
TRAVAUX DIRIGÉS N° 3 : Linear separators

Stephan CLÉMENÇON <stephan.clemencon@telecom-paris.fr>

Ekhine IRUOZKI <irurozki@telecom-paris.fr>

EXERCICE 1. On se place dans le cadre de la classification binaire : soient un descripteur aléatoire X à valeurs dans \mathbb{R} muni de sa tribu des Boréliens, et un label aléatoire Y valant 0 ou 1.

Soit $\mathbb{G} := \{g : \mathbb{R} \rightarrow \{0, 1\}\}$ l'ensemble des classifieurs adaptés à ce contexte. L'erreur de classification est définie comme l'application $L : g \in \mathbb{G} \mapsto \mathbb{P}(Y \neq g(X)) \in [0, 1]$ et on note $L^* := \inf_{g \in \mathbb{G}} L(g)$.

Dans cet exercice, on s'intéresse à la famille \mathcal{G} des classifieurs linéaires sur \mathbb{R} de la forme :

$$g_{(x_0, y_0)} : x \in \mathbb{R} \mapsto \begin{cases} y_0 & \text{si } x \leq x_0, \\ 1 - y_0 & \text{sinon,} \end{cases}$$

avec $(x_0, y_0) \in \mathbb{R} \times \{0, 1\}$. L'erreur de classification d'un tel $g_{(x_0, y_0)}$ est notée plus simplement $L(x_0, y_0)$ et on pose $L_0 := \inf_{(x_0, y_0)} L(x_0, y_0)$.

1) Exprimer l'erreur de classification d'un élément quelconque de \mathcal{G} en fonction des lois conditionnelles de X sachant Y . On utilisera les notations $F_y(x) := \mathbb{P}\{X \leq x \mid Y = y\}$ pour $(x, y) \in \mathbb{R} \times \{0, 1\}$ et $p := \mathbb{P}(Y = 1)$.

2) En considérant les points $(x_0, y_0) = (-\infty, 0)$ et $(x_0, y_0) = (-\infty, 1)$, montrer que $L_0 \leq \frac{1}{2}$.

3) Montrer que $L_0 = \frac{1}{2} - \sup_x \left| p F_1(x) - (1 - p) F_0(x) - p + \frac{1}{2} \right|$. Simplifier l'expression quand $p = \frac{1}{2}$.

Indication. Pour tout $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ on peut écrire $\min(a, b) = \frac{a + b - |a - b|}{2}$.

4) Montrer que $L_0 = \frac{1}{2}$ si et seulement si $L^* = \frac{1}{2}$.

5) Montrer l'inégalité de Chebychev-Cantelli : pour toute variable aléatoire réelle Z et tout $t \geq 0$,

$$\mathbb{P}(Z - \mathbb{E}(Z) \geq t) \leq \frac{\mathbb{V}(Z)}{\mathbb{V}(Z) + t^2}.$$

- 6) On note respectivement m_y et σ_y^2 l'espérance et la variance de la loi conditionnelle de X sachant $Y = y$, avec $y \in \{0, 1\}$. Montrer que :

$$L_0 \leq \left(1 + \frac{(m_0 - m_1)^2}{(\sigma_0 + \sigma_1)^2}\right)^{-1}.$$

Indication. Utiliser l'inégalité démontrée à la question précédente.

- 7) Discuter de la performance du minimiseur empirique pris dans la classe \mathcal{G} et des limites des classifieurs linéaires.

Solution:

- 1) Soit $(x, y) \in \mathbb{R} \times \{0, 1\}$, alors ,

$$\begin{aligned} L(x, y) &= \mathbb{P}(Y \neq g_{(x,y)}(X)) = \mathbb{P}(Y = y, X > x) + \mathbb{P}(Y = 1 - y, X \leq x) \\ &= \mathbb{P}(X > x \mid Y = y)\mathbb{P}(Y = y) + \mathbb{P}(X \leq x \mid Y = 1 - y)\mathbb{P}(Y = 1 - y) \\ &= y(p(1 - F_1(x)) + (1 - p)F_0(x)) + (1 - y)((1 - p)(1 - F_0(x)) + pF_1(x)) \\ &= (1 - y)(F_1(x)p + 1 - p - F_0(x) + F_0(x)p) + y(F_0(x) - F_0(x)p + p - F_1(x)p) \\ &= (1 - y)(1 - \phi(x)) + y\phi(x). \end{aligned}$$

- 2) Soit $y \in \{0, 1\}$. D'après la question précédente, puisque F_0 et F_1 sont des fonctions de répartition, on a

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} L(x, y) = \begin{cases} p, & \text{si } y = 1, \\ 1 - p, & \text{si } y = 0. \end{cases}$$

On en déduit que $L_0 \leq p \wedge (1 - p) \leq \frac{1}{2}$.

- 3) Posons $\phi : x \in \mathbb{R} \mapsto (1 - p)F_0(x) - pF_1(x) + p \in [0, 1]$ et prenons $(x, y) \in \mathbb{R} \times \{0, 1\}$. D'après la première question, on a

$$L(x, y) = \begin{cases} \phi(x), & \text{si } y = 1, \\ (1 - \phi(x)), & \text{si } y = 0. \end{cases}$$

Ainsi,

$$\begin{aligned}
L_0 &= \inf_{x \in \mathbb{R}} \min((1 - \phi(x), \phi(x)) = \inf \frac{1 - \phi(x) + \phi(x) - |1 - \phi(x) - \phi(x)|}{2} \\
&= \inf_{x \in \mathbb{R}} \left(\frac{1}{2} - \left| \frac{1}{2} - \phi(x) \right| \right) = \frac{1}{2} - \sup_{x \in \mathbb{R}} \left(\left| \frac{1}{2} - \phi(x) \right| \right) \\
&= \frac{1}{2} - \sup_{x \in \mathbb{R}} \left(\left| \frac{1}{2} - (F_0(x) - F_0(x)p + p - F_1(x)) \right| \right) \\
&= \frac{1}{2} - \sup_{x \in \mathbb{R}} \left| p F_1(x) - (1 - p) F_0(x) - p + \frac{1}{2} \right|
\end{aligned}$$

Lorsque $p = \frac{1}{2}$, cela donne

$$L_0 = \frac{1}{2} \left(1 - \sup_{x \in \mathbb{R}} |F_0(x) - F_1(x)| \right).$$

- 4) — Supposons que $L^* = \frac{1}{2}$. Par définition de L^* , on a $L_0 \geq L^* = \frac{1}{2}$.

Puisque L_0 est aussi majorée par $\frac{1}{2}$, d'après la question 2, on a donc bien $L_0 = \frac{1}{2}$.

- Réciproquement, supposons que $L_0 = \frac{1}{2}$.

Puisque $L_0 \leq p \wedge (1 - p) \leq \frac{1}{2}$ (cf. question 2), on a alors $p = \frac{1}{2}$.

En utilisant le dernier résultat de la question 3, on obtient ensuite $\sup_{x \in \mathbb{R}} |F_0(x) - F_1(x)| = 0$, ce qui signifie que $F_0 = F_1$ (i.e. $X \mid Y = 0$ a la même loi que $X \mid Y = 1$).

On en déduit que pour tout $g \in \mathbb{G}$,

$$\begin{aligned}
L(g) &= \mathbb{P}(Y \neq g(X)) = \mathbb{P}(g(X) = 0 \mid Y = 1) \mathbb{P}(Y = 1) + \mathbb{P}(g(X) = 1 \mid Y = 0) \mathbb{P}(Y = 0) \\
&= \frac{1}{2} (\mathbb{P}(g(X) = 0 \mid Y = 1) + \mathbb{P}(g(X) = 1 \mid Y = 1)) = \frac{1}{2}, \text{ (car } F_0 = F_1),
\end{aligned}$$

d'où $L^* = \frac{1}{2}$.

- 5) Soit Z une variable aléatoire de carré intégrable et $t \geq 0$. Posons $Z^* := Z - \mathbb{E}(Z)$. On remarque que

$$0 \leq t = \mathbb{E}(t - Z^*) \leq \mathbb{E}((t - Z^*) \mathbb{1}_{\{Z^* < t\}}),$$

d'où

$$\begin{aligned}
t^2 &\leq \mathbb{E}((t - Z^*)^2) \mathbb{E}(\mathbb{1}_{\{Z^* < t\}}) \quad (\text{Cauchy-Schwarz}) \\
&= \mathbb{E}(t^2 + (Z^*)^2 - 2tZ^*) \mathbb{P}(Z^* < t)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (\mathbb{V}(Z^*) + t^2) \mathbb{P}(Z^* < t) \\
&= (\mathbb{V}(Z) + t^2) \mathbb{P}(Z - \mathbb{E}(Z) < t).
\end{aligned}$$

Par conséquent,

$$\begin{aligned}
\mathbb{P}(Z - \mathbb{E}(Z) < t) &\geq \frac{t^2}{\mathbb{V}(Z) + t^2} \\
\iff 1 - \mathbb{P}(Z - \mathbb{E}(Z) \geq t) &\geq \frac{t^2}{\mathbb{V}(Z) + t^2} \\
\iff \mathbb{P}(Z - \mathbb{E}(Z) \geq t) &\leq 1 - \frac{t^2}{\mathbb{V}(Z) + t^2} = \frac{\mathbb{V}(Z)}{\mathbb{V}(Z) + t^2}.
\end{aligned}$$

6) Commençons par remarquer que si $m_0 = m_1$, alors l'inégalité à démontrer est $L_0 \leq 1$, ce qui est toujours vrai.

Supposons maintenant que $m_0 < m_1$. On peut alors choisir deux réels $\Delta_0, \Delta_1 > 0$ tels que $m_1 - m_0 = \Delta_0 + \Delta_1$ et considérer le classifieur $g_{(\Delta_0 + m_0, 0)}$ (cf. Figure 1).

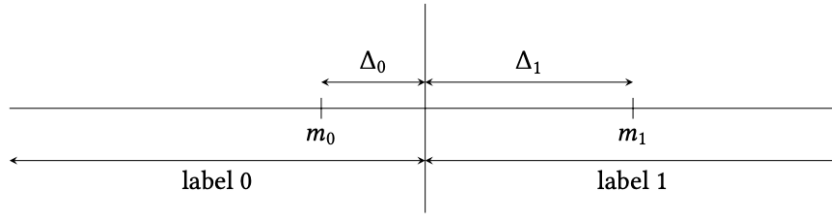


FIGURE 1 – Sketch of the classifier $g_{(\Delta_0 + m_0, 0)}$.

D'après la question 1, en remarquant que $\Delta_0 + m_0 = m_1 - \Delta_1$, on obtient

$$\begin{aligned}
L(\Delta_0 + m_0, 0) &= pF_1(\Delta_0 + m_0) + (1 - p)(1 - F_0(\Delta_0 + m_0)) \\
&= p\mathbb{P}(X \leq \Delta_0 + m_0 \mid Y = 1) + (1 - p)\mathbb{P}(X > \Delta_0 + m_0 \mid Y = 0) \\
&= p\mathbb{P}(X \leq m_1 - \Delta_1 \mid Y = 1) + (1 - p)\mathbb{P}(X > \Delta_0 + m_0 \mid Y = 0) \\
&= p\mathbb{P}(-X - (-m_1) \geq \Delta_1 \mid Y = 1) + (1 - p)\mathbb{P}(X - m_0 > \Delta_0 \mid Y = 0) \\
&= p \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \Delta_1^2} + (1 - p) \frac{\sigma_0^2}{\sigma_0^2 + \Delta_0^2} \\
&= \frac{p}{1 + \frac{\Delta_1^2}{\sigma_1^2}} + \frac{1 - p}{1 + \frac{\Delta_0^2}{\sigma_0^2}}.
\end{aligned}$$

En prenant $\Delta_0 = \frac{m_1 - m_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \sigma_0$ et $\Delta_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \Delta_0$, on trouve

$$L(\Delta_0 + m_0, 0) \leq \left(1 + \frac{(m_0 - m_1)^2}{(\sigma_0 + \sigma_1)^2}\right)^{-1}.$$

Puisque par définition $L_0 \leq L(\Delta_0 + m_0, 0)$, on retombe bien sur l'inégalité recherchée.

Remarque. Le cas $m_1 < m_0$ peut être traité de la même manière en inversant tous les indices 0 et 1 des objets apparaissant dans la Figure 1.

Interprétation. Ce résultat nous dit que plus l'écart entre m_0 et m_1 est grand et plus σ_0^2 et σ_1^2 sont faibles, plus on sera à même de garantir un faible risque de classification sur G . Exprimé de manière plus grossière, mieux les classes sont séparées, plus on peut garantir une bonne classification en utilisant un simple séparateur linéaire (ce qui semble tout à fait logique). Une illustration est proposée à la Figure 2.

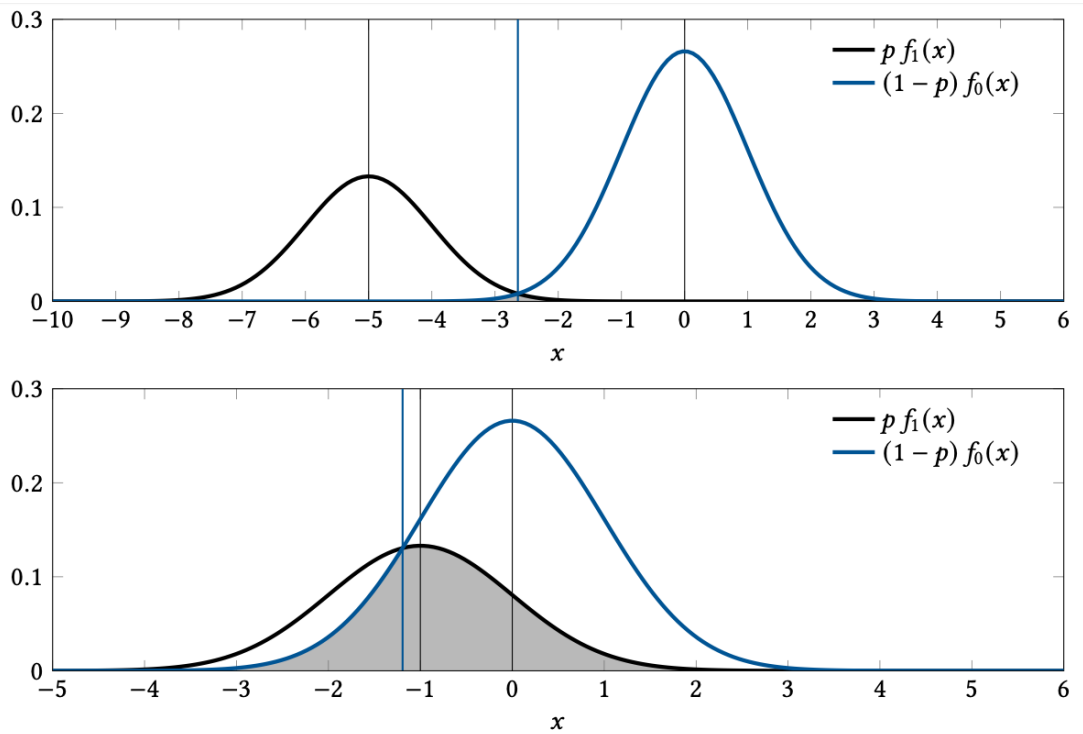


FIGURE 2 – Illustration du résultat de la question 6 : $p = \frac{1}{3}$, $X | Y = 0$ et $X | Y = 1$ suivent toutes deux des gaussiennes réduites, d'espérances $m_0 = 0$ et $m_1 = -5$ (haut) ou $m_1 = -1$ (bas), et de densités respectives f_0 et f_1 . Le classifieur optimal donne le label 0 à droite du séparateur (trait vertical bleu) et son risque L_0 est indiqué par la zone grisée.

7) On s'intéresse maintenant au risque empirique

$$L_n : g \in \mathbb{G} \mapsto \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{1}\{Y_i \neq g(X_i)\},$$

minimisé sur \mathcal{G} par $\hat{g}_n = g(\hat{x}_n, \hat{y}_n)$. Par application directe des résultats vus en cours, nous avons d'une part

$$L(\hat{g}_n) \leq 2 \sup_{(x,y) \in \mathbb{R} \times \{0,1\}} |L(x, y) - L_n(x, y)| + L_0 \quad \text{p.s.}$$

puis d'autre part que pour tout $\epsilon > 0$ et tout $y \in \{0, 1\}$,

$$\mathbb{P} \left(\sup_{x \in \mathbb{R}} |L(x, y) - L_n(x, y)| \geq \epsilon \right) \leq 2e^{-2n\epsilon^2}.$$

On déduit de ces deux inégalités que pour tout $\epsilon > 0$,

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(L(\hat{g}_n) - L_0 \geq \epsilon) &\leq \mathbb{P} \left(\sup_{(x,y) \in \mathbb{R} \times \{0,1\}} |L(x, y) - L_n(x, y)| \geq \frac{\epsilon}{2} \right) \\ &\leq \mathbb{P} \left(\sup_{x \in \mathbb{R}} |L(x, 0) - L_n(x, 0)| \geq \frac{\epsilon}{2} \right) + \mathbb{P} \left(\sup_{x \in \mathbb{R}} |L(x, 1) - L_n(x, 1)| \geq \frac{\epsilon}{2} \right) \\ &\leq 4 \exp \left(-n \frac{\epsilon^2}{2} \right). \end{aligned}$$

et ce quelle que soit la loi du vecteur (X, Y) . Évidemment, contrôler ce risque relatif n'a de sens que si le risque théorique L_0 est lui-même petit. Les limites des séparateurs linéaires (ici quand X est à valeurs dans \mathbb{R}) sont aisément illustrées par l'exemple donné en Figure 3. Dans ce type de configuration, aucun séparateur linéaire ne sera à même de faire mieux qu'une labellisation purement aléatoire.

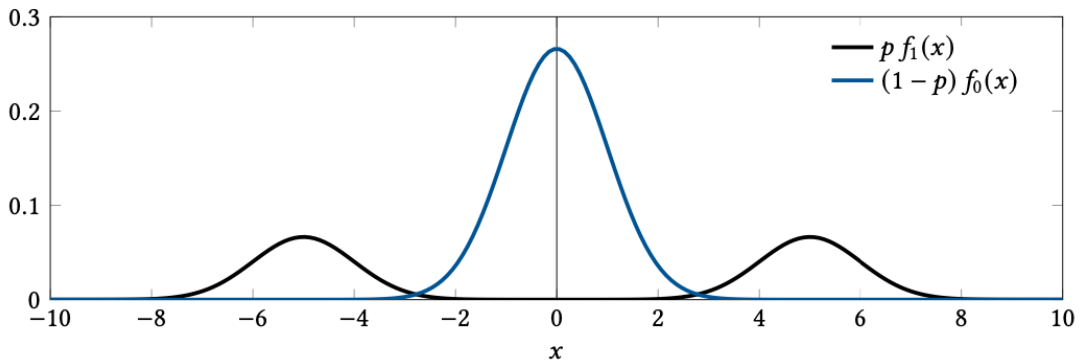


FIGURE 3 – Exemple où un séparateur linéaire n'est pas approprié : $p = \frac{1}{3}$, $X|Y = 0$ suit une loi Normale centrée réduite de densité f_0 , $X|Y = 1$ suit un mélange équilibré de deux gaussiennes réduites, la première centrée en -5 et la seconde en 5, de densité f_1 , de telle manière que $m_0 = m_1 = 0$.

