

TD 28 : ESPACES PROBABILISÉS

► Généralités, obtention de probas par dénombrement (équiprobabilité)

EXERCICE 28.1 On tire trois cartes dans un jeu de 32 cartes. Dans chacun des cas suivants, préciser l'univers modélisant l'expérience, et calculer la probabilité d'obtenir 3 cartes de même couleur. F

1. Si les cartes sont tirées simultanément.
2. Si les cartes sont tirées successivement et sans remise.
3. Si les cartes sont tirées successivement et avec remise.

EXERCICE 28.2 On lance 6 fois un dé équilibré. Quelle est la probabilité d'avoir obtenu une fois chaque face ? PD

EXERCICE 28.3 Soient A et B deux événements d'un espace probabilisé fini. On note alors C l'événement «un et un seul des événements A ou B est réalisé». PD

1. Exprimer C en fonction de A et B .
2. Prouver que $\mathbf{P}(C) = \mathbf{P}(A) + \mathbf{P}(B) - 2\mathbf{P}(A \cap B)$.

EXERCICE 28.4 On lance $2n$ fois une pièce qui tombe sur pile avec probabilité $p \in]0, 1[$. Déterminer la probabilité que chaque lancer donne un résultat contraire du lancer précédent. PD

EXERCICE 28.5 Montrer que si A et B sont indépendants, alors les couples A et \bar{B} sont indépendants, de même que \bar{A} et B , et \bar{A} et \bar{B} . PD

EXERCICE 28.6 Soient A et B deux événements d'un espace probabilisé. Montrer que $|\mathbf{P}(A \cap B) - \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(B)| \leq \frac{1}{4}$. PD

EXERCICE 28.7 Une loterie a lieu une fois par semaine. Chaque semaine, sur 100 billets mis en jeu, n sont gagnants, avec $n \leq 90$. Chaque billet coûte un euro, et on dispose de 10 euros. PD

Parmi les deux stratégies suivantes :

1. acheter 10 billets la même semaine
2. acheter un billet par semaine durant 10 semaines

Laquelle permet de maximiser les chances de gagner au moins une fois ?

EXERCICE 28.8 Paradoxe des anniversaires PD

Dans un groupe de n personnes, on considère que chaque personne a autant de chance d'être née chacun des 365 jours de l'année.

Quelle est la probabilité que deux personnes aient leur anniversaire le même jour ?

Un calcul numérique prouve que pour $n \geq 23$, cette probabilité est supérieure à $1/2$, et c'est ce que l'on nomme paradoxe des anniversaires. Ce n'est pas un vrai paradoxe, mais cela contredit l'intuition, car on pourrait s'attendre à ce qu'il faille bien davantage de personnes.

Pour $n = 48$, cette probabilité vaut environ 0.96, et votre classe ne déroge pas à la règle : vous êtes bien deux à être nés le même jour !

EXERCICE 28.9 On place deux amis dans une file d'attente de n personnes ($n \geq 3$). Quelle est la probabilité qu'il y ait r personnes ($0 \leq r \leq n - 2$) entre les deux amis ? AD

Quelle est le nombre de personnes le plus probable entre les deux ?

Mêmes questions si cette fois les deux amis sont placés sur une table ronde, et que l'on compte le nombre de personnes entre les deux dans le sens le plus direct.

EXERCICE 28.10 On lance n fois une pièce de monnaie, qui tombe sur *pile* avec probabilité $p \in]0, 1[$. PD

1. Quelle est la probabilité que le premier pile arrive au $n^{\text{ème}}$ lancer ?
2. Pour $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, quelle est la probabilité d'obtenir le $k^{\text{ème}}$ pile au $n^{\text{ème}}$ lancer ?

EXERCICE 28.11 (Oral X PC) D

On place aléatoirement $n \geq 3$ boules dans n urnes. Quelle est la probabilité qu'une et une seule urne reste vide ? Donner un équivalent simple de cette probabilité lorsque $n \rightarrow +\infty$.

EXERCICE 28.12 Formule du crible et application D

1. Soient A_1, \dots, A_n des événements d'un espace probabilisé fini (Ω, \mathbf{P}) . On souhaite prouver que

$$\mathbf{P}\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{k=1}^n \left((-1)^{k+1} \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n} \mathbf{P}(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) \right). \quad (\star)$$

On rappelle à cet effet que pour toute partie $A \in \mathcal{P}(\Omega)$, $\mathbf{P}(A) = \sum_{\omega \in A} \mathbf{P}(\{\omega\})$.

Si l'on applique ceci à tous les termes du membre de droite de (\star) , on obtient une combinaison linéaire des $\mathbf{P}(\{\omega\})$, $\omega \in \Omega$.

(a) Soit $\omega \in \Omega$ un élément qui appartient à exactement p événements parmi A_1, \dots, A_n . Montrer que le coefficient devant $\mathbf{P}(\{\omega\})$ dans le membre de droite de (\star) est $\sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \binom{p}{k}$.

(b) Conclure.

2. n personnes laissent leurs chapeaux au vestiaire. Pour les récupérer, chacune prend un chapeau au hasard. Quelle est la probabilité que personne n'ait repris son chapeau ?

EXERCICE 28.13 Problème du scrutin (Oral X PC)

Lors d'une élection, a électeurs votent pour A et b votent pour B ($a > b$). Quelle est la probabilité que, pendant le dépouillement, A soit toujours strictement en tête ?

TD

► Formules des probabilités composées/totales/de Bayes. Indépendance

EXERCICE 28.14 Urne de Polya

Une urne contient au départ une boule blanche et une boule noire.

On répète indéfiniment l'expérience suivante : on tire une boule, on la remet dans l'urne, et on ajoute une autre boule de la même couleur.

Ainsi, à l'issue de la $k^{\text{ème}}$ répétition de l'expérience, l'urne contient $k + 2$ boules.

On note alors pour $k \in \mathbf{N}$ et $i \in \llbracket 1, k + 1 \rrbracket$, B_k^i l'événement «l'urne contient i boules blanches à l'issue du $k^{\text{ème}}$ tirage».

Montrer par récurrence sur k que pour tout $i \in \llbracket 1, k + 1 \rrbracket$, $\mathbf{P}(B_k^i) = \frac{1}{k + 1}$.

AD

EXERCICE 28.15 (Oral Centrale PC)

Soit $n \in \mathbf{N}^*$. Une urne contient $2n$ boules, n blanches et n noires. On tire les boules deux par deux jusqu'à vider l'urne. Quelle est la probabilité qu'à chaque tirage on ait obtenu une boule blanche et une boule noire ?

AD

EXERCICE 28.16 Soient A_1, \dots, A_n des événements indépendants. Montrer que la probabilité qu'aucun des événements

A_1, \dots, A_n ne soit réalisé est majorée par $\exp\left(-\sum_{i=1}^n \mathbf{P}(A_i)\right)$.

PD

EXERCICE 28.17 Le concierge alcoolique

Un concierge possède 10 clés sur son trousseau, dont une seule ouvre la porte devant laquelle il se trouve.

On note A_k l'événement «la $k^{\text{ème}}$ clé essayée par le concierge est la première à ouvrir la porte».

1. Le concierge essaie les clés sans remise, calculer $\mathbf{P}(A_k)$ pour $1 \leq k \leq 10$.
2. Le concierge essaie les clés avec remise, calculer $\mathbf{P}(A_k)$ pour $k \in \mathbf{N}^*$.
3. Le concierge est ivre un jour sur trois. Lorsque c'est le cas, il essaie les clés avec remise, et les autres jours, il les essaie sans remise. Calculer $\mathbf{P}(A_k)$.
4. Aujourd'hui, il a fallu 6 essais au concierge pour ouvrir sa porte. Quelle est la probabilité qu'il soit ivre ? Même question avec 11 essais.

AD

EXERCICE 28.18 (Banque CCP)

On dispose de 100 dés dont 25 sont pipés. Pour chaque dé pipé, la probabilité d'obtenir le chiffre 6 lors d'un lancer vaut $\frac{1}{2}$.

1. On tire un dé au hasard parmi les 100 dés. On lance ce dé et on obtient le chiffre 6. Quelle est la probabilité que ce dé soit pipé ?
2. Soit $n \in \mathbf{N}^*$. On tire un dé au hasard parmi les 100 dés. On lance ce dé n fois et on obtient n fois le chiffre 6. Quelle est la probabilité p_n que ce dé soit pipé ?
3. Déterminer $\lim_{n \rightarrow +\infty} p_n$. Interpréter ce résultat.

AD

EXERCICE 28.19 On dispose de deux dés équilibrés : le dé A possède quatre faces rouges et deux faces noires, le dé B possède quatre faces noires et deux faces rouges.

On lance une pièce de monnaie truquée, qui tombe sur pile avec probabilité $\frac{1}{3}$. Si la pièce tombe sur pile, alors on ne joue qu'avec le dé A, si la pièce de monnaie tombe sur face, on ne joue qu'avec le dé B.

On note R_i l'événement «le $i^{\text{ème}}$ lancer de dé donne une face rouge».

1. Calculer $\mathbf{P}(R_1)$, $\mathbf{P}(R_2)$, puis $\mathbf{P}(R_1 \cap R_2)$. Les événements R_1 et R_2 sont-ils indépendants ?
2. On a obtenu «rouge» aux deux premiers lancers. Calculer la probabilité d'obtenir «rouge» au troisième.
3. On a obtenu «rouge» aux n premiers lancers. Calculer la probabilité qu'on joue avec le dé A.

EXERCICE 28.20 On dispose de n urnes U_1, U_2, \dots, U_n , et on dispose 3 boules dans chaque urne.

Dans l'ensemble des $3n$ boules, une seule est bleue, les autres sont rouges.

Sachant que l'on a tiré sans remise deux boules rouges dans l'urne U_1 , quelle est la probabilité que la boule bleue se trouve dans l'urne U_2 ?

EXERCICE 28.21 Loi de succession de Laplace

On dispose de N urnes numérotées de 1 à N . L'urne numéro i contient i boules blanches et $N - i$ boules noires.

On choisit une urne au hasard, sans connaître son numéro, et on effectue une série de tirages dans cette urne, avec remise entre les tirages.

1. Sachant que les n premiers tirages ont tous donné une boule blanche, quelle est la probabilité que le tirage suivant donne encore une boule blanche ?
2. Déterminer la limite lorsque $N \rightarrow +\infty$ de la probabilité calculée à la question précédente.

CORRECTION DES EXERCICES DU TD 28

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.1

Dans les 3 cas, notons A l'événement «obtenir 3 cartes de même couleur», en gardant à l'esprit que les univers Ω étant différents, A n'est pas toujours égal au même ensemble.

1. Les issues possibles de l'expérience sont donc les mains des 3 cartes. Autrement dit, les parties à 3 éléments de l'ensemble des 32 cartes.

Soit encore ce que nous avons nommé les 3-combinaisons de l'ensemble des cartes.

Donc l'univers Ω est¹ l'ensemble des 3-combinaisons de l'ensemble des 32 cartes.

Nous savons alors $\text{Card}\Omega = \binom{32}{3} = \frac{32 \times 31 \times 30}{6} = 5 \times 32 \times 31$.

Et le nombre de mains de même couleur est $4 \times \binom{8}{3} = 4 \times 8 \times 7$, 4 étant le nombre de

couleurs, et $\binom{8}{3}$ étant, une fois la couleur choisie, le nombre de manières de choisir 3 cartes parmi les 8 de cette couleur.

Donc la probabilité d'obtenir 3 cartes de même couleur est

$$\mathbf{P}(A) = \frac{\text{Card}(A)}{\text{Card}(\Omega)} = \frac{4 \times 8 \times 7}{32 \times 31 \times 5} = \frac{7}{155}.$$

2. Cette fois l'ordre des tirages a une importance², et donc les issues possibles de l'expérience sont des triplets (donc ordonnés) de cartes, ne comportant pas deux fois la même carte³. Autrement dit, ce sont des arrangements de 3 cartes parmi les 32 possibles.

Donc Ω est l'ensemble des tels arrangements, de sorte que $\text{Card}(\Omega) = 32 \times 31 \times 30$.

Et alors A est de cardinal $4 \times 8 \times 7 \times 6$. Encore une fois 4 correspond au nombre de couleurs possibles, et $8 \times 7 \times 6$ est le nombre de 3-arrangements de cartes d'une couleur fixée.

Et donc $\mathbf{P}(A) = \frac{\text{Card}(A)}{\text{Card}(\Omega)} = \frac{4 \times 6 \times 7 \times 8}{32 \times 31 \times 30} = \frac{7}{155}$.

Remarque importante : nous trouvons bien la même probabilité que précédemment. C'est complètement intuitif, et vous serez d'accord pour dire que la probabilité d'obtenir 3 cartes de même couleur est la même qu'on tire les cartes simultanément ou bien une par une.

C'est un fait qu'il est bon d'avoir à l'esprit : si les événements que l'on considère ne tiennent pas en compte l'ordre (ici on ne regarde pas la couleur de la première/de la deuxième/de la troisième carte), modéliser une expérience par des tirages successifs **sans remise** ou par des tirages simultanés conduit au même résultat.

3. Cette fois, les tirages étant avec remise, il est possible d'obtenir plusieurs fois la même carte, et donc une issue de l'expérience est un triplet de cartes.

Donc $\Omega = (\{7\spadesuit, 7\diamondsuit, \dots, A\clubsuit, A\heartsuit\})^3$.

Et donc $\text{Card}(\Omega) = 32^3$.

Pour chaque couleur, il y a 8^3 triplets de cartes de cette couleur.

Et donc $\mathbf{P}(A) = \frac{4 \times 8^3}{32^3} = \frac{1}{16}$.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.2

Comme souvent, la difficulté réside dans la manière dont on modélise l'épreuve.

Si on commence à distinguer les résultats des différents lancers, les calculs et les notations vont vite devenir inextricables. Il sera facile de dire «le second lancer donne un résultat différent du premier», mais au moment d'écrire que les 4 premiers sont différents, cela va se corser...

Notons qu'on peut ici prendre $\Omega = \llbracket 1, 6 \rrbracket^6$, muni de sa probabilité uniforme⁴.

Et donc une issue qui réalise l'événement A : «les 6 numéros sont sortis» est la donnée d'un 6-arrangement de $\llbracket 1, 6 \rrbracket$ (ou si vous préférez d'une permutation de $\llbracket 1, 6 \rrbracket$).

Il y a $6!$ tels arrangements, et donc

$$\mathbf{P}(A) = \frac{6!}{6^6} = \frac{5}{324}.$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.3

¹ Ou du moins peut-être pris tel quel, on pourrait imaginer d'autres possibilités.

² Pas forcément sur la probabilité que nous obtiendrons, mais en tous cas dans la description de l'expérience.

³ Car les tirages sont sans remise.

⁴ Car le dé est équilibré.

- On a $C = (A \cup B) \setminus (A \cap B)$. C'est ce que dans le TD de théorie des ensembles nous avons nommé *différence symétrique de A et B* et noté $A \Delta B$.
- Puisque C et $A \cap B$ sont incompatibles, $\mathbf{P}(A \cup B) = \mathbf{P}(C \cup (A \cap B)) = \mathbf{P}(C) + \mathbf{P}(A \cap B)$.
Et donc

$$\mathbf{P}(C) = \mathbf{P}(A \cup B) - \mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}(A) + \mathbf{P}(B) - \mathbf{P}(A \cap B) - \mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}(A) + \mathbf{P}(B) - 2\mathbf{P}(A \cap B).$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.4

Notons P_i (resp. F_i) l'événement «le $i^{\text{ème}}$ lancer donne pile (resp. face)».

Et soit alors A l'événement dont la probabilité est cherchée, à savoir : «chaque lancer donne un résultat différent du précédent».

Puisque $\{F_1, P_1\}$ est un système complet d'événements, par la formule des probabilités totales,

$$\mathbf{P}(A) = \mathbf{P}(A \cap F_1) + \mathbf{P}(A \cap P_1).$$

Mais $A \cap F_1 = F_1 \cap P_2 \cap F_3 \cap \dots \cap F_{2n-1} \cap P_{2n}$, de sorte que par indépendance des lancers,

$$\mathbf{P}(A \cap F_1) = \mathbf{P}(F_1)\mathbf{P}(P_2) \dots \mathbf{P}(F_{2n-1})\mathbf{P}(P_{2n}) = (pq)^n.$$

De même, $\mathbf{P}(A \cap P_1) = (pq)^n$ et donc $\mathbf{P}(A) = 2(pq)^n$.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.5

On a $\mathbf{P}(\bar{B}) = 1 - \mathbf{P}(B)$, et donc

$$\mathbf{P}(A \cap \bar{B}) = \mathbf{P}(A) - \mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}(A) - \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(B) = \mathbf{P}(A)(1 - \mathbf{P}(B)) = \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(\bar{B}).$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.6

Le point important ici, souvent utile en probas est que $\forall x \in [0, 1], 0 \leq x(1-x) \leq \frac{1}{4}$.

Ceci se retrouve soit à l'aide d'un tableau de variations, soit à l'aide d'un résultat bien connu⁵ sur le sommet d'une parabole.

$$5 - \frac{b}{2a} \dots$$

D'une part, on a $\mathbf{P}(A) \geq \mathbf{P}(A \cap B)$ et de même $\mathbf{P}(B) \geq \mathbf{P}(A \cap B)$, si bien que $\mathbf{P}(A)\mathbf{P}(B) \geq \mathbf{P}(A \cap B)^2$, et donc

$$\mathbf{P}(A \cap B) - \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(B) \leq \mathbf{P}(A \cap B) - \mathbf{P}(A \cap B)^2 \leq \mathbf{P}(A \cap B)(1 - \mathbf{P}(A \cap B)) \leq \frac{1}{4}.$$

Pour l'autre inégalité, notons que $\mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}(A) - \mathbf{P}(A \cap \bar{B})$ et donc

$$\mathbf{P}(A \cap B) - \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(B) = \mathbf{P}(A) - \mathbf{P}(A \cap \bar{B}) - \mathbf{P}(A) + \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(\bar{B}) = \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(\bar{B}) - \mathbf{P}(A \cap \bar{B}).$$

Mais alors en appliquant le même raisonnement que pour la première inégalité, en changeant B en \bar{B} , on obtient

$$\mathbf{P}(A \cap \bar{B}) - \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(\bar{B}) \leq \frac{1}{4} \Leftrightarrow \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(\bar{B}) - \mathbf{P}(A \cap \bar{B}) \geq -\frac{1}{4}.$$

Et donc il vient bien $|\mathbf{P}(A \cap B) - \mathbf{P}(A)\mathbf{P}(B)| \leq \frac{1}{4}$.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.7

Notons G l'événement «l'un des billets achetés est gagnant».

Avec la première stratégie, la probabilité d'obtenir uniquement des billets perdants est :

$$\mathbf{P}(\bar{G}) = \frac{\binom{100-n}{10}}{\binom{100}{10}} = \frac{(100-n)!90!}{(90-n)!100!} = \frac{(100-n)(99-n) \cdot (91-n)}{100 \cdot 99 \dots 91} = \prod_{k=91}^{100} \frac{k-n}{k}$$

Donc

$$\mathbf{P}(G) = 1 - \prod_{k=91}^{100} \frac{k-n}{k}$$

Avec la seconde stratégie, notons G_i l'événement : «le joueur gagne la $i^{\text{ème}}$ semaine». Alors

$$\mathbf{P}(\bar{G}_i) = \frac{100-n}{100}.$$

Par indépendance des événements G_1, \dots, G_{10} , et puisque $\bar{G} = \bigcap_{i=1}^{10} \bar{G}_i$, on a

$$\mathbf{P}(\bar{G}) = \prod_{i=1}^{10} \mathbf{P}(\bar{G}_i) = \left(\frac{100-n}{100}\right)^{10}.$$

Incompatibilité

Cette incompatibilité se comprend encore mieux quand on le dit en français : C est l'événement «un seul des 2 événements A et B est réalisé» quand $A \cap B$ est l'événement « A et B sont réalisés».

Il est alors clair que C et $A \cap B$ ne peuvent pas être simultanément réalisés.

Et donc il vient

$$P(G) = 1 - \left(\frac{100-n}{100}\right)^{10}$$

On prouve facilement que pour $k \in \llbracket 91, 100 \rrbracket$, on a $\frac{k-n}{k} \leq \frac{100-n}{100}$.

On en déduit que

$$\prod_{k=91}^{100} \frac{k-n}{k} \leq \left(\frac{100-n}{100}\right)^{10}$$

On en déduit que la probabilité de gagner est plus grande avec la première stratégie.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.8

Prenons pour Ω l'ensemble $\llbracket 1, 365 \rrbracket^n$ des n -uplets d'éléments de $\llbracket 1, 365 \rrbracket$, le $i^{\text{ème}}$ élément correspondant au jour de naissance de la $i^{\text{ème}}$ personne.

Cherchons alors la probabilité de l'événement contraire, à savoir que les n dates de naissances soient deux à deux distinctes.

Alors les événements élémentaires réalisant cet événement sont les n -uplets sans répétitions : ce sont précisément les n -arrangements de $\llbracket 1, 365 \rrbracket$.

Si $n \geq 366$, il n'y en a pas⁶, et sinon, il sont au nombre de $\frac{365!}{(365-n)!}$.

Et donc au final, la probabilité que deux personnes soient nées le même jour est $1 - \frac{365!}{(365-n)!365^n}$.

⁶ Mais on n'a probablement pas besoin d'un calcul pour répondre au problème posé si $n \geq 366$...

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.9

1. Puisque seules comptent les places occupées par les deux amis (appelons-les Laurel et Hardy), il s'agit de dénombrer les manières de placer ces deux comparses.

Il y a $n(n-1)$ tels choix (nombre de 2-arrangements de $\llbracket 1, n \rrbracket$).

Il y aura alors r places entre les deux si Laurel se trouve en place i et Hardy en place $i+r+1$ pour $1 \leq i \leq n-r-1$, ou le contraire.

Ce qui fait $2(n-r-1)$ possibilités.

Et donc la probabilité cherchée est $\frac{2(n-r-1)}{n(n-1)}$.

2. Cette probabilité décroît clairement lorsque r augmente, donc est maximale pour $r=0$: le plus probable⁷ est que Laurel et Hardy soient voisins.
3. Si la table est ronde, alors une modélisation possible de l'expérience est de commencer par placer Laurel sur la première chaise (peu importe laquelle, seules les positions relatives nous intéressent), puis de placer les autres personnes dans le sens direct à partir de Laurel. Il y a donc $(n-1)!$ manières de placer ces personnes.

Mais pour $1 \leq r \leq \lfloor \frac{n}{2} \rfloor - 1$, seules deux positions pour Hardy placeront r personnes entre Laurel et lui : s'il est sur la chaise $r+1$ (où la chaise de Laurel porte le numéro 0), ou sur la chaise $n-r-1$. Et il y a $(n-2)!$ dispositions réalisant chacune de ces possibilités.

Donc la probabilité que Laurel et Hardy soient à distance r est $\frac{2(n-2)!}{(n-1)!} = \frac{2}{n-1}$.

Avec une exception dans le cas où n est pair et $r = \frac{n}{2} - 1$, auquel cas les positions $r+1$ et $n-1-r$ sont les mêmes, et donc la probabilité cherchée est $\frac{1}{n-1}$.

⁷ Attention, je n'ai pas dit qu'il y avait plus de 50% de chances que ceci se produise, mais juste que c'est plus probable que n'importe quelle autre distance.

Remarque

Ce cas est précisément celui où Laurel et Hardy se sont face.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.10

Notons P_i et F_i les événements correspondants aux résultats du $i^{\text{ème}}$ tirage.

1. L'événement « le 1^{er} pile arrive au $n^{\text{ème}}$ lancer est

$$A = F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_{n-1} \cap P_n$$

qui, par indépendance des différents lancers, a pour probabilité

$$P(A) = P(F_1)P(F_2) \dots P(F_{n-1})P(P_n) = q^{n-1}p.$$

2. Si le $k^{\text{ème}}$ pile se produit au $n^{\text{ème}}$ lancer, c'est que ce dernier lancer donne pile, et que $k - 1$ parmi les $n - 1$ premiers ont déjà donné une pile.

Or, si l'on choisit $k - 1$ tirages parmi les $n - 1$ premiers, la probabilité d'obtenir pile exactement à ces tirages ainsi qu'au $n^{\text{ème}}$ est $p^k q^{n-k}$.

Puisqu'il y a $\binom{n-1}{k-1}$ manières de choisir ces positions, la probabilité cherchée est $\binom{n-1}{k-1} p^k q^{n-k}$.

Alternative : si vraiment on a besoin de nommer les événements alors l'événement que nous cherchons est

$$\bigcup_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_{k-1} \leq n-1} \left(\bigcap_{i \in \{i_1, \dots, i_{k-1}\}} P_i \cap \bigcap_{j \notin \{i_1, \dots, i_{k-1}\}} F_j \cap P_n \right).$$

C'est franchement indigeste, et ça conduira au même raisonnement : chacun des événements dans l'union est de probabilité $p^k q^{n-k}$, et il faudra quand même dénombrer le nombre d'événements dans l'union.

Bref, on n'y gagne rien... si ce n'est que c'est un peu plus rigoureux !

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.11

Choisir la position des boules dans les urnes, c'est choisir une fonction de $\llbracket 1, n \rrbracket$ dans $\llbracket 1, n \rrbracket$: à chaque boule on associe une urne.

Tous les placements étant équiprobables, nous voici donc ramenés à un problème de dénombrement.

Il y a n^n applications de $\llbracket 1, n \rrbracket$ dans lui-même, et on cherche donc combien de ces applications ont une image de cardinal égal à $n - 1$ (puisque $n - 1$ urnes doivent contenir au moins une boule, et la dernière doit rester vide).

Pour choisir une telle application, il faut commencer par choisir son image, et il y a

$$\binom{n}{n-1} = n \text{ parties de } \llbracket 1, n \rrbracket \text{ de cardinal } n - 1.$$

Puis une fois l'image A choisie, on choisit quel élément x de A aura deux antécédents (il y a $n - 1$ choix possibles), puis on choisit les deux antécédents a et b de x (et il y a

$$\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2} \text{ choix possibles), et reste alors à choisir une bijection de } \llbracket 1, n \rrbracket \setminus \{a, b\} \text{ sur}$$

$A \setminus \{x\}$ (et il y a $(n - 2)!$ choix).

Donc au final, la probabilité cherchée est

$$p_n = \frac{n^2(n-1)^2(n-2)!}{2n^n} = \frac{(n-1)}{2} \frac{n!}{n^{n-1}}.$$

Pour en donner un équivalent, utilisons la formule de Stirling : $n! \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^n e^{-n} \sqrt{2\pi n}$.

On a donc

$$p_n \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} n^n e^{-n} \sqrt{2\pi n} \frac{n}{2n^{n-1}} \underset{n \rightarrow +\infty}{\sim} e^{-n} n^{5/2} \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.12

- 1.a. En écrivant

$$\mathbf{P}(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) = \sum_{\tau \in A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}} \mathbf{P}(\{\tau\})$$

la somme ne contiendra un terme $\mathbf{P}(\{\omega\})$ que si ω est dans tous les A_{i_j} .

Donc dans la somme du membre de droite de (\star) , à k fixé, il y aura autant de $\mathbf{P}(\{\omega\})$ que de parties à k éléments de l'ensemble des indices⁸ i tels que $\omega \in A_i$.

Il y a $\binom{p}{k}$ telles parties, et donc le coefficient devant $\mathbf{P}(\{\omega\})$ est $\sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \binom{p}{k} = \sum_{k=1}^p (-1)^{k+1} \binom{p}{k}$.

- 1.b. Ce coefficient vaut donc $-\sum_{k=1}^p (-1)^k \binom{p}{k} = -((1-1)^p - 1) = 1$ si $p \geq 1$, et 0 sinon.

Donc le membre de droite de (\star) est la somme de $\mathbf{P}(\{\omega\})$ pour ω apparaissant dans l'un au

Détails

La raison pour laquelle il suffit de multiplier par $\binom{n-1}{k-1}$ est que les événements que l'on compte sont 2 à 2 disjoints.

⁸ Que l'on a supposé de cardinal exactement p .

moins des A_i .

Autrement dit, c'est
$$\sum_{\omega \in A_1 \cup \dots \cup A_n} \mathbf{P}(\{\omega\}) = \mathbf{P}\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right).$$

2. Notons A_i l'événement «la $i^{\text{ème}}$ personne a récupéré son chapeau».

Alors nous cherchons la probabilité de $B = \bigcap_{i=1}^n \overline{A_i} = \overline{\bigcup_{i=1}^n A_i}$.

Par la formule précédente, on a

$$\mathbf{P}\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{k=1}^n \left((-1)^{k+1} \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n} \mathbf{P}(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) \right).$$

Pour k fixé, et $1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n$ fixés, on a $\mathbf{P}(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) = \frac{(n-k)!}{n!}$.

En effet, il s'agit de choisir, parmi les $n!$ permutations possibles des n chapeaux, une permutation des chapeaux autres que ceux de i_1, \dots, i_k .

Donc

$$\mathbf{P}\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \sum_{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n} \frac{(n-k)!}{n!}.$$

Mais, toujours à k fixé, il y a $\binom{n}{k}$ façons de choisir une partie à k éléments $\{i_1, \dots, i_k\}$ de $\llbracket 1, n \rrbracket$.

Donc la somme intérieure comporte $\binom{n}{k}$ termes, et donc

$$\mathbf{P}\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \binom{n}{k} \frac{(n-k)!}{n!} = \sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} \frac{1}{k!}.$$

Et donc enfin, $\mathbf{P}(B) = 1 - \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k+1}}{k!} = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k}{k!} = e^{-1}$.

Remarques : ► la formule de Taylor-Lagrange⁹ permet de prouver que cette probabilité tend vers e^{-1} .

► Notons au passage que nous avons (quasiment) déterminé le nombre de dérangements (= de permutations sans point fixe) de $\llbracket 1, n \rrbracket$.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.13

Il s'agit bien évidemment d'un exercice dur, puisqu'oral de l'X. Entendons-nous bien : en 20/30 minutes l'examinateur ne va pas nécessairement attendre que vous ayez la bonne idée qui va plier l'exercice. Au contraire, on va vouloir évaluer votre capacité à explorer des pistes, et plus encore, votre capacité à réagir à des indications partielles.

D'ailleurs, le problème posé a mis une dizaine d'années avant d'avoir une solution, et c'est Joseph Bertrand, probabiliste célèbre (et accessoirement major de l'X) qui le premier en a apporté une réponse, qui n'est pas celle que nous présentons ici.

Commençons par noter qu'un dépouillement est entièrement, et uniquement caractérisé par les positions des bulletins A .

Il y a donc $\binom{a+b}{a}$ dépouillements possibles.

Notons D l'ensemble de ces dépouillements, D_f l'ensemble des dépouillements favorables, c'est-à-dire pour lesquels A est toujours strictement en tête, et D_d l'ensemble des dépouillements défavorables.

Notons également D_+ l'ensemble des dépouillements (favorables ou non) qui commencent par un bulletin A , et D_- ceux qui commencent par un B (tous défavorables), de sorte que $D_+ \cup D_- = D$, l'union étant disjointe.

On peut se représenter graphiquement la situation par des chemins à coordonnées entières, qui commencent à $(0, 0)$ et terminent à $(a+b, a-b)$, par exemple :

Remarque

Une fois la partie choisie, il n'y a qu'une seule manière de l'ordonner.

⁹ Ou le fait de reconnaître les sommes partielles d'une série exponentielle.

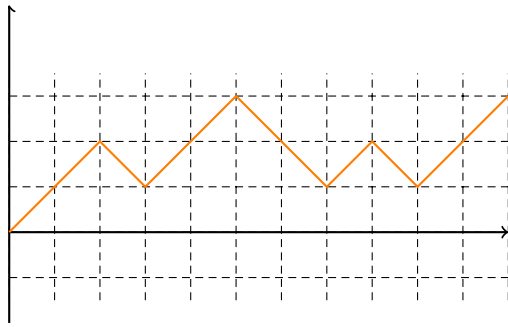


FIGURE 28.1 – Un dépouillement favorable : le chemin reste au dessus de l'axe des abscisses sans jamais le toucher, donc A est toujours strictement en tête.

Si vous souhaitez formaliser davantage, c'est possible, mais ça ne me semble pas nécessaire...

On peut identifier un chemin à un élément de $\left\{ (v_1, \dots, v_{a+b}) \in \{-1, 1\}^{a+b} \mid \sum_{i=1}^{a+b} v_i = a - b \right\}$.

Un chemin¹⁰ favorable est un (v_1, \dots, v_{a+b}) tel que pour tout $k \in \llbracket 1, a+b \rrbracket$, $\sum_{i=1}^k v_i > 0$.

¹⁰ Ou dépouillement.

Alors il y a autant de dépouillements favorables commençant par un bulletin A que de dépouillements (tous défavorables) commençant par un B.

En effet, si un dépouillement défavorable commence par un bulletin A (c'est-à-dire est un élément de $D_d \cap D_+$), alors nécessairement il existe un moment où les deux candidats sont à égalité. Autrement dit, le chemin associé coupe l'axe des abscisses¹¹.

En effectuant une réflexion par rapport à l'axe des abscisses de la partie du chemin d'abscisses comprises entre 0 et le premier point d'intersection avec l'axe des abscisses, on obtient un élément¹² de D_- .

¹¹ Sans nécessairement le traverser.

¹² Ou plutôt un chemin correspondant à un élément de D_- .

On vérifie aisément qu'on définit ainsi une bijection (et même une involution) de $D_+ \cap D_d$ sur D_- . Par conséquent, ces deux ensembles ont même cardinal.

Ce raisonnement est souvent appelé *principe de réflexion*.

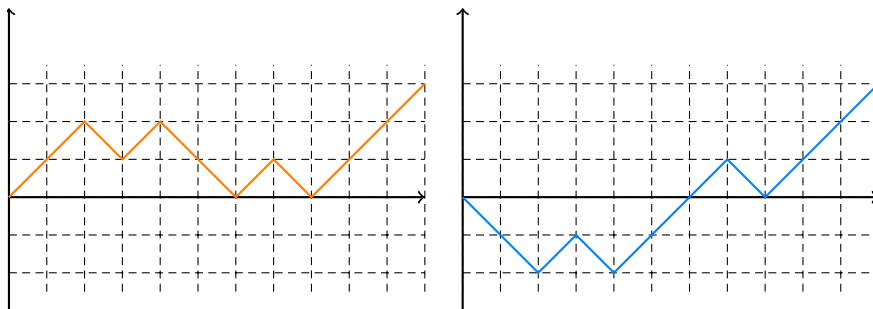


FIGURE 28.2 – Un élément de $D_d \cap D_+$ et l'élément de D_- obtenu par réflexion.

Or les éléments de D_- sont faciles à dénombrer : ils commencent tous par un bulletin B, donc il reste à choisir la position des a bulletins A parmi les $a+b-1$ places restantes. Donc

$$\text{Card}(D_-) = \binom{a+b-1}{a}.$$

On a donc $D = D_f \cup (D_d \cap D_+) \cup D_-$, et cette union est disjointe, de sorte que

$$\text{Card}(D) = \text{Card}(D_f) + \text{Card}(D_d \cap D_+) + \text{Card}(D_-) = \text{Card}(D_f) + 2\text{Card}(D_-).$$

$$\text{Et donc } \text{Card}(D_f) = \text{Card}(D) - 2\text{Card}(D_-) = \binom{a+b}{a} - 2\binom{a+b-1}{a}.$$

Et donc pour finir, par équiprobabilité des dépouillements, la probabilité cherchée est

$$\frac{\text{Card}(D_f)}{\text{Card}(D)} = 1 - 2 \frac{\binom{a+b-1}{a}}{\binom{a+b}{a}} = 1 - 2 \frac{b}{a+b} = \frac{a-b}{a+b}.$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.14

Pour $k = 1$, c'est assez évident, à l'issue du premier tirage, il y a une chance sur deux pour qu'il y ait une seule boule blanche, et une chance sur deux qu'il y en ait deux.

Supposons donc que pour $k \in \mathbf{N}^*$, alors $\forall i \in \llbracket 1, k+1 \rrbracket$, $\mathbf{P}(B_k^i) = \frac{1}{k+1}$.

Notons alors A_{k+1} l'événement «le $(k+1)$ ème tirage a donné une boule blanche».

On a alors, par la formule des probabilités totales appliquée au système complet d'événements $\{A_{k+1}, \overline{A_{k+1}}\}$, pour tout $i \in \llbracket 1, k+2 \rrbracket$,

$$\mathbf{P}(B_{k+1}^i) = \mathbf{P}(A_{k+1} \cap B_{k+1}^i) + \mathbf{P}(\overline{A_{k+1}} \cap B_{k+1}^i).$$

Or, $A_{k+1} \cap B_{k+1}^i = A_{k+1} \cap B_k^{i-1}$ et de même $\overline{A_{k+1}} \cap B_{k+1}^i = \overline{A_{k+1}} \cap B_k^i$.

On a alors

$$\mathbf{P}(A_{k+1} \cap B_{k+1}^i) = \mathbf{P}(A_{k+1} \cap B_k^{i-1}) = \mathbf{P}(B_k^{i-1})\mathbf{P}_{B_k^{i-1}}(A_{k+1}) = \frac{1}{k+1} \frac{i-1}{k+2}$$

Et de même,

$$\mathbf{P}(\overline{A_{k+1}} \cap B_{k+1}^i) = \mathbf{P}(\overline{A_{k+1}} \cap B_k^i) = \mathbf{P}(B_k^i)\mathbf{P}_{B_k^i}(\overline{A_{k+1}}) = \frac{1}{k+1} \frac{k+2-i}{k+2}.$$

Et donc il vient bien $\mathbf{P}(B_{k+1}^i) = \frac{1}{k+2}$.

On conclut alors par le principe de récurrence.

Alternative : voici une autre solution, avec un autre système complet d'événements. Ni moins bonne, ni meilleure, elle vise surtout à vous montrer qu'il peut y avoir plusieurs systèmes complets d'événements intéressants.

On sait que $\{B_k^j, 1 \leq j \leq k+1\}$ est un système complet d'événements.

Donc par la formule des probabilités totales,

$$\mathbf{P}(B_{k+1}^i) = \sum_{j=1}^{k+1} \mathbf{P}(B_{k+1}^i \cap B_k^j).$$

Mais puisqu'au tirage numéro $k+1$ on a soit ajouté une boule blanche, soit aucune, on a donc $B_{k+1}^i \cap B_k^j = \emptyset$ si $j \notin \{i, i-1\}$.

Et donc $\mathbf{P}(B_{k+1}^i) = \mathbf{P}(B_{k+1}^i \cap B_k^{i-1}) + \mathbf{P}(B_{k+1}^i \cap B_k^i)$.

Mais $B_{k+1}^i \cap B_k^{i-1}$ signifie qu'on avait $i-1$ boules blanches après le k ème tirage et qu'on a eu une blanche au $(k+1)$ ème. Et donc $B_{k+1}^i \cap B_k^{i-1} = B_k^{i-1} \cap A_{k+1}$.

De même, $B_{k+1}^i \cap B_k^i = B_k^i \cap \overline{A_{k+1}}$.

Et donc on retrouve bien

$$\mathbf{P}(B_{k+1}^i) = \mathbf{P}(B_k^{i-1} \cap A_{k+1}) + \mathbf{P}(B_k^i \cap \overline{A_{k+1}}).$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.15

Notons A_i l'événement «le i ème tirage donne deux boules de couleurs différentes».

Alors l'événement dont l'énoncé demande la probabilité est $A = \bigcap_{i=1}^n A_i$.

Lors du premier tirage, il y a $\binom{2n}{2}$ tirages possibles. Parmi ceux-ci, $\binom{n}{2}$ sont formés de deux boules blanches et $\binom{n}{2}$ de boules noires.

Donc $\mathbf{P}(A_1) = 1 - \frac{2\binom{n}{2}}{\binom{2n}{2}} = \frac{n}{2n-1}$.

On a alors, par la formule des probabilités composées,

$$\mathbf{P}(A) = \mathbf{P}(A_1)\mathbf{P}_{A_1}(A_2) \cdots \mathbf{P}_{A_1 \cap \cdots \cap A_{n-1}}(A_n).$$

Mais si A_1 est réalisé, l'urne contient $n-1$ boules blanches et $n-1$ boules noires, donc un raisonnement analogue à celui que nous venons de tenir pour n boules prouve que

Remarque

Cette formule reste valable pour $i = 1$, même si alors la signification de B_k^{i-1} est douteuse.

$$\mathbf{P}_{A_1}(A_2) = \frac{n-1}{2n-3}.$$

Et plus généralement, pour $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$, si A_1, A_2, \dots, A_{k-1} sont réalisés, alors lors du $k^{\text{ème}}$ tirage, l'urne contient $n-k$ boules de chaque couleur.

$$\text{Et donc pour } k \leq n, \mathbf{P}_{A_1 \cap \dots \cap A_{k-1}}(A_k) = \frac{n-k+1}{2n-2k+1}.$$

Donc au final,

$$\mathbf{P}(A) = \frac{n}{2n-1} \frac{n-1}{2n-3} \cdots \frac{2}{3} \frac{1}{1} = \frac{n!}{1 \times 3 \times 5 \times \cdots \times (2n-1)}.$$

Et alors en procédant aux simplifications usuelles,

$$1 \times 3 \times \cdots \times (2n-1) = \frac{(2n)!}{2 \times 4 \times \cdots \times 2n} = \frac{(2n)!}{2^n n!}$$

$$\text{de sorte que } \mathbf{P}(A) = \frac{2^n (n!)^2}{(2n)!}.$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.16

Il s'agit donc de majorer $\mathbf{P}(\overline{A_1} \cap \cdots \cap \overline{A_n})$.

Puisque les A_i sont indépendants, les $\overline{A_i}$ le sont aussi.

$$\text{On a donc } \mathbf{P}(\overline{A_1} \cap \dots \cap \overline{A_n}) = \prod_{i=1}^n \mathbf{P}(\overline{A_i}) = \prod_{i=1}^n (1 - \mathbf{P}(A_i)).$$

Mais une inégalité de convexité classique nous informe que pour tout $x \in \mathbf{R}$, $1+x \leq e^x$, et donc en appliquant cette inégalité à $-\mathbf{P}(A_i)$, il vient

$$\mathbf{P}(\overline{A_1} \cap \dots \cap \overline{A_n}) \leq \prod_{i=1}^n e^{-\mathbf{P}(A_i)} = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \mathbf{P}(A_i)\right).$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.17

Pour $k \in \mathbf{N}$, notons B_k l'événement «la $k^{\text{ème}}$ clé n'ouvre pas la porte».

$$1. \text{ On a } A_k = \bigcap_{i=1}^{k-1} B_i \cap \overline{B_k}.$$

Et donc par la formule des probabilités composées,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(A_k) &= \mathbf{P}(B_1) \mathbf{P}_{B_1}(B_2) \cdots \mathbf{P}_{B_1 \cap \dots \cap B_{k-2}}(B_{k-1}) \mathbf{P}_{B_1 \cap \dots \cap B_{k-1}}(\overline{B_k}) = \frac{9}{10} \frac{8}{9} \cdots \frac{9-(k-2)}{10-(k-2)} \frac{1}{10-(k-1)} \\ &= \frac{1}{10}. \end{aligned}$$

Le résultat, éventuellement¹³ surprenant au premier abord se comprend finalement assez bien en termes de dénombrement.

On peut imaginer que notre concierge décide dès le début dans quel ordre il va essayer les 10 clés.

Et alors la bonne a autant de chances d'être en première position, en seconde, ..., en dernière.

2. L'énoncé est un peu vague ici, et surtout, nous risquons de sortir du cadre autorisé d'un univers fini, puisque le nombre d'essais nécessaires n'est pas borné...

Fermons les yeux, même si un moyen de remédier à ce problème serait par exemple de décréter arbitrairement que si au bout de 100 essais il n'a toujours pas trouvé la clé, le concierge rebrousse chemin.

Peu importe, le but ici est de faire des calculs...

On a toujours $A_k = \left(\bigcap_{i=1}^{k-1} B_i\right) \cap \overline{B_k}$, mais cette fois, par indépendance des différents essais

$$\mathbf{P}(A_k) = \prod_{i=1}^{k-1} \mathbf{P}(B_i) \times \mathbf{P}(\overline{B_k}) = \left(\frac{9}{10}\right)^{k-1} \frac{1}{10} = \frac{9^{k-1}}{10^k}.$$

3. Notons I l'événement «le concierge est ivre», de sorte que $\mathbf{P}(I) = \frac{1}{3}$.

Alors $\{I, \bar{I}\}$ est un système complet d'événements, donc par la formule des probabilités totales,

$$\mathbf{P}(A_k) = \mathbf{P}(I) \mathbf{P}_I(A_k) + \mathbf{P}(\bar{I}) \mathbf{P}_{\bar{I}}(A_k).$$

¹³ À vous de voir...

Méthode

L'indépendance est ici garantie par les remises. Il n'y a pas moyen de la prouver mathématiquement, elle se comprend de la situation décrite.

Mais ces probabilités conditionnelles ont en fait été calculées aux questions précédentes : sachant qu'il y a/ou qu'il n'y a pas remis, on connaît la probabilité d'avoir besoin de k essais.

$$\text{On a } \mathbf{P}_I(A_k) = \frac{9^{k-1}}{10^k} \text{ et } \mathbf{P}_{\bar{I}}(A_k) = \begin{cases} \frac{1}{10} & \text{si } 1 \leq k \leq 10 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

Et donc

$$\mathbf{P}(A_k) = \begin{cases} \frac{2}{3} \frac{1}{10} + \frac{1}{3} \frac{9^{k-1}}{10^k} & \text{si } 1 \leq k \leq 10 \\ \frac{1}{3} \frac{9^{k-1}}{10^k} & \text{si } k \geq 11 \end{cases}$$

4. C'est le cas typique de la formule de Bayes, on veut connaître «les probas des causes en connaissant celles des conséquences».

Il vient donc

$$P_{A_6}(I) = \frac{\mathbf{P}_I(A_6)\mathbf{P}(I)}{\mathbf{P}(A_6)} = \frac{\frac{1}{3} \frac{9^5}{10^6}}{\frac{2}{30} + \frac{9^5}{3 \cdot 10^6}} \frac{9^5}{9^5 + 2 \cdot 10^5} \approx 0.227.$$

Pour la seconde partie de la question, on peut faire un calcul¹⁴, ou se dire que c'est du bon sens : s'il a eu besoin de strictement plus de 10 essais, le concierge est ivre.

Et donc $P_{A_{11}}(I) = 1$.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.18

1. Notons A l'événement «le dé est pipé» et B l'événement «on obtient un 6».

On cherche alors $\mathbf{P}_B(A)$. Mais par la formule de Bayes, on a $\mathbf{P}_B(A) = \frac{\mathbf{P}_A(B)\mathbf{P}(A)}{\mathbf{P}(B)}$.

Pour obtenir $\mathbf{P}(B)$, il suffit d'appliquer la formule des probabilités totales avec le système complet d'événements $\{A, \bar{A}\}$:

$$\mathbf{P}(B) = \mathbf{P}(A)\mathbf{P}_A(B) + \mathbf{P}(\bar{A})\mathbf{P}_{\bar{A}}(B) = \frac{1}{4} \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \frac{1}{6} = \frac{1}{4}.$$

Et puisque $\mathbf{P}_A(B) = \frac{1}{2}$, il vient $\mathbf{P}_B(A) = \frac{\frac{1}{4} \frac{1}{2}}{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$.

2. Il n'y a pas de grande difficulté ici : une fois le dé choisi, les différents tirages sont indépendants.

Donc pour un dé non pipé, la probabilité d'obtenir n fois le nombre 6 est $\frac{1}{6^n}$, alors que pour un dé pipé, elle est de $\frac{1}{2^n}$.

Autrement dit, en notant cette fois B_n l'événement «obtenir n fois la face 6 en n lancers», alors

$$\mathbf{P}_A(B_n) = \frac{1}{2^n} \text{ et } \mathbf{P}_{\bar{A}}(B_n) = \frac{1}{6^n}.$$

Et donc on a¹⁵

$$\mathbf{P}_{B_n}(A) = \frac{\mathbf{P}_A(B_n)\mathbf{P}(A)}{\mathbf{P}(A)\mathbf{P}_A(B_n) + \mathbf{P}(\bar{A})\mathbf{P}_{\bar{A}}(B_n)} = \frac{\frac{1}{2^{n+2}}}{\frac{1}{2^{n+2}} + \frac{3}{4} \frac{1}{6^n}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{3^{n-1}}}.$$

3. On a $\lim_{n \rightarrow +\infty} p_n = 1$. L'idée étant qu'un dé qui ne fait que des 6 (ou plutôt qui les enchaîne) a de plus en plus de chances d'être pipé au fur et à mesure qu'on le lance et qu'on observe davantage de 6.

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.19

Notons A l'événement : «on joue avec le dé A » et B l'événement «on joue avec le dé B ».

On a donc $\mathbf{P}(A) = \frac{1}{3}$ et $\mathbf{P}(B) = \frac{2}{3}$.

1. Par la formule des probabilités totales appliquée avec le système complet d'événements $\{A, B\}$, on a

$$\mathbf{P}(R_1) = \mathbf{P}_A(R_1)\mathbf{P}(A) + \mathbf{P}_B(R_1)\mathbf{P}(B) = \frac{2}{3} \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \frac{1}{3} = \frac{4}{9}.$$

Danger !

Les notations sont complètement trompeuses : chaque fois qu'on a changé d'expérience : avec remise/sans remise/avec apéro, on a changé l'univers et donc par conséquent A_k , mais aussi la probabilité \mathbf{P} . Pourtant, nous continuons de noter $\mathbf{P}(A_k)$ pour des situations différentes...

¹⁴ Qui mènera évidemment au même résultat.

¹⁵ Toujours par Bayes.

Le même calcul nous donne également $\mathbf{P}(R_2) = \frac{4}{9}$.

Enfin, toujours par la formule des probabilités totales,

$$\begin{aligned}\mathbf{P}(R_1 \cap R_2) &= \mathbf{P}_A(R_1 \cap R_2)\mathbf{P}(A) + \mathbf{P}_B(R_1 \cap R_2)\mathbf{P}(B) = \mathbf{P}(A)\mathbf{P}_A(R_1)\mathbf{P}_A(R_2) + \mathbf{P}(B)\mathbf{P}_B(R_1)\mathbf{P}_B(R_2) \\ &= \frac{1}{3} \frac{2}{3} \frac{2}{3} + \frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{1}{3} = \frac{6}{27}.\end{aligned}$$

On constate que $\mathbf{P}(R_1 \cap R_2) \neq \mathbf{P}(R_1)\mathbf{P}(R_2)$, et donc R_1 et R_2 ne sont pas indépendants.

Bien que ceci soit plutôt surprenant au premier abord, il y a une explication simple : si on obtient une face rouge lors du premier lancer, il est plus probable que nous soyons en train de jouer avec le dé A .

Et donc il est plus probable d'obtenir encore une face rouge au second lancer.

Alors qu'au contraire, si le premier lancer a donné une face noire, il est plus probable qu'on joue avec B , et donc qu'on obtienne encore une face noire au second lancer.

Il en serait autrement si on choisissait (toujours au hasard) un nouveau dé à chaque lancer.

2. Nous cherchons $\mathbf{P}_{R_1 \cap R_2}(R_3)$. Par définition, on a

$$\mathbf{P}_{R_1 \cap R_2}(R_3) = \frac{\mathbf{P}(R_1 \cap R_2 \cap R_3)}{\mathbf{P}(R_1 \cap R_2)}$$

Or, nous savons déjà que $\mathbf{P}(R_1 \cap R_2) = \frac{6}{27}$.

Comme à la question précédente, on prouve¹⁶ que $\mathbf{P}(R_1 \cap R_2 \cap R_3) = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{3}\right)^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{3}\right)^3 = \frac{10}{81}$.

On en déduit que $\mathbf{P}_{R_1 \cap R_2}(R_3) = \frac{5}{9}$.

3. Par la formule de Bayes, on a

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n}(A) &= \frac{\mathbf{P}_A(R_1 \cap \dots \cap R_n)\mathbf{P}(A)}{\mathbf{P}(R_1 \cap \dots \cap R_n)} = \frac{\mathbf{P}_A(R_1 \cap \dots \cap R_n)\mathbf{P}(A)}{\mathbf{P}(A)\mathbf{P}_A(R_1 \cap \dots \cap R_n) + \mathbf{P}(B)\mathbf{P}_B(R_1 \cap \dots \cap R_n)} \\ &= \frac{\frac{1}{3} \left(\frac{2}{3}\right)^n}{\frac{1}{3} \left(\frac{2}{3}\right)^n + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{3}\right)^n} = \frac{\frac{2^n}{3^{n+1}}}{\frac{2^n+2}{3^{n+1}}} = \frac{2^n}{2^n+2}.\end{aligned}$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.20

Notons B_i l'événement «la boule bleue est dans l'urne U_i .»

Notons R_1 (resp. R_2) l'événement «la première (resp. deuxième) boule tirée dans l'urne U_1 est rouge».

La probabilité demandée est alors $\mathbf{P}_{R_1 \cap R_2}(B_2)$.

Par la formule de Bayes, on a

$$\mathbf{P}_{R_1 \cap R_2}(B_2) = \frac{\mathbf{P}_{B_2}(R_1 \cap R_2)\mathbf{P}(B_2)}{\mathbf{P}(R_1 \cap R_2)}.$$

Mais, sachant que la boule bleue est dans l'urne U_2 , l'urne U_1 ne contient que des boules rouges, et donc $\mathbf{P}_{B_2}(R_1 \cap R_2) = 1$.

D'autre part, on a $\mathbf{P}(B_2) = \frac{1}{n}$, puisque la boule bleue a autant de chances de se trouver dans chaque urne.

Reste donc à calculer $\mathbf{P}(R_1 \cap R_2)$.

Pour cela, appliquons la formule des probabilités totales au système complet d'événements $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$:

$$\mathbf{P}(R_1 \cap R_2) = \sum_{i=1}^n \mathbf{P}(B_i)\mathbf{P}_{B_i}(R_1 \cap R_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_{B_i}(R_1 \cap R_2) = \frac{1}{n} (\mathbf{P}_{B_1}(R_1 \cap R_2) + n - 1).$$

Mais on a alors

$$\mathbf{P}_{B_1}(R_1 \cap R_2) = \frac{\mathbf{P}(B_1 \cap R_1 \cap R_2)}{\mathbf{P}(B_1)} = \frac{\mathbf{P}(B_1)\mathbf{P}_{B_1}(R_1)\mathbf{P}_{B_1 \cap R_1}(R_2)}{\mathbf{P}(B_1)} = \mathbf{P}_{B_1}(R_1)\mathbf{P}_{B_1 \cap R_1}(R_2) = \frac{2}{3} \frac{1}{2} = \frac{1}{3}.$$

Et donc on en déduit que

$$\mathbf{P}(R_1 \cap R_2) = \frac{1}{n} (\mathbf{P}_{B_1}(R_1)\mathbf{P}_{B_1 \cap R_1}(R_2) + n - 1) = \frac{1}{n} \left(\frac{2}{3} \frac{1}{2} + n - 1\right) = 1 - \frac{3n-2}{3n}.$$

Indépendance

Les lancers sont indépendants, une fois le dé choisi. Autrement dit, R_1 et R_2 sont indépendants pour les probabilités \mathbf{P}_A et \mathbf{P}_B . Cela ne signifie pas pour autant qu'ils sont indépendants pour \mathbf{P} , comme nous le verrons ci-dessous.

¹⁶ À l'aide de la formule des probabilités totales.

Remarque

Nous venons de prouver que

$$\mathbf{P}_{B_1}(R_1 \cap R_2) = \mathbf{P}_{B_1}(R_1)\mathbf{P}_{B_1 \cap R_1}(R_2).$$

Il s'agit en fait de la formule des probabilités composées, mais appliquée à la probabilité \mathbf{P}_{B_1} et non à la probabilité \mathbf{P} .

En effet, on a alors

$$(\mathbf{P}_{R_1})_{B_1}(R_2) = \mathbf{P}_{R_1 \cap B_1}(R_2),$$

ce qui est relativement intuitif : la probabilité sachant B_1 , sachant R_1 est la probabilité sachant $R_1 \cap B_1$.

Il vient alors

$$\mathbf{P}_{R_1 \cap R_2}(B_2) = \frac{1}{n} \frac{3n}{3n-2} = \frac{3}{3n-2}.$$

SOLUTION DE L'EXERCICE 28.21

1. Notons B_k , N_k les événements «obtenir une boule blanche (resp. noire) au $k^{\text{ème}}$ tirage».

$$\text{On cherche donc } \mathbf{P}_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n}(B_{n+1}) = \frac{\mathbf{P}(B_1 \cap \dots \cap B_{n+1})}{\mathbf{P}(B_1 \cap \dots \cap B_n)}.$$

Utilisons la formule des probabilités totales avec le système complet d'événements $\{U_1, U_2, \dots, U_N\}$, où U_i est l'événement «les tirages ont lieu dans l'urne numéro i ».

D'une part, on a

$$\mathbf{P}(B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n) = \sum_{i=1}^N \mathbf{P}(U_i) \mathbf{P}_{U_i}(B_1 \cap \dots \cap B_n).$$

Puisqu'une fois le choix de l'urne effectué les tirages ont lieu avec remise, les événements B_1, \dots, B_n sont mutuellement indépendants pour la probabilité \mathbf{P}_{U_i} .

$$\text{Et donc } \mathbf{P}_{U_i}(B_1 \cap \dots \cap B_n) = \left(\frac{i}{N}\right)^n.$$

$$\text{On en déduit que } \mathbf{P}(B_1 \cap \dots \cap B_n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{i}{N}\right)^n.$$

$$\text{Et sur le même principe, } \mathbf{P}(B_1 \cap \dots \cap B_{n+1}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{i}{N}\right)^{n+1}.$$

La probabilité cherchée est donc

$$\mathbf{P}_{B_1 \cap \dots \cap B_n}(B_{n+1}) = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{i}{N}\right)^{n+1}}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{i}{N}\right)^n}.$$

2. Reprenons chacune des probabilités précédentes : $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{i}{N}\right)^n$ est une somme de Riemann

pour la fonction $x \mapsto x^n$.

$$\text{Donc } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{i}{N}\right)^n \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} \int_0^1 t^n dt = \frac{1}{n+1}.$$

$$\text{Et de la même manière, } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{i}{N}\right)^{n+1} \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} \frac{1}{n+2}.$$

$$\text{Et donc } \lim_{N \rightarrow +\infty} \mathbf{P}_{B_1 \cap \dots \cap B_n}(B_{n+1}) = \frac{n+1}{n+2}.$$

Ce type de calcul a été abordé par Pierre-Simon de LAPLACE en essayant de répondre à la question «quelle est la probabilité que le soleil se lève demain ?».

Ou plutôt «sachant que le soleil s'est levé tous les jours les 10/100/10 000 derniers jours, quelle est la probabilité qu'il se lève demain ?».

 **Danger !**

Qui dit proba conditionnelle ne dit pas forcément Bayes !
 Cette formule n'a d'intérêt que si vous savez calculer la probabilité conditionnelle «dans l'autre sens».