

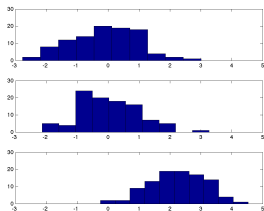
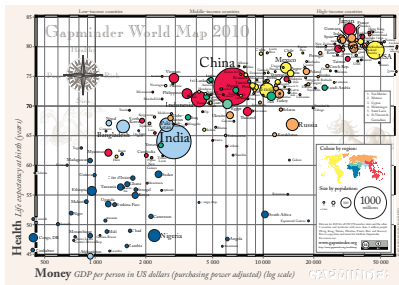
Statistiques descriptives d'un couple de variables

Benoit Gaüzère, Stéphane Canu
benoit.gauzere@insa-rouen.fr

INSA Rouen Normandie - ITI

5 février 2026

Exemples de couples de variables



Les distances de freinage et les consommations d'alcool

Pourquoi étudier un couple de variables ?

- ▶ Y a-t-il des couples aberrants ?
- ▶ Ces deux variables sont-elles liées ou sont-elles indépendantes ?
 - ▶ Quelle est la nature de cette dépendance ?

Plan

Couple de variables continues

- Résumé Statistique

 - Médiane de Tukey

- Mesure de dépendance

 - Coefficient de Corrélation

- Deux variables quantitatives

Couple de variables discrètes

- Cas de deux variable discrètes : tableau de contingence

- Dépendance entre Deux Variables Qualitatives

 - Distance du χ^2

- Deux variables qualitatives

Couple de variable discret/continu

- Cas Mixte

- Résumé Statistique

 - Analyse de la Variance

Conclusion

Tendance centrale

Moyenne

Couple des moyennes (\bar{x}, \bar{y}) :

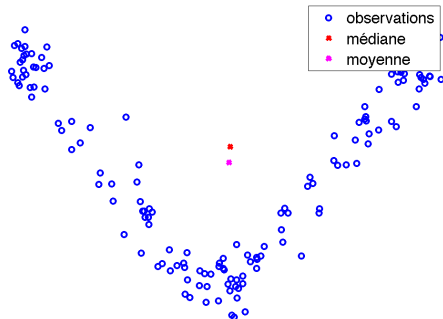
$$\min_{c_1, c_2} \sum_{i=1}^n (x_i - c_1)^2 + (y_i - c_2)^2 = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{z}_i - \mathbf{c}\|^2 \quad \text{avec : } \begin{array}{l} \mathbf{z}_i = (x_i, y_i) \\ \mathbf{c} = (c_1, c_2) \end{array}$$

Médiane composante par composante

Couple des médianes (M_x, M_y) :

$$\min_{c_1, c_2} \sum_{i=1}^n |x_i - c_1| + |y_i - c_2| = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{z}_i - \mathbf{c}\|_1 \quad \text{avec : } \begin{array}{l} \mathbf{z}_i = (x_i, y_i) \\ \mathbf{c} = (c_1, c_2) \end{array}$$

Tendance centrale : illustration 2d



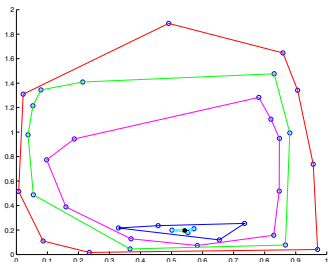
Tendance centrale

Extension au multi-dimensionnel

- ▶ Les concepts de moyenne et médiane définis en 1-D peuvent être adaptées en multi-dimensionnel
- ▶ Attention à l'interprétation !

Alternative

- ▶ Médiane géométrique (point de Toricelli) :
$$\mathbf{c} = \arg \min_{\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n} \|\mathbf{z}_i - \mathbf{c}\|_2$$
- ▶ Médiane de Tukey



Médiane de Tukey

Définition : Médiane de Tukey

C'est le centre de gravité des points de profondeur maximale encore appelé le sous espace médian.

La définition originale est de nature géométrique, elle est complexe mais il existe des algorithmes de calcul rapide.

La méthode des pelures d'oignon

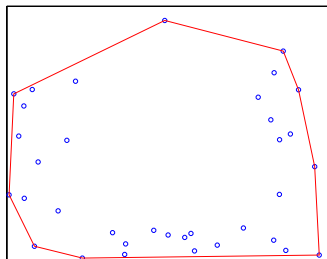
D_k l'ensemble des points de profondeurs k



La notion d'enveloppe convexe

Définition : Enveloppe convexe (Convex hull)

L'enveloppe convexe d'un ensemble de points est le plus petit ensemble convexe qui le contient. Cette enveloppe convexe est un polyèdre convexe dont les sommets sont les points extérieurs.

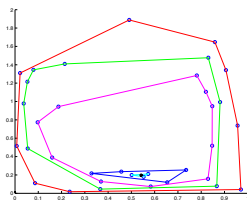
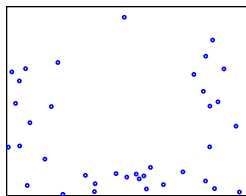


Calcul de la médiane de Tukey

Algorithme du calcul de la Médiane de Tukey

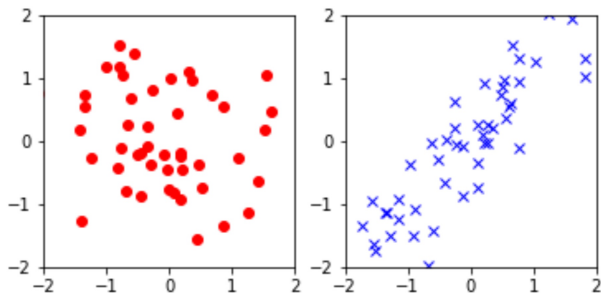
Pour construire la médiane de Tukey on utilise un algorithme de type **épluchage** :

1. Tant qu'il reste des points non étiquetés
 - ▶ Considérons l'**enveloppe convexe** des points non étiquetés
 - ▶ on étiquette les points de cette enveloppe convexe
2. La médiane de Tukey est alors le centre de gravité (la moyenne) du dernier ensemble de points



Mesure de dépendance : motivation

Moyennes et variances égales :



Comment mesurer la dépendance ?

<https://moodle.insa-rouen.fr/mod/url/view.php?id=87762>

Mesure de dépendance : cas des variables quantitatives

Variance empirique

$$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Covariance empirique

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}$$

- Mesure comment les variables évoluent de manière conjointe

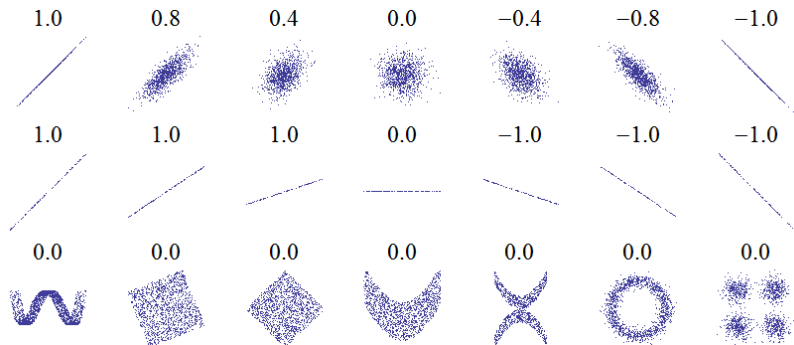
Mesure de dépendance : cas des variables quantitatives

Coefficient de corrélation

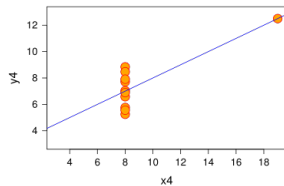
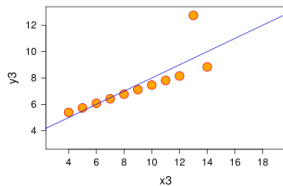
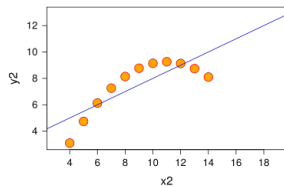
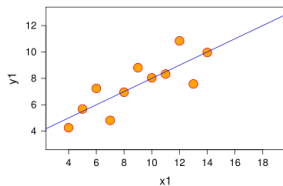
$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i y_i) - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

► $r \in [-1, 1]$

Corrélations

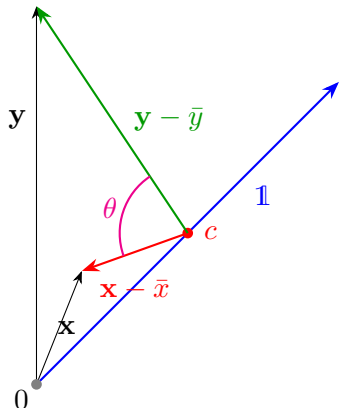


Corrélations



Les quatre exemples ont le même coefficient de corrélation de 0,81
[Tiré de Wikipédia]

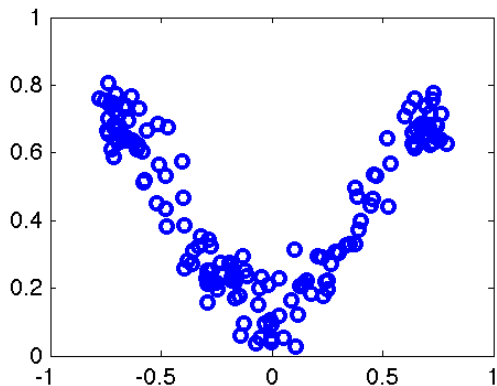
Corrélation : interprétation géométrique



- ▶ $\mathbf{x} = \mathbf{x}_c + \bar{x}\mathbb{1}$: une composante constante ($\bar{x}\mathbb{1}$) + les variations autour de la moyenne ($\mathbf{x}_c = \mathbf{x} - (\bar{x}\mathbb{1})$).
- ▶ $\mathbf{x}_c \in \mathbb{R}^{n-1}$, l'hyperplan orthogonal à $\mathbb{1}$
- ▶ $r \in [-1, 1] = \cos(\theta)$, ou θ c'est l'angle formé par \mathbf{x}_c et \mathbf{y}_c

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\frac{1}{n} \mathbf{x}_c^\top \mathbf{y}_c}{\sqrt{\frac{1}{n}} \|\mathbf{x}_c\| \cdot \sqrt{\frac{1}{n}} \|\mathbf{y}_c\|} = \frac{\mathbf{x}_c^\top \mathbf{y}_c}{\|\mathbf{x}_c\| \cdot \|\mathbf{y}_c\|}$$

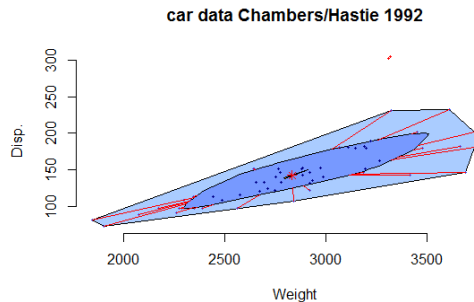
Résumé graphique de deux variables quantitatives



1



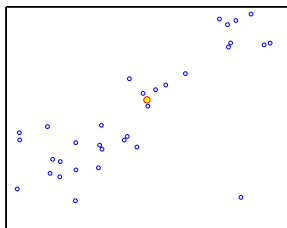
Résumé graphique : Sac à moustache



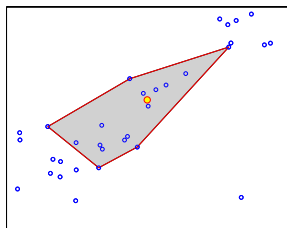
1. Centre (médiane 2d)
2. Boite (sac médian)
3. Épure
4. Moustaches
5. Points aberrant

L'analogie en deux dimensions des boites à moustaches.

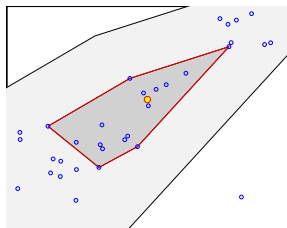
Les étapes du calcul du sac à moustaches



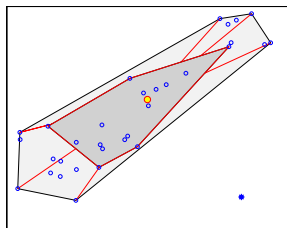
Calcul de la médiane de Tukey



Calcul du sac médian



Calcul de l'épure



Sac à moustaches

Calcul du sac à moustaches

1. Calculer la **médiane 2d** (le barycentre des points de profondeur maximale)
2. Sélectionner les **enveloppes convexes** $\#D_k \leq n/2 \leq \#D_{k-1}$ points les plus proches de la médiane, en dessiner l'enveloppe interpolante. Le résultat est ce qu'on appelle le sac médian (*bag plot* en anglais).
3. Calculer l'épure : l'enveloppe du sac médian "**gonflé**" **trois fois**
4. Dessiner l'enveloppe convexe des points contenus dans l'épure. Il s'agit des points situés à moins de trois fois la distance entre le sac médian et la médiane. Une moustache est associée à chacun des points de cette enveloppe convexe.
5. Les points en dehors de cette dernière enveloppe son marqués comme étant hors épure.

Exemple d'utilisation du sac à moustaches

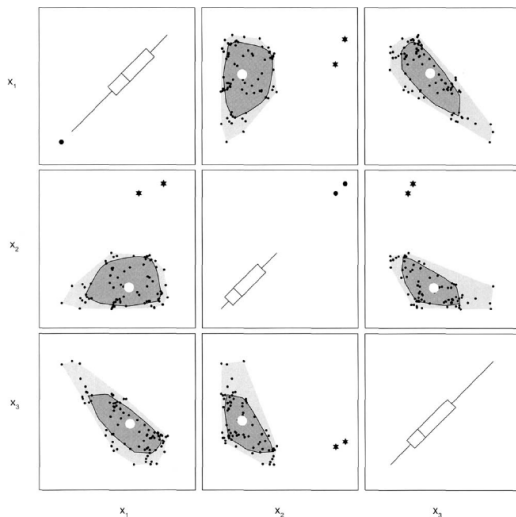


Figure 7. Bagplot matrix of the three-dimensional aquiler data with 85 data points.

Couple de variables discrètes

Résumé statistique : tableau de contingence

Considérons un échantillon où chaque observation est une vente, décrite par deux variables qualitatives : le vendeur et le produit.

Vendeur	Produit
Bob	un pc
Percy	un aspirateur
Percy	une télé
Bob	une télé
Percy	une télé
Bob	un mac
John	un mac
Bob	un lave vaisselle

⇒

Résumé statistique : tableau de contingence

Considérons un échantillon où chaque observation est une vente, décrite par deux variables qualitatives : le vendeur et le produit.

Vendeur	Produit
Bob	un pc
Percy	un aspirateur
Percy	une télé
Bob	une télé
Percy	une télé
Bob	un mac
John	un mac
Bob	un lave vaisselle

⇒

	Bob	Percy	John
télévision	1	2	0
ordinateurs	2	0	1
aspirateurs	0	1	0
lave vaisselle	0	1	0

Tableau de Contingence

Tableau de contingence

Définition : Tableau de contingence

Soit X une variable discrète à ℓ modalités et Y une variable discrète à k modalités. Soit

$$S_n = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)\}$$

un échantillon de n observations.

On appelle **Tableau de contingence** de l'échantillon S_n le tableau N de ℓ lignes et k colonnes dont le terme général N_{ij} désigne le nombre d'individus présentant conjointement les modalités a_i pour X et b_j pour Y .

Effectifs marginaux d'un tableau de contingence

Définition : Effectif marginal

L'effectif marginal $n_{i\bullet}$ ($n_{\bullet j}$) d'une modalité d'un tableau de contingence de taille n est le nombre d'individus dans l'échantillon pour lesquels on a observé la modalité a_i (b_j)

▶ Ligne :

$$n_{i\bullet} = \sum_{j=1}^k n_{ij}$$

▶ Colonne :

$$n_{\bullet j} = \sum_{i=1}^{\ell} n_{ij}$$

▶ Total :

$$n = \sum_{i=1}^{\ell} \sum_{j=1}^k n_{ij}$$

Modalités	b_1	b_2	\dots	b_j	\dots	b_k	marge
a_1	n_{11}	n_{12}	\dots	n_{1j}	\dots	n_{1k}	$n_{1\bullet}$
\vdots	\vdots					\vdots	\vdots
a_i	n_{i1}	n_{i2}	\dots	n_{ij}	\dots	n_{ik}	$n_{i\bullet}$
\vdots						\vdots	\vdots
a_{ℓ}	$n_{\ell 1}$	$n_{\ell 2}$	\dots	$n_{\ell j}$	\dots	$n_{\ell k}$	$n_{\ell \bullet}$
marge	$n_{\bullet 1}$	$n_{\bullet 2}$	\dots	$n_{\bullet j}$	\dots	$n_{\bullet k}$	$n_{\bullet \bullet} = n$

Définition : Fréquence

La fréquence $f_{ij} = \frac{n_{ij}}{n}$, c'est un estimateur de la probabilité jointe $\mathbb{P}(a_i, b_j)$.

Par construction, nous avons $\sum_{i=1}^{\ell} \sum_{j=1}^k f_{ij} = 1$ et $0 \leq f_{ij} \leq 1$.

Exemple de tableau de contingence

Marges et fréquences

	Bob	Percy	John
TV	12	21	12
PC	21	12	14
VC	22	31	14
LV	4	17	5

Exemple de tableau de contingence

Marges et fréquences

	Bob	Percy	John	Marge
TV	12	21	12	45
PC	21	12	14	47
VC	22	31	14	67
LV	4	17	5	26
Marge	59	81	45	185

Exemple de tableau de contingence

Marges et fréquences

Tableau de Contingence avec Fréquences

	Bob	Percy	John	Fréquences
TV	$\frac{12}{185}$	$\frac{21}{185}$	$\frac{12}{185}$	$\frac{45}{185}$
PC	$\frac{21}{185}$	$\frac{12}{185}$	$\frac{14}{185}$	$\frac{47}{185}$
VC	$\frac{22}{185}$	$\frac{31}{185}$	$\frac{14}{185}$	$\frac{67}{185}$
LV	$\frac{4}{185}$	$\frac{17}{185}$	$\frac{5}{185}$	$\frac{26}{185}$
Fréquences	$\frac{59}{185}$	$\frac{81}{185}$	$\frac{45}{185}$	$\frac{185}{185} = 1$

Mesure de dépendance entre variables qualitatives

Variables indépendantes

$$\mathbb{P}(x, y) = \mathbb{P}(x)\mathbb{P}(y)$$

Mesure du degré d'indépendance entre deux variables

Distance du χ^2 entre la distribution empirique observée et celle théorique calculée en faisant l'hypothèse d'indépendance sur le tableau de contingence.

	Bob	Percy	John
TV	12	21	12
PC	21	12	14
VC	22	31	14
LV	4	17	5

Mesure de dépendance entre variables qualitatives

Variables indépendantes

$$\mathbb{P}(x, y) = \mathbb{P}(x)\mathbb{P}(y)$$

Mesure du degré d'indépendance entre deux variables

Distance du χ^2 entre la distribution empirique observé et celle théorique calculée en faisant l'hypothèse d'indépendance sur le tableau de contingence.

	Bob	Percy	John	
TV	12	21	12	45
PC	21	12	14	47
VC	22	31	14	67
LV	4	17	5	26
	59	81	45	185

Mesure de dépendance entre variables qualitatives

Variables indépendantes

$$\mathbb{P}(x, y) = \mathbb{P}(x)\mathbb{P}(y)$$

Mesure du degré d'indépendance entre deux variables

Distance du χ^2 entre la distribution empirique observée et celle théorique calculée en faisant l'hypothèse d'indépendance sur le tableau de contingence.

	Bob	Percy	John	
TV	12	21	12	45
PC	21	12	14	47
VC	22	31	14	67
LV	4	17	5	26
	59	81	45	185

	Bob	Percy	John
TV	14.35	19.70	10.94
PC	14.98	20.57	11.43
VC	21.36	29.33	16.29
LV	8.29	11.38	6.32

$$\mathbb{P}(TV, Bob) = \frac{59}{185} * \frac{45}{185} \simeq 0.07$$

effectif théorique : $\mathbb{P}(TV, Bob) * 185 \simeq 14.35$

Distance du χ^2

Définition : Distance du χ^2

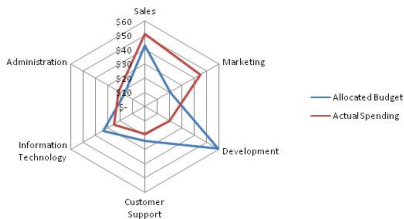
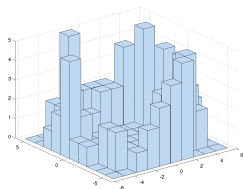
On appelle distance du χ^2 du tableau de contingence n :

$$D_{\chi^2}(X, Y) = \sum_{i \in \Omega_x} \sum_{j \in \Omega_y} \frac{(n_{ij} - n_{i\bullet}n_{\bullet j}/n)^2}{n_{i\bullet}n_{\bullet j}/n} = n \sum_{i \in \Omega_x} \sum_{j \in \Omega_y} \frac{(\hat{P}_{ij} - \hat{P}_i \hat{P}_j)^2}{\hat{P}_i \hat{P}_j}$$

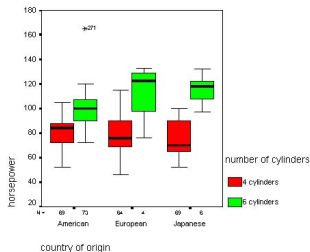
- ▶ $\hat{P}_{ij} = n_{ij}/n$: fréquence empirique de la loi jointe
- ▶ $\hat{P}_i = n_{i\bullet}/n$, $\hat{P}_j = n_{\bullet j}/n$: Distributions marginales empiriques
- ▶ $D_{\chi^2}(X, Y) = \frac{(12-14.35)^2}{14.35} + \dots$
- ▶ À comparer avec des distances de référence (on verra ça plus tard)

Résumé graphique de deux variables qualitatives

Histogrammes 2d, diagramme de Kiviati (radar, star, ou spider charts)



et boîtes à moustaches



De la variable continue à la pseudo-variable

Pourquoi discrétiser ?

Transformer une variable $X \in \mathbb{R}$ en une variable qualitative Y à k modalités pour :

- ▶ Utiliser des tableaux de contingence et le test du χ^2 .
- ▶ Simplifier l'interprétation (ex : transformer l'âge en "Tranches d'âge").

Méthodes de découpage

- ▶ **Effectifs égaux (Quantiles)** : Chaque classe contient n/k individus. Maximise la robustesse statistique.
- ▶ **Amplitudes égales** : Les bornes sont régulièrement espacées. Plus intuitif mais sensible aux queues de distribution.

Le danger : Perte d'information

La discrétisation réduit la variance. Le choix du nombre de classes k est crucial pour ne pas masquer la structure des données.

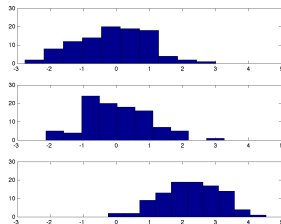
Cas mixte : une variable
discrète et l'autre continue

Cas mixte : une variable discrète et l'autre continue

Performances de conduite pour trois groupes de personnes

Mesure de la distance de freinage pour 3 groupes de personnes : à jeun, a bu une bière (G1) et a bu trois verres de vin (G2).

Observation	À jeun	G. 1	G. 2
1	22 m	21 m	27 m
2	20 m	24 m	24 m
⋮	⋮	⋮	⋮
n	19 m	22 m	31 m
moyenne	20,9	22,5	28,3
variance	4,32	5,18	5,87



- ▶ Effet de la variable qualitative ?
- ▶ Le codage des variables a un effet.

Analyse de la Variance (ANOVA) I

Idée principale : Décomposer la variance¹ d'une variable quantitative Y en une part expliquée par une variable qualitative X et une part résiduelle.

Décomposition de la variance

- ▶ X : variable qualitative Y : variable quantitative
- ▶ y_{ij} : i -ème valeur de la modalité j de X

Variance totale

$$s^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{j \in \Omega_x} \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y})^2 = s_{\text{inter}}^2 + s_{\text{intra}}^2$$

Variance intra-classe

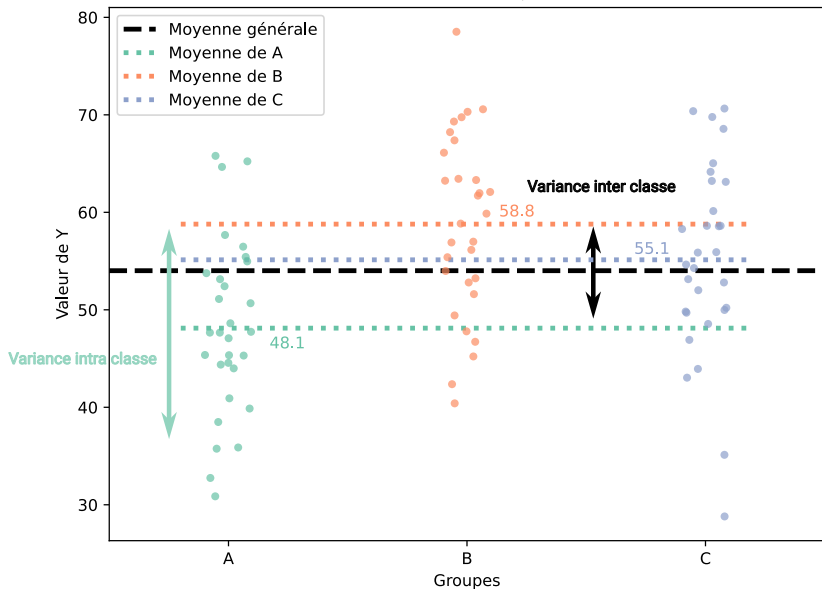
$$s_{\text{intra}}^2 = \sum_{j \in \Omega_x} \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$$

Variance inter-classe

$$s_{\text{inter}}^2 = \sum_{j \in \Omega_x} n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2$$

1. On considère la variance sans le facteur $\frac{1}{n}$ pour la lisibilité des formules

Illustration de la variance totale, inter et intra-classe



Interprétation : Plus la variance inter-classe est grande par rapport à la variance intra-classe, plus X a un impact sur Y.

Mesure de la dépendance : Le rapport de corrélation

Objectif : Évaluer dans quelle mesure X explique la variance de Y .

Rapport de corrélation

► Définition :

$$\eta_{Y/X}^2 = \frac{s_{\text{inter}}^2}{s^2} = \frac{\sum_{j \in \Omega_x} n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

► **Propriétés** :

- $\eta_{Y/X}^2 \in [0, 1]$
- $\eta_{Y/X}^2 = 1$: Toute la variance de Y est expliquée par X (relation parfaite).
- $\eta_{Y/X}^2 = 0$: X n'explique rien de la variance de Y (indépendance totale).
- Augmente avec $p = \text{card}(\Omega_x)$ (nombre de modalités de X).

Attention : Plus p est grand, plus η^2 peut être biaisé vers des valeurs élevées. Il existe des alternatives.

En résumé

Mesure de dépendance : Résumé

X	Y	Exemple	étude de la dépendance ?
continue	continue	poids/taille	corrélation
continue	discrète	poids/varieté	analyse de la variance
discrète	discrète	nombre d'enfants / PCS	distance du χ^2

► Corrélation :
$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y}$$

► Analyse de la variance :
$$s_{Y/X}^2 = \frac{\sum_{j \in \Omega_x} n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

► Distance du χ^2 :
$$D_{\chi^2}(X, Y) = \sum_{i \in \Omega_x} \sum_{j \in \Omega_y} \frac{(n_{ij} - n_{i \bullet} n_{\bullet j} / n)^2}{(n_{i \bullet} n_{\bullet j}) / n}$$

Conclusion

Tableau

- ▶ Qualitative et quantitative discrète : Tableau de contingence
- ▶ Quantitative (continue) : pseudo variables

Résumé quantitatif

- ▶ ordre 1 : centre
- ▶ ordre 2 : corrélation, ANOVA et χ^2
- ▶ 2D est différent de 1D

Résumé qualitatif (graphique)

- ▶ Qualitative et quantitative discrète : histogramme
- ▶ Quantitative qualitative : diagramme de Kiviat
- ▶ Quantitative (continue) : nuage de points et bag plot.