

Millot

# Comprendre et réaliser les tests statistiques à l'aide de R

Manuel de biostatistique

4<sup>e</sup> édition

A large, 3D, light-colored letter 'R' is positioned in the center of the cover. It is set against a dark blue background that features a network of glowing blue lines and dots, resembling a molecular or data network structure.

deboeck **B**  
SUPÉRIEUR

**NOTO**  
VERSION NUMÉRIQUE  
**OFFERTE**

# SOMMAIRE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ABREVIATIONS ET SYMBOLES .....</b>                                     | <b>15</b> |
| <b>CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE R .....</b>                               | <b>17</b> |
| <b>1.1. Introduction .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>1.2. Installation et description de l'interface R classique.....</b>   | <b>17</b> |
| 1.2.1. Installation de R sous Windows et macOS .....                      | 17        |
| 1.2.2. Installation de <i>packages</i> .....                              | 18        |
| 1.2.3. Récupérer des manuels d'aide .....                                 | 20        |
| 1.2.4. Découverte .....   | 20        |
| <b>1.3. Installation et description de RStudio .....</b>                  | <b>22</b> |
| 1.3.1. Installation .....   | 22        |
| 1.3.2. Console (panneau inférieur gauche) .....                           | 23        |
| 1.3.3. Panneau d'édition (supérieur gauche) .....                         | 24        |
| 1.3.4. Panneau "environnement et historique" (supérieur droit) .....      | 24        |
| 1.3.5. Panneau d'outils (inférieur droit) .....                           | 25        |
| 1.3.5.1. Onglet <i>Files</i> .....  | 25        |
| 1.3.5.2. Onglet <i>Plots</i> .....  | 26        |
| 1.3.5.3. Onglet <i>Packages</i> .....                                     | 26        |
| 1.3.5.4. Onglet <i>Help</i> .....   | 28        |
| 1.3.5.5. Onglet <i>Viewer</i> .....                                       | 28        |
| <b>1.4. Description des principaux attributs de R .....</b>               | <b>28</b> |
| 1.4.1. L'instruction .....  | 28        |
| 1.4.2. Les objets .....   | 29        |
| 1.4.2.1. Les objets de données .....                                      | 29        |
| 1.4.2.2. Les fonctions .....  | 30        |
| 1.4.3. Les opérateurs .....   | 32        |
| 1.4.4. Les attributs spéciaux .....                                       | 33        |
| <b>1.5. Premiers pas : R est une calculatrice.....</b>                    | <b>34</b> |
| <b>1.6. Manipulation des objets de données .....</b>                      | <b>34</b> |
| 1.6.1. Création d'objets de données.....                                  | 34        |
| 1.6.1.1. Création par écriture .....                                      | 35        |
| 1.6.1.2. Création par importation de fichiers .....                       | 42        |
| 1.6.1.3. Création par utilisation du tableur de R .....                   | 46        |
| 1.6.2. Description d'un objet de données .....                            | 47        |
| 1.6.2.1. La fonction <code>length()</code> .....                          | 47        |
| 1.6.2.2. La fonction <code>mode()</code> .....                            | 48        |
| 1.6.2.3. La fonction <code>typeof()</code> .....                          | 49        |
| 1.6.2.4. La fonction <code>class()</code> .....                           | 50        |
| 1.6.2.5. La fonction <code>str()</code> .....                             | 51        |
| 1.6.2.6. La fonction <code>attributes()</code> .....                      | 52        |
| 1.6.2.7. La fonction <code>summary()</code> .....                         | 53        |
| 1.6.3. Analyse et modification des données dans un objet de données ..... | 55        |
| 1.6.3.1. Vecteurs .....   | 55        |
| 1.6.3.2. Matrices .....   | 56        |
| 1.6.3.3. Data frames .....  | 61        |
| 1.6.3.4. Listes .....   | 69        |
| 1.6.3.5. Facteurs .....   | 73        |
| 1.6.3.6. Tables .....   | 76        |
| <b>1.7. Notion d'import et export .....</b>                               | <b>78</b> |
| 1.7.1. Sauver des lignes de code et les réimporter dans RStudio .....     | 78        |
| 1.7.2. <i>Sourcer</i> du code .....                                       | 79        |

|   |            |
|---|------------|
| 1.7.3. Exporter des données au format texte, csv, etc. ....                               | 79         |
| 1.7.4. Sauvegarder et réimporter des objets de données au format R .....                  | 81         |
| <b>1.8. Fonctions de statistique descriptive .....</b>                                    | <b>82</b>  |
| <b>1.9. Manipuler les instructions conditionnelles ou répétées en boucles .....</b>       | <b>85</b>  |
| 1.9.1. Attributs de condition .....   | 85         |
| 1.9.2. Attributs de répétition .....  | 87         |
| <b>1.10. Graphiques .....</b>   | <b>90</b>  |
| 1.10.1. Découverte de la fenêtre graphique .....  | 90         |
| 1.10.2. Différents types de graphique .....   | 91         |
| 1.10.2.1. Description des fonctions classiques .....                                      | 91         |
| 1.10.2.2. Arguments communs de ces fonctions .....  | 97         |
| 1.10.3. Ajout d'éléments sur un graphique.....  | 99         |
| 1.10.4. Paramètres graphiques .....   | 99         |
| 1.10.5. Manipulation des polices de caractères.....                                       | 103        |
| 1.10.6. Manipulation des couleurs .....   | 109        |
| 1.10.7. Tracer plusieurs graphiques côte à côte dans une même fenêtre.....                | 123        |
| 1.10.8. Gérer plusieurs fenêtres graphiques .....   | 125        |
| 1.10.8.1. Interface R classique.....  | 125        |
| 1.10.8.2. Interface RStudio .....   | 126        |
| 1.10.9. Exporter un graphique.....  | 128        |
| 1.10.9.1. Interface R classique.....  | 128        |
| 1.10.9.2. Interface RStudio .....   | 130        |
| 1.10.10. Le <i>package ggplot2</i> .....  | 130        |
| 1.10.10.1. Présentation de l'approche graphique .....                                     | 130        |
| 1.10.10.2. Syntaxe .....  | 134        |
| 1.10.10.3. Exemples de graphiques .....   | 138        |
| 1.10.10.4. la fonction <code>qplot()</code> .....   | 157        |
| 1.10.10.5. Comment gérer les graphiques classiques de R avec ceux de <i>ggplot2</i> ..... | 159        |
| <b>1.11. Création de fonctions .....</b>  | <b>160</b> |
| 1.11.1. Notions de base.....  | 160        |
| 1.11.2. Récupération des résultats générés par <code>function() {}</code> .....           | 163        |
| 1.11.3. Fonctions avec arguments.....   | 164        |
| 1.11.4. Création d'opérateurs .....   | 170        |
| 1.11.5. Notion d'environnement.....   | 170        |
| 1.11.6. Fonctions primitives et fonctions clôtures .....                                  | 180        |
| 1.11.7. Accès au code des fonctions prédéfinies de R .....                                | 183        |
| 1.11.8. Toute action dans R fait appel à une fonction.....                                | 187        |
| <b>1.12. Exercices .....</b>  | <b>187</b> |
| <b>1.13. Correction des exercices .....</b>   | <b>189</b> |
| <b>CHAPITRE 2 : NOTIONS DE BASE DE LA STATISTIQUE .....</b>                               | <b>197</b> |
| <b>2.1. Introduction .....</b>  | <b>197</b> |
| <b>2.2. Définitions de la statistique, de la population et de l'échantillon .....</b>     | <b>198</b> |
| <b>2.3. L'individu.....</b>   | <b>200</b> |
| <b>2.4. Les variables aléatoires.....</b>   | <b>201</b> |
| 2.4.1. Définition.....  | 201        |
| 2.4.2. Deux types de variables aléatoires.....  | 205        |
| 2.4.2.1. Variable quantitative.....   | 205        |
| 2.4.2.2. Variable qualitative.....  | 205        |

|   |            |
|---|------------|
| 2.4.3. Particularités de certaines variables qualitatives .....                               | 206        |
| 2.4.3.1. Exclusivité des classes .....  | 206        |
| 2.4.3.2. Classes appariées .....  | 207        |
| 2.4.3.3. Cas des variables fixées .....   | 208        |
| 2.4.4. Observer la distribution des valeurs d'une variable quantitative : l'histogramme ..... | 210        |
| 2.4.4.1. Choix du nombre de classes .....   | 210        |
| 2.4.4.2. Fixer l'intervalle des classes .....   | 210        |
| 2.4.4.3. Ordonnée en effectif, proportion ou densité .....                                    | 211        |
| 2.4.4.4. La fonction <code>hist()</code> de R .....   | 212        |
| 2.4.5. Observer la distribution des valeurs d'une variable qualitative .....                  | 214        |
| 2.4.6. Limite entre l'aspect quantitatif et qualitatif d'une variable .....                   | 215        |
| <b>2.5. Les différents types de tableaux de données .....</b>                                 | <b>218</b> |
| 2.5.1. Cas standard .....   | 218        |
| 2.5.2. Le tableau disjonctif complet pour les variables qualitatives .....                    | 218        |
| 2.5.3. Le tableau de contingence pour une ou deux variables qualitatives .....                | 219        |
| <b>2.6. Avant d'entreprendre toute analyse statistique : la check-list .....</b>              | <b>220</b> |
| <b>2.7. Les paramètres de statistique descriptive les plus employés .....</b>                 | <b>221</b> |
| 2.7.1. La moyenne et la médiane .....   | 221        |
| 2.7.2. Les quantiles .....  | 223        |
| 2.7.3. La variance, l'écart type et le coefficient de variation .....                         | 223        |
| 2.7.4. La covariance .....  | 224        |
| 2.7.5. Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson .....                                | 227        |
| <b>2.8. Exercices .....</b>   | <b>229</b> |
| <b>2.9. Corrections des exercices .....</b>   | <b>230</b> |
| <b>CHAPITRE 3 : DEMARCHE SCIENTIFIQUE ET ERREURS ASSOCIEES .....</b>                          | <b>236</b> |
| <b>3.1. Formulation de la question scientifique .....</b>                                     | <b>236</b> |
| 3.1.1. Décalage entre la question posée et l'approche envisagée .....                         | 236        |
| 3.1.2. Faits supposés avérés .....  | 237        |
| <b>3.2. Organisation de l'étude scientifique .....</b>  | <b>238</b> |
| 3.2.1. Individus non semblables .....   | 238        |
| 3.2.2. Conditions environnementales non semblables .....                                      | 239        |
| <b>3.3. Interprétation du résultat .....</b>  | <b>242</b> |
| <b>3.4. La gestion des individus extrêmes (<i>outliers</i> en anglais) .....</b>              | <b>243</b> |
| <b>3.5. Conclusion .....</b>  | <b>245</b> |
| <b>CHAPITRE 4 : LES ETAPES D'UN TEST STATISTIQUE .....</b>                                    | <b>246</b> |
| <b>4.1. Introduction à lire avant de se lancer dans ce chapitre .....</b>                     | <b>246</b> |
| <b>4.2. Les deux hypothèses statistiques .....</b>  | <b>248</b> |
| <b>4.3. La Variable de Test (VT) .....</b>  | <b>250</b> |
| 4.3.1. Définition .....   | 250        |
| 4.3.2. Différents types de VT .....   | 250        |
| 4.3.2.1. Tests paramétriques et non paramétriques .....                                       | 251        |
| 4.3.2.2. Estimateur et VT .....   | 252        |
| 4.3.2.3. VT et distribution de probabilité .....  | 252        |
| <b>4.4. Distributions de probabilité .....</b>  | <b>253</b> |
| 4.4.1. Définition de la distribution de probabilité et de la loi de probabilité .....         | 253        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.4.2. Paramètres d'une distribution de probabilité.....  | 253        |
| 4.4.2.1. Cas des variables discrètes : quantile, probabilité et fonction de répartition .....   | 253        |
| 4.4.2.2. Cas des variables continues : quantile, densité de probabilité et fonction de répartition. ....  | 255        |
| 4.4.2.3. Calcul de la probabilité de voir apparaître une valeur de variable continue .....  | 257        |
| 4.4.3. Comment utiliser les distributions de probabilité connues avec R.....  | 260        |
| 4.4.4. Différentes lois de probabilité discrètes.....   | 261        |
| 4.4.4.1. Loi binomiale.....   | 261        |
| 4.4.4.2. Loi multinomiale .....   | 267        |
| 4.4.4.3. Loi de Pascal et loi binomiale négative .....  | 269        |
| 4.4.4.4. Loi géométrique.....   | 272        |
| 4.4.4.5. Loi hypergéométrique.....  | 274        |
| 4.4.4.6. Loi de Poisson .....   | 276        |
| 4.4.5. Différentes lois de probabilité continues.....   | 278        |
| 4.4.5.1. Loi normale ou de Laplace-Gauss .....  | 278        |
| 4.4.5.2. Loi normale centrée réduite .....  | 282        |
| 4.4.5.3. Loi exponentielle .....  | 285        |
| 4.4.5.4. Loi gamma.....   | 286        |
| 4.4.5.5. Loi de $\chi^2$ .....  | 289        |
| 4.4.5.6. Loi de Fisher-Snedecor.....  | 291        |
| 4.4.5.7. Loi de Student.....  | 294        |
| 4.4.6. Distributions de probabilité qui ne suivent pas de loi connue.....   | 296        |
| 4.4.6.1. Distribution de probabilité de Mann-Whitney .....  | 296        |
| 4.4.6.2. Distribution de probabilité de Wilcoxon.....   | 301        |
| 4.4.6.3. Distribution de probabilité du test des signes de Wilcoxon.....  | 307        |
| 4.4.7. Rapport entre toutes ces distributions de probabilité .....  | 312        |
| 4.4.8. Remarques importantes.....   | 313        |
| 4.4.8.1. Ne pas confondre la loi de probabilité d'une variable mesurée et celle d'une VT.....   | 313        |
| 4.4.8.2. Simulation avec R de la fluctuation d'une VT due à l'échantillonnage.....  | 314        |
| 4.4.8.3. Importance du tirage aléatoire des individus dans la formation de l'échantillon .....  | 317        |
| <b>4.5. Hypothèse <math>H_0</math>, distribution de probabilité de la VT et échantillon : le cocktail magique de l'obtention de la <math>p</math> value .....</b> | <b>318</b> |
| <b>4.6. Conclusion d'un test statistique et les deux risques d'erreurs associés.....</b>  | <b>321</b> |
| 4.6.1. Conclure, c'est deux vérités, deux décisions soit quatre probabilités.....   | 321        |
| 4.6.2. L'hypothèse $H_0$ et le risque $\alpha$ : définitions.....   | 323        |
| 4.6.3. La correction de la $p$ value ou du seuil de rejet $\alpha$ .....  | 325        |
| 4.6.3.1. Le problème soulevé.....   | 325        |
| 4.6.3.2. La technique de Bonferroni .....   | 328        |
| 4.6.3.3. La technique séquentielle (Holm).....  | 329        |
| 4.6.3.4. La méthode de Benjamini & Hochberg (BH) .....  | 331        |
| 4.6.3.5. Quand appliquer la correction ?.....   | 332        |
| 4.6.3.6. Comment choisir la méthode de correction à appliquer ?.....  | 335        |
| 4.6.4. L'hypothèse $H_1$ et son influence sur le risque $\alpha$ .....  | 335        |
| 4.6.4.1. Le problème de l'hypothèse $H_1$ .....   | 335        |
| 4.6.4.2. Test bilatéral et unilatéral .....   | 336        |
| 4.6.4.3. Obtenir la $p$ value en test bilatéral et unilatéral .....   | 339        |
| 4.6.4.4. Placer les seuils $\alpha$ de rejet en test bilatéral et unilatéral .....  | 342        |
| 4.6.4.5. Comment choisir entre test bilatéral et unilatéral ?.....  | 347        |
| 4.6.5. Le risque $\beta$ et la puissance $1-\beta$ du test .....  | 348        |
| 4.6.5.1. Retour sur les définitions du risque $\beta$ et de la puissance $1-\beta$ .....  | 349        |
| 4.6.5.2. Variations de $\beta$ et $1-\beta$ suivant la distribution de probabilité de la VT sous $H_1$ .....  | 349        |
| 4.6.6. $\alpha$ et $\beta$ en termes de faux positifs et faux négatifs .....  | 355        |
| 4.6.7. Propriétés de la puissance $1-\beta$ .....   | 357        |
| 4.6.7.1. A lire avant de se lancer dans ce paragraphe .....   | 357        |
| 4.6.7.2. La puissance d'un test diminue quand décroît le $\alpha_{\text{seuil}}$ .....  | 357        |
| 4.6.7.3. La puissance d'un test croît quand augmente l'effectif $n$ de l'échantillon .....  | 359        |
| 4.6.7.4. La puissance d'un test augmente avec l'écart entre les paramètres testés.....  | 365        |
| 4.6.8. Le danger de considérer la $p$ value comme un indicateur de forte ou faible significativité .....  | 367        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.6.9. Alors comment fixer la puissance d'un test ? .....                                 | 369        |
| 4.6.9.1. Considérations générales .....   | 369        |
| 4.6.9.2. Réaliser des abaques .....   | 371        |
| 4.6.9.3. Les fonctions disponibles sous R.....  | 373        |
| 4.6.9.4. Le ncp des lois de probabilité de VT sous R .....                                | 375        |
| 4.6.10. Comment conclure finalement ? .....   | 379        |
| <b>4.7. Récapitulation.....</b>   | <b>381</b> |
| <b>4.8. Exercices .....</b>   | <b>382</b> |
| <b>4.9. Correction des exercices .....</b>  | <b>385</b> |
| <b>CHAPITRE 5 : LES TESTS STATISTIQUES .....</b>  | <b>401</b> |
| <b>5.1. A lire absolument avant d'utiliser un test .....</b>                              | <b>401</b> |
| <b>5.2. Quel test appliquer et quelle fonction de R utiliser ? .....</b>                  | <b>410</b> |
| <i>Comparaison d'effectifs et de proportions.....</i>                                     | <i>413</i> |
| <b>5.3. <math>\chi^2</math> de conformité.....</b>  | <b>414</b> |
| 5.3.1. Méthode .....  | 414        |
| 5.3.2. Exemple avec R .....   | 418        |
| 5.3.3. Tests de comparaisons deux à deux .....  | 425        |
| <b>5.4. <math>\chi^2</math> d'homogénéité .....</b>                                       | <b>429</b> |
| 5.4.1. Méthode .....  | 429        |
| 5.4.2. Exemples avec R.....   | 435        |
| 5.4.3. Tests de comparaisons deux à deux .....  | 444        |
| <b>5.5. Test G .....</b>  | <b>447</b> |
| 5.5.1. Méthode .....  | 447        |
| 5.5.2. Exemples avec R.....   | 450        |
| 5.5.3. Tests de comparaisons deux à deux .....  | 451        |
| <b>5.6. Test exact de Fisher.....</b>   | <b>454</b> |
| 5.6.1. Tableau de contingence $2 \times 2$ .....  | 454        |
| 5.6.1.1. Méthode .....  | 454        |
| 5.6.1.2. Exemples avec R .....  | 460        |
| 5.6.2. Tableau de contingence $c \times k$ .....  | 471        |
| 5.6.2.1. Méthode .....  | 471        |
| 5.6.2.2. Exemple avec R.....  | 472        |
| 5.6.2.3. Tests de comparaisons deux à deux .....  | 474        |
| <b>5.7. Test de Mantel-Haenszel.....</b>  | <b>476</b> |
| 5.7.1. Méthode .....  | 476        |
| 5.7.2. Exemples avec R.....   | 482        |
| 5.7.3. Tests de comparaisons deux à deux .....  | 489        |
| <b>5.8. Comparaison d'une proportion observée à une proportion théorique.....</b>         | <b>491</b> |
| 5.8.1. Méthode .....  | 491        |
| 5.8.2. Exemples avec R.....   | 494        |
| <b>5.9. Comparaison de deux proportions observées .....</b>                               | <b>505</b> |
| 5.9.1. Méthode .....  | 505        |
| 5.9.2. Exemples avec R.....   | 509        |
| <b>5.10. Comparaison de deux proportions en séries appariées (test de Mac Nemar).....</b> | <b>514</b> |
| 5.10.1. Méthode .....   | 514        |
| 5.10.2. Exemples avec R.....  | 519        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>5.11. Comparaison de plusieurs proportions observées.....</b>   | <b>525</b> |
| 5.11.1. Méthode.....   | 525        |
| 5.11.2. Exemple avec R.....  | 528        |
| 5.11.3. Tests de comparaisons deux à deux.....   | 532        |
| <b>5.12. Comparaison de plusieurs proportions observées à plusieurs proportions théoriques.....</b>        | <b>537</b> |
| 5.12.1. Méthode.....   | 537        |
| 5.12.2. Exemple avec R.....  | 540        |
| 5.12.3. Tests de comparaisons deux à deux.....   | 544        |
| <b><i>Comparaison de moyennes</i>.....</b>   | <b>545</b> |
| <b>5.13. Le test t de Student de comparaison de moyennes.....</b>  | <b>546</b> |
| 5.13.1. Comparaison d'une moyenne observée à une valeur théorique.....                                     | 546        |
| 5.13.1.1. Méthode.....   | 546        |
| 5.13.1.2. Exemples avec R.....   | 548        |
| 5.13.2. Comparaison de deux moyennes observées.....  | 554        |
| 5.13.2.1. Méthode.....   | 554        |
| 5.13.2.2. Exemple avec R.....  | 557        |
| 5.13.3. Comparaison de deux moyennes observées avec variances différentes (test de Welch).....             | 560        |
| 5.13.3.1. Méthode.....   | 560        |
| 5.13.3.2. Exemples avec R.....   | 561        |
| 5.13.4. Comparaison de deux moyennes observées en séries appariées.....                                    | 567        |
| 5.13.4.1. Méthode.....   | 567        |
| 5.13.4.2. Exemple avec R.....  | 570        |
| <b>5.14. Comparaison d'au moins deux moyennes observées.....</b>   | <b>575</b> |
| 5.14.1. Anova (analyse de variances à un facteur).....   | 575        |
| 5.14.1.1. Méthode.....   | 575        |
| 5.14.1.2. Exemple avec R.....  | 580        |
| 5.14.2. Anova avec variances différentes (correction de Welch).....  | 583        |
| 5.14.2.1. Méthode.....   | 583        |
| 5.14.2.2. Exemple avec R.....  | 584        |
| 5.14.3. Tests de comparaisons deux à deux.....   | 587        |
| <b><i>Comparaison de médianes</i>.....</b>   | <b>590</b> |
| <b>5.15. Comparaison d'une médiane observée à une valeur théorique (test des signes de Wilcoxon).....</b>  | <b>591</b> |
| 5.15.1. Méthode.....   | 591        |
| 5.15.2. Exemples avec R.....   | 597        |
| <b>5.16. Comparaison de deux médianes observées (test de Mann-Whitney-Wilcoxon).....</b>                   | <b>605</b> |
| 5.16.1. Méthode.....   | 605        |
| 5.16.2. Exemples avec R.....   | 614        |
| <b>5.17. Comparaison de deux médianes observées en séries appariées (test des signes de Wilcoxon).....</b> | <b>623</b> |
| 5.17.1. Méthode.....   | 623        |
| 5.17.2. Exemples avec R.....   | 632        |
| <b>5.18. Comparaison d'au moins deux médianes observées.....</b>   | <b>640</b> |
| 5.18.1. Test de Kruskal-Wallis.....  | 640        |
| 5.18.1.1. Méthode.....   | 640        |
| 5.18.1.2. Exemple avec R.....  | 644        |
| 5.18.1.3. Tests de comparaisons deux à deux.....   | 650        |
| 5.18.2. Test des médianes.....   | 653        |
| 5.18.2.1. Méthode.....   | 653        |
| 5.18.2.2. Exemple avec R.....  | 657        |
| 5.18.2.3. Tests de comparaisons deux à deux.....   | 660        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Comparaison de variances</b> .....   | <b>662</b> |
| <b>5.19. Comparaison de deux variances observées</b> .....                                  | <b>663</b> |
| 5.19.1. Test de Fisher-Snedecor.....  | 663        |
| 5.19.1.1. Méthode.....  | 663        |
| 5.19.1.2. Exemple avec R.....   | 666        |
| 5.19.2. Test d'Ansari-Bradley.....  | 670        |
| 5.19.2.1. Méthode.....  | 670        |
| 5.19.2.2. Exemples avec R.....  | 678        |
| <b>5.20. Comparaison d'au moins deux variances observées</b> .....                          | <b>688</b> |
| 5.20.1. Test de Bartlett.....   | 688        |
| 5.20.1.1. Méthode.....  | 688        |
| 5.20.1.2. Exemple avec R.....   | 691        |
| 5.20.2. Test de Fligner-Killeen.....  | 695        |
| 5.20.2.1. Méthode.....  | 695        |
| 5.20.2.2. Exemple avec R.....   | 699        |
| 5.20.3. Tests de comparaisons deux à deux.....  | 704        |
| <b>Corrélations entre variables</b> .....   | <b>705</b> |
| <b>5.21. Test du coefficient de corrélation linéaire de Pearson</b> .....                   | <b>706</b> |
| 5.21.1. Méthode.....  | 706        |
| 5.21.2. Exemple avec R.....   | 712        |
| <b>5.22. Test du coefficient de corrélation de Spearman</b> .....                           | <b>717</b> |
| 5.22.1. Méthode.....  | 717        |
| 5.22.2. Exemples avec R.....  | 724        |
| <b>5.23. Test du coefficient de corrélation de Kendall</b> .....                            | <b>732</b> |
| 5.23.1. Méthode.....  | 732        |
| 5.23.2. Exemples avec R.....  | 737        |
| <b>5.24. Test de <math>\chi^2</math></b> .....  | <b>742</b> |
| 5.24.1. Méthode.....  | 742        |
| 5.24.2. Exemple avec R.....   | 743        |
| <b>5.25. Tests de corrélations multiples</b> .....  | <b>744</b> |
| <b>Comparaison de distributions</b> .....   | <b>746</b> |
| <b>5.26. Ajustement d'une distribution observée à une distribution théorique</b> .....      | <b>747</b> |
| 5.26.1. Introduction.....   | 747        |
| 5.26.2. Test de $\chi^2$ de conformité.....   | 748        |
| 5.26.2.1. Méthode.....  | 748        |
| 5.26.2.2. Exemple avec R.....   | 751        |
| 5.26.3. Test de Kolmogorov-Smirnov.....   | 756        |
| 5.26.3.1. Méthode.....  | 756        |
| 5.26.3.2. Exemple avec R.....   | 762        |
| 5.26.4. Test de Shapiro-Wilk.....   | 769        |
| 5.26.4.1. Méthode.....  | 769        |
| 5.26.4.2. Exemple avec R.....   | 774        |
| <b>5.27. Comparaison de deux distributions observées (test de Kolmogorov-Smirnov)</b> ..... | <b>778</b> |
| 5.27.1. Méthode.....  | 778        |
| 5.27.2. Exemple avec R.....   | 783        |
| <b>Autres tests</b> .....   | <b>789</b> |
| <b>5.28. Tests autour de la régression</b> .....  | <b>790</b> |
| 5.28.1. Introduction.....   | 790        |
| 5.28.2. Principe de la régression linéaire simple.....                                      | 791        |



|   |            |
|---|------------|
| 5.28.3. Comparaison d'une régression observée à une régression nulle.....   | 794        |
| 5.28.3.1. Méthode.....  | 794        |
| 5.28.3.2. Exemple avec R.....   | 803        |
| 5.28.4. Comparaison d'une régression observée à une régression théorique.....   | 814        |
| 5.28.4.1. Méthode.....  | 814        |
| 5.28.4.2. Exemples avec R.....  | 817        |
| <b>5.29. Test autour de la survie .....</b>   | <b>822</b> |
| 5.29.1. Introduction.....   | 822        |
| 5.29.2. Comparaison de deux courbes de survie (test du logrank).....  | 828        |
| 5.29.2.1. Méthode.....  | 828        |
| 5.29.2.2. Exemple avec R.....   | 836        |
| <b>ANNEXES .....</b>  | <b>847</b> |
| 01. Formule développée de la variance et de la covariance.....  | 847        |
| 02. L'estimateur.....   | 848        |
| 03. Distribution normale de variables mesurées et théorème central limite.....  | 855        |
| 04. Rappel des moyennes et variances des distributions de probabilité.....  | 857        |
| 05. Rappel sur les combinaisons.....  | 858        |
| 06. Passage du $\chi^2$ au $Z^2$ dans le cas de la comparaison d'une proportion observée à une proportion théorique.....  | 860        |
| 07. Passage du $\chi^2$ au $Z^2$ dans le cas de la comparaison de deux proportions observées.....   | 861        |
| 08. Retrouver la formule de la VT à partir de la formule du $\chi^2$ dans le cas de la comparaison de plusieurs proportions observées.....  | 864        |
| 09. Estimation de la fluctuation de la VT $\chi^2$ avec correction de continuité de Yates.....  | 865        |
| 10. Comment se comportent les différents couples de proportions ( $p_{G1/F1}$ , $p_{G1/F2}$ ), ( $p_{G2/F1}$ , $p_{G2/F2}$ ), ( $p_{F1/G1}$ , $p_{F1/G2}$ ) et ( $p_{F2/G1}$ , $p_{F2/G2}$ ) lors d'un test exact de Fisher sur tableau de contingence $2 \times 2$ ..... | 868        |
| 11. Anova et régression linéaire sont liées.....  | 871        |
| 12. Procédure lorsque la fonction <code>solve()</code> n'est pas utilisable.....  | 876        |
| 13. Précisions sur la médiane et autres quantiles.....  | 877        |
| 14. Rendre non paramétrique un test paramétrique.....   | 879        |
| 15. Définitions autour des faux positifs et faux négatifs.....  | 883        |
| 16. Exemples graphiques avec R.....   | 886        |
| 17. Exécution des codes du chapitre 5 depuis un fichier.....  | 892        |
| 18. Edition des graphiques du chapitre 5 dans un fichier de type "pdf".....   | 893        |
| 19. Différences entre les fonctions <code>sort()</code> , <code>rank()</code> et <code>order()</code> .....   | 894        |
| 20. Les objets de mode "expression", "call" et "name" pour manipuler du code sans l'exécuter.....   | 895        |
| 21. Symboles mathématiques et formats particuliers dans les graphiques.....   | 899        |
| 22. Comparaison de chaînes de caractères.....   | 902        |
| 23. Identifier des chaînes de caractères à l'aide d'expressions régulières.....   | 904        |
| 24. Modifier le format d'affichage des nombres.....   | 910        |
| 25. Problème de virgule flottante et d'entier long.....   | 916        |
| 26. Principaux attributs de R.....  | 918        |
| <b>REFERENCES.....</b>  | <b>942</b> |
| <b>REMERCIEMENTS .....</b>  | <b>944</b> |
| <b>INDEX.....</b>   | <b>945</b> |