

# Chapitre XII :

## Chapitre XII Somme de variables aléatoires et loi des grands nombres

### I-Rappels

#### Variable aléatoire discrète

Définir une variable aléatoire discrète  $X$  pour une expérience aléatoire d'univers  $\Omega$ . c'est associé à chaque issue de  $\Omega$  un nombre réel.

La loi de probabilité de  $X$  associée à chaque valeur prise par  $X$  une probabilité :

Valeur prise $x_i$	$x_1$	...	$x_n$
Probabilité $P(X = x_i)$	$p_1$	...	$p_n$

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$$

L'espérance mathématique (on dit simplement espérance) d'une variable aléatoire  $X$  correspond à la valeur moyenne prise par  $X$  si on répète l'expérience aléatoire associée à  $X$  un grand nombre de fois. On note  $E(X)$  l'espérance de  $X$ .

Avec la loi de probabilité donnée par le tableau précédent, on a :

$$\heartsuit \heartsuit \heartsuit E(X) = p_1 x_1 + \dots + p_n x_n = \sum_{i=1}^n p_i x_i \heartsuit \heartsuit \heartsuit$$

Dans le cas d'un jeu d'argent, l'espérance correspond au gain moyen espéré par partie... effectuée.....

Un jeu est qualifié d'équitable si l'espérance de la variable aléatoire égale au gain du joueur est nulle.

#### Définition

La variance de la variable aléatoire  $X$ , dont est donnée précédemment la loi de probabilité, est notée  $V(X)$ , elle est définie par :

$$\heartsuit \heartsuit \heartsuit V(X) = p_1 (x_1 - E(X))^2 + \dots + p_n (x_n - E(X))^2 = \sum_{i=1}^n p_i (x_i - E(X))^2. \heartsuit \heartsuit \heartsuit$$

En général, on calcule la variance puis l'écart-type noté  $\sigma(X)$ , où  $\sigma(X) = \sqrt{V(X)}$ .

L'écart type est un indicateur de la dispersion des valeurs prises par la variable aléatoire  $X$  autour de son espérance. En particulier, au plus l'écart-type est élevé, au plus les valeurs prises par  $X$  sont dispersées autour de  $E(X)$ .

Si une variable aléatoire  $X$  est constante, combien vaut sa variance et son écart-type ? → nulle → nul

Remarque : Le théorème de Koëning-Huygens (admis), montre que :  $V(X) = E(X^2) - (E(X))^2$ , où  $X^2$  est la variable aléatoire des carrés des valeurs prises par  $X$  (avec les mêmes probabilités).

#### Exemple

Calculer l'espérance, la variance et l'écart type de la variable aléatoire  $X$  dont la loi de probabilité est donnée ci-dessous :

$x_i$	-2	0	3	4
$p(X = x_i)$	0,2	0,4	0,3	0,1

$$\bullet E(x) = -2 \times 0,2 + 0 \times 0,4 + 3 \times 0,3 + 4 \times 0,1$$

$$E(x) = -0,4 + 0,9 + 0,14 = 0,9$$

$$\bullet \text{Donc } \sigma(X) = \sqrt{V(x)}$$

$$\sigma(X) = \sqrt{4,29} \approx 2,07$$

$$\bullet V(x) = 0,2 \times (-2 - 0,9)^2 + 0,4 \times (0 - 0,9)^2 + 0,3 \times (3 - 0,9)^2 + 0,1 \times (4 - 0,9)^2$$

$$V(x) = 4,29$$

## Exemple d'introduction :

### Jeux de cartes en double

Un joueur tire au hasard une carte dans un jeu de 32 cartes, puis tire une seconde carte dans un autre jeu de 32 cartes.

On note  $X$  la variable aléatoire qui, au premier tirage, associe un gain de 2 € si la carte tirée est un as, un gain de 1 € si la carte tirée est une carte « habillée » (roi, dame, valet), et rien du tout dans les autres cas.

On note  $Y$  la variable aléatoire qui, au second tirage, associe un gain de 1 € si la carte tirée est un pique, et rien du tout dans les autres cas.

On appelle  $Z$  la variable aléatoire qui, à chaque double tirage, associe le gain total du joueur.

On peut noter cette variable :  $Z = X + Y$ .

- 1 Déterminer les valeurs prises par  $X$ , par  $Y$  et par  $Z$ .
- 2 Donner la loi de  $X$  et la loi de  $Y$ .
  - a. Exprimer l'événement  $\{Z=0\}$  en fonction des événements  $\{X=0\}$  et  $\{Y=0\}$ .
  - b. En utilisant l'indépendance des deux épreuves, déterminer  $P\{Z=0\}$ .
  - c. Calculer de la même façon  $P\{Z=3\}$ .
- 3 a. Déterminer  $P\{Z=1\}$  en exprimant l'événement  $\{Z=1\}$  comme réunion de deux événements incompatibles.
  - b. En déduire  $P\{Z=3\}$ , puis la loi de  $Z$ .
- 5 Calculer l'espérance et la variance des variables  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . Que constate-t-on ?



$$X = \begin{cases} +2€ & \text{si as obtenu au 1er tirage} \\ +1€ & \text{si carte habillée (D;R;V)} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Y = \begin{cases} 1€ & \text{si pique obtenu} \\ 0€ & \text{sinon} \end{cases}$$

⇒  $Z = X + Y$  : gain total du joueur à l'issue du double tirage

1) Les valeurs prises par  $X$  sont : 0, 1, 2

on note :  $X(\Omega) = \{0; 1; 2\}$

Les valeurs prises par  $Y$  sont : 0 et 1

on note :  $Y(\Omega) = \{0; 1\}$

$Z$  :

$(X=)$		0	1	2
$(Y=)$	0	0	1	2
	1	1	2	3

Donc les valeurs prises par  $Z$  sont : 0, 1, 2, 3

$$Z(\Omega) = \{0; 1; 2; 3\}$$

2)

$(X=x_i)$	0	1	2
$P(X=x_i)$	$\frac{16}{32}$	$\frac{12}{32}$	$\frac{4}{32}$

4 as

32 cartes

↳ 12 cartes habillées : 4V; 4D; 4R

$$\rightarrow P(X=0) = 1 - \left( \frac{12}{32} + \frac{4}{32} \right) = \frac{16}{32}$$

$(Y=y_i)$	0	1
$P(Y=y_i)$	$\frac{3}{4}$	$\frac{8}{32} = \frac{1}{4}$

$$3) a) \{Z=0\} = \{X=0\} \cap \{Y=0\}$$

$$3) b) P(Z=0) = P(\{X=0\} \cap \{Y=0\})$$

$$P(Z=0) = P(X=0) \times P(Y=0)$$

↑  
indépendance

$$P(Z=0) = \frac{16}{32} \times \frac{3}{4} = \frac{1}{2} \times \frac{3}{4} = \frac{3}{8}$$

$$3) c) \{Z=3\} = \{X=2\} \cap \{Y=1\}$$

$$P(Z=3) = P(\{X=2\} \cap \{Y=1\})$$

$$P(Z=3) = P(X=2) \times P(Y=1) = \frac{1}{8} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{32}$$

↑  
indépendance

$$4) a) \{Z=1\} = (\{X=0\} \cap \{Y=1\}) \cup (\{X=1\} \cap \{Y=0\})$$

Donc :

$$P(Z=1) = P(\{X=0\} \cap \{Y=1\}) + P(\{X=1\} \cap \{Y=0\})$$

$$P(Z=1) = P(X=0) \times P(Y=1) + P(X=1) \times P(Y=0)$$

$$P(Z=1) = \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} + \frac{12}{32} + \frac{3}{4}$$

$$P(Z=1) = \frac{1}{8} + \frac{36}{128} = \frac{1}{8} + \frac{9}{32} = \frac{4}{32} + \frac{9}{32} = \frac{13}{32}$$

$$P(Z=2) = 1 - (P(Z=0) + P(Z=1) + P(Z=3))$$

$$P(Z=2) = 1 - \left( \frac{3}{8} + \frac{13}{32} + \frac{1}{32} \right)$$

$$P(Z=2) = \frac{32}{32} - \frac{12}{32} - \frac{13}{32} - \frac{1}{32}$$

$$P(Z=2) = \frac{6}{32}$$

Donc la loi de proba de Z :

$(Z=j)$	0	1	2	3
$P(Z=j)$	$\frac{3}{8}$	$\frac{13}{32}$	$\frac{6}{32}$	$\frac{1}{32}$

$$5) E(Z) = 0 \times \frac{3}{8} + 1 \times \frac{13}{32} + 2 \times \frac{6}{32} + 3 \times \frac{1}{32} = \frac{28}{32}$$

Donc  $E(Z) = E(X) + E(Y)$  car  $\frac{28}{32} = \frac{20}{32} + \frac{8}{32}$

### Definition

Soit  $X$  une variable aléatoire définie sur l'univers d'une expérience aléatoire donnée.

On suppose que  $X$  a pour loi de probabilité :

$(X=x_i)$	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_m$
$P(X=x_i)$	$P_1$	$P_2$	$\dots$	$P_m$

Pour tout réel  $a$  non nul, on définit la variable aléatoire  $aX$  par :

$aX$  prend pour valeurs :  $\{ax_1, ax_2, \dots, ax_m\}$

La loi de probabilité de la variable aléatoire  $aX$  est :

$(aX=wi)$	$ax_1$	$ax_2$	$\dots$	$ax_m$
$P(aX=wi)$	$P_1$	$P_2$	$\dots$	$P_m$

### Exemple

Une entreprise fabrique des machines.  $X$  est la variable aléatoire, qui pour un mois donné, est égale au nombre de machines vendues au cours de ce mois. Voici la loi de probabilité de  $X$  :

$X=x_i$	0	1	2	3	4	5	6
$P(X=x_i)$	0.04	0.08	0.12	0.28	0.25	0.17	0.06

La vente de chaque machine rapporte 5000€. Soit  $Y$  la variable aléatoire égale à la somme rapportée par la vente des machines au cours de ce mois. Donner la loi de  $Y$ .

$Y =$  somme d'argent rapportée par la vente des machines

On a :  $Y = 5000 X$

Loi de  $Y$  :

$(Y=y_i)$	0	5000	10000	15000	20000	25000	30000
$P(Y=y_i)$	0,04	0,08	0,12	0,28	0,25	0,17	0,06

Rq :  $E(X) = 1 \times 0,08 + 2 \times 0,12 + 3 \times 0,28 + 4 \times 0,25 + 5 \times 0,17 + 6 \times 0,06$

$E(X) = 3,37$

$\Rightarrow E(Y) = 5000 \times 0,08 + 10000 \times 0,12 + 15000 \times 0,28 + 20000 \times 0,25 + 25000 \times 0,17 + 30000 \times 0,06$

$E(Y) = 5000(0,08 + 2 \times 0,12 + 3 \times 0,28 + 4 \times 0,25 + 5 \times 0,17 + 6 \times 0,06)$

$E(Y) = 5000 \times E(X) = 5000 \times 3,37 = 16\ 850 \text{ €}$

### Propriété de linéarité de l'espérance (admise)

Dans le cadre des définitions précédentes, pour toutes variables aléatoires  $X$  et  $Y$  et tous réels  $a$  et  $b$  :

$-E(X+Y) = E(X) + E(Y)$

$-E(aX) = a E(X)$

$-E(aX+bY) = aE(X) + bE(Y)$

Exemple : Dans l'exemple précédent, calculer  $E(Y)$ . (↑)

Remarques : les formules de linéarité de l'espérance vues précédemment s'étendent à un nombre quelconque de variables aléatoires.

En particulier, si  $(X_i)_{1 \leq i \leq n}$  est une famille de  $n$  variables aléatoires, et  $S = \sum_{i=1}^n X_i$ , on a :

$E(S) = \sum_{i=1}^n E(X_i)$

Que dire de l'espérance d'un variable aléatoire constante et égale à un réel  $b$ ? Elle est égale à  $b$ .

### Exercice 1

Soient  $X$  et  $Y$  deux variables aléatoires définies sur un même univers.

On donne :  $E(X) = 3,1$  et  $E(Y) = 1,8$ .

Déterminer l'espérance des variables aléatoires suivantes : a)  $X+Y$     b)  $7Y$     c)  $2X + Y$ .

$$E(X) = 3,1 \quad \text{et} \quad E(Y) = 1,8$$

a)  $E(X+Y) = E(X) + E(Y)$  *par linéarité de l'espérance \**

$$E(X+Y) = 3,1 + 1,8 = 4,9$$

b)  $E(7Y) = 7E(Y) = 7 \times 1,8 = 12,6$  \*

c)  $E(2X+Y) = 2E(X) + E(Y) = 2 \times 3,1 + 1,8 = 8$  \*

### Exercice 2

62 Une urne contient deux boules rouges et une boule jaune. On tire une boule de l'urne : le gain est de 10 € si la boule est rouge, 20 € si elle est jaune.

On réalise 10 tirages successifs avec remise.

On note  $X$  la variable aléatoire égale au gain obtenu à l'issue des 10 tirages.

On se propose de déterminer  $E(X)$  de deux manières différentes.

#### 1. Première méthode

Pour tout entier  $i$  tel que  $1 \leq i \leq 10$ ,  $X_i$  est la variable aléatoire égale au gain lors du  $i$ -ième tirage.

a) Calculer  $E(X_i)$  pour  $1 \leq i \leq 10$ .

b) Exprimer la variable aléatoire  $X$  en fonction des  $X_i$ , et en déduire la valeur de  $E(X)$ .

#### 2. Deuxième méthode

$Y$  est la variable aléatoire égale au nombre de boules jaunes tirées.

a) Justifier que  $X = 10Y + 100$ .

b) Calculer  $E(Y)$ .

c) En déduire la valeur de  $E(X)$ .

$$1 \leq i \leq 10$$

$X_i =$  gain obtenu lors du  $i$ -ième tirage.

a) $X_i = w$	10	20	* $P(R) = \frac{2}{3}$
$P(X_i = w)$	$\frac{2}{3}$ *	$\frac{1}{3}$	

$X_i$  est une épreuve de Bernoulli

$$E(X_i) = 10 \times \frac{2}{3} + 20 \times \frac{1}{3} = \frac{40}{3}$$

b)  $X = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{10}$

$$X = \sum_{i=1}^{10} X_i$$

→ Donc  $E(X) = E(X_1 + X_2 + \dots + X_{10})$  *par linéarité de l'espérance*

$$= E(X_1) + E(X_2) + \dots + E(X_{10})$$
$$= \frac{40}{3} \times 10 = \frac{400}{3}$$

### Seconde Méthode :

$Y = \text{nb de boules jaunes tirées (10 tirages)} / \text{nb de boules rouges obtenues} = 10 - Y$

$$a) X = 20Y + 10(10 - Y)$$

$$X = 20Y + 100 - 10Y$$

$$\boxed{X = 10Y + 100}$$

$$E(X) = E(10Y + 100) = 10E(Y) + \underbrace{E(100)}_{100}$$

$$E(X) = 10E(Y) + 100$$

Or  $Y$  suit la loi binomiale de paramètre  $n = 10$  et  $p = \frac{1}{3}$  (succès = piocher jaune)

$$\text{Donc } E(Y) = n \times p = \frac{10}{3}$$

$$\text{Donc } E(X) = 10 \times \frac{10}{3} + 100$$

$$\boxed{E(X) = \frac{100}{3} + \frac{300}{3} = \frac{400}{3}}$$

### IV - Variables aléatoires indépendantes et variance

Soit  $X$  et  $Y$  deux variables aléatoires indépendantes.

Si  $x_i$  est une issue de  $X$  et  $y_j$  est une issue de  $Y$ , alors les événements :  $(X = x_i)$  et  $(Y = y_j)$  sont indépendants, et donc on a :  $p((X = x_i) \cap (Y = y_j)) = p(X = x_i) \times p(Y = y_j)$ .

#### Exemple

On lance successivement deux dés cubiques non truqués.  $X$  est la variable aléatoire donnant le numéro affiché par le premier dé, et  $Y$  est la variable aléatoire donnant le numéro affiché par le second dé.

$X$  et  $Y$  sont bien évidemment indépendantes.  $\rightarrow X \perp\!\!\!\perp Y$

Calculer la valeur de :  $p((X = 6) \cap (Y = 1))$ .

$$\rightarrow P((X=6) \cap (Y=1)) = P(X=6) \times P(Y=1) \\ = \frac{1}{6} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{36}$$

♥♥♥ Propriété de la variance de variables aléatoires indépendantes (admise) ♥

Pour toutes variables aléatoires  $X$  et  $Y$  indépendantes et tous réels  $a$  :

$$-V(X+Y) = V(X) + V(Y)$$

$$-V(aX) = a^2 V(X)$$

Conséquences : Dans le cadre de la propriété précédente, on a également :

Pour tout réel  $b$  :  $Y = b$  (v.c. constant)

$V(X+b) \stackrel{\leftarrow}{=} V(X) + V(b) = V(X) + 0 = V(X)$  : une v. a. constante à une variance nulle.

$$V(aX+bY) = V(aX) + V(bY) = a^2 V(X) + b^2 V(Y)$$

Pour les écarts-types, on a seulement :  $\sigma(aX) = |a| \times \sigma(X)$

En règle générale, même pour des variables aléatoires indépendantes,  $\sigma(X+Y) \neq \sigma(X) + \sigma(Y)$ .

[Rq : si  $X_1, X_2, \dots, X_n$  sont des variables aléatoires deux à deux indépendantes alors  $\rightarrow V(\sum_{i=1}^n X_i) = \sum_{i=1}^n V(X_i)$ ]

39 Émeline s'interroge sur la hauteur de précipitations pour un jour du mois de décembre dans sa ville. On représente cette hauteur, en mm, par la variable aléatoire  $X$ . Voici la loi de probabilité de  $X$ :

$a$	0	1	3	6	8	10
$P(X=a)$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{15}$

- a) Calculer l'espérance et la variance de  $X$ .  
 b) Pour comparer avec une amie anglaise, Émeline doit convertir les hauteurs en pouce.  
 Sachant que 1 cm vaut environ 0,4 pouce, calculer la variance de la hauteur de précipitations en pouce.

$$a) E(X) = 1 \times \frac{2}{15} + 3 \times \frac{1}{10} + 6 \times \frac{1}{10} + 8 \times \frac{1}{10} + 10 \times \frac{1}{15}$$

$$E(X) = \frac{2}{15} + \frac{3}{10} + \frac{6}{10} + \frac{8}{10} + \frac{10}{15}$$

$$E(X) = \frac{12}{15} + \frac{17}{10} = \frac{24}{30} + \frac{51}{30} = \frac{75}{30} = 2,5 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow V(X) = \frac{1}{2} \times (0-2,5)^2 + \frac{2}{15} \times (1-2,5)^2 + \dots + \frac{1}{15} \times (10-2,5)^2$$

$$V(X) = 11,45$$

b) mm  $\xrightarrow{\text{cm}}$  pouces :

$$1 \text{ cm} = 0,4 \text{ pouce}$$

$$10 \text{ mm} = 0,4 \text{ pouce}$$

$Y$  = hauteur en pouce des précipitations

$$Y = 0,04X$$

$$\text{Donc } V(Y) = V(0,04X) = 0,04^2 V(X) = 0,0016 \times 11,45 = 0,01832 \text{ (pouce)}$$

#### V- Retour à la loi binomiale

Soit  $n$  un entier non nul et  $p$  un réel tel que :  $0 < p < 1$ .

Si  $X$  suit la loi binomiale  $\mathcal{B}(n; p)$ , alors :

$$\textcircled{1} \quad \heartsuit \heartsuit \heartsuit E(X) = n \times p \quad \heartsuit \heartsuit \heartsuit$$

$$\textcircled{2} \quad \heartsuit \heartsuit \heartsuit V(X) = n p (1-p) \quad \heartsuit \heartsuit \heartsuit \rightarrow \text{En proba: on note } q \text{ la quantité } 1-p$$

$$\heartsuit \heartsuit \heartsuit \sigma(X) = \sqrt{n p (1-p)} \quad \heartsuit \heartsuit \heartsuit = \sqrt{n p q}$$

Preuve: Soit  $1 \leq i \leq n$

$$\textcircled{1} \quad X_i = \begin{cases} 1 & \text{si succès obtenu au } i^{\text{ème}} \text{ tirage} \\ 0 & \text{si échec au } i^{\text{ème}} \text{ tirage} \end{cases}$$

$$X = \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{avec } X_i \text{ suit une loi de Bernoulli de paramètre } p \text{ donc } E(X_i) = p$$

$$E(X) = E\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = \sum_{i=1}^n E(X_i) = \sum_{i=1}^n p$$

$$E(X) = \underbrace{p + p + \dots + p}_n = n \times p$$

②  $X_1, \dots, X_m$  sont 2 à 2 indépendants

$$V(X) = V\left(\sum_{i=1}^m X_i\right) = \sum_{i=1}^m V(X_i)$$

$$V(X) = \sum_{i=1}^m p(1-p)$$

$$V(X) = \underbrace{p(1-p) + p(1-p) + \dots + p(1-p)}_{n \text{ termes}}$$

$$V(X) = m p (1-p)$$

#### Exercice 4

41 On lance 200 fois une pièce équilibrée.

X est le nombre d'apparitions de Pile.

- Quelle est la loi suivie par X ? Préciser ses paramètres.
- Expliquer pourquoi il serait fastidieux de donner la loi de probabilité sous forme de tableau.
- Calculer l'espérance de X. Interpréter le résultat.
- Calculer la variance et l'écart-type de X.

a) X suit la loi binomiale de paramètres :  $\begin{cases} m = 200 \\ p = 0,5 \text{ (pièce équilibrée)} \end{cases}$

⇒ Par répétition d'épreuves de Bernoulli de paramètre  $p = 0,5$  identiques et indépendantes.

b) Si X prend pour valeurs :  $0; 1; 2; \dots; 200$  soit en tout 201 valeurs : le tableau aurait 202 colonnes ! (= pas pratique)

c) X suit la loi binomiale de para :  $n = 200$  et  $p = 0,5$  ( $X \sim \mathcal{B}(200; 0,5)$ )

Donc :  $E(X) = 200 \times 0,5 = 100$

• En moyenne si on faisait une succession de plusieurs séries de 200 lancers de pièce on obtiendrait 100 piles par série.

d)  $V(X) = n p (1-p) = 200 \times 0,5 \times (1-0,5) = 50$

$$\sigma(X) = \sqrt{V(X)} = \sqrt{n p (1-p)} = \sqrt{50} = 5\sqrt{2} \approx 7,1$$

#### VI. Echantillon

##### Exemple

On étudie la fiabilité d'un composant électronique. On appelle X la variable aléatoire égale à 1 si le composant électronique ne se détériore pas suite aux tests effectués et 0 dans le cas contraire.

Le fabricant précise que le composant électronique ne subit pas de détériorations suite aux tests dans 99,8 % des cas.

Dans ce cas, la variable aléatoire X suit la loi de Bernoulli de paramètre 0,998.

On effectue les tests sur un échantillon de 100 composants électroniques prélevés au hasard dans le stock du fabricant.

On peut considérer alors que la liste  $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{100})$  forment un échantillon de taille 100 de variables aléatoires suivant la loi de Bernoulli de paramètre 0,998.

### Définition

Soit  $n$  un entier naturel non nul et  $X$  une variable aléatoire définie sur l'ensemble  $\Omega$  des issues d'une expérience aléatoire.

Un échantillon de taille  $n$  de la loi de  $X$  est une liste de  $n$  variables aléatoires  $(X_1; X_2; \dots; X_n)$  indépendantes et identiques (on notera *iid*) qui suivent toutes cette même loi de probabilité.

### Exemple

Matt travaille 5 jours dans la semaine, et chaque jour, indépendamment des autres, la probabilité d'aller travailler à vélo est égale à 0,8.

$X$  est la variable aléatoire égale au nombre de jours de la semaine où Matt va travailler à vélo.

Quelle est la loi suivie par  $X$ ?  $X$  suit la loi binomiale de para:  $n=5; p=0,8$   $X \rightarrow B(5; 0,8)$

En répétant cette expérience sur une période de 10 semaines, on obtient un échantillon  $(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10})$  de taille 10 de cette loi de probabilité.

= nb de jours à vélo au cours des 10 semaines

Somme d'un échantillon, moyenne d'un échantillon

(nb de jours à vélo sur 1)

### Définition

$(X_1; X_2; \dots; X_n)$  désigne un échantillon de taille  $n$  de la loi de probabilité suivie par une variable aléatoire  $X$ . les  $(X_i)$   $1 \leq i \leq n$  étant l'a 2 indép.

La somme de cet échantillon est la variable aléatoire notée  $S_n$ , avec:  $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n = \sum_{k=1}^n X_k$

La moyenne de cet échantillon est la variable aléatoire notée  $M_n$ , où:  $M_n = \frac{S_n}{n}$

### Propriété de la somme et de la moyenne d'un échantillon

$S_n$  désigne un échantillon de taille  $n$  de la loi de probabilité suivie par une variable aléatoire  $X$ .

$M_n = \frac{S_n}{n}$  désigne la variable aléatoire moyenne de cet échantillon.

①  $E(S_n) = nE(X)$        $E(M_n) = E(X)$

②  $V(S_n) = nV(X)$        $V(M_n) = \frac{V(X)}{n}$

$\sigma(S_n) = \sqrt{n} \sigma(X)$        $\sigma(M_n) = \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}}$

Preuve:

①  $S_n = \sum_{k=1}^n X_k$       linéarité de l'esp.

Donc  $E(S_n) = E\left(\sum_{k=1}^n X_k\right) = \sum_{k=1}^n E(X_k)$

Or  $E(X_k) = E(X)$  pour tout entier  $k \in [1, n]$

Donc  $E(S_n) = \sum_{k=1}^n E(X) = nE(X)$

Or  $M_n = \frac{S_n}{n}$  donc  $E(M_n) = E\left(\frac{S_n}{n}\right) = \frac{1}{n} E(S_n)$

$E(M_n) = \frac{1}{n} \times nE(X) = E(X)$

②  $S_n = \sum_{k=1}^n X_k$  et  $X_k$  sont l'a 2 indép.

donc  $V(S_n) = \sum_{k=1}^n V(X_k) = \sum_{k=1}^n V(X) = nV(X)$

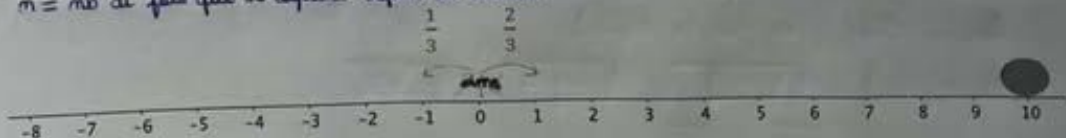
Enfin:  $M_n = \frac{S_n}{n}$

Donc  $V(M_n) = V\left(\frac{S_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2} V(S_n) = \frac{1}{n^2} \times n \times V(X) = \frac{V(X)}{n}$

Sur un axe gradué, on dépose une petite goûte de confiture à la fraise au point d'abscisse 10. Pierrot invite Sophie la fourmi à se placer à l'origine de l'axe gradué. Attirée par la confiture, Sophie se déplace de façon aléatoire d'une unité vers la droite (sens positif) avec la probabilité de  $\frac{2}{3}$  et d'une unité vers la gauche (sens négatif) avec la probabilité de  $\frac{1}{3}$ .

On suppose que les déplacements de la fourmi sont **indépendants les uns des autres**. Pour tout entier naturel  $k$ , on note  $X_k$  la variable aléatoire valant 1 si la fourmi se déplace vers la droite au  $k$ -ième déplacement et valant  $-1$  si elle se déplace vers la gauche. On note  $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$  la variable aléatoire somme des  $X_k$ .

$m =$  nb de fois que se déplace Sophie de 1 unité



- 1) Calculer  $E(X_k)$  et  $V(X_k)$
- 2) En déduire  $E(S_n)$  et  $V(S_n)$ .
- 3) Au bout de combien de déplacements, Sophie peut-elle espérer théoriquement atteindre la goûte de confiture ? Calculer  $\sigma(S_n)$  dans ce cas.

$X_k = 1$  si fourmi va à droite ( $k$ -ième déplacement)

$X_k = -1$  sinon

1) Loi de  $X_k$

$(X_k = a)$	1	-1
$P(X_k = a)$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$

$$E(X_k) = 1 \times \frac{2}{3} + (-1) \times \frac{1}{3} = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \frac{1}{3}$$

$$V(X_k) = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(-1 - \frac{1}{3}\right)^2$$

$$V(X_k) = \frac{2}{3} \times \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \frac{1}{3} \times \left(-\frac{4}{3}\right)^2$$

$$V(X_k) = \frac{8}{27} + \frac{16}{27} = \frac{8}{9}$$

2)  $S_n = X_1 + \dots + X_n$

$$E(S_n) = E(X_1 + \dots + X_n)$$

$$E(S_n) = E(X_1) + E(X_2) + \dots + E(X_n)$$

Or  $\forall k \in [1; n]$ ,  $X_k$  ont la même loi de proba et  $E(X_k) = \frac{1}{3}$

Donc  $E(S_n) = n \times \frac{1}{3} = \frac{n}{3}$

De même comme  $X_1, X_2, \dots, X_n$  sont les uns indépendants

$$V(S_n) = V(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$$

$$V(S_n) = V(X_1) + V(X_2) + \dots + V(X_n)$$

d'après q.1) :  $\forall k \in [1; n]$ ,  $V(X_k) = \frac{8}{9}$  donc  $V(S_n) = \frac{8n}{9}$

3) Sophie atteint la goutte lors de  $n$  déj.

$$\frac{ni}{q} \quad E(S_n) = 10$$

$$\frac{n}{3} = 10$$

$$\boxed{n = 30}$$

En moyenne, 30 déj. sont nécessaires à Sophie pour atteindre la goutte.

Puis  $n = 30$ , on cherche  $\sigma(S_n)$

$$\text{Or } \sigma(S_{30}) = \sqrt{V(S_{30})} = \sqrt{\frac{3 \times 30}{9}} = \sqrt{\frac{240}{9}}$$

$$\sigma(S_{30}) = \frac{\sqrt{240}}{3} = \frac{4\sqrt{15}}{3}$$

### Exercice 7

Un laboratoire mène des études sur la vaccination contre la grippe dans une ville. Après l'hiver, on interroge au hasard 40 personnes de cette ville, ce qui peut être assimilé à des tirages successifs avec remise.

La probabilité qu'une personne de la ville soit vaccinée est égale à 0,4.

Soit  $X$  le nombre de personnes vaccinées parmi les 40 interrogées.

- 1) Calculer l'espérance et l'écart-type de  $X$ .
- 2) Le laboratoire répète  $n$  fois cette étude ( $n$  entier non nul) : il va donc sonder  $n$  groupes de 40 personnes de cette ville.  $M_n$  est la variable aléatoire égale au nombre moyen de personnes vaccinées dans ces  $n$  groupes.
  - a) Calculer l'espérance, la variance et l'écart-type de  $M_n$ .
  - b) Trouver la valeur minimale de  $n$  telle que l'écart-type de  $M_n$  soit inférieur à 0,5.

1)  $X$  suit la loi binomiale de paramètres :  $n=40$  et  $p=0,4$

$$X \rightarrow \boxed{B(40, 0,4)}$$

$$\boxed{E(X) = n \times p = 40 \times 0,4 = 16}$$

$$\boxed{V(X) = n p (1-p) = 40 \times 0,4 \times 0,6 = 9,6}$$

$$\boxed{\sigma(X) = \sqrt{V(X)} = \sqrt{9,6}}$$

2)  $M_n =$  nb moyen de vaccinés dans ces  $n$  groupes.

$X_1 =$  nb de vaccinés au sein du grp ① de 40 pers

$X_2 =$  // // ② //

$\vdots$

$X_n =$  // // ③ //

$$M_n = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}, \quad \forall i \in \llbracket 1; n \rrbracket, X_i \rightarrow B(40; 0,4)$$

a) Donc  $E(M_n) = E\left(\frac{X_1 + \dots + X_n}{n}\right)$

$$E(M_n) = \frac{1}{n} \times E(X_1 + \dots + X_n)$$

$$E(M_n) = \frac{1}{n} \times (E(X_1) + \dots + E(X_n))$$

$$E(M_n) = \frac{1}{n} \times (16 + 16 + \dots + 16)$$

$$\boxed{E(M_n) = \frac{1}{n} \times 16n = 16}$$

$$\sigma(M_n) = \sqrt{V(M_n)} = \sqrt{V\left(\frac{1}{n}(x_1 + \dots + x_n)\right)}$$

$$\sigma(M_n) = \sqrt{\frac{1}{n^2} V(x_1 + \dots + x_n)} \quad V(ax) = a^2 V(x)$$

$$\sigma(M_n) = \sqrt{\frac{1}{n^2}} \times \sqrt{V(x_1) + \dots + V(x_n)}$$

$$\sigma(M_n) = \frac{1}{n} \times \sqrt{9,6 + 9,6 + \dots + 9,6}$$

$$\sigma(M_n) = \frac{1}{n} \times \sqrt{9,6n} = \sqrt{\frac{9,6}{n}}$$

$$\frac{1}{n} \times \sqrt{9,6n} = \frac{1 \times \sqrt{9,6n}}{\sqrt{n} \times \sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}}$$

$$b) \sigma(M_n) < 0,5 \Leftrightarrow \sqrt{\frac{9,6}{n}} < 0,5$$

$$\sigma(M_n) < 0,5 \Leftrightarrow \frac{9,6}{n} < 0,5^2$$

$$\sigma(M_n) < 0,5 \Leftrightarrow n > \frac{9,6}{0,5^2} \quad \left(\frac{9,6}{0,25} = 38,4\right)$$

$$\sigma(M_n) < 0,5 \Leftrightarrow n > 38,4 \Leftrightarrow n \geq 39$$

Réponse:  $n_0 = 39$  est ici la valeur cherchée.

### VII - Inégalités célèbres en probabilités

#### A - Inégalité de Bienaymé-Tchebychev (Attention ça tombe au bac !)

$|a-b|$  = écart entre les nb  
a et b

$$|2-7| = 5$$

Soit  $X$  une variable aléatoire d'espérance  $E(X)$ , et de variance  $V(X)$ .

Pour tout réel  $\delta$  strictement positif, on a :  $\forall \delta > 0, P(|X - E(X)| \geq \delta) \leq \frac{V(X)}{\delta^2}$  ♥

*Preuve*: Donnée à titre culturel, c'est typiquement le genre de preuve qui ne s'invente pas !

Soit  $\delta > 0$ . Notons  $X(\Omega) = \{x_1; x_2; \dots; x_n\}$  l'ensemble des valeurs prises par  $X$ .

Soit  $A$  l'ensemble des éléments  $x_i$  de  $X(\Omega)$  tels que :  $|x_i - E(X)| \geq \delta$ .

On sait que :  $V(X) = \sum_{i=1}^n P(X = x_i)(x_i - E(X))^2$ .

Or  $X(\Omega) = A \cup \bar{A}$ .

Donc  $V(X) = \sum_{i \in A} P(X = x_i)(x_i - E(X))^2 + \sum_{i \in \bar{A}} P(X = x_i)(x_i - E(X))^2$ .

Ainsi,  $V(X)$  apparait comme la somme de deux expressions à termes positifs ( $P(X=x_i) \geq 0$  et  $(x_i - E(X))^2 \geq 0$ ), donc  $V(X)$  est supérieure ou égale à chacune de ces deux sommes.

En particulier,  $V(X) \geq \sum_{i \in A} P(X = x_i)(x_i - E(X))^2$ . (Relation notée (\*)).

Or par définition de l'ensemble  $A$ , pour tout élément  $i$  appartenant à  $A$ ,  $|x_i - E(X)| \geq \delta > 0$ , donc par croissance de la fonction carrée sur  $[0; +\infty[$ ,  $(|x_i - E(X)|)^2 \geq \delta^2$ .

En se souvenant que pour tout réel  $w$ ,  $|w|^2 = w^2$ , on a :  $(x_i - E(X))^2 \geq \delta^2$ , et par suite, comme  $P(X=x_i) \geq 0$ , on a :  $P(X = x_i)(x_i - E(X))^2 \geq P(X = x_i)\delta^2$ .

Grâce à (\*), et en sommant des inégalités de même sens, on a :  $V(X) \geq \sum_{i \in A} P(X = x_i)\delta^2$ .

$\delta^2$  est une constante multiplicative vis-à-vis de l'indice  $i$  de la somme, donc par factorisation par  $\delta^2$ , on a :

$$V(X) \geq \delta^2 \sum_{i \in A} P(X = x_i).$$

Pour conclure, il suffit de constater que :  $\sum_{i \in A} P(X = x_i) = P(A)$ .

Ainsi,  $V(X) \geq \delta^2 P(A)$ , donc  $P(A) \leq \frac{V(X)}{\delta^2}$  ou encore :  $P(|X - E(X)| \geq \delta) \leq \frac{V(X)}{\delta^2}$ .

### Exemple

Soit une variable aléatoire  $X$  qui suit la loi binomiale de paramètres  $n = 20$  et  $p = 0,1$ .

- 1) Appliquer l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev avec  $\delta = 2\sigma(X)$ . Interpréter.
- 2) Recommencer avec  $\delta = 3\sigma(X)$ , puis  $\delta = 4\sigma(X)$ . Que constate-t-on ?

1) Si  $X$  suit la loi binomiale de paramètres :  $n = 20$  et  $p = 0,1$

$$E(X) = 20 \times 0,1 = 2$$

$$V(X) = n p (1-p) = 200 \times 0,1 \times 0,9 = 1,8$$

donc  $\sigma(X) = \sqrt{1,8}$

Posez  $\delta = 2\sigma(X) : \delta > 0$

Soit J.B.T avec pour choix  $\delta = 2\sigma(X)$  conduit à :

$$P(|X - E(X)| \geq 2\sigma(X) \leq \frac{V(X)}{(2\sigma(X))^2}$$

$(\sigma(X))^2 = V(X)$  (formule cours)

$$P(|X - E(X)| \geq 2\sigma(X) \leq \frac{\sigma(X)^2}{4\sigma(X)^2} = \frac{1}{4}$$

$$P(|X - E(X)| \geq 2\sigma(X) \leq \frac{1}{4}$$

2)

Si  $\delta = 3\sigma(X)$

J.B.T n'écrit alors

$$P(|X - E(X)| \geq 3\sigma(X) \leq \frac{1}{9} \text{ car } \sigma(X)^2 = V(X)$$

Enfin avec  $\delta = 4\sigma(X)$

$$P(|X - E(X)| \geq 4\sigma(X) \leq \frac{1}{16}$$

Conclusion : plus  $\delta$  est grand ou plus  $P(|X - E(X)| \geq \delta)$  diminue :  $\frac{1}{4} > \frac{1}{9} > \frac{1}{16}$

Remarque : cette inégalité est loin d'être optimale et n'est intéressante que si  $\frac{V(X)}{\delta^2} < 1$ , c'est-à-dire si  $\delta \geq \sigma(X)$ . Pourquoi au fait ? car une proba est  $\leq 1$  et si  $\delta \geq \sigma(X)$  alors  $\frac{V(X)}{\delta^2} \leq 1$

### Exercice 3

Les deux parties sont indépendantes.

Un laboratoire fabrique un médicament conditionné sous forme de cachets.

#### Partie A

Un contrôle de qualité, portant sur la masse des cachets, a montré que 2% des cachets ont une masse non conforme. Ces cachets sont conditionnés par boîtes de 100 choisies au hasard dans la chaîne de production. On admet que la conformité d'un cachet est indépendante de celle des autres.

On note  $N$  la variable aléatoire qui à chaque boîte de 100 cachets associe le nombre de cachets non conformes dans cette boîte.

1. Justifier que la variable aléatoire  $N$  suit une loi binomiale dont on précisera les paramètres.

2. Calculer l'espérance de  $N$  et en donner une interprétation dans le contexte de l'exercice.
3. On arrondira les résultats à  $10^{-3}$  près.
  - a. Calculer la probabilité qu'une boîte contienne exactement trois cachets non conformes.
  - b. Calculer la probabilité qu'une boîte contienne au moins 95 cachets conformes.

$N = n$  a égale au nbr de cachets non conformes dans une boîte de 100 cachets.

- 1) Piocher un cachet et regarder si il est conforme ou pas est une épreuve de Bernoulli ; le succès est ici avoir un cachet non conforme.

Donc  $p = \frac{2}{100} = 0,02$

→ On répète 100 fois de façon indep cette m<sup>ème</sup> épreuve de Bernoulli

Donc  $N$  suit la loi Binomiale de paramètres  $n = 100$  et  $p = 0,02$

$N \sim \mathcal{B}(100; 0,02)$

- 2)  $N$  suit la loi binomiale  $\mathcal{B}(100; 0,02)$

Donc  $E(N) = n \times p = 100 \times 0,02 = 2$

⇒ Si on piochait un grand nombre de boîtes de 100 cachets, on aurait en moyenne 2 cachets non conformes par boîtes.

- 3) a) On cherche ici la valeur de :  $P(N=3)$

On  $N \sim \mathcal{B}(100; 0,02)$  donc  $\forall k \in \llbracket 0; 100 \rrbracket$ ,  $P(N=k) = \binom{100}{k} \times p^k \times (1-p)^{100-k}$

Pour  $k=3$  :  $P(N=3) = \binom{100}{3} \times 0,02^3 \times 0,98^{97}$

avec la machine :  $P(N=3) \approx 0,182$  à  $10^{-3}$  près.

- b)  $N =$  nbr de cachets non conformes dans la boîte de 100

Donc il y a  $100 - N$  cachets conformes dans la boîte

On veut que :  $100 - N \geq 95$

$100 - 95 \geq N$

$N \leq 5$

On cherche ici :  $P(N \leq 5)$

$P(N \leq 5) = \sum_{k=0}^5 P(N=k)$

avec la machine :  $P(N \leq 5) \approx 0,984$

Partie B

On admet que les masses des cachets sont indépendantes les unes des autres. On prélève 100 cachets et on note  $M_i$ , pour  $i$  entier naturel compris entre 1 et 100, la variable aléatoire qui donne la masse en gramme du  $i$ -ème cachet prélevé.

On considère la variable aléatoire  $S$  définie par :

$$S = M_1 + M_2 + \dots + M_{100}$$

On admet que les variables aléatoires  $M_1, M_2, \dots, M_{100}$  suivent la même loi de probabilité d'espérance  $\mu = 2$  et d'écart-type  $\sigma$ .

1. Déterminer  $E(S)$  et interpréter le résultat dans le contexte de l'exercice.
2. On note  $s$  l'écart type de la variable aléatoire  $S$ .

Montrer que :  $s = 10\sigma$ .

On souhaite que la masse totale, en gramme, des comprimés contenus dans une boîte soit strictement comprise entre 199 et 201 avec une probabilité au moins égale à 0,9.

- a. Montrer que cette condition est équivalente à :

$$P(|S - 200| \geq 1) \leq 0,1.$$

- b. En déduire la valeur maximale de  $\sigma$  qui permet, à l'aide de l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, d'assurer cette condition. Bienaymé-Tchebychev

$M_i$  = masse du  $i$ -ème cachet prélevé

$$S = M_1 + M_2 + \dots + M_{100} \quad (= S = \sum_{i=1}^{100} M_i)$$

$M_i$  ont toutes la même loi de proba avec :

$$E(M_i) = \mu = 2$$

$$\sigma(M_i) = \sigma$$

$$1) S = M_1 + M_2 + \dots + M_{100}$$

$$\text{Donc } E(S) = E(M_1 + M_2 + \dots + M_{100})$$

Par linéarité de l'espérance on a :

$$E(S) = E(M_1) + E(M_2) + \dots + E(M_{100})$$

$$E(S) = \underbrace{2 + 2 + \dots + 2}_{100 \text{ termes}}$$

$$E(S) = 100 \times 2 = 200$$

$\Rightarrow$  La masse de 100 cachets est de 200g sur un grand nombre de prélèvements de 100 cachets.

$$2) A = \sigma(S)$$

$$V(S) = V(M_1 + M_2 + \dots + M_{100})$$

On  $M_1, M_2, \dots, M_{100}$  sont l à l indépendantes donc  $V(M_1 + M_2 + \dots + M_{100}) = V(M_1) + V(M_2) + \dots + V(M_{100})$

$$\text{On } \forall i \in [1, 100] \text{ , } V(M_i) = (\sigma(M_i))^2 = \sigma^2$$

$$\text{Donc } V(S) = \underbrace{\sigma^2 + \sigma^2 + \dots + \sigma^2}_{100 \text{ termes}}$$

$$V(S) = 100\sigma^2$$

On,  $\sigma(S) = \sqrt{V(S)}$

$\sigma(S) = \sqrt{100\sigma^2} = \sqrt{100} \times \sqrt{\sigma^2}$

$\sigma(S) = 10 \times \sigma$  car  $\sqrt{\sigma^2} = \sigma$  vu que l'écart-type est positif

3) a) On veut que  $P(199 < S < 201) \geq 0,9$

→ Centre de  $[199; 201] = \frac{199+201}{2} = 200$

$199 < S < 201$   
 $-1 < S-200 < 1$

On (cours 2<sup>nd</sup>) :  $x \geq 0, a \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R}$

$-x < x-a < x$



$|x-a| < x$

→ l'écart entre  $x$  et  $a$  est inférieur à  $x$  ou  $x \in ]a-x, a+x[$

Donc :  $|S-200| < 1$

Soit  $A$  l'événement :  $|S-200| < 1$

$P(|S-200| < 1) \geq 0,9$

$P(A) \geq 0,9$

On  $P(A) + P(\bar{A}) = 1$

Donc  $P(A) = 1 - P(\bar{A})$

Donc  $1 - P(\bar{A}) \geq 0,9$

$1 - 0,9 \geq P(\bar{A})$

$P(\bar{A}) \leq 0,1$

On  $\bar{A}$  est l'événement :  $|S-200| \geq 1$

Donc  $P(|S-200| \geq 1) \leq 0,1$

3) b) Rappelons l'G.B.T appliquée à la v.a S :

$\forall \delta > 0, P(|S-E(S)| \geq \delta) \leq \frac{V(S)}{\delta^2}$

On  $E(S) = 200$  ;  $V(S) = (\sigma(S))^2 = (100)^2 = 100\sigma^2$

On choisit  $\delta = 1$  : ( $1 > 0$ )

i.B.T. n'écrit alors :  $P(|S-200| \geq 1) \leq \frac{100\sigma^2}{1^2}$

$P(|S-200| \geq 1) \leq 100\sigma^2$

2'après q.a)  $P(|S-200| \geq 1) \leq 0,1$ , donc il suffit d'avoir :  $100\sigma^2 \leq 0,1$

$100\sigma^2 \leq 0,1$   
 $\sigma^2 \leq \frac{0,1}{100}$   
 $\sigma \leq \sqrt{0,001}$  (car  $\sigma > 0$ )  
v. max de  $\sigma$

$\sigma_{\max} = \sqrt{0,001} \approx 0,32$

### B- Inégalité de concentration

$S_n$  désigne un échantillon de taille  $n$  de la loi de probabilité suivie par une variable aléatoire  $X$ .

$S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ , où chaque variable aléatoire  $X_i$  sont identiques et indépendantes et suivent la même loi de probabilité que  $X$ .

$M_n = \frac{S_n}{n}$  désigne la variable aléatoire nommée moyenne de cet échantillon.

Pour tout réel  $\delta$  strictement positif, on a :  $\forall \delta > 0, P(|M_n - E(X)| \geq \delta) \leq \frac{V(X)}{n\delta^2}$ . (Appelée inégalité de concentration).

Preuve : déduction de l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev appliquée à la variable aléatoire  $M_n$ , en se souvenant que :  $E(M_n) = E(X)$  et  $V(M_n) = \frac{1}{n}V(X)$ .

Appliquons IBT à la v.a.  $M_n$  :  $M_n = \frac{S_n}{n}$  donc  $E(M_n) = \frac{1}{n}E(S_n)$

$$E(M_n) = \frac{1}{n} \times n \times E(X) = E(X)$$

$$V(M_n) = V\left(\frac{S_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2} \times V(S_n) = \frac{1}{n^2} (V(S_1) + V(S_2) + \dots + V(S_n))$$

$$\text{Donc } V(M_n) = \frac{1}{n^2} (n \cdot V(X)) = \frac{V(X)}{n} \quad \left\{ \begin{array}{l} \uparrow \\ V(aX) = a^2 V(X) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \uparrow \\ \text{indép des } (V_i) \quad 1 \leq i \leq n \end{array} \right.$$

Donc IBT donne :

$$\forall \delta > 0, P(|M_n - E(M_n)| \geq \delta) \leq \frac{V(M_n)}{\delta^2}$$

$$P(|M_n - E(X)| \geq \delta) \leq \frac{V(X)}{n\delta^2}$$

### Exemple d'utilisation (important)

On s'intéresse à un échantillon de 20 enfants atteints d'allergie alimentaire choisis au hasard.

L'âge d'apparition des premiers symptômes allergiques de ces 20 enfants est modélisé par les variables aléatoires  $A_1, A_2, \dots, A_{20}$ . On admet que ces variables aléatoires sont indépendantes et suivent la même loi d'espérance 4 et de variance 2,25.

On considère la variable aléatoire :

$$M_{20} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_{20}}{20}$$

1. Que représente la variable aléatoire  $M_{20}$  dans le contexte de l'exercice ?
2. Déterminer l'espérance et la variance de  $M_{20}$ .
3. Justifier, à l'aide de l'inégalité de concentration, que

$$P(2 < M_{20} < 6) > 0,97.$$

$$M_{20} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_{20}}{20}$$

1)  $M_{20}$  désigne l'âge moyen d'apparition des symptômes d'allergies par échantillon de 20 enfants

$$2) E(M_{20}) = E\left(\frac{A_1 + A_2 + \dots + A_{20}}{20}\right)$$

$$E(M_{20}) = \frac{1}{20} \times E(A_1 + A_2 + \dots + A_{20})$$

*linéarité de l'esp.*

$$E(M_{20}) = \frac{1}{20} \times (E(A_1) + E(A_2) + \dots + E(A_{20}))$$

On  $E(A_i) = 4$  pour tout entier  $i$  entre 1 et 20.

$$E(M_{20}) = \frac{1}{20} \times \underbrace{(4 + 4 + \dots + 4)}_{20 \text{ termes}} = \frac{1}{20} \times 4 \times 20 = 4$$

$$V(M_{20}) = V\left(\frac{A_1 + A_2 + \dots + A_{20}}{20}\right)$$

$$\text{Or } \forall a \in \mathbb{R}, V(aX) = a^2 V(X)$$

$$\text{Soit } a = \frac{1}{20}$$

$$V(M_{20}) = \left(\frac{1}{20}\right)^2 \times V(A_1 + A_2 + \dots + A_{20})$$

$$V(M_{20}) = \left(\frac{1}{20}\right)^2 \times [V(A_1) + V(A_2) + \dots + V(A_{20})]$$

$$V(M_{20}) = \frac{1}{400} \times 2,25 \times 20 = \frac{225}{200} = 0,1125$$

3) IBT à la va  $M_{20}$

$$\forall \delta > 0, P(|M_{20} - E(M_{20})| \geq \delta) \leq \frac{V(M_{20})}{\delta^2}$$

$$\forall \delta > 0, P(|M_{20} - 4| \geq \delta) \leq \frac{0,1125}{\delta^2}$$

Soit A l'événement :  $|M_{20} - 4| \geq \delta$

$\bar{A}$  est :  $|M_{20} - 4| < \delta$

$$\text{Donc } \underbrace{1 - P(|M_{20} - 4| < \delta)}_{P(A) = 1 - P(\bar{A})} < \frac{0,1125}{\delta^2}$$

$$1 - P(|M_{20} - 4| < \delta) \leq \frac{0,1125}{\delta^2}$$

$$1 - \frac{0,1125}{\delta^2} \leq P(|M_{20} - 4| < \delta)$$

$$P(|M_{20} - 4| < \delta) \geq 1 - \frac{0,1125}{\delta^2}$$

$$|M_{20} - 4| < \delta \iff 4 - \delta < M_{20} < 4 + \delta$$

$$P(4 - \delta < M_{20} < 4 + \delta) \geq 1 - \frac{0,1125}{\delta^2}$$

d'après l'énoncé on prend  $\delta = 2$

$$P(4 - 2 < M_{20} < 4 + 2) \geq 1 - \frac{0,1125}{2^2}$$

$$P(2 < M_{20} < 6) \geq 1 - \frac{0,1125}{4}$$

$$\text{Or } 1 - \frac{0,1125}{4} \approx 0,971$$

$$\text{et } 0,971 > 0,97$$

$$\text{Donc } \boxed{P(2 < M_{20} < 6) > 0,97}$$

### C. Loi faible des grands nombres

$S_n$  désigne un échantillon de taille  $n$  de la loi de probabilité suivie par une variable aléatoire  $X$ .

$M_n = \frac{S_n}{n}$  désigne la variable aléatoire moyenne de cet échantillon.

Pour tout réel  $\delta$  strictement positif, on a :  $\lim_{n \rightarrow +\infty} P(|M_n - E(X)| \geq \delta) = 0$ .

Justification et interprétation :

La loi des grands nombres dit qu'au plus la taille de l'échantillon d'une variable aléatoire  $X$  est grande, au plus l'écart entre la moyenne de cet échantillon et l'espérance de  $X$  se rapproche de 0.

**Exercice 9**

Soit une variable aléatoire  $X$  d'espérance 3 et de variance 0,2.

Soit  $M_n$  la variable aléatoire moyenne d'un échantillon de taille  $n$  de la variable aléatoire  $X$ .

1) Déterminer un majorant de  $P(|M_n - 3| \geq 0,1)$  pour  $n = 100$ , pour  $n = 1000$ , puis pour  $n = 10\,000$ . Que constate-t-on ?

2) Démontrer et interpréter le résultat précédent.

•  $E(X) = 3$  et  $V(X) = 0,2$

•  $M_n$  : moyenne d'un échantillon de taille  $n$

•  $M_n = \frac{X_1 + \dots + X_n}{n}$  où  $X_i$  à  $m$  la que  $X$

1)  $P(|M_n - 3| \geq 0,1) = P(|M_n - E(M_n)| \geq 0,1)$

appliquons I BT à la v.a  $M_n$  et avec  $S = 0,1$  :

$$P(|M_n - 3| \geq 0,1) \leq \frac{V(M_n)}{0,1^2} \quad \left( \begin{array}{l} V(M_n) = \frac{1}{n} V(X) \\ V(M_n) = \frac{0,2}{n} \end{array} \right)$$

$$P(|M_n - 3| \geq 0,1) \leq \frac{\frac{0,2}{n}}{0,01}$$

$$P(|M_n - 3| \geq 0,1) \leq 100 \times \frac{0,2}{n}$$

$$P(|M_n - 3| \geq 0,1) \leq \frac{20}{n}$$

Pour  $n = 100$  :  $P(|M_{100} - 3| \geq 0,1) \leq \frac{20}{100} = 0,2$

Pour  $n = 1000$  :  $P(|M_{1000} - 3| \geq 0,1) \leq \frac{20}{1000} = 0,02$

Pour  $n = 10\,000$  :  $P(|M_{10000} - 3| \geq 0,1) \leq \frac{20}{10\,000} = 0,002$

Quand  $n$  tend vers  $+\infty$ ,  $P(|M_n - 3| \geq 0,1)$  tend vers 0

Ex 10 :

La société demande à un institut de sondage de faire une enquête sur le profil de ses clients réguliers. L'institut a élaboré un questionnaire en ligne constitué d'un nombre variable de questions.

On choisit au hasard un échantillon de 1 000 clients réguliers, à qui le questionnaire est proposé. On considère que ces 1 000 clients répondent.

- Pour les remercier, la société offre un bon d'achat à chacun des clients de l'échantillon. Le montant de ce bon d'achat dépend du nombre de questions posées au client.
- La société souhaite récompenser particulièrement les clients de l'échantillon qui ont acheté une carte de fidélité et, en plus du bon d'achat, offre à chacun d'eux une prime d'un montant de 50 euros versée sur la carte de fidélité.

On note  $Y_1$  la variable aléatoire qui, à chaque échantillon de 1 000 clients réguliers, associe le total, en euros, des montants du bon d'achat des 1 000 clients.

On admet que son espérance  $E(Y_1)$  est égale à 30 000 et que sa variance  $V(Y_1)$  est égale à 100 000.

On note  $X_2$  la variable aléatoire qui, à chaque échantillon de 1 000 clients réguliers, associe le nombre de clients ayant acheté la carte de fidélité parmi eux, et on note  $Y_2$  la variable aléatoire qui, à chaque échantillon de 1 000 clients, associe le total, en euros, des montants de la prime de fidélité versée.

On admet que  $X_2$  suit la loi binomiale de paramètres 1 000 et 0,47 et que  $Y_2 = 50 X_2$ .

1. Calculer l'espérance  $E(X_2)$  de la variable  $X_2$  et interpréter le résultat dans le contexte de l'exercice.

On note  $Y = Y_1 + Y_2$  la variable aléatoire égale au total général, en euros, des montants offerts (bon d'achat et prime de fidélité) aux 1000 clients. On admet que les variables aléatoires  $Y_1$  et  $Y_2$  sont indépendantes.

On note  $Z$  la variable aléatoire définie par  $Z = \frac{Y}{1000}$  : somme moyenne d'argent payée par clients réguliers.

2. Préciser ce que modélise la variable  $Z$  dans le contexte de l'exercice.  
Vérifier que son espérance  $E(Z)$  est égale à 53,5 et que sa variance  $V(Z)$  est égale à 0,72275.
3. À l'aide de l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, vérifier que la probabilité que  $Z$  soit strictement compris entre 51,7 euros et 55,3 euros est supérieure à 0,75.

$$E(Y_1) = 30\,000$$

$$V(Y_1) = 100\,000$$

$X_2 =$  nb de clients réguliers ayant carte fid parmi les 1000

$$X_2 \rightarrow \mathcal{B}(1000, 0,47)$$

$$Y_2 = 50X_2$$

$$1) E(X_2) = np = 1000 \times 0,47 = 470$$

⇒ En moyenne, il y a 470 clients réguliers qui ont la carte de fid par échantillon de taille 1000.

2)  $Z$  modélise la somme moyenne d'argent payée par chacun des indiv de cet échantillon de taille 1000

$$E(Z) = E\left(\frac{Y}{1000}\right)$$

$$E(Z) = \frac{1}{1000} E(Y) \text{ par linéarité de l'espérance}$$

$$E(Z) = \frac{1}{1000} \times E(Y_1 + Y_2) \text{ car } Y = Y_1 + Y_2$$

$$E(Z) = \frac{1}{1000} \times (E(Y_1) + E(Y_2)) = \frac{1}{1000} (30000 + E(50X_2)) \text{ car } Y_2 = 50X_2$$

$$E(Z) = \frac{1}{1000} \times (30000 + 50 \times E(X_2))$$

$$E(Z) = \frac{1}{1000} \times (30000 + 23500) = \frac{53500}{1000} = 53,5$$

↑ somme payée par l'ensemble des  $X_2$  personnes avec carte fidélité.

$$V(Z) = V\left(\frac{Y}{1000}\right) = \frac{1}{1000^2} V(Y)$$

$$V(Z) = \frac{1}{10^6} \times V(Y_1 + Y_2) \quad (\#)$$

$$V(Y_1) = 100\,000 = 10^5$$

$$Y_2 = 50X_2 \text{ donc } V(Y_2) = V(50X_2) = 50^2 \times V(X_2) = 2500 V(X_2)$$

$$\text{Or } X_2 \rightarrow \mathcal{B}(1000, 0,47) \text{ donc } V(X_2) = np(1-p) = 1000 \times 0,47 \times 0,53$$

$$V(X_2) = 470 \times 0,53 = 249,1$$

$$(\#) V(Z) = \frac{1}{10^6} V(Y_1 + Y_2)$$

$$V(Z) = \frac{1}{10^6} (V(Y_1) + V(Y_2))$$

$$V(Z) = \frac{1}{10^6} \times (100\,000 + 2500 \times 249,1)$$

$$\boxed{V(Z) = 0,72275}$$

$$3) \text{ On a: } P(51,7 < Z < 55,3) > 0,75$$

$$\text{Rappel IBT: } \forall \delta > 0, P(|Z - E(Z)| \geq \delta) \leq \frac{V(Z)}{\delta^2}$$

$$\text{On a } E(Z) = 53,5 \text{ et } V(Z) = 0,72275$$

$$51,7 < Z < 55,3$$

↓  $\overset{-0,2}{\text{arrondi}}$  (précision de l'arrondi)

$$51,7 - E(Z) < Z - E(Z) < 55,3 - E(Z)$$

$$51,7 - 53,5 < Z - E(Z) < 55,3 - 53,5$$

$$-1,8 < Z - E(Z) < 1,8 \iff |Z - E(Z)| < 1,8$$

$$* |x - a| < n \iff a - n < |x - a| < a + n$$

$$\text{IBT } \forall \delta > 0, P(|Z - E(Z)| \geq \delta) \leq \frac{0,72275}{\delta^2}$$

$$P(A) = 1 - P(\bar{A})$$

$$\text{Donc: } 1 - P(|Z - E(Z)| < \delta) \leq \frac{0,72275}{\delta^2}$$

Pour le choix de  $\delta = 1,8 (> 0)$  on a:

$$1 - P(|Z - E(Z)| < 1,8) \leq \frac{0,72275}{1,8^2}$$

$$1 - \frac{0,72275}{1,8^2} \leq P(|Z - E(Z)| < 1,8)$$

$$\underbrace{1 - \frac{0,72275}{1,8^2}}_{0,777} \leq P(|Z - E(Z)| < 1,8)$$

• On  $0,75 < 0,777$  Donc  $P(|Z - E(Z)| < 1,8) > 0,75$

### Exercice 11 (partie d'exercice, Métropole 2024)

1. On interroge au hasard dix étudiants.

Les variables aléatoires  $N_1, N_2, \dots, N_{10}$  modélisent la note sur 20 obtenue à l'examen par chacun d'entre eux. On admet que ces variables sont indépendantes et suivent la même loi binomiale de paramètres  $(20; 0,615)$ .

Soit  $S$  la variable définie par  $S = N_1 + N_2 + \dots + N_{10}$ .

Calculer l'espérance  $E(S)$  et la variance  $V(S)$  de la variable aléatoire  $S$ .

2.

On considère la variable aléatoire  $M = \frac{S}{10}$ .

a. Que modélise cette variable aléatoire  $M$  dans le contexte de l'exercice?

b. Justifier que  $E(M) = 12,3$  et  $V(M) = 0,47355$ .

c. À l'aide de l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, justifier l'affirmation ci-dessous.

« La probabilité que la moyenne des notes de dix étudiants pris au hasard soit strictement comprise entre 10,3 et 14,3 est d'au moins 80% ». =  $\geq 0,8$

} (#)

$$S = N_1 + N_2 + \dots + N_{10}$$

avec  $N_i \rightarrow B(20, 0,615)$  et  $E(N_i) = m_i = 20 \times 0,615 = 12,3$

1)  $E(S) = E(N_1 + N_2 + \dots + N_{10})$

$$E(S) = E(N_1) + E(N_2) + \dots + E(N_{10})$$

$$E(S) = 12,3 + 12,3 + \dots + 12,3$$

$$E(S) = 123$$

$\Rightarrow V(S) = V(N_1 + N_2 + \dots + N_{10})$

$$V(S) = V(N_1) + V(N_2) + \dots + V(N_{10})$$

$$V(S) = 10 V(N_1)$$

Or  $N_1 \rightarrow B(20; 0,615)$  donc :

$$V(N_1) = 20 \times 0,615 \times (1 - 0,615)$$

$$V(N_1) = 12,3 \times 0,385 = 4,7355$$

Donc :  $V(S) = 10 \times 4,7355 = 47,355$

2) a)  $M = \frac{S}{10}$

$\rightarrow M$  représente la moyenne des notes obtenues par ces 10 candidats.

2) b)  $E(M) = E\left(\frac{S}{10}\right) \stackrel{\text{linéarité espérance}}{=} \frac{1}{10} E(S) = \frac{1}{10} \times 123 = 12,3$

$$V(M) = V\left(\frac{S}{10}\right) = \frac{1}{10^2} \times V(S) = \frac{47,355}{10^2} = 0,47355$$

$\Delta V(as) = a^2 V(S)$  (ici  $a = \frac{1}{10}$ )

2) c) (#) dit :  $P(10,3 < M < 14,3) \geq 0,8$  (BUT)

Or l'inégalité de la variance de Bienaymé - Tchebychev dit que :

$$\forall \delta > 0, P(|M - E(M)| \geq \delta) \leq \frac{V(M)}{\delta^2}$$

Or  $10,3 < M < 14,3$

$$10,3 - E(M) < M - E(M) < 14,3 - E(M)$$

$$10,3 - 12,3 < M - E(M) < 14,3 - 12,3$$

$$-2 < M - E(M) < 2 \iff |M - E(M)| < 2$$

Faisons  $\delta = 2 (> 0)$  dans l'IBT

$$P(|M - 12,3| \geq 2) \leq \frac{0,47355}{2^2}$$

$$1 - P(|M - 12,3| < 2) \leq 0,118$$

Donc  $1 - 0,118 \leq P(|M - 12,3| < 2)$

$$P(10,3 < M < 14,3) \geq 0,886 \geq 0,8 :$$

affirmation vraie.

**Exercice 12**

On prélève au hasard dans la production de l'entreprise un lot de  $n$  jouets, où  $n$  est un entier strictement positif. On suppose que ce prélèvement se fait sur une quantité suffisamment grande de jouets pour être assimilé à une succession de  $n$  tirages indépendants avec remise.

On rappelle que la probabilité qu'un jouet réussisse le test de fabrication est égale à 0,95. Soit  $S_n$  la variable aléatoire qui compte le nombre de jouets ayant réussi le test de fabrication. On admet que  $S_n$  suit la loi binomiale de paramètres  $n$  et  $p = 0,95$ .

1. Exprimer l'espérance et la variance de la variable aléatoire  $S_n$  en fonction de  $n$ .
2. Dans cette question, on pose  $n = 150$ .
  - a. Déterminer une valeur approchée à  $10^{-3}$  près de  $P(S_{150} = 145)$ . Interpréter ce résultat dans le contexte de l'exercice.
  - b. Déterminer la probabilité qu'au moins 94 % des jouets de ce lot réussissent le test de fabrication. Donner une valeur approchée du résultat à  $10^{-3}$  près.
3. Dans cette question, l'entier naturel non nul  $n$  n'est plus fixé.

Soit  $F_n$  la variable aléatoire définie par :  $F_n = \frac{S_n}{n}$ . La variable aléatoire  $F_n$  représente la proportion des jouets qui réussissent le test de fabrication dans un lot de  $n$  jouets prélevés.

On note  $E(F_n)$  l'espérance et  $V(F_n)$  la variance de la variable aléatoire  $F_n$ .

- a. Montrer que  $E(F_n) = 0,95$  et que  $V(F_n) = \frac{0,0475}{n}$ .
- b. On s'intéresse à l'évènement  $I$  suivant : « la proportion de jouets qui réussissent le test de fabrication dans un lot de  $n$  jouets est strictement comprise entre 93 % et 97 % ».

En utilisant l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, déterminer une valeur  $n$  de la taille du lot de jouets à prélever, à partir de laquelle la probabilité de l'évènement  $I$  est supérieure ou égale à 0,96.

1)  $S_n \rightarrow B(n, p)$

Donc  $E(S_n) = n \times p = 0,95n$  car  $p = 0,95$

2) a) Ici  $n = 150$

$$P(S_{150} = 145) = \binom{150}{145} \times 0,95^{145} \times 0,05^5$$

$P(S_{150} = 145) \approx 0,109$  à  $10^{-3}$  près

b) On cherche ici la valeur de  $P(S_{150} \geq \frac{94}{100} \times 150)$

$\frac{94}{100} \times 150 = 141$

Donc  $P(S_{150} \geq 141) \approx 0,781$  ← calculatrice

Rq  $P(S_{150} \geq 141) = \sum_{k=141}^{150} P(S_{150} = k)$

3) a)  $n$  entier q.l.g.  $F_n = \frac{S_n}{n}$

$E(F_n) = E\left(\frac{S_n}{n}\right) = \frac{1}{n} \times E(S_n) = \frac{1}{n} \times 0,95n$

$E(F_n) = 0,95$

linéarité de l'esp.

$V(F_n) = V\left(\frac{S_n}{n}\right) = \frac{1}{n^2} \times V(S_n)$

• Or  $S_n \rightarrow B(n, 0,95)$ , donc  $V(S_n) = n \times p \times (1-p)$

$V(S_n) = \frac{0,0475n}{n^2} = \frac{0,0475}{n}$

$V(S_n) = n \times 0,95 \times 0,05$   
 $V(S_n) = 0,0475n$

3) b) I = "proportion de jeûtes réunissant le test et strictement comprise entre 93% et 97%."

on a:  $P(I) \geq 0,96$

on a:  $P(0,93 < F_m < 0,97) \geq 0,96$

→ On applique l'IBT à la variable aléatoire  $F_m$

$$\forall \delta > 0, P(|F_m - E(F_m)| \geq \delta) \leq \frac{V(F_m)}{\delta^2}$$

$$\forall \delta > 0, P(|F_m - 0,95| \geq \delta) \leq \frac{0,0475}{n\delta^2}$$

$$1 - P(\bar{A}) \leq \frac{0,0475}{n\delta^2}$$

$$1 - P(|F_m - 0,95| < \delta) \leq \frac{0,0475}{n\delta^2}$$

$$|F_m - 0,95| < \delta$$



$$0,95 - \delta < F_m < 0,95 + \delta$$

$$1 - \frac{0,0475}{n\delta^2} \leq P(|F_m - 0,95| < \delta)$$

$$P(0,95 - \delta < F_m < 0,95 + \delta) \geq 1 - \frac{0,0475}{n\delta^2}$$

0,93                      0,97

On peut  $\delta = 0,02 (> 0)$ :  $P(0,93 < F_m < 0,97) \geq 1 - \frac{0,0475}{0,02^2 n}$

donc on résout :

$$1 - \frac{0,0475}{0,0004n} \geq 0,96$$

$$1 - 0,96 \geq \frac{0,0475}{0,0004n}$$

$$0,04 \geq \frac{1}{n} \times \frac{0,0475}{0,0004}$$

$$n \geq \frac{0,0475}{0,04 \times 0,0004} \approx 2968,75$$

Taille minimale de l'échantillon : 2969 jeûtes.

Partie B

On choisit au hasard une personne venue un week-end au centre multisport. On note  $T_1$  la variable aléatoire donnant son temps d'attente total en minute avant les accès aux activités sportives pendant la journée du samedi et  $T_2$  la variable aléatoire donnant son temps d'attente total en minutes avant les accès aux activités sportives pendant la journée du dimanche.

On admet que :

- $T_1$  suit une loi de probabilité d'espérance  $E(T_1) = 40$  et d'écart-type  $\sigma(T_1) = 10$ ;
- $T_2$  suit une loi de probabilité d'espérance  $E(T_2) = 60$  et d'écart-type  $\sigma(T_2) = 16$ ;
- les variables aléatoires  $T_1$  et  $T_2$  sont indépendantes.

On note  $T$  la variable aléatoire donnant le temps total d'attente avant les accès aux activités sportives lors des deux jours, exprimé en minute. Ainsi on a  $T = T_1 + T_2$ .

1. Déterminer l'espérance  $E(T)$  de la variable aléatoire  $T$ . Interpréter le résultat dans le contexte de l'exercice.
2. Montrer que la variance  $V(T)$  de la variable aléatoire  $T$  est égale à 356.
3. À l'aide de l'inégalité de Bienaymé-Tchebychev, montrer que, pour une personne choisie au hasard parmi celles venues un week-end au centre multisports, la probabilité que son temps total d'attente  $T$  soit strictement compris entre 60 et 140 minutes est supérieure à 0,77.

**EX 13 :**  $T = T_1 + T_2$

1)  $E(T) = E(T_1 + T_2)$   
 $E(T) = E(T_1) + E(T_2)$

↑ linéarité de l'espérance  $\Rightarrow E(T) = 40 + 60 = 100$

• En moyenne chaque personne attend 100 min au cours du w.e pour l'accès aux activités.

2)  $T = T_1 + T_2$

Donc  $V(T) = V(T_1 + T_2) \stackrel{T_1 \text{ et } T_2 \text{ indep}}{=} V(T_1) + V(T_2)$

$V(T) = (\sigma(T_1))^2 + (\sigma(T_2))^2 = 10^2 + 16^2 = 100 + 256 = 356$

3)  $\forall \delta > 0, P(|T - E(T)| \geq \delta) \leq \frac{V(T)}{\delta^2}$

Donc  $P(60 < T < 140) = P(-40 < T - 100 < 40)$

$P(-40 < T - E(T) < 40) = P(\underbrace{|T - E(T)| < 40}_A)$

Donc  $1 - P(|T - E(T)| \geq 40) (= P(60 < T < 140))$

$\Rightarrow$  Appliquons I.B.T avec  $\delta = 40$

Donc  $P(|T - E(T)| \geq 40) \leq \frac{356}{40^2} = 0,2225$

$1 - P(|T - E(T)| \geq 40) \geq 1 - 0,2225$

$1 - P(|T - E(T)| \geq 40) \geq 1 - 0,2225$

$P(60 < T < 140) \geq 0,7775 \geq 0,77$