TD 2 : estimateurs

Les questions marquées d'un astérisque (*) *sont facultatives.*

Dans tous les exercices, on commencera par soigneusement écrire le modèle statistique considéré.

Exercice 1. Soit $(X_1, \ldots, X_n)$ un n-échantillon de v.a. (variables aléatoires) i.i.d. (indépendantes et identiquement distribuées) suivant une loi normale de moyenne μ et variance σ^2 inconnues, qu'on cherche à estimer.

1. Calculer un estimateur du maximum de vraisemblance de (μ, σ^2). Calculer son biais. Calculer la variance de l'estimateur de μ. Ces estimateurs sont-ils consistants ?
2. Calculer un estimateur de (μ, σ^2) en utilisant la méthode des moments. Que constatez-vous ?

Exercice 2. Soit $(X_1, \ldots, X_n)$ un n-échantillon de v.a. i.i.d. suivant une loi uniforme sur $[0, \theta]$. On cherche à estimer θ.

1. Calculer un estimateur du maximum de vraisemblance de θ. Calculer sa fonction de répartition. En déduire sa densité, son biais et sa variance. Est-il consistant ?
2. Calculer un estimateur de θ en utilisant la méthode des moments. Calculer son biais et sa variance. Est-il consistant ?

Exercice 3. Soit $(X_1, \ldots, X_n)$ un n-échantillon de v.a. i.i.d. suivant une loi exponentielle de paramètre inconnu.

1. Comparer les estimateurs de θ obtenus par la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode des moments.
2. On considère l'estimateur du maximum de vraisemblance. Est-il consistant ? Que peut-on dire de son biais ?

On rappelle l'inégalité de Jensen : soit A un intervalle de $\mathbb{R}$, $\varphi : A \longrightarrow \mathbb{R}$ une fonction convexe et X une variable aléatoire à valeurs dans A. Alors

$$\mathbb{E}[\varphi(X)] \geqslant \varphi(\mathbb{E}[X]).$$

De plus, si φ est strictement convexe, alors il y a égalité si et seulement si X est constante.

Exercice 4. (Unicité de l'estimateur du maximum de vraisemblance)

1. Soient $X_1, \ldots, X_n$ une suite de v.a. i.i.d. uniformes sur $[\theta, \theta + 1]$. Calculer un estimateur du maximum de vraisemblance. Est-il unique ?
2. Soient $X_1, \ldots, X_n$ une suite de v.a. i.i.d. de loi de Laplace de paramètres $(\mu, 1)$ (autrement dit, de densité $x \mapsto \frac{\exp(-|x-\mu|)}{2}$). Montrer que la log-vraisemblance est dérivable sur $\mathbb{R} \setminus \{X_1, \ldots, X_n\}$ de dérivée
$$\mu \longmapsto \#\{i \in \{1, \ldots, n\} : X_i > \mu\} - \#\{i \in \{1, \ldots, n\} : X_i < \mu\}.$$
En déduire que tout estimateur du maximum de vraisemblance de μ est une médiane de l'échantillon $(X_1, \ldots, X_n)$. L'estimateur du maximum de vraisemblance est-il unique ?

Problème : régression non paramétrique (*). On observe des v.a. $Y_1, \dots, Y_n$ qu'on suppose de la forme

$$Y_j = f\left(\frac{j}{n}\right) + \varepsilon_j$$

où $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ sont des v.a. i.i.d. gaussiennes de moyenne nulle et de variance connue σ^2 et où f est une fonction inconnue de $[0,1]$ dans $\mathbb{R}$ qu'on cherche à estimer. On fait l'hypothèse que f est (α, L)-hölderienne pour $\alpha \in (0,1]$ et $L > 0$, autrement dit : pour tout x, y, $|f(x) - f(y)| \leqslant L|x-y|^\alpha$.

1. Écrire le modèle statistique correspondant.

Comme ce modèle se prête mal à la méthode du maximum de vraisemblance, on procède plutôt comme suit. Soit $D \geqslant 1$. Pour tout $i \in \{1, \dots, D\}$, soit $I_i =]\frac{i-1}{D}, \frac{i}{D}]$. On cherche un estimateur de f parmi les fonctions constantes sur chaque I_i. Pour simplifier, on suppose $D|n$ et on note $K = n/D$ le nombre de points de la forme j/n qui tombent dans I_i (pour un i fixé).

2. Écrire ce nouveau modèle statistique sous la forme d'un modèle paramétrique.
   Indication : les mesures de probabilité de ce modèle correspondent aux fonctions parmi lesquelles on cherche l'estimateur. Il n'est pas nécessaire que la vraie loi soit dans ce modèle.
3. Montrer que l'estimateur du maximum de vraisemblance de f s'écrit
   $$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^{D} \left(\frac{1}{K} \sum_{j=K(i-1)+1}^{Ki} Y_j \right) \mathbf{1}_{I_i}(x).$$
   Autrement dit, $\hat{f}$ est constant sur chaque I_i égal à la moyenne des Y observés sur ce I_i.
4. Calculer l'espérance de $\hat{f}$. Cet estimateur est-il sans biais ?
5. Notons $\|g\|^2 = \int_{[0,1]} g(x)^2 \mathrm{d}x$. Montrer que l'erreur $\mathbf{L}^2$ de cet estimateur se décompose suivant le compromis biais-variance
   $$\mathbb{E}[\|\hat{f} - f\|^2] = \mathbb{E}[\|\hat{f} - \mathbb{E}[\hat{f}]\|^2] + \|\mathbb{E}[\hat{f}] - f\|^2.$$
   En déduire que si D reste constant quand $n \to \infty$, cet estimateur n'est pas consistant.
6. Montrer qu'il existe une constante $c \leqslant 1$ telle que le biais vérifie $\|\mathbb{E}[\hat{f}] - f\|^2 \leqslant cL^2 D^{-2\alpha}$.
7. Montrer que la variance vérifie $\mathbb{E}[\|\hat{f} - \mathbb{E}[\hat{f}]\|^2] \leqslant \sigma^2 D/n$.
8. Quel choix de D proposez-vous ? En admettant que les réponses aux questions 5 à 7 restent vraies même si D ne divise pas n, quelle est la vitesse de convergence du risque de l'estimateur ?