la probabilité conditionnelle, $p(Y = i/X = k)$ (on distinguera des cas si nécessaire).
 - (b) En déduire la loi de probabilité de Y .
 - (c) Vérifier que $\sum_{i=0}^{n-1} p(Y = i) = 1$.
 - (d) Calculer l'espérance de Y .

Exercice 14 (***)

Une urne contient une boule blanche et une boule noire, les boules étant indiscernables au toucher. On y prélève une boule, chaque boule ayant la même probabilité d'être tirée, on note sa couleur, et on la remet dans l'urne avec c boules supplémentaires de la couleur de la boule tirée (c étant évidemment un entier naturel). On répète cette épreuve, on réalise ainsi une succession de n tirages ($n > 2$).

I. Étude du cas $c = 0$.

On note X la variable aléatoire réelle égale au nombre de boules blanches obtenues au cours des n tirages et Y la variable aléatoire égale au numéro du premier tirage pour lequel on obtient une boule blanche (si on ne tire que des boules noires, on posera $Y = 0$).

1. Déterminer la loi de X . Donner la valeur de $\mathbb{E}(X)$ et de $\mathbb{V}(X)$.
2. Déterminer la loi de Y (on séparera le calcul de $\mathbb{P}(Y = 0)$).

3. Vérifier que $\sum_{k=0}^{k=n} \mathbb{P}(Y = k) = 1$.

4. Montrer que, pour $x \neq 1$ et $n \geq 1$, $\sum_{k=1}^{k=n} kx^k = \frac{nx^{n+2} - (n+1)x^{n+1} + x}{(1-x)^2}$.

5. En déduire $\mathbb{E}(Y)$.

II. Étude du cas $c \neq 0$.

On considère les variables aléatoires $(X_i)_{1 \leq i \leq n}$ indicatrices des événements « On tire une boule blanche au i -ème tirage ». On définit ensuite, pour p compris entre 2 et n , la variable Z_p par $Z_p = \sum_{i=1}^{i=p} X_i$.

1. Que représente la variable Z_p ?
2. Donner la loi de X_1 et son espérance.
3. Déterminer les probabilités conditionnelles $\mathbb{P}_{X_1=0}(X_2 = 0)$, $\mathbb{P}_{X_1=0}(X_2 = 1)$, $\mathbb{P}_{X_1=1}(X_2 = 0)$ et $\mathbb{P}_{X_1=1}(X_2 = 1)$. En déduire la loi de X_2 ainsi que son espérance.
4. Déterminer la loi de Z_2 .
5. Déterminer l'ensemble des valeurs prises par la variable Z_p .
6. Soit $p \leq n - 1$:
 - (a) Déterminer $\mathbb{P}_{Z_p=k}(X_{p+1} = 1)$.
 - (b) En utilisant la formule des probabilités totales, montrer que $\mathbb{P}(X_{p+1} = 1) = \frac{1 + cE(Z_p)}{2 + pc}$.
 - (c) En déduire, par un raisonnement par récurrence, que X_p est une variable aléatoire de Bernoulli de paramètre $\frac{1}{2}$.

Exercice 15 (**)

On dispose d'une urne contenant $2n$ jetons numérotés de 1 à $2n$.

- Un joueur pioche au hasard un jeton dans l'urne. On note X le numéro tiré. Rappeler la loi, l'espérance et la variance de la variable aléatoire X .
- Le joueur pioche à présent deux jetons successivement dans l'urne, avec remise du jeton entre les deux tirages. On note Y le plus grand numéro tiré lors de ces deux tirages, U le premier numéro tiré et D le deuxième numéro tiré.
 - Pour un entier $i \leq 2n$, déterminer $\mathbb{P}(U \leq i)$ et $\mathbb{P}(D \leq i)$, en déduire $\mathbb{P}(Y \leq i)$.
 - Déduire de la question précédente que $\mathbb{P}(Y = i) = \frac{2i-1}{4n^2}$.
 - Calculer l'espérance de la variable aléatoire Y .
- Le joueur procède maintenant à l'expérience suivante : il tire un premier jeton dans l'urne. Si le numéro obtenu est strictement supérieur à n , il conserve ce numéro, mais si ce n'est pas le cas il remet son jeton dans l'urne et effectue un deuxième tirage, et conservera le numéro obtenu à ce deuxième tirage (PAS le plus grand des deux). On note Z le numéro obtenu à l'issue de cette expérience.
 - Calculer $\mathbb{P}(Z = i)$ dans le cas où $i \leq n$.
 - Calculer $\mathbb{P}(Z = i)$ lorsque $i > n$.
 - Vérifier que $\sum_{i=1}^{2n} \mathbb{P}(Z = i) = 1$.
 - Calculer l'espérance de la variable aléatoire Z , et la comparer à celles des variables X et Y calculées plus haut.

Exercice 16 (***)

Une urne contient N boules : b boules blanches et $N - b$ boules noires (avec $b \geq 1$). On tire toutes les boules de cette urne successivement sans remise et on note X le numéro du tirage où on a tiré la dernière boule blanche.

- Quelle est la loi de X lorsque $b = 1$?
- Déterminer la loi, l'espérance et la variance de X lorsque $N = 4$ et $b = 2$.
- On se place maintenant dans le cas général.
 - Quelles sont les valeurs prises par la variable aléatoire X ?
 - Déterminer la probabilité qu'on tire $b - 1$ boules blanches lors des k premiers tirages, et en

$$\text{déduire que } \mathbb{P}(X = k) = \frac{\binom{k-1}{b-1}}{\binom{N}{b}}.$$

- Calculer, en fonction de N et de b , l'espérance de X (on doit pouvoir simplifier le résultat).

Exercice 17 (***)

On considère une variable S suivant une loi binômiale de paramètre (n, p) , et un réel $x > 0$.

- À l'aide de l'inégalité de Markov, montrer que, si $\lambda > 0$, $\mathbb{P}(S - np \geq nx) \leq \frac{\mathbb{E}(e^{\lambda(S-np)})}{e^{n\lambda x}}$.
- Calculer $\mathbb{E}(e^{\lambda(S-np)})$.
- Montrer que, pour tout réel t , on a $e^t \leq e^{t^2} + t$. En déduire que $\mathbb{P}(S - np \geq nx) \leq e^{n(\lambda^2 - \lambda x)}$, puis que $\mathbb{P}(S - np \geq nx) \leq e^{-\frac{nx^2}{4}}$.
- Expliquer pourquoi on aurait de même $\mathbb{P}(S - np \leq -nx) \leq e^{-\frac{nx^2}{4}}$.
En déduire que $\mathbb{P}\left(\left|\frac{S}{n} - p\right| \geq x\right) \leq 2e^{-\frac{nx^2}{4}}$ (inégalité de Bernstein).
- Comparer cette inégalité avec celle de Bienaymé-Tchebychev pour de grandes valeurs de n .

Exercice 18 (**)

On définit une fonction f sur $[0, +\infty[$ par $f(x) = -x \ln(x)$, prolongée par continuité en 0 par $f(0) = 0$. Pour une variable aléatoire X , on appelle entropie de X le réel $H(X) = \sum_{k \in X(\Omega)} f(\mathbb{P}(X = k))$.

1. Calculer $H(X)$ pour une variable constante.
2. Calculer $H(X)$ pour une variable suivant une loi uniforme.
3. En notant $N = |X(\Omega)|$, montrer que $\sum_{k \in X(\Omega)} f(N\mathbb{P}(X = k)) \leq 0$ (on pourra utiliser, après l'avoir démontrée, l'inégalité $f(x) \leq 1 - x$).
4. Montrer que $\sum_{k \in X(\Omega)} f(N\mathbb{P}(X = k)) = -N \ln(N) + NH(X)$, en déduire une majoration de $H(X)$.
5. Pour quelles variables aléatoires l'entropie est-elle minimale (on veut une démonstration rigoureuse)?
6. Pour quelles variables aléatoires l'entropie est-elle maximale (on veut aussi une démonstration rigoureuse)?

Exercice 19 (*)

Soient X et Y deux variables indépendantes suivant une loi de Bernoulli de même paramètre p . On note $U = X + Y$ et $V = X - Y$. Calculer la loi du couple (U, V) . Les deux variables sont-elles indépendantes? Peut-on avoir $\mathbb{E}(UV) = \mathbb{E}(U)\mathbb{E}(V)$? Calculer également $\text{Cov}(U, V)$.

Exercice 20 (**)

Une armoire est constituée de trois tiroirs. On y range une chaussette verte, une rouge et une noire. On note X le nombre de chaussettes que contient le premier tiroir et N le nombre de tiroirs vides. Déterminez la loi conjointe puis les lois marginales du couple (X, N) . Les deux variables sont-elles indépendantes?

Exercice 21 (**)

On dispose de n urnes numérotées de 1 à n . L'urne k contient k boules elles-mêmes numérotées de 1 à k . On tire une urne au hasard, puis une boule au hasard dans cette urne. On note X le numéro de l'urne et Y le numéro de la boule. Déterminer la loi du couple (X, Y) , puis les lois marginales. En déduire l'espérance des variables X et Y .

Exercice 22 (**)

On considère deux variables aléatoires X et Y telle que $X(\Omega) = Y(\Omega) = \{1, 2, \dots, n\}$, et $\mathbb{P}((X = i) \cap (Y = j)) = a \times i \times j$.

1. Déterminer la valeur de la constante a .
2. Donner la loi, l'espérance et la variance de X .
3. Déterminer la loi de Y .
4. Les variables X et Y sont-elles indépendantes?
5. Calculer $\mathbb{P}(X = Y)$.
6. On pose $U = \max(X, Y)$. Calculer la loi de U .

Exercice 23 (**)

Soit $n \geq 2$, et X et Y deux variables aléatoires indépendantes suivant la même loi $\mathcal{U}(\{1, 2, \dots, n\})$.

1. Déterminer la loi de la variable $Z = \max(X, Y)$.
2. Calculer l'espérance de Z , en déduire (presque sans calcul) celle de la variable $T = \min(X, Y)$.

3. Calculer la valeur de $\mathbb{E}(ZT)$ (là encore, presque pas de calculs à faire).
4. Les variables Z et T sont-elles indépendantes ?
5. Déterminer la loi du couple (Z, X) .
6. Retrouver à l'aide du calcul de la question précédente la loi de la variable Z .

Exercice 24 (*)

À la cantine du lycée, trois plats différents sont proposés à chacun des n élèves qui viennent manger un certain jour. Comme chacun des trois plats est également appétissant, chaque élève choisit aléatoirement (et de manière indépendante des autres) un plat parmi les trois. On note X_1 , X_2 et X_3 le nombre d'élèves ayant choisi chacun des trois plats disponibles.

1. Quelles sont les lois des variables X_i ?
2. Donner la variance de X_1 de X_2 et de $X_1 + X_2$.
3. En déduire la covariance des variables X_1 et X_2 . Sont-elles indépendantes ?

Exercice 25 (**)

Une urne contient $n + 1$ boules numérotées 0 à n . On y tire successivement et avec remise un certain nombre de boules. La variable aléatoire X_k est définie de la façon suivante : $X_1 = 1$, et ensuite $X_i = 1$ si le numéro obtenu au tirage i n'avait jamais été tiré avant, $X_i = 0$ sinon.

1. Déterminer la loi de X_2 .
2. Montrer que X_i suit une loi de Bernoulli de paramètre $\left(\frac{n}{n+1}\right)^{i-1}$.
3. Montrer que, si $i < j$, on a $\mathbb{P}((X_i = 1) \cap (X_j = 1)) = \frac{(n-1)^{i-1}n^{j-i}}{(n+1)^{j-1}}$.
4. En déduire la loi du produit $X_i X_j$.
5. Les variables X_i et X_j sont-elles indépendantes ?
6. On note Z_p la variable aléatoire égale au nombre de numéros distincts obtenus lors des p premiers tirages. Exprimer Z_p en fonction des variables définies précédemment.
7. En déduire son espérance, et la limite de celle-ci lorsque p tend vers $+\infty$.

Exercice 26 (***)

Pour une variable aléatoire X à valeurs entières, on définit la fonction génératrice g_X de X de la façon suivante : $\forall t \in \mathbb{R}, g_X(t) = \mathbb{E}(t^X) = \sum_{k \in X(\Omega)} t^k \mathbb{P}(X = k)$.

1. Montrer que la connaissance de la fonction g_X permet de déterminer de façon unique la loi de X .
2. Calculer g_X lorsque X suit une loi de Bernoulli, puis effectuer le même calcul pour une loi binômiale.
3. Montrer que si X et Y sont deux variables indépendantes à valeurs entières, alors $g_{X+Y} = g_X g_Y$.
4. En déduire que la somme de deux variables suivant des lois binômiales de paramètres respectifs (n_1, p) et (n_2, p) suit une loi binômiale de paramètre $(n_1 + n_2, p)$.

Exercice 27 (***)

Trois urnes contiennent chacune n boules numérotées de 1 à n . On tire une boule dans chaque urne et on note X_1 , X_2 et X_3 les trois numéros obtenus. On note X le plus grand des numéros obtenus, Z le plus petit, et Y celui du milieu. Déterminer la loi du triplet (X, Y, Z) (qui est définie, comme vous pourriez vous en douter, comme la donnée des probabilités de toutes les intersections de trois événements possibles). En déduire la loi de X , de Y et de Z . On pourra commencer pour cet exercice par traiter le cas où $n = 3$.

Problème (***)

Soit n un entier naturel non nul. On considère l'expérience aléatoire consistant en la succession de n lancers d'une pièce équilibrée. On note S_n le nombre de Piles obtenus au cours des n lancers et T_n le rang d'apparition du premier Pile (si aucun Pile n'apparaît lors des n lancers, on convient que $T_n = 0$).

1. Dans cette question $n = 3$.
 - (a) Donner la loi du couple (S_3, T_3) .
 - (b) Donner la loi de T_3 et calculer son espérance.
 - (c) Quelle est la loi de S_3 et quelle est son espérance?
 - (d) Les variables S_3 et T_3 sont-elles indépendantes?
 - (e) Calculer les probabilités suivantes :
 - i. $\mathbb{P}(S_3 = T_3)$.
 - ii. $\mathbb{P}_{T_3 \neq 0}(S_3 = T_3)$.
 - iii. $\mathbb{P}_{S_3=2}(T_3 = 1)$.
 - (f) Donner la loi de la variable produit $S_3 T_3$, calculer son espérance et en déduire le quotient $\frac{\mathbb{E}(S_3 T_3)}{\mathbb{E}(S_3)\mathbb{E}(T_3)}$.
2. Désormais et jusqu'à la fin du problème on revient au cas général.
 - (a) Pour $k = 0$ puis pour tout entier k compris entre 1 et n , calculer la probabilité conditionnelle $\mathbb{P}_{S_n=1}(T_n = k)$. Pourquoi ce résultat était-il intuitivement prévisible?
 - (b) Préciser les valeurs prises par la variable T_n et donner sa loi.
 - (c) Déterminer la valeur de l'espérance de T_n en fonction de n puis sa limite quand n tend vers $+\infty$ (on a le droit d'utiliser la formule suivante : $\sum_{k=1}^n kq^k = \frac{nq^{n+1} - (n+1)q^n + 1}{(1-q)^2}$).
 - (d) Reconnaître la loi de S_n et préciser son espérance.
Justifier l'inégalité $S_n T_n \geq S_n$ et en déduire que $\mathbb{E}(S_n T_n) \geq \frac{n}{2}$.
 - (e) Quand T_n prend la valeur k ($0 \leq k \leq n$), quelles valeurs peut prendre S_n ?
 - (f) Étudier les variations de la fonction $x \mapsto x(n+1-x)$ définie sur $[0, n+1]$. En distinguant les cas n pair et n impair, donner la valeur maximale que peut prendre la variable $S_n T_n$. En déduire que $\mathbb{E}(S_n T_n) \leq \left(\frac{n+1}{2}\right)^2$.
3. On cherche maintenant à obtenir un meilleur encadrement de $\mathbb{E}(S_n T_n)$ permettant de calculer $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}(S_n T_n)}{n}$. On admet que $\mathbb{E}(S_n T_n) = \sum_{k=1}^n \frac{k}{2^k} \times \frac{n-k+2}{2}$.
 - (a) Montrer que $\frac{n+2}{2} \sum_{k=1}^n \frac{k}{2^k} - 3 \leq \mathbb{E}(S_n T_n) \leq n+2$ (on pourra utiliser la superbe formule suivante : $\sum_{k=1}^{+\infty} k(k-1)q^k = \frac{2}{(1-q)^3}$ si $q \in]-1, 1[$).
 - (b) Montrer que : $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{2}{n}\right) \sum_{k=1}^n \frac{k}{2^k} = 2$.
 - (c) Déterminer la limite de la suite de terme général $\frac{\mathbb{E}(S_n T_n)}{n}$.
 - (d) En déduire la valeur de $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E}(S_n T_n)}{\mathbb{E}(S_n)\mathbb{E}(T_n)}$. Interpréter ce résultat.