Statistiques mathématiques : cours 7

Guillaume Lecué

23 septembre 2015

Cours précédent (rappels)

1. vocabulaire : accepter, rejeter, zone de rejet, erreur de 1ère et 2-ième espèces, niveau d'un test, fonction puissance, p-value, test UPP

2. résultat : construction du test de Neyman-Pearson grâce au rapport de vraisemblance pour les problèmes de tests à hypothèses simples – propriété UPP des tests de Neyman-Pearson

Test UPP dans une famille à rapport de vraisemblance monotone

Rappels sur Neyman-Pearson

On a montré que le test de Neyman-Pearson est UPP pour un test de la forme :

$$\boxed{H_0 : \theta = \theta_0 \text{ contre } H_1 : \theta = \theta_1}$$

ce test est de la forme

$$\varphi_\alpha(Z) = \begin{cases} H_0 & \text{si } f(\theta_1, Z) \leq c_\alpha f(\theta_0, Z) \\ H_1 & \text{sinon} \end{cases}$$

où c_α est tel que (quand il y a une solution)

$$\mathbb{P}_{\theta_0}\left[f(\theta_1, Z) > c_\alpha f(\theta_0, Z)\right] = \alpha$$

Alors :

1. φ_α est de niveau α
2. φ_α est le test le plus puissant parmi tous les tests de niveau α

Famille à rapport de vraisemblance monotone (1/2)

On va construire un test UPP pour les problèmes de test de la forme :

$$\boxed{H_0 : \theta \leq \theta_0 \text{ contre } H_1 : \theta > \theta_0}$$

quand le rapport de vraisemblance a une structure particulière.
On considère le cadre suivant :

- $\mathcal{E} = (\mathfrak{Z}, \mathcal{Z}, \{\mathbb{P}_\theta : \theta \in \Theta\})$: une expérience statistique
- Z : une observation dans cette expérience
- on suppose que $\Theta \subset \mathbb{R}$ est un intervalle ouvert
- le modèle est dominé par μ tel que $f(\theta, z) = \dfrac{d\,\mathbb{P}_\theta}{d\mu}(z) > 0$, pour μ-presque tout $z \in \mathfrak{Z}$.

Famille à rapport de vraisemblance monotone (2/2)

Définition

On dit que la famille de densités $\{f(\theta, \cdot) : \theta \in \Theta\}$ est à rapport de vraisemblance monotone s'il existe une statistique $T(Z)$ telle que

$$\forall \theta_1 < \theta_2, \quad \frac{f(\theta_2, Z)}{f(\theta_1, Z)} \text{ est une fonction monotone de } T(Z)$$

ex. : quand $Z = (X_1, \ldots, X_n)$ où $X_i \overset{i.i.d.}{\sim} \mathcal{N}(\theta, 1)$, le rapport de vraisemblance pour $\theta_1 < \theta_2$

$$\frac{f(\theta_2, Z)}{f(\theta_1, Z)} = \exp\left(\frac{n}{\sigma^2}(\theta_2 - \theta_1)\overline{X}_n\right) \exp\left(\frac{-n}{2\sigma^2}(\theta_2^2 - \theta_1^2)\right)$$

est une fonction croissante de $T(Z) = \overline{X}_n$.

Test UPP – théorème de Lehmann

Soit $\{f(\theta, \cdot) : \theta \in \Theta\}$ une famille vérifiant les hypothèses précédantes et à rapport de vraisemblance monotone, par exemple croissante en $T(Z)$. Soit $\alpha \in (0,1)$. On suppose que pour $\theta_0 \in \Theta$, il existe $\rho(\theta_0, \alpha)$ tel que

$$\boxed{\mathbb{P}_{\theta_0}\left[T(Z) > \rho(\theta_0, \alpha)\right] = \alpha}$$

alors le test de région de rejet

$$\boxed{\mathcal{R}^\star = \{z \in \mathfrak{Z} : T(z) > \rho(\theta_0, \alpha)\}}$$

est

1. de niveau α
2. le plus puissant parmi tous les tests de niveau α

pour le problème de test

$$\boxed{H_0 : \theta \leq \theta_0 \text{ contre } H_1 : \theta > \theta_0}$$

Exemple de test UPP

Pour $Z = (X_1, \ldots, X_n)$ où $X_i \overset{i.i.d.}{\sim} \mathcal{N}(\theta, 1)$, le rapport de vraisemblance

$$\frac{f(\theta_2, Z)}{f(\theta_1, Z)} = \exp\left(\frac{n}{\sigma^2}(\theta_2 - \theta_1)\overline{X}_n\right) \exp\left(\frac{-n}{2\sigma^2}(\theta_2^2 - \theta_1^2)\right)$$

est une fonction croissante de $T(Z) = \overline{X}_n$.
Alors pour le problème de test

$$\boxed{H_0 : \theta \leq \theta_0 \text{ contre } H_1 : \theta > \theta_0}$$

le test de région de rejet

$$\boxed{\mathcal{R}^\star = \{(x_1, \ldots, x_n)^\top \in \mathbb{R}^n : \bar{x}_n > \theta_0 + t_{n,\alpha}\}}$$

où $t_{n,\alpha}$ est tel que $\mathbb{P}_{\theta_0}[\overline{X}_n > \theta_0 + t_{n,\alpha}] = \alpha$ (càd $t_{n,\alpha} = q_{1-\alpha}/\sqrt{n}$), est une test de niveau α, UPP.

objectifs : niveau asymptotique et consistance

idée : Les tests UPP sont très rares. En général, on se contentera de construire des tests φ satisfaisant deux propriétés quand le nombre n d'observations tend vers $+\infty$:

1. on dit qu'un test est de niveau asymptotique α quand

$$\forall \theta \in \Theta_0, \quad \limsup_{n \to \infty} \mathbb{P}_\theta[\varphi = H_1] \leq \alpha$$

2. on dit qu'un test est consistant ou convergeant quand

$$\forall \theta \in \Theta_1, \quad \lim_{n \to \infty} \mathbb{P}_\theta[\varphi = H_1] = 1$$

Test de Wald

Le test de Wald : hypothèse nulle simple

On considère le problème de test

$$\boxed{H_0 : \theta = \theta_0 \text{ contre } H_1 : \theta \neq \theta_0}$$

Hypothèse : on dispose d'un estimateur $\widehat{\theta}_n$ asymptotiquement normal

$$\boxed{\sqrt{n}(\widehat{\theta}_n - \theta) \xrightarrow{d} \mathcal{N}(0, v(\theta))}$$

et $\theta \mapsto v(\theta) > 0$ est continue.
Sous H_0 (càd quand $Z \sim \mathbb{P}_{\theta_0}$) : on a la convergence

$$\sqrt{\frac{n}{v(\widehat{\theta}_n)}}(\widehat{\theta}_n - \theta_0) \xrightarrow{d} \mathcal{N}(0, 1)$$

Rem. : $v(\widehat{\theta}_n) \leftrightarrow v(\theta_0)$ (pour une hypothèse simple)

Test de Wald : comportement sous H_0 et H_1

<u>sous H_0</u> :

$$T_n = n\frac{(\widehat{\theta}_n - \theta_0)^2}{v(\widehat{\theta}_n)} \xrightarrow{d} \chi^2(1)$$

<u>sous H_1</u> : $\forall\theta \in \Theta_1$ (càd $\theta \neq \theta_0$),

$$T_n \xrightarrow{\mathbb{P}_\theta} +\infty$$

On va utiliser T_n comme statistique de test et, au vue du comportement de T_n sous H_1, on considère des tests de la forme

$$\varphi_\alpha = \begin{cases} H_0 & \text{quand } T_n \leq t_{n,\alpha} \\ H_1 & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour déterminer le seuil $t_{n,\alpha}$, on regarde le comportement sous H_0 : soit $q_{1-\alpha}^{\chi^2(1)}$, le quantile d'ordre $1-\alpha$ d'une $\chi^2(1)$, on choisit

$$\boxed{t_{n,\alpha} = q_{1-\alpha}^{\chi^2(1)}}$$

Propriétés du test de Wald

Proposition

Le test de Wald de l'hypothèse simple $\theta = \theta_0$ *contre l'alternative* $\theta \neq \theta_0$ *basé sur l'estimateur a.n.* $\widehat{\theta}_n$ *est*

- *de niveau asymptotique* α *:*

$$\mathbb{P}_{\theta_0}\left[\varphi_\alpha = H_1\right] \longrightarrow \alpha$$

- *convergeant (ou consistant) : pour tout* $\theta \neq \theta_0$

$$\mathbb{P}_{\theta}\left[\varphi_\alpha = H_1\right] \longrightarrow 1$$

Preuve

- niveau asymptotique α : par construction
- Contrôle de la puissance : Soit $\theta \neq \theta_0$. On a, sous $\mathbb{P}_\theta$,

$$\frac{(\widehat{\theta}_n - \theta_0)}{v(\widehat{\theta}_n)} \xrightarrow{\mathbb{P}_\theta} \frac{(\theta - \theta_0)^2}{v(\theta)} > 0$$

et comme

$$T_n = n \frac{(\widehat{\theta}_n - \theta_0)}{v(\widehat{\theta}_n)}$$

alors $T_n \xrightarrow{\mathbb{P}_\theta} +\infty$ et donc

$$\mathbb{P}_\theta \left[\varphi_\alpha = H_1 \right] = \mathbb{P}_\theta \left[T_n > q_{1-\alpha}^{\chi^2(1)} \right] \longrightarrow +\infty$$

Test de Wald : hypothèse nulle composite

- Même contexte : $\Theta \subset \mathbb{R}^d$ et on dispose d'un estimateur $\widehat{\theta}_n$ asymptotiquement normal :

$$\sqrt{n}\left(\widehat{\theta}_n - \theta\right) \xrightarrow{d} \mathcal{N}\left(0, V(\theta)\right)$$

où $V(\theta)$ est définie positive et continue en θ.

- But : Tester $H_0 : \theta \in \Theta_0$ contre $H_1 : \theta \notin \Theta_0$, où

$$\boxed{\Theta_0 = \left\{\theta \in \Theta, \quad g(\theta) = 0\right\}}$$

et

$$g : \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}^m$$

est régulière.

Test de Wald : comportement sous H_0

- Hypothèse : le gradient $\nabla g(\theta)$ de g est tel que

$$\theta \in \Theta \mapsto \Sigma_g(\theta) = \nabla g(\theta)^\top V(\theta) \nabla g(\theta)$$

  est continue et inversible en tout point θ.

Proposition

Pour tout $\theta \in \Theta_0$ (i.e. sous H_0), on a :

- $$\sqrt{n} g(\widehat{\theta}_n) \xrightarrow{d} \mathcal{N}(0, \Sigma_g(\theta))$$
- $$T_n = n g(\widehat{\theta}_n)^T \Sigma_g(\widehat{\theta}_n)^{-1} g(\widehat{\theta}_n) \xrightarrow{d} \chi^2(m)$$

- Preuve : méthode « delta » multidimensionnelle.

Test de Wald : propriétés

Proposition

Sous les hypothèses précédentes, le test

$$\varphi_\alpha = \begin{cases} H_0 & si\ T_n \geq q_{1-\alpha}^{\chi^2(m)} \\ H_1 & sinon \end{cases}$$

où $q_{1-\alpha}^{\chi^2(m)}$ *: quantile d'ordre* $1-\alpha$ *d'une* $\chi^2(m)$*, est*

- *de niveau asymptotique* α *:* $\forall \theta \in \Theta_0$,

$$\mathbb{P}_\theta\left[\varphi_\alpha = H_1\right] \to \alpha$$

- *Convergeant :* $\forall \theta \notin \Theta_0$,

$$\mathbb{P}_\theta\left[\varphi_\alpha = H_1\right] \to 1$$

Tests d’adéquation

Problème de test d'adéquation

Situation : On observe un n-échantillon de loi (cdf) F inconnu

$$X_1, \dots, X_n \overset{i.i.d.}{\sim} F$$

et on se donne une loi (cdf) F_0 (ex. : F_0 cdf d'une $\mathcal{N}(0,1)$)

But : Tester

$$\boxed{H_0 : F = F_0 \;\text{ contre }\; H_1 : F \neq F_0}$$

Ce problème de test est appelé : problème de test d'adéquation

Test (d'adéquation) de Kolmogorov-Smirnov

Test de Kolmogorov-Smirnov

- Rappel : Si la fonction de répartition F est continue alors

$$\sqrt{n}\left\|\widehat{F}_n - F\right\|_\infty \xrightarrow{d} K$$

où la loi de K ne dépend pas de F (cf. cours1)

Proposition (Test de Kolmogorov-Smirnov)

Soit $q_{1-\alpha}^K$ tel que $\mathbb{P}\left[K > q_{1-\alpha}^K\right] = \alpha$. Le test défini par

$$\varphi_\alpha = \begin{cases} H_0 & \text{si } T_n \leq q_{1-\alpha}^K \\ H_1 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{pour } T_n = \sqrt{n}||\widehat{F}_n - F_0||_\infty$$

est de niveau asymptotique α : $\mathbb{P}_{F_0}\left[\varphi_\alpha = H_1\right] \to \alpha$ et consistant :

$$\forall F \neq F_0 : \mathbb{P}_F\left[\varphi_\alpha = H_1\right] \to 1$$

Tests d'adéquation du χ^2

Test du Chi-deux

- X variable qualitative : $X \in \{1, \dots, d\}$

$$\mathbb{P}\left[X = \ell\right] = p_\ell,\ \ell = 1, \dots d.$$

- La loi de X est caratérisée par $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_d)^T$
- Notation

$$\mathcal{M}_d = \left\{\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_d)^T : p_\ell \geq 0, \sum_{\ell=1}^{d} p_\ell = 1\right\}$$

- Objectif : A partir d'un n-échantillon $X_1, \dots, X_n \overset{i.i.d.}{\sim} \mathbf{p}$, et d'une loi $\mathbf{q} \in \mathcal{M}_d$ donnée on veut tester

$$\boxed{H_0 : \mathbf{p} = \mathbf{q} \text{ contre } H_1 : \mathbf{p} \neq \mathbf{q}}$$

Construction « naturelle » d'un test

- Comparaison des fréquences empiriques

$$\widehat{p}_{n,\ell} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I(X_i = \ell) \quad \text{proche de} \quad q_\ell, \quad \ell = 1, \ldots, d \text{ ?}$$

- Loi forte des grands nombres : sous H_0,

$$\left(\widehat{p}_{n,1}, \ldots, \widehat{p}_{n,d}\right) \xrightarrow{p.s.} (p_1, \ldots, p_d) = \mathbf{p}.$$

- Théorème central-limite ?

$$\mathbf{U}_n(\mathbf{p}) = \sqrt{n}\left(\frac{\widehat{p}_{n,1} - p_1}{\sqrt{p_1}}, \ldots, \frac{\widehat{p}_{n,d} - p_d}{\sqrt{p_d}}\right) \xrightarrow{d} ?$$

- Composante par composante oui. Convergence globale plus délicate (coordonnées dépendantes).

Statistique du Chi-deux

Proposition

Si les composantes de $\mathbf{p}$ *sont toute non-nulles*

- *On a la convergence en loi sous* $\mathbb{P}_{\mathbf{p}}$

$$\mathbf{U}_n(\mathbf{p}) \xrightarrow{d} \mathcal{N}\big(0, V(\mathbf{p})\big)$$

avec $V(\mathbf{p}) = \mathrm{Id}_d - \sqrt{\mathbf{p}}\big(\sqrt{\mathbf{p}}\big)^T$ *et* $\sqrt{\mathbf{p}} = (\sqrt{p_1}, \ldots, \sqrt{p_d})^T$

- *De plus*

$$\|\mathbf{U}_n(\mathbf{p})\|_2^2 = n \sum_{\ell=1}^{d} \frac{(\widehat{p}_{n,\ell} - p_\ell)^2}{p_\ell} \xrightarrow{d} \chi^2(d-1)$$

Preuve de la normalité asymptotique

- Pour $i = 1, \ldots, n$ et $1 \leq \ell \leq d$, on pose

$$Y_\ell^i = \frac{1}{\sqrt{p_\ell}} \left(I(X_i = \ell) - p_\ell \right)$$

- Les vecteurs $\mathbf{Y}_i = (Y_1^i, \ldots, Y_d^i)$ sont i.i.d. et

$$\mathbf{U}_n(\mathbf{p}) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^{n} \mathbf{Y}_i,$$

$\mathbb{E}\left[Y_\ell^i\right] = 0$, $\mathbb{E}\left[(Y_\ell^i)^2\right] = 1 - p_\ell$, $\mathbb{E}\left[Y_\ell^i Y_{\ell'}^i\right] = -(p_\ell p_{\ell'})^{1/2}$

- On applique le TCL vectoriel

Convergence de la norme au carré

- On a donc, sous H_0, $\mathbf{U}_n(\mathbf{p}) \xrightarrow{d} \mathcal{N}\big(0, V(\mathbf{p})\big)$
- et aussi, par Cochran,

$$\|\mathbf{U}_n(\mathbf{p})\|_2^2 \xrightarrow{d} \|\mathcal{N}\big(0, V(\mathbf{p})\big)\|_2^2 \sim \chi^2\big(\mathrm{Rang}\big(V(\mathbf{p})\big)\big)$$

$V(\mathbf{p}) = \mathrm{Id}_d - \sqrt{\mathbf{p}}\big(\sqrt{\mathbf{p}}\big)^T$ est la projection orthogonale sur $\mathrm{vect}\{\sqrt{\mathbf{p}}\}^\perp$ qui est de dimension $d-1$

Test d'adéquation du χ^2

- « distance » du χ^2 :

$$\chi^2(\mathbf{p},\mathbf{q}) = \sum_{\ell=1}^{d} \frac{(p_\ell - q_\ell)^2}{q_\ell}.$$

- Avec ces notations $\|\mathbf{U}_n(\mathbf{p})\|_2^2 = n\chi^2(\widehat{\mathbf{p}}_n,\mathbf{p})$.

Proposition

Pour $\mathbf{q} \in \mathcal{M}_d$ le test défini par

$$\varphi_\alpha = \begin{cases} H_0 & \textit{si } n\chi^2(\widehat{\mathbf{p}}_n,\mathbf{p}) \leq q_{1-\alpha}^{\chi^2(d-1)} \\ H_1 & \textit{sinon} \end{cases}$$

est de niveau asymptotique α et consistant pour tester

$$H_0 : \mathbf{p} = \mathbf{q} \quad \textit{contre} \quad H_1 : \mathbf{p} \neq \mathbf{q}$$

Exemple de mise en oeuvre : expérience de Mendel

- Soit $d = 4$ et
$$\mathbf{q} = \left(\frac{9}{16}, \frac{3}{16}, \frac{3}{16}, \frac{1}{16}\right).$$
- fréquence empirique : $n = 556$
$$\widehat{\mathbf{p}}_{556} = \frac{1}{556}(315, 101, 108, 32).$$
- Calcul de la statistique du χ^2
$$556 \times \chi^2(\widehat{\mathbf{p}}_{556}, \mathbf{q}) = 0,47.$$
- On a $q_{95\%}^{\chi^2(3)} = 7.815$.
- Conclusion : Puisque $0.47 < 7.815$, on accepte l'hypothèse $\mathbf{p} = \mathbf{q}$ au niveau $\alpha = 5\%$. De plus, la p-value vaut 0.93 : très grand niveau de confiance en l'acceptation.

Test d'indépendance du χ^2

Problèmatique

données/modèle : on observe un n-échantillon de couples de variables aléatoires qualitatives

$$(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n) \overset{i.i.d.}{\sim} (X, Y) \in \{1, \dots, d_1\} \times \{1, \dots, d_2\}$$

La loi $\mathbf{p}$ de (X, Y) appartient à

$$\mathcal{M}_{d_1,d_2} = \left\{ \mathbf{p} = (p_{\ell,\ell'})_{\substack{1 \leq \ell \leq d_1 \\ 1 \leq \ell' \leq d_2}} : 0 \leq p_{\ell,\ell'}, \sum_{\ell,\ell'} p_{\ell,\ell'} = 1 \right\}$$

On considère le problème de test suivant :

$$\boxed{H_0 : \mathbb{P}_{(X,Y)} = \mathbb{P}_X \otimes \mathbb{P}_Y \ \text{ contre } H_1 : \mathbb{P}_{(X,Y)} \neq \mathbb{P}_X \otimes \mathbb{P}_Y}$$

principe du test d'indépendance du χ^2 (1/2)

On a l'équivalence :

$$\mathbb{P}_{(X,Y)} = \mathbb{P}_X \otimes \mathbb{P}_Y \Leftrightarrow \forall \ell, \ell', p_{\ell,\ell'} = p_{\ell,\bullet} \times p_{\bullet,\ell'}$$

où

$$p_{\ell,\ell'} = \mathbb{P}[(X,Y) = (\ell,\ell')], \quad p_{\ell,\bullet} = \mathbb{P}[X = \ell], \quad p_{\bullet,\ell'} = \mathbb{P}[Y = \ell']$$

On estime ces quantités par leurs fréquences empiriques :

$$\hat{p}^{(n)}_{\ell,\ell'} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I[(X_i, Y_i) = (\ell,\ell')]$$

$$\hat{p}^{(n)}_{\ell,\bullet} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I[X_i = \ell] \quad \hat{p}^{(n)}_{\bullet,\ell'} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I[Y_i = \ell']$$

principe du test d'indépendance du χ^2 (2/2)

Idée :

1. On aimerait pouvoir tester si la loi du couple (X, Y) est égale à $\mathbb{P}_X \otimes \mathbb{P}_Y$, on ferait alors un test d'adéquation.
2. Mais, on ne connaît pas la loi $\mathbb{P}_X \otimes \mathbb{P}_Y$, on va donc l'estimer par

$$\left(\hat{p}^{(n)}_{\ell,\bullet} \times \hat{p}^{(n)}_{\bullet,\ell'}\right)_{\substack{1 \leq \ell \leq d_1 \\ 1 \leq \ell' \leq d_2}}$$

3. on peut alors faire un test d'adéquation du χ^2 par rapport à cette loi estimée. La statistique de test est

$$n\chi^2\left((\hat{p}^{(n)}_{\ell,\ell'})_{\ell,\ell'}, (\hat{p}^{(n)}_{\ell,\bullet} \times \hat{p}^{(n)}_{\bullet,\ell'})_{\ell,\ell'}\right)$$

Comportement de la statistique de test sous H_0 et sous H_1

On utilise la statistique de test

$$T_n = n\chi^2\left((\hat{p}^{(n)}_{\ell,\ell'})_{\ell,\ell'}, (\hat{p}^{(n)}_{\ell,\bullet} \times \hat{p}^{(n)}_{\bullet,\ell'})_{\ell,\ell'}\right)$$

pour construire le test d'indépendance du χ^2. Son comportement sous les deux hypothèses est donné par :

Sous H_0 :

$$T_n \xrightarrow{d} \chi^2\big((d_1 - 1)(d_2 - 1)\big)$$

Sous H_1 :

$$T_n \xrightarrow{p.s.} +\infty$$

On regarde donc des tests de la forme

$$\varphi_\alpha = \begin{cases} H_0 & \text{si } T_n \leq t_{n,\alpha} \\ H_1 & \text{sinon} \end{cases}$$

et le seuil $t_{n,\alpha}$ est donné par la loi limite de T_n sous H_0

test d'indépendance du χ^2

Theorem

Pour tout $\alpha \in (0,1)$, le test

$$\varphi_\alpha = \begin{cases} H_0 & si\ T_n \leq q_{1-\alpha}^{\chi^2((d_1-1)(d_2-1))} \\ H_1 & sinon \end{cases}$$

où $q_{1-\alpha}^{\chi^2((d_1-1)(d_2-1))}$ est le quantile d'ordre $1-\alpha$ d'une $\chi^2((d_1-1)(d_2-1))$, est de niveau asymptotique α et consistant

Exemple : test d'indépendance entre revenus et nombre d'enfants

Catégories de revenus : I (faible) à IV (élevé)

nb. enfants	I	II	III	IV	total ligne
0	2161	3577	2184	1636	9558
1	2755	5081	2222	1052	11110
2	936	1753	640	306	3635
3	225	419	96	38	778
≥ 4	39	98	31	14	182
tot. col.	6116	10928	5173	3016	25263

On obtient :

$$T_n = n\chi^2\Big((\hat{p}^{(n)}_{\ell,\ell'})_{\ell,\ell'}, (\hat{p}^{(n)}_{\ell,\bullet} \times \hat{p}^{(n)}_{\bullet,\ell'})_{\ell,\ell'} \Big)$$

$$= \sum_{\substack{\ell \in \{0,1,2,3,\text{"}\geq 4\text{"}\} \\ \ell' \in \{I,II,III,IV\}}} \frac{\big(\hat{p}^{(n)}_{\ell,\ell'} - \hat{p}^{(n)}_{\ell,\bullet}\hat{p}^{(n)}_{\bullet,\ell'}\big)^2}{\hat{p}^{(n)}_{\ell,\bullet}\hat{p}^{(n)}_{\bullet,\ell'}} = 568.5$$

Table des quantiles d'une $\chi^2(12)$

On a ici $(d_1 - 1)(d_2 - 1) = (5 - 1)(4 - 1) = 12$. On regarde alors les quantiles

$$\boxed{q_{1-\alpha}^{\chi^2(12)}}$$

α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
$q_{1-\alpha}^{\chi^2(12)}$	15,8	18,5	21,0	24,0	26,2	28,2	32,9

Python :

```
> from scipy.stats import chi2
> 1-chi2.cdf(100, 12)
5.5e-16
```

Ici la statistique du test vaut $T_n = 568.5$ donc la p-value est plus petite que $5.5.10^{-16}$. Alors on rejete avec confiance. Il y a donc une très forte dépendance entre le nombre d'enfants et les revenus.