

FEUILLE DE TRAVAUX PRATIQUES - PYTHON #4

Dans ce TP, nous nous intéresserons aux estimateurs et à leurs propriétés.

1 Rappels sur les estimateurs

Etant données (x_1, \dots, x_n) , n réalisations indépendantes d'un phénomène aléatoire X de loi inconnue \mathbb{P}_X , l'inférence statistique a pour but de donner des informations sur cette loi. On parle

- d'**estimation paramétrique** lorsque l'on s'intéresse à des caractéristiques fini-dimensionnelles de la loi \mathbb{P}_X : espérance, variance, etc. Ou si on fait l'hypothèse que la loi inconnue \mathbb{P}_X appartient à une famille de lois connue, indexée par un paramètre. Estimer la loi inconnue \mathbb{P}_X revient alors à estimer la valeur du/des paramètre(s).
- d'**estimation non paramétrique** lorsque les quantités à estimer sont à valeurs dans des espaces fonctionnels de dimension infinie : fonction de répartition, densité (si elle existe), fonction caractéristique, etc.

Notons θ un paramètre à estimer, le but est de construire un estimateur $\hat{\theta}_n$, fonction mesurable de l'échantillon, qui nous donnera des informations sur ce paramètre.

↯ Comment construire un estimateur ?

Les méthodes les plus courantes sont

- la **méthode des moments** :
On estime les moments par leur version empirique
- la **méthode du maximum de vraisemblance** :
La vraisemblance d'un échantillon est la probabilité d'avoir obtenu cet échantillon sous le modèle choisi. Ainsi, plus la probabilité d'avoir obtenu les observations est grande, plus le modèle est proche de la réalité. On choisit donc le modèle pour lequel la vraisemblance est la plus élevée :
 $\hat{\theta}_n = \arg \max_{\theta} \mathcal{L}(\theta, (x_1, \dots, x_n))$.

Bien entendu, tous les estimateurs ne se valent pas, certains ont de meilleures propriétés statistiques que d'autres...

↯ Comment juger de la qualité d'un estimateur ?

On cherche à

- minimiser la distance (à préciser) entre l'estimateur et le paramètre à estimer,
- maximiser la vitesse de convergence de l'estimateur vers sa limite,
- contrôler les fluctuations autour de la limite pour obtenir des intervalles de confiance.

Des critères de performance sont :

- Le **biais** : l'estimateur est dit sans biais si $\mathbb{E}_{\theta}[\hat{\theta}_n] = \theta$. Il est dit asymptotiquement sans biais si $\mathbb{E}_{\theta}[\hat{\theta}_n] \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \theta$. En moyenne, l'estimateur se comporte comme le paramètre cible.

- Le **risque quadratique**

$$R(\hat{\theta}_n, \theta) = \mathbb{E}_\theta(\hat{\theta}_n - \theta)^2 = \text{Biais}(\hat{\theta}_n, \theta)^2 + \text{Var}_\theta(\hat{\theta}_n).$$

Cela décrit la variabilité autour de la moyenne. Un estimateur $\hat{\theta}_n^1$ est préférable à un estimateur $\hat{\theta}_n^2$ lorsque son risque quadratique est inférieur.

- La **(forte) consistance** : si $\hat{\theta}_n$ converge (p.s.) en probabilité vers θ .
- La **vitesse de convergence** $(v_n)_n$: si pour tout θ , il existe une loi $l(\theta)$ telle que $v_n(\hat{\theta}_n - \theta) \xrightarrow{\mathcal{L}/\mathbb{P}_\theta} l(\theta)$.
- L'**asymptotique normalité** si $\sqrt{n}(\hat{\theta}_n - \theta)$ converge en loi vers une variable gaussienne.

Pour contrôler les fluctuations de l'estimateur autour du paramètre, on utilise des intervalles de confiance. Un **intervalle de confiance**, de niveau de confiance $1 - \alpha$, est un intervalle I_n tel que

$$\mathbb{P}_\theta(\theta \in I_n) \geq 1 - \alpha.$$

Un tel intervalle est rarement explicitable, sauf si, par exemple, l'estimateur de θ a une loi connue. C'est pourquoi on s'intéresse souvent aux intervalles de confiance asymptotiques. Un **intervalle de confiance asymptotique**, de niveau de confiance $1 - \alpha$, est un intervalle I_n tel que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}_\theta(\theta \in I_n) \geq 1 - \alpha.$$

On obtient de tels intervalles à l'aide de la propriété d'asymptotique normalité, du lemme de Slutsky, de la δ -méthode, etc. Pour plus de détails, voir [ici](#)

2 Estimation paramétrique

2.1 Sur les estimateurs

Exercice 1. Support d'une variable uniforme

Le vecteur de données \mathbf{x} téléchargeable [ici](#) correspond à $n = 1000$ réalisations de variables indépendantes, de loi commune uniforme dans un intervalle $[0, \theta]$, où $\theta > 0$ est inconnu.

1. Expliciter l'estimateur empirique $\bar{\theta}_n$ et l'estimateur du maximum de vraisemblance $\hat{\theta}_n$ de θ .
2. Illustrer le fait que ces estimateurs sont consistants. Quelle est leur vitesse de convergence ?
3. L'estimateur $\hat{\theta}_n$ est-il asymptotiquement normal ?
4. Pouvez-vous donner un intervalle de confiance pour le paramètre θ ?

Exercice 2. Quantiles empiriques.

On considère (X_1, \dots, X_n) un n -échantillon d'une loi à densité f et de fonction de répartition F . On note $(X_{(1)}, \dots, X_{(n)})$ la statistique d'ordre associée. Pour tout $p \in]0, 1[$, le quantile d'ordre p de la loi sous-jacente, noté $k(p)$ est alors défini par $k(p) := F^{-1}(p)$. Le quantile empirique d'ordre p associé à l'échantillon est lui défini par $\hat{k}_n(p) := X_{(\lfloor np \rfloor + 1)}$.

1. Dans le cas où la loi sous-jacente est la loi normale centrée réduite, illustrer le fait que le quantile empirique est un estimateur fortement consistant du quantile (théorique), i.e. que pour tout $p \in]0, 1[$, lorsque n tend vers l'infini

$$\hat{k}_n(p) \xrightarrow{ps} k(p).$$

2. Illustrer le fait que le quantile empirique est asymptotiquement normal, autrement dit pour tout $p \in]0, 1[$, lorsque n tend vers l'infini

$$\sqrt{n} \left(\hat{k}_n(p) - k(p) \right) \xrightarrow{d} \mathcal{N}(0, \sigma_p^2), \quad \text{où } \sigma_p^2 = \frac{p(1-p)}{f(k(p))^2}.$$

2.2 Intervalles de confiance exacts

Exercice 3. Estimation gaussienne.

Le vecteur de données \mathbf{x} téléchargeable [ici](#) correspond à $n = 1000$ réalisations indépendantes de variables $\mathcal{N}(m, \sigma^2)$.

1. On suppose dans cette question que $m = 1$ et que σ est inconnue. Quelle est alors la loi de $\sigma^{-2} \sum_{k=1}^n (X_k - m)^2$? En déduire un intervalle de confiance pour la variance σ^2 .
2. On suppose maintenant que m et σ sont inconnues. On désigne par \bar{X}_n la moyenne empirique de l'échantillon. Quelle est la loi de $\sigma^{-2} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X}_n)^2$? En déduire un intervalle de confiance pour la variance σ^2 .
3. On suppose encore que m et σ sont inconnues. Quelle est la loi de la variable ci-dessous

$$\sqrt{n-1} \frac{\sum_{k=1}^n (X_k - m)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X}_n)^2}} ?$$

En déduire un intervalle de confiance pour la moyenne m .

Exercice 4. Estimation exponentielle.

Le vecteur de données \mathbf{y} téléchargeable [ici](#) correspond à des réalisations indépendantes de variables exponentielles $\mathcal{E}(\lambda)$ pour un $\lambda > 0$ inconnu.

1. Quel est l'estimateur du maximum de vraisemblance de la moyenne $1/\lambda$?
2. Quel est sa loi ?
3. En déduire un intervalle de confiance exact de niveau 95% pour le paramètre λ .

2.3 Intervalle de confiance asymptotique

Exercice 5. Distance aléatoire.

On tire uniformément et indépendamment deux points A et B dans le carré $[0, 1]^2$. On note X la distance euclidienne entre A et B .

1. Exprimer la distance moyenne $\mathbb{E}[X]$ comme une intégrale multiple.
2. Estimer $\mathbb{E}[X]$ par la méthode de Monte-Carlo.
3. Montrer que $\mathbb{E}[X^2] = 1/3$ et en déduire un intervalle de confiance asymptotique de niveau 95% pour la distance moyenne $\mathbb{E}[X]$.

Exercice 6. Référendum.

Le vecteur de données \mathbf{z} téléchargeable [ici](#) correspond à des réalisations indépendantes de variables de Bernoulli de paramètre p inconnu.

1. Quel est l'estimateur du maximum de vraisemblance de p .
2. Donner un intervalle de confiance asymptotique de niveau 95% pour p .

Références

- [CBCC16] Alexandre Casamayou-Boucau, Pascal Chauvin, and Guillaume Connan. *Programmation en Python pour les mathématiques - 2e éd.* Dunod, Paris, 2e édition edition, January 2016.
- [Vig18] Vincent Vigon. *python proba stat.* Independently published, October 2018.