

# Apprentissage supervisé - Machine learning

L. Rouvière

*laurent.rouvriere@univ-rennes2.fr*

JANVIER 2023

## Table des matières

<b>I</b>	<b>Apprentissage : contexte et formalisation</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Risques et algorithmes de prévision</b>	<b>3</b>
1.1	Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...	3
1.2	Quelques exemples	10
1.3	Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé	11
1.4	L'algorithme des plus proches voisins	13
1.5	Exemples de fonction de perte	15
1.6	Le sur-apprentissage	20
1.7	Complexité versus compromis biais/variance	22
<b>2</b>	<b>Estimation du risque</b>	<b>23</b>
2.1	Ré-échantillonnage	23
2.2	Calibrer un algorithme	25
2.3	Le package <code>tidymodels</code>	26
2.4	Compléments	29
2.4.1	Estimer la variance d'un validation croisée	29
2.4.2	Stabiliser les estimateurs du risque	30
2.5	Annexe : le package <code>caret</code>	31
<b>3</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>34</b>
<b>II</b>	<b>Arbres</b>	<b>35</b>
<b>1</b>	<b>Arbres</b>	<b>35</b>
1.1	Arbres binaires	35
1.2	Choix des coupures	38
1.2.1	Cas de la régression	39
1.2.2	Cas de la classification supervisée	39
1.3	Elagage	41
1.4	Importance des variables	45
<b>2</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>46</b>
<b>III</b>	<b>Agrégation</b>	<b>48</b>
<b>1</b>	<b>Bagging et forêts aléatoires</b>	<b>48</b>
1.1	Bagging	49
1.2	Forêts aléatoires	50
1.2.1	Algorithme	51
1.2.2	Choix des paramètres	52
1.2.3	Erreur OOB et importance des variables	53

## Présentation

- *Objectifs* : comprendre les aspects théoriques et pratiques de l'apprentissage supervisé ainsi que de quelques algorithmes de référence.
- *Pré-requis* : théorie des probabilités, modélisation statistique, régression (linéaire et logistique). R, niveau avancé.
- *Enseignant* : Laurent Rouvière [laurent.rouviere@univ-rennes2.fr](mailto:laurent.rouviere@univ-rennes2.fr)
  - **Recherche** : statistique non paramétrique, apprentissage statistique
  - **Enseignements** : statistique et probabilités (Université, école d'ingénieur et de commerce, formation continue).
  - Co-responsable du **Master MAS** et responsable du **parcours SDD-IA**.
  - **Consulting** : energie, finance, marketing, sport.

## Programme

- *Matériel* :
  - slides : [https://lrouviere.github.io/page\\_perso/apprentissage\\_sup.html#app-sup-M1MAS](https://lrouviere.github.io/page_perso/apprentissage_sup.html#app-sup-M1MAS)
  - Tutoriel : [https://lrouviere.github.io/TUTO\\_APP\\_SUP/](https://lrouviere.github.io/TUTO_APP_SUP/) (chapitres 1 à 5).
- *3 parties* :
  1. **Machine Learning** : cadre, objectif, risque...
  2. **Segmentation** : arbres CART
  3. **Agrégation** : forêts aléatoires

## Objectifs/questions

- *Buzzword* : machine learning, big data, data mining, intelligence artificielle...
- *Machine learning* versus **statistique** (traditionnelle)
- *Risque* ⇒ calcul ou estimation : ré-échantillonnage, validation croisée...
- Algorithmes versus estimateurs...
- *Classification* des algorithmes. Tous équivalents ? Cadre propice...
- ...

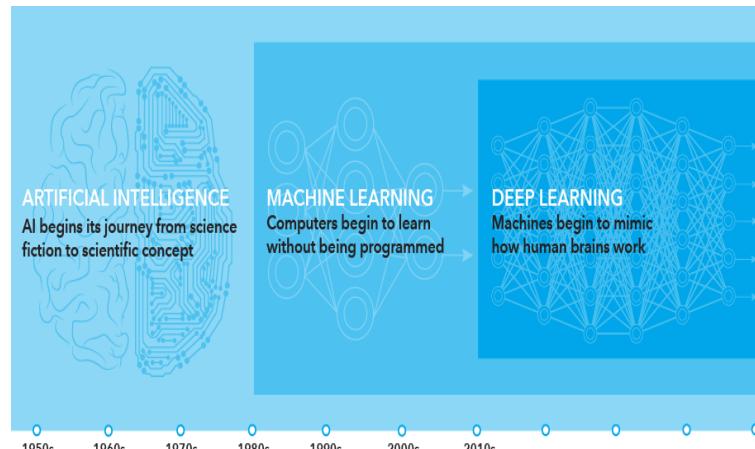
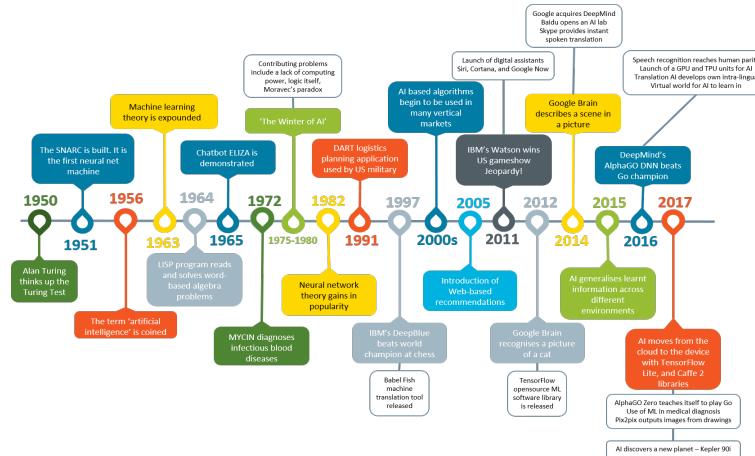
# Première partie

## Apprentissage : contexte et formalisation

### 1 Risques et algorithmes de prévision

#### 1.1 Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

##### Un peu d'historique



##### IA - début (source)

- Historiquement, les débuts de l'IA remontent à *Alan Turing* dans les années *1950*, et le mot veut **tout dire et ne rien dire**.
- Se réduit à des *règles déterministes*

```
si (condition 1 et/ou condition 2...) alors (action 1)
sinon (action 2)
```
- Les choses ont évolué par la suite notamment grâce au développement des *ressources informatiques* et de la *pouissance de calcul*.

##### Quelques définitions

###### *Intelligence artificielle (Wikipédia)*

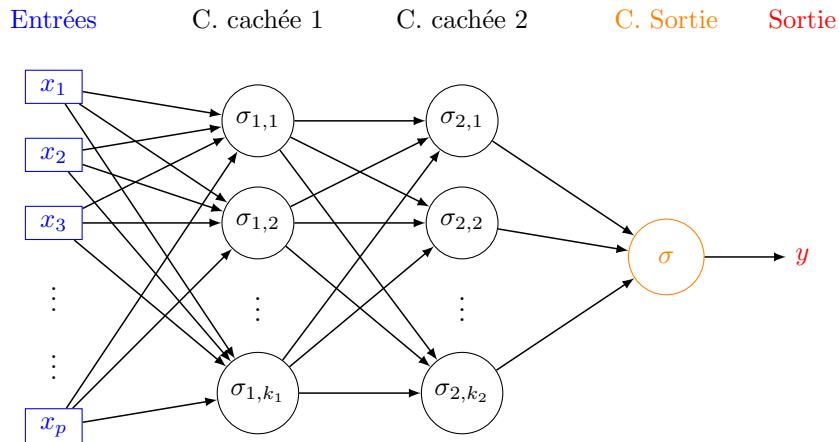
Ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des **machines capables de simuler l'intelligence humaine**.

## Apprentissage automatique - Machine Learning (Wikipédia)

Champ d'étude de l'intelligence artificielle qui se fonde sur des approches mathématiques et statistiques pour donner aux ordinateurs la capacité d'« apprendre » à partir de données, c'est-à-dire d'améliorer leurs performances à résoudre des tâches sans être explicitement programmés pour chacune.

## Apprentissage profond - Deep Learning

Technologie du ML qui permet de mimer les actions du cerveau humain grâce à des réseaux de neurones composés de dizaines voire de centaines de couches de neurones, chacune recevant et interprétant les informations de la couche précédente.



## Historique (toujours)

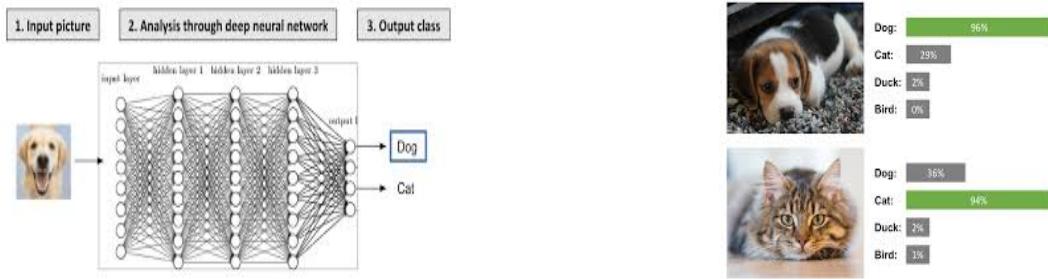
- 1950 : Alan Turing
- 1959 : apparition du *Machine Learning* (Arthur Samuel, jeu de dames)  $\Rightarrow$  création d'un programme pour IBM qui s'améliore en jouant
- Années 80 : développement du ML  $\Rightarrow$  l'ordinateur commence à déduire des règles à suivre en analysant seulement des données
- 1997 : *Deep Blue*  $\Rightarrow$  premier ordinateur à vaincre Garry Kasparov aux échecs
- 2000 : naissance de l'*apprentissage profond (deep learning)*
- 2012 : *identification de visages humains* par des réseaux de neurones développés par Google

## 2015 nouveaux défis

- Perception visuelle
- Compréhension du langage naturel écrit ou parlé
- Analyse automatique du langage
- Prise de décision autonome

## Perception visuelle et prise de décision





## Compréhension du langage

DeepL Traducteur   DeepL Pro   Pourquoi DeepL ?   API   Forfaits et tarifs   Applications   Commencer l'essai gratuit   Connexion

Traduire du texte   Traduire des fichiers

Français (langue détectée) ⇄ Anglais (USA) Glossaire

Introduction au machine learning est mon cours préféré.   Introduction to Machine Learning is my favorite course.

Dictionnaire

## Compétitions hommes/machines

Artificial intelligence beats eight world champions at bridge

Victory marks milestone for AI as bridge requires more human skills than other strategy games



The AI, NooI!, was able to read its opponents and explain its decision-making. Photograph: swissat/Getty Images/Stockphoto

An artificial intelligence has beaten eight world champions at bridge, a game in which human supremacy has resisted the march of the machines until now.

The victory represents a new milestone for AI because in bridge players work with incomplete information and must react to the behaviour of several other players - a scenario far closer to human decision-making.

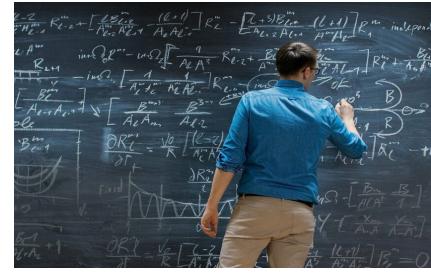
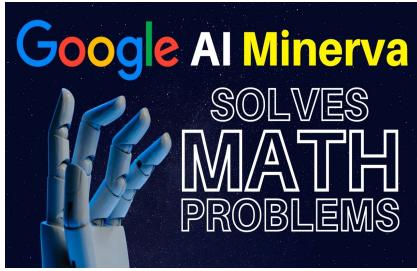
**Artificial Intelligence Easily Beats Human Fighter Pilot in DARPA Trial**

Aug. 20, 2020 | By Brian W. Everstine

In the battle of artificial intelligence versus a human fighter pilot, it wasn't even close.

The artificial intelligence algorithm, developed by Heron Systems, swept a human F-16 pilot in a simulated dogfight 5-0 in the Defense Advanced Research Projects Agency's [AlphaDogfight Trials](#) on Aug. 20. The company beat out seven other companies before going head to head with "Banger," a pilot from the District of Columbia Air National Guard and a recent graduate of the Air Force Weapons School's F-16 Weapons Instructor Course. The pilot, whose full name was not provided, is an operational fighter pilot with more than 2,000 hours in the F-16.

Banger and Heron Systems' AI fought in five different basic fighter maneuver scenarios with the simulated fight only using the Fighting Falcon's guns, and each time the AI was able to out maneuver and take out Banger. The algorithm operated within the limits of the F-16 - meaning it did not pull Gs beyond what a real-world aircraft could do. However, Banger said after the event that the jet was not limited by the training and thinking that is engrained in an



**Question:** What are the eigenvalues of a 3-by-2 matrix  $M = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ -1 & 5 \end{pmatrix}$ ?

**Model output:** The characteristic polynomial of  $M$  is  $|M - \lambda I|$ , where  $I$  is the 2-by-2 identity matrix. So the characteristic polynomial is  $|M - \lambda I| = \begin{vmatrix} 1-\lambda & 2 \\ -1 & 5-\lambda \end{vmatrix} = (1-\lambda)(5-\lambda) + 2 = \lambda^2 - 6\lambda + 7$ . This is a quadratic polynomial, so the eigenvalues are the solutions of  $\lambda^2 - 6\lambda + 7 = 0$ . We can solve this by completing the square:

$$\begin{aligned} \lambda^2 - 6\lambda + 7 &= 0 \\ \Rightarrow \quad \lambda^2 - 6\lambda + 9 - 9 + 7 &= 0 \\ \Rightarrow \quad (\lambda - 3)^2 - 2 &= 0 \\ \Rightarrow \quad (\lambda - 3)^2 &= 2 \\ \Rightarrow \quad \lambda - 3 &= \pm\sqrt{2} \\ \Rightarrow \quad \lambda &= 3 \pm \sqrt{2} \end{aligned}$$

So the eigenvalues are  $3 + \sqrt{2}$  and  $3 - \sqrt{2}$ .

**Question:** Assume that the variance of the first  $n$  natural numbers is 10, and the variance of the first  $m$  even natural numbers is 16. Compute  $m+n$ .

**Model output:** Let  $\sigma^2$  be the variance of the first  $n$  natural numbers, and  $\tau^2$  be the variance of the first  $m$  even natural numbers. Then, we have  $\sigma^2 = \frac{n(n+1)}{12}$  and  $\tau^2 = \frac{m(m+1)}{12}$ . We solve the system of equations:

$$\begin{aligned} \frac{n(n+1)}{12} &= 10 \\ \frac{m(m+1)}{12} &= 16. \end{aligned}$$

This translates into the system

$$\begin{aligned} n^2 + n &= 120 \\ m^2 + m &= 144. \end{aligned}$$

Therefore,  $n = \boxed{11}$  and  $m = \boxed{7}$ , so  $n+m = \boxed{18}$ .

**Question:** For every  $a, b, b \neq a$  prove that  $\frac{a^2 + b^2}{2} > \left(\frac{a+b}{2}\right)^2$ .

**Model output:**

$$\begin{aligned} \frac{a^2 + b^2}{2} &> \left(\frac{a+b}{2}\right)^2 \\ \iff \frac{a^2 + b^2}{2} &> \frac{a^2 + 2ab + b^2}{4} \\ \iff 2a^2 + 2b^2 &> a^2 + b^2 + 2ab \\ \iff a^2 + b^2 &> 2ab \\ \iff a^2 + b^2 - 2ab &> 0 \\ \iff (a - b)^2 &> 0 \end{aligned}$$

which is true, because the square of a real number is positive.

## ChatGPT

- Dernière expérimentation d'*OpenAI* :
- Outil conversationnel en *langage naturel* qui va produire des *réponses et des textes*, demandées par des commandes écrites dans des langues prises en charge.
- Il sait aussi faire des *maths...*

## Exemples

L Différences entre intelligence artificielle et machine Learning en français

L L'IA et le machine learning (apprentissage automatique en français) sont souvent confondus, mais ils ne sont pas exactement la même chose. L'IA est un domaine de l'informatique qui vise à créer des ordinateurs qui simulent l'intelligence humaine. Le machine learning, en revanche, est une technique utilisée pour mettre en œuvre l'IA.

Voici quelques différences clés entre l'IA et le machine learning :

- L'IA est une discipline qui vise à créer des ordinateurs capables de simuler l'intelligence humaine, tandis que le machine learning est une technique utilisée pour mettre en œuvre l'IA.
- L'IA peut utiliser différentes techniques pour atteindre ses objectifs, comme le raisonnement symbolique, la logique floue, etc. Le machine learning, en revanche, se base principalement sur l'analyse de données et l'apprentissage automatique.
- L'IA peut être utilisée pour résoudre des problèmes complexes qui nécessitent une grande quantité de données et de calculs, tels que la reconnaissance de la parole ou la traduction automatique. Le machine learning, quant à lui, est utilisé pour automatiser des tâches qui nécessitent de grandes quantités de données et de calculs, mais qui ne nécessitent pas nécessairement une compréhension profonde du domaine.

En résumé, l'IA est un domaine large qui vise à créer des ordinateurs capables de simuler l'intelligence humaine, tandis que le machine learning est une technique utilisée pour mettre en œuvre l'IA en utilisant l'analyse de données et l'apprentissage automatique.

L Démontrer que racine 2 n'est pas un rationnel

L Pour démontrer que la racine carrée de 2 n'est pas un rationnel, nous allons utiliser le fait que tous les nombres rationnels peuvent être écrits sous la forme d'une fraction irréductible  $a/b$ , où  $a$  et  $b$  sont des entiers.

Commençons par supposer que la racine carrée de 2 est un rationnel, c'est-à-dire qu'elle peut être écrite sous la forme d'une fraction irréductible  $a/b$ , où  $a$  et  $b$  sont des entiers. Nous savons alors que  $a^2 = 2 * b^2$ .

Si  $a$  et  $b$  sont tous les deux pairs, alors  $a^2$  et  $b^2$  sont tous les deux pairs, ce qui signifie que  $2 * b^2$  est pair, ce qui signifie que  $a^2$  est pair. Cela signifie que  $a$  est pair, ce qui signifie que  $a$  et  $b$  ont au moins 2 comme diviseur commun, ce qui contredit le fait que la fraction  $a/b$  est irréductible.

Si  $a$  est pair et  $b$  est impair, alors  $a^2$  est pair et  $b^2$  est impair, ce qui signifie que  $2 * b^2$  est impair, ce qui signifie que  $a^2$  est impair. Cela signifie que  $a$  est impair, ce qui signifie que  $a$  et  $b$  n'ont aucun diviseur commun, ce qui signifie que la fraction  $a/b$  est irréductible, ce qui contredit notre hypothèse initiale selon laquelle la racine carrée de 2 était un rationnel.

Si  $a$  est impair et  $b$  est pair, cela entraîne les mêmes conclusions que dans le cas où  $a$  est pair et  $b$  est impair.

Enfin, si  $a$  et  $b$  sont tous les deux impairs, alors  $a^2$  et  $b^2$  sont tous les deux impairs, ce qui signifie que  $2 * b^2$  est pair, ce qui signifie que  $a^2$  est pair. Cela signifie que  $a$  est pair, ce qui signifie que  $a$  et  $b$  ont au moins 2 comme diviseur commun, ce qui contredit le fait que la fraction  $a/b$  est irréductible.

En résumé, dans tous les cas, nous arrivons à la conclusion que la fraction  $a/b$  ne peut être irréductible, ce qui signifie que la racine carrée de 2 ne peut pas être un rationnel. Par conséquent, nous avons démontré que la racine carrée de 2 n'est pas un rationnel.

## Génération d'image

### Generative Adversarial Networks (GAN)

- Type de *réseau de neurones* utilisé en apprentissage automatique pour générer de nouvelles données de *manière convaincante*, de manière à ce qu'elles soient difficiles à distinguer des données réelles.
- Nombreuses applications, notamment la *génération d'images*, la *génération de texte* et la création de *contenu vidéo*.

## DALL.E

- “new AI system that can create realistic images and art from a description in natural language”.
- voir <https://openai.com/dall-e-2/>

**Exemple** <https://www.whichfaceisreal.com/>

Click on the person who is real.



**Exemple** <https://www.whichfaceisreal.com/>

You are **correct**. The image on the right is real.

[Play again.](#)



## Apprentissage statistique ?

### Plusieurs "définitions"

1. "... explores way of **estimating functional dependency** from a given collection of data" [Vapnik, 2000].
2. "...vast set of tools for modelling and understanding **complex data**" [James et al., 2015]

### Wikipedia

L'**apprentissage automatique** (en anglais : machine learning), **apprentissage artificiel** ou **apprentissage statistique** est un champ d'étude de l'**intelligence artificielle** qui se fonde sur des approches **mathématiques et statistiques** pour donner aux **ordinateurs** la capacité d'apprendre à partir de donnée...

⇒ **Interface** : Mathématiques-statistique/informatique.

### Constat

- Le **développement des moyens informatiques** fait que l'on est confronté à des données de plus en plus **complexes**.
- Les méthodes **traditionnelles** se révèlent souvent **peu efficaces** face à ce type de données.
- Nécessité de proposer des **algorithmes/modèles statistiques** qui apprennent directement à partir des données.

## Un peu d'histoire - voir [Besse, 2018]

Période	Mémoire	Ordre de grandeur
1940-70	Octet	$n = 30, p \leq 10$
1970	kO	$n = 500, p \leq 10$
1980	MO	Machine Learning
1990	GO	Data-Mining
2000	TO	$p > n$ , apprentissage statistique
2010	PO	$n$ explose, cloud, cluster...
2013	serveurs	Big data
2017	??	Intelligence artificielle...

## Conclusion

Capacités informatiques  $\Rightarrow$  Data Mining  $\Rightarrow$  Apprentissage statistique  $\Rightarrow$  Big Data  $\Rightarrow$  Intelligence artificielle...

## Approche statistique

### Objectif $\Rightarrow$ expliquer

- notion de modèle ;
- retrouver des lois de probabilités ;
- décisions prises à l'aide de tests statistiques, intervalles de confiance.

### Exemples

- Tests indépendance/adéquation...
- Modèle linéaire : estimation, sélection de variables, analyse des résidus...
- Régression logistique...
- Séries temporelles...

## Approche machine learning

### Objectif $\Rightarrow$ prédire

- notion d'algorithmes de prévision ;
- critères d'erreur de prévision ;
- calibration de paramètres (tuning).

### Exemples

- Algorithmes linéaires (moindres carrés, régularisation, "SVM") ;
- Arbres, réseaux de neurones ;
- Agrégation : boosting, bagging (forêts aléatoires) ;
- Deep learning (apprentissage profond).

## Statistique vs apprentissage

- Les objectifs *différent* :
  - recherche de complexité minimale en statistique  $\Rightarrow$  le modèle doit être interprétable !
  - complexité moins importante en machine learning  $\Rightarrow$  on veut "juste bien prédire".
- Approches néanmoins *complémentaires* :
  - bien expliquer  $\Rightarrow$  bien prédire ;
  - "récentes" évolutions d'aide à l'interprétation des algorithmes ML  $\Rightarrow$  scores d'importance des variables...
  - un bon algorithme doit posséder des bonnes propriétés statistiques (convergence, biais, variance...).

## Conclusion

Ne pas dissocier les deux approches.

## Problématiques associées à l'apprentissage

- *Apprentissage supervisé* : prédire une sortie  $y \in \mathcal{Y}$  à partir d'entrées  $x \in \mathcal{X}$  ;
- *Apprentissage non supervisé* : établir une typologie des observations ;
- *Règles d'association* : identifier des liens entre différents produits ;
- *Systèmes de recommandation* : identifier les produits susceptibles d'intéresser des consommateurs.

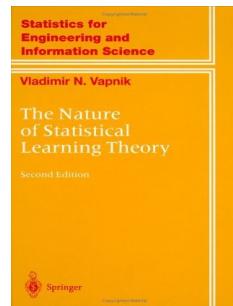
## NOMBREUSES APPLICATIONS

finance, économie, marketing, biologie, médecine...

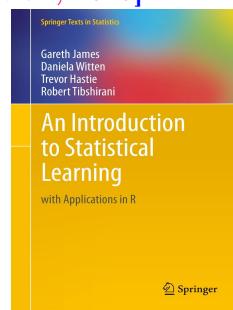
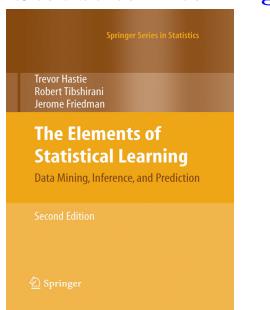
## Théorie de l'apprentissage statistique

### Approche mathématique

- Ouvrage fondateur : [Vapnik, 2000]
- voir aussi [Bousquet et al., 2003].



## The Elements of Statistical Learning [Hastie et al., 2009, James et al., 2015]



- Disponibles (avec jeux de données, codes...) aux url :

<https://hastie.su.domains/ElemStatLearn/> <https://www.statlearning.com>

## Wikistat

- Page de cours et tutoriels très bien faits sur la *statistique classique et moderne*.
- On pourra notamment regarder les *vignettes* sur la partie apprentissage :
  - [Wikistat, 2020a]
  - [Wikistat, 2020b]
  - ...
- Plusieurs parties de ce cours sont *inspirées de ces vignettes*.

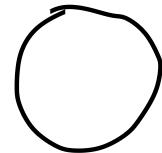
## 1.2 Quelques exemples

### Reconnaissance de l'écriture

#### *Apprentissage statistique*

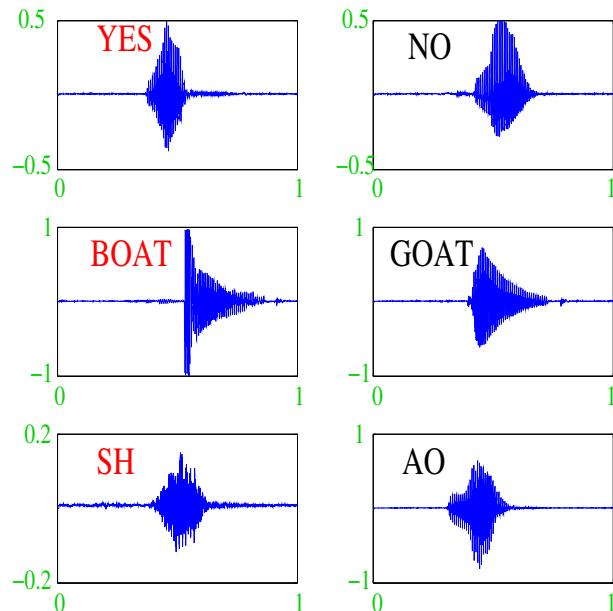
Comprendre et apprendre un comportement à partir d'**exemples**.

0	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4
5	5	5	5	5
6	6	6	6	6
7	7	7	7	7
8	8	8	8	8
9	9	9	9	9

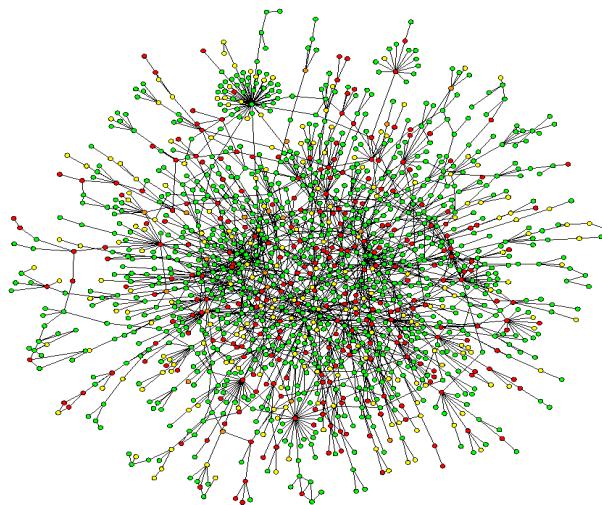


Qu'est-ce qui est écrit ? 0, 1, 2...?

### Reconnaissance de la parole



### Apprentissage sur les réseaux



## Prévision de pics d'ozone

- On a mesuré pendant 366 jours la *concentration maximale* en ozone (V4) ;
- On dispose également d'autres variables météorologiques (température, nébulosité, vent...).

```
> head(Ozone)
##   V1 V2 V3 V4   V5 V6 V7 V8     V9 V10 V11   V12 V13
## 1  1  1  4  3 5480  8 20 NA    NA 5000 -15 30.56 200
## 2  1  2  5  3 5660  6 NA 38    NA  NA -14    NA 300
## 3  1  3  6  3 5710  4 28 40    NA 2693 -25 47.66 250
## 4  1  4  7  5 5700  3 37 45    NA 590 -24 55.04 100
## 5  1  5  1  5 5760  3 51 54 45.32 1450  25 57.02 60
## 6  1  6  2  6 5720  4 69 35 49.64 1568  15 53.78 60
```

### Question

Peut-on prédire la concentration maximale en ozone du *lendemain* à partir des prévisions météorologiques ?

## Détection de spam

- Sur 4 601 mails, on a pu identifier *1813 spams*.
- On a également mesuré sur chacun de ces mails la présence ou absence de *57 mots*.

```
> spam %>% select(c(1:8,58)) %>% head()
##   make address all num3d our over remove internet type
## 1 0.00  0.64 0.64  0 0.32 0.00  0.00  0.00 spam
## 2 0.21  0.28 0.50  0 0.14 0.28  0.21  0.07 spam
## 3 0.06  0.00 0.71  0 1.23 0.19  0.19  0.12 spam
## 4 0.00  0.00 0.00  0 0.63 0.00  0.31  0.63 spam
## 5 0.00  0.00 0.00  0 0.63 0.00  0.31  0.63 spam
## 6 0.00  0.00 0.00  0 1.85 0.00  0.00  1.85 spam
```

### Question

Peut-on construire à partir de ces données une méthode de *détection automatique* de spam ?

## 1.3 Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

### Régression vs classification

- *Données* de type *entrée-sortie* :  $d_n = (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  où  $x_i \in \mathcal{X}$  représente l'entrée et  $y_i \in \mathcal{Y}$  la sortie.

### Objectifs

1. *Expliquer* le(s) mécanisme(s) liant les entrée  $x_i$  aux sorties  $y_i$  ;
2. *Prédire* « au mieux » la sortie  $y$  associée à une nouvelle entrée  $x \in \mathcal{X}$ .

### Vocabulaire

- Lorsque la variable à expliquer est quantitative ( $\mathcal{Y} \subseteq \mathbb{R}$ ), on parle de *régression*.
- Lorsqu'elle est qualitative ( $\text{Card}(\mathcal{Y})$  fini), on parle de *classification (supervisée)*.

## Exemples

- La plupart des problèmes présentés précédemment peuvent être appréhendés dans un contexte d'*apprentissage supervisé* : on cherche à expliquer une sortie  $y$  par des entrées  $x$  :

$y_i$	$x_i$	
Chiffre	image	Classification
Mot	courbe	Classification
Spam	présence/absence de mots	Classification
C. en $O_3$	données météo.	Régression

## Remarque

La nature des variables associées aux *entrées*  $x_i$  est *variée* (quanti, quali, fonctionnelle...).

## Un début de formalisation mathématique

- Etant données des observations  $d_n = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$  on cherche à *expliquer/prédire* les sorties  $y_i \in \mathcal{Y}$  à partir des entrées  $x_i \in \mathcal{X}$ .
- Il s'agit donc de trouver *une fonction de prévision*  $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  telle que

$$f(x_i) \approx y_i, i = 1, \dots, n.$$

- Nécessité de se donner un *critère* qui permette de mesurer la qualité des fonctions de prévision  $f$ .
- Le plus souvent, on utilise une *fonction de perte*  $\ell : \mathcal{Y} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{R}^+$  telle que

$$\begin{cases} \ell(y, y') = 0 & \text{si } y = y' \\ \ell(y, y') > 0 & \text{si } y \neq y'. \end{cases}$$

## Vision statistique

- On suppose que les données  $d_n = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$  sont des *réalisations d'un n-échantillon*  $\mathcal{D}_n = \{(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)\}$  de loi *inconnue*.
- Les  $X_i$  sont des *variables aléatoires* à valeurs dans  $\mathcal{X}$ , les  $Y_i$  dans  $\mathcal{Y}$ .
- Le plus souvent on supposera que les couples  $(X_i, Y_i), i = 1, \dots, n$  sont *i.i.d* de loi (*inconnue*)  $\mathbf{P}$ .

## Performance d'une fonction de prévision

- Etant donné une *fonction de perte*  $\ell : \mathcal{Y} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{R}^+$ , la performance d'une *fonction de prévision*  $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$  est mesurée par

$$\mathcal{R}(f) = \mathbf{E}[\ell(Y, f(X))]$$

- où  $(X, Y)$  est indépendant des  $(X_i, Y_i)$  et de même loi  $P$ .
- $\mathcal{R}(f)$  est appelé *risque* ou *erreur de généralisation* de  $f$ .

## Fonction de prévision optimale

- $\mathcal{R}(f) \implies$  "Erreur moyenne" de  $f$  par rapport à la loi des données.
- *Idée* : trouver  $f$  qui a la *plus petite erreur*.

## Aspect théorique

- Pour une fonction de perte  $\ell : \mathcal{Y} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{R}^+$  donnée, le problème *théorique* consiste à trouver

$$f^* \in \underset{f}{\operatorname{argmin}} \mathcal{R}(f) \iff \mathcal{R}(f^*) \leq \mathcal{R}(f) \forall f$$

- Une telle fonction  $f^*$  (si elle existe) est appelée *fonction de prévision optimale* pour la perte  $\ell$ .

## Aspect pratique

- La fonction de prévision optimale  $f^*$  dépend le plus souvent de la loi  $\mathbf{P}$  des  $(X, Y)$  qui est en pratique *inconnue*.
- Le job du statisticien est de trouver un *estimateur*  $f_n = f_n(\cdot, \mathcal{D}_n)$  tel que  $\mathcal{R}(f_n) \approx \mathcal{R}(f^*)$ .

## Définition

Un *algorithme de prévision* est représenté par une suite  $(f_n)_n$  d'applications (mesurables) telles que pour  $n \geq 1$ ,  $f_n : \mathcal{X} \times (\mathcal{X} \times \mathcal{Y})^n \rightarrow \mathcal{Y}$ .

## Propriétés statistiques d'un algorithme

- 1 un **algorithme** : 1 estimateur  $f_n(\cdot) = f_n(\cdot, \mathcal{D}_n)$  de  $f^*$ .

### Propriétés statistiques

- **Biais** :  $\mathbf{E}[f_n(x)] - f^*(x) \implies$  prévisions "en moyenne" ;
- **Variance** :  $\mathbf{V}[f_n(x)] \implies$  stabilité des prévisions ;
- **Consistance** :  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{R}(f_n) = \mathcal{R}(f^*) \implies$  précision quand  $n$  augmente ;
- ...

## 1.4 L'algorithme des plus proches voisins

- Algorithme **simple** qui permet de répondre à des problèmes de **régression** et de **classification**.
- Approche **non paramétrique** basée sur des **moyennes locales**.

### **Idée**

Estimer la fonction inconnue au point  $x$  par une **moyenne** des  $y_i$  tels que  $x_i$  est **proche** de  $x$ .

### kppv en régression

- $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  avec  $x_i \in \mathbb{R}^d$  et  $y_i \in \mathbb{R}$ .

### Définition

Soit  $k \leq n$ . L'estimateur des  **$k$  plus proches voisins** de  $m^*(x)$  est défini par

$$m_{n,k}(x) = \frac{1}{k} \sum_{i \in \text{kppv}(x)} y_i$$

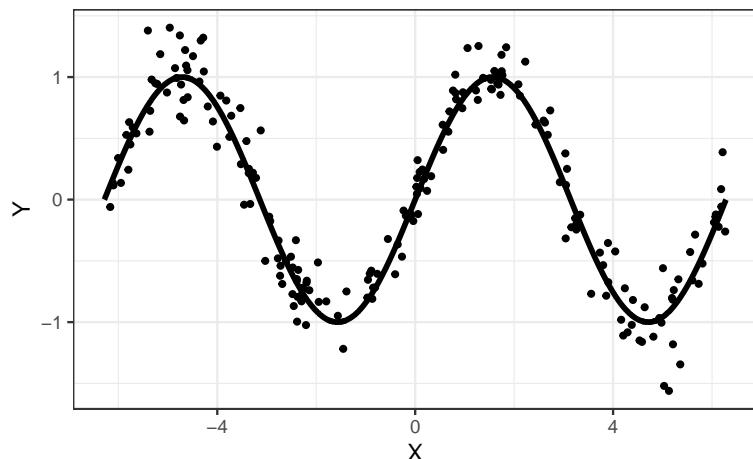
avec

$$\text{kppv}(x) = \{i \leq n : \|x - x_i\| \leq \|x - x_{(k)}\|\}$$

et  $\|x - x_{(k)}\|$  la  $k^{\text{e}}$  plus petite valeur parmi  $\{\|x - x_1\|, \dots, \|x - x_n\|\}$ .

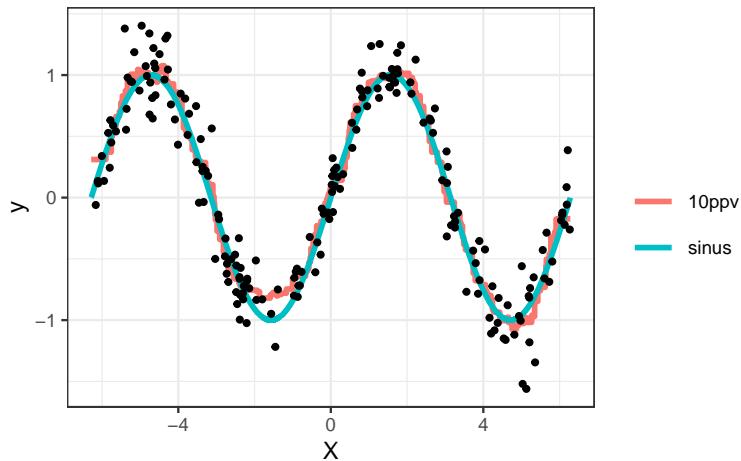
### Exemple

- On veut estimer la fonction **sinus** à partir du nuage de points



- La fonction **kknn** du package **kknn** permet d'entraîner l'algorithme des kppv

```
> library(kknn)
> knn10 <- kknn(Y~., train=nuage.sinus, test=grille.sinus,
+ + k=10, kernel="rectangular")
```



### kppv en classification binaire

—  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  avec  $x_i \in \mathbb{R}^d$  et  $y_i \in \{0, 1\}$ .

#### Définition

Soit  $k \leq n$ . L'algorithme des *k plus proches voisins* est défini par

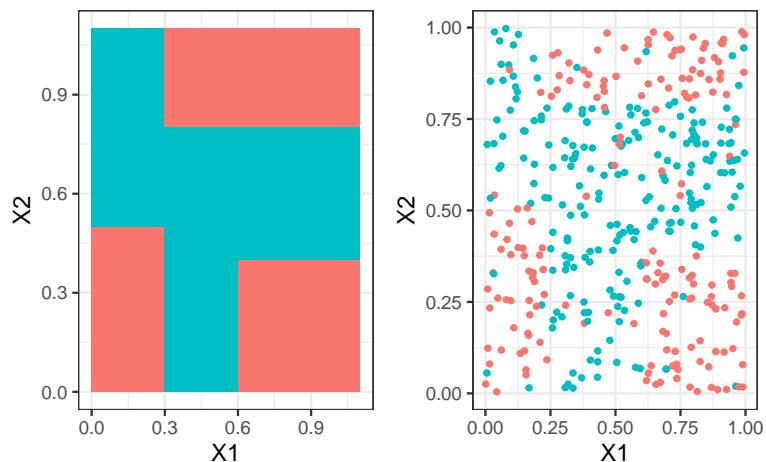
$$g_{n,k}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i \in \text{kppv}(x)} \mathbf{1}_{y_i=1} \geq \sum_{i \in \text{kppv}(x)} \mathbf{1}_{y_i=0} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

pour la prévision des *groupes* et par

$$S_{n,k}(x) = \frac{1}{|\text{kppv}(x)|} \sum_{i \in \text{kppv}(x)} \mathbf{1}_{y_i=1}$$

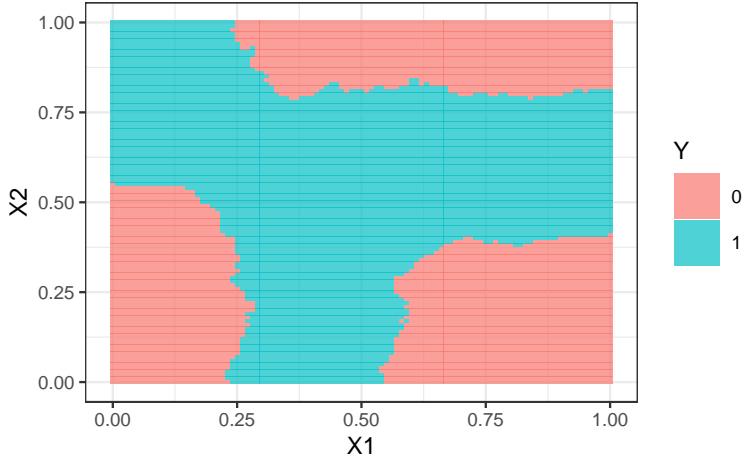
pour la prévision de la *probabilité*  $\mathbf{P}(Y = 1|X = x)$ .

#### Exemple



— La fonction **kknn** du package **kknn** permet d'entrainer l'algorithme des kppv

```
> prev <- kknn(Y~., train=ex.classif2D, test=px, k=25,
+   kernel="rectangular")$fitted.values
```



## 1.5 Exemples de fonction de perte

### Choix de la fonction de perte

- Le cadre mathématique développé précédemment sous-entend qu'une fonction est *performante* (voire *optimale*) vis-à-vis d'un *critère* (représenté par la *fonction de perte*  $\ell$ ).
- Un algorithme de prévision performant pour un critère ne sera *pas forcément performant pour un autre*.

### Conséquence pratique

Avant de s'attacher à construire un algorithme de prévision, il est **capital** de savoir **mesurer la performance** d'un algorithme de prévision.

- Une fonction de perte  $\ell : \mathcal{Y} \times \tilde{\mathcal{Y}} \rightarrow \mathbb{R}^+$  dépend de l'*espace des observations*  $\mathcal{Y}$  et de celui des *prévisions*  $\tilde{\mathcal{Y}}$ .
- On distingue **3 catégories** de fonction de perte en fonction de ces espaces :
  1. Prévisions *numériques* : problème de *régression* où on cherche à prédire la *valeur* de  $Y : \ell : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$  ;
  2. Prévision *de groupes* : problème de *classification* où on veut prédire un *label* :  $\ell : \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, K\} \rightarrow \mathbb{R}^+$  ;
  3. Prévision de *probabilités* : problème de *classification* où on veut prédire les *probabilités*  $\mathbf{P}(Y = k | X = x) : \ell : \{1, \dots, K\} \times \mathbb{R}^K \rightarrow \mathbb{R}^+$ .

### Régression

- $\mathcal{Y} = \mathbb{R}$ , une prévision = un réel  $\implies m : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ ;
- Une perte = une *distance* entre deux nombres, par exemple la *perte quadratique* :

$$\begin{aligned}\ell : \mathbb{R} \times \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{R}^+ \\ (y, y') &\mapsto (y - y')^2\end{aligned}$$

- Le *risque* (risque quadratique) est alors donné par

$$\mathcal{R}(m) = \mathbf{E}[(Y - m(X))^2]$$

- et la *fonction optimale (inconnue)*, appelée *fonction de régression*, par

$$m^*(x) = \mathbf{E}[Y | X = x].$$

## Classification

- $\mathcal{Y} = \{1, \dots, K\}$ , une prévision = un **groupe**  $\Rightarrow g : \mathcal{X} \rightarrow \{1, \dots, K\}$  ;
- Une perte = 1 **coût** pour une mauvaise prévision, par exemple la **perte indicatrice**

$$\begin{aligned}\ell : \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, K\} &\rightarrow \mathbb{R}^+ \\ (y, y') &\mapsto \mathbf{1}_{y \neq y'}\end{aligned}$$

- Le **risque** (erreur de classification) est alors donné par

$$\mathcal{R}(g) = \mathbf{E}[\mathbf{1}_{g(X) \neq Y}] = \mathbf{P}(g(X) \neq Y).$$

- et la **fonction optimale (inconnue)**, appelée **règle de Bayes**, par

$$g^*(x) = \operatorname{argmax}_k \mathbf{P}(Y = k | X = x).$$

## Classification binaire

- $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$ , une prévision = un **groupe**  $\Rightarrow g : \mathcal{X} \rightarrow \{-1, 1\}$ .
- Ce cadre permet une **analyse plus fine** des différents types d'erreur.
- En effet, seules **4 situations** peuvent se produire

	$g(x) = -1$	$g(x) = 1$
$y = -1$	VN	FP
$y = 1$	FN	VP

- On peut les quantifier en terme de **probabilités**.

Pour aller plus vite

## Erreurs binaires

- **Spécificité**  $\Rightarrow$  bien prédire les négatifs :

$$\text{sp}(g) = \mathbf{P}(g(X) = -1 | Y = -1),$$

- **Sensibilité**  $\Rightarrow$  bien prédire les positifs :

$$\text{se}(g) = \mathbf{P}(g(X) = 1 | Y = 1),$$

- **Taux de faux négatifs**  $\Rightarrow$  prédire négatif à tort :

$$\text{fn}(g) = \mathbf{P}(g(X) = -1 | Y = 1),$$

- **Taux de faux positifs**  $\Rightarrow$  prédire positif à tort :

$$\text{fp}(g) = \mathbf{P}(g(X) = 1 | Y = -1).$$

## Critères binaires

De nombreux critères s'obtiennent en combinant ces probabilités :

$$\text{EC}(g) = \mathbf{P}(g(X) \neq Y) = \text{fp}(g)\mathbf{P}(Y = -1) + \text{fn}(g)\mathbf{P}(Y = 1).$$

## Quelques critères binaires

- **Balanced Accuracy** :

$$\frac{1}{2}\mathbf{P}(g(X) = -1 | Y = -1) + \frac{1}{2}\mathbf{P}(g(X) = 1 | Y = 1) = \frac{1}{2}(\text{se}(g) + \text{sp}(g)).$$

- **$F_1$ -score** :

$$2 \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}},$$

avec

$$\text{Precision} = \mathbf{P}(Y = 1 | g(X) = 1) \quad \text{et} \quad \text{Recall} = \mathbf{P}(g(X) = 1 | Y = 1).$$

- **Kappa de Cohen**...

## Remarque

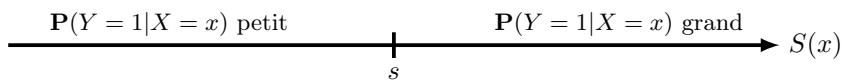
Mieux adapté que l'erreur de classification au cas de **données déséquilibrées**.

## Classification (pour des probabilités)

- $\mathcal{Y} = \{1, \dots, K\}$ , une prévision =  **$K - 1$  probabilités**  $p_k(x) = \mathbf{P}(Y = k|X = x), k = 1, \dots, K - 1$ .
- Les fonctions de perte sont généralement définies comme généralisation de pertes spécifiques au problème de **classification binaire**.
- **Classification binaire** avec  $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$  et  $S : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$  ( $S(x) = \mathbf{P}(Y = 1|X = x)$  ou une transformation bijective de cette probabilité)  $\Rightarrow$  fonction de **score**.

## Fonction de score

- **Objectif d'un score** : ordonner



- avant (d'éventuellement) **classer** en fixant un seuil  $s \in \mathbb{R}$  :

$$g_s(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } S(x) > s \\ -1 & \text{sinon.} \end{cases}$$

- Pour un seuil  $s$  donné, on a les erreurs (FP et FN)

$$\alpha(s) = \mathbf{P}(S(X) > s | Y = -1) = 1 - \text{sp}(s)$$

et

$$\beta(s) = \mathbf{P}(S(X) \leq s | Y = 1) = 1 - \text{se}(s).$$

## Courbe ROC

- **Idée** : s'affranchir du choix de  $s$  en **visualisant les erreurs  $\alpha(s)$  et  $\beta(s)$**  sur un graphe 2D pour toutes les valeurs de  $s$ .

## Définition

La **courbe ROC** de  $S$  est la courbe paramétrée par les valeurs de seuil  $s$  dont les abscisses et ordonnées sont définies par

$$\begin{cases} x(s) = \mathbf{P}(S(X) > s | Y = -1) = \alpha(s) \\ y(s) = \mathbf{P}(S(X) > s | Y = 1) = 1 - \beta(s). \end{cases}$$

## Visualisation

- **Abscisses** : les faux positifs ou la spécificité ;
- **Ordonnées** : les faux négatifs ou la sensibilité.

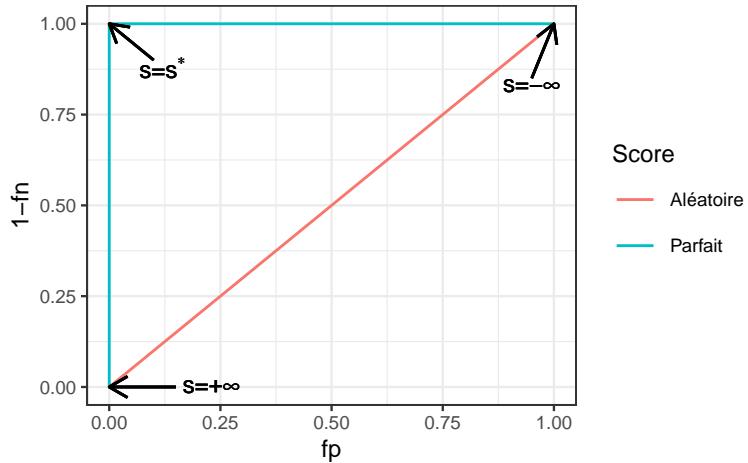
## Analyse de la courbe ROC

- Une proba est entre 0 et 1  $\Rightarrow$  ROC vit dans le carré  $[0, 1]^2$ .
- $x(-\infty) = y(-\infty) = 1$  et  $x(+\infty) = y(+\infty) = 1 \Rightarrow$  ROC part du point  $(1, 1)$  pour arriver en  $(0, 0)$ .
- **ROC parfaite** : il existe  $s^*$  tel que  $\alpha(s^*) = \beta(s^*) = 0 \Rightarrow$  ROC est définie par l'union des segments

$$[(1, 1); (0, 1)] \quad \text{et} \quad [(0, 1); (0, 0)].$$

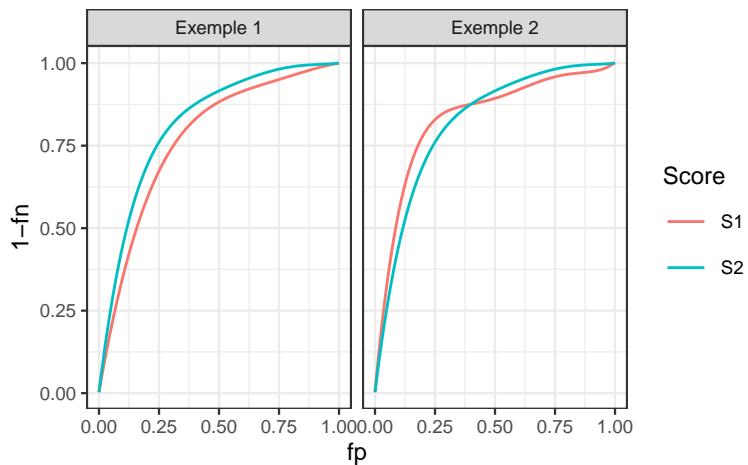
- **Mauvaise ROC** :  $S(X)$  et  $Y$  sont indépendantes  $\Rightarrow x(s) = y(s)$  pour tout  $s \in \mathbb{R}$  et ROC correspond à la première bissectrice.

## Visualisation



## Interprétation

On évalue la *performance d'un score* par sa **capacité à se rapprocher** le plus vite possible de la droite  $y = 1$ .



## Comparaison

- **Exemple 1** : S2 meilleur que S1.
- **Exemple 2** : il y a débat...
- **Idée** : utiliser l'*aire sous la courbe*.

## AUC

### Définition

On appelle AUC l'aire sous la courbe ROC de  $S$ .

### Propriété

- $0.5 \leq \text{AUC}(S) \leq 1$ .
- Plus l'AUC est *grand, meilleur* est le score.

## Interprétation de l'AUC

### Propriété

Soit  $(X_1, Y_1)$  et  $(X_2, Y_2)$  indépendants et de même loi que  $(X, Y)$ , on a

$$\begin{aligned} \text{AUC}(S) &= \mathbf{P}(S(X_1) > S(X_2) | Y_1 = 1, Y_2 = -1) \\ &\quad + \frac{1}{2} \mathbf{P}(S(X_1) = S(X_2) | Y_1 = 1, Y_2 = -1). \end{aligned}$$

En particulier si  $S(X)$  est continue alors

$$\text{AUC}(S) = \mathbf{P}(S(X_1) \geq S(X_2) | Y_1 = 1, Y_2 = -1).$$

### Interprétation

- L'AUC correspond à la probabilité que le score ordonne correctement deux observations prélevées aléatoirement dans les groupes -1 et 1.
- $\text{AUC}(S) = 0.9 \implies$  dans 90% des cas, le score d'un individu positif sera plus grand que le score d'un individu négatif.

### Perte AUC et score optimal

- Remarquons que

$$\text{AUC}(S) = \mathbf{E}[\mathbf{1}_{S(X_1) > S(X_2)} | Y_1 = 1, Y_2 = -1].$$

- L'AUC peut donc s'écrire comme l'*espérance d'une fonction de perte particulière*

$$\ell((y_1, y_2), (S(x_1), S(x_2))) = \mathbf{1}_{S(x_1) > S(x_2)} \quad \text{avec } y_1 = 1 \text{ et } y_2 = -1.$$

### Proposition

Le **score optimal** par rapport à l'AUC est

$$S^*(x) = \mathbf{P}(Y = 1 | X = x).$$

En effet pour tout score  $S : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$  on a

$$\text{AUC}(S^*) \geq \text{AUC}(S).$$

### Résumé

	Perte $\ell(y, f(x))$	Risque $\mathcal{R}(f)$	Champion $f^*$
Régression	$(y - m(x))^2$	$\mathbf{E}[Y - m(X)]^2$	$\mathbf{E}[Y   X = x]$
Classif. binaire	$\mathbf{1}_{y \neq g(x)}$	$\mathbf{P}(Y \neq g(X))$	Bayes
Scoring	$\mathbf{1}_{S(x_1) > S(x_2)}$	$\text{AUC}(S)$	$\mathbf{P}(Y = 1   X = x)$

### Le package yardstick

- Nous verrons dans la section suivante que ces *critères* se **calcurent** (ou plutôt s'**estiment**) en confrontant les valeurs *observées*  $y_i$  aux valeurs *prédictes* d'un algorithme. Par exemple

```
> head(tbl)
## # A tibble: 6 x 3
##   obs   proba class
##   <dbl> <dbl> <dbl>
## 1 0     0.117 0
## 2 0     0.288 0
## 3 1     0.994 1
## 4 0     0.528 1
## 5 0     0.577 1
## 6 1     0.997 1
```

- Le package **yardstick** contient un ensemble de fonctions qui permettent de calculer les critères :

<https://yardstick.tidymodels.org/articles/metric-types.html>

### Exemples

- Erreur de classification (ou plutôt accuracy) avec **accuracy** :

```
> library(yardstick)
> tbl %>% accuracy(truth=obs, estimate=class)
## # A tibble: 1 x 3
##   .metric  .estimator .estimate
##   <chr>    <chr>        <dbl>
## 1 accuracy binary     0.834
```

- AUC avec **roc\_auc**

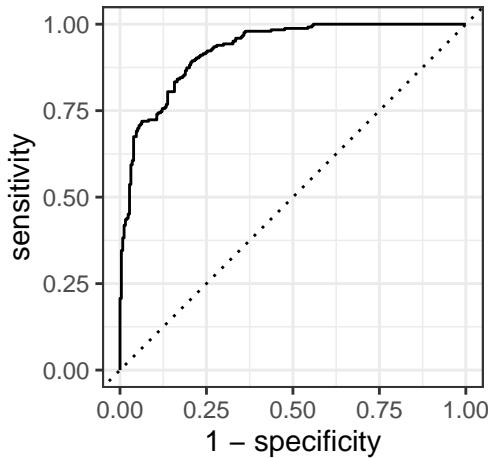
```
> tbl %>% roc_auc(truth=obs, estimate=proba, event_level="second")
## # A tibble: 1 x 3
##   .metric  .estimator .estimate
##   <chr>    <chr>        <dbl>
## 1 roc_auc binary     0.926
```

- On peut aussi définir plusieurs critères :

```
> multi_metric <- metric_set(accuracy, bal_accuracy, f_meas, kap)
> tbl %>% multi_metric(truth=obs, estimate=class, event_level="second")
## # A tibble: 4 x 3
##   .metric  .estimator .estimate
##   <chr>    <chr>        <dbl>
## 1 accuracy binary     0.834
## 2 bal_accuracy binary     0.834
## 3 f_meas    binary     0.832
## 4 kap       binary     0.668
```

- et tracer des courbes ROC avec **roc\_curve** et **autoplot**

```
> tbl %>% roc_curve(truth=obs, estimate=proba, event_level="second") %>%
+   autoplot()
```



## 1.6 Le sur-apprentissage

- La plupart des modèles statistiques renvoient des estimateurs qui dépendent de *paramètres λ à calibrer*.

### Exemples

- nombres de variables dans un modèle linéaire ou logistique.
- paramètre de pénalités pour les régressions pénalisées.
- profondeur des arbres.
- nombre de plus proches voisins.
- nombre d'itérations en boosting.
- ...

### Remarque importante

Le choix de ces paramètres est le plus souvent *crucial* pour la *performance* de l'estimateur sélectionné.

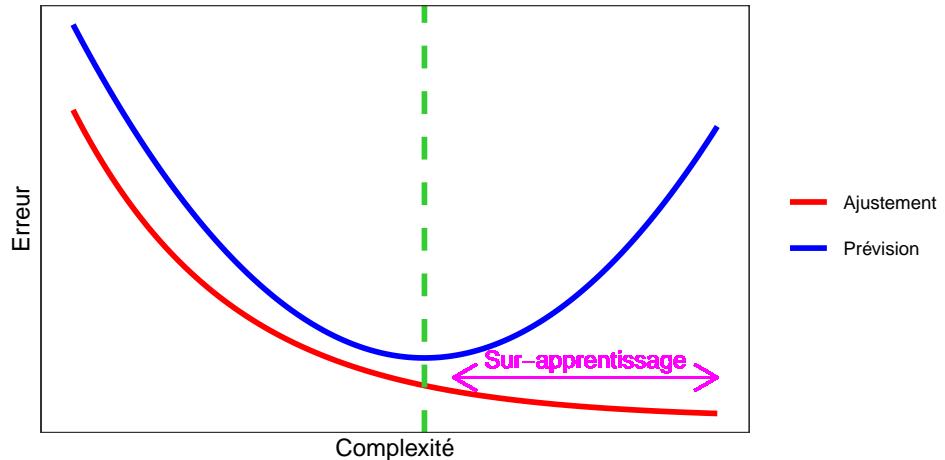
- Le paramètre  $\lambda$  à sélectionner représente la *complexité du modèle* :

### Complexité $\Rightarrow$ compromis biais/variance

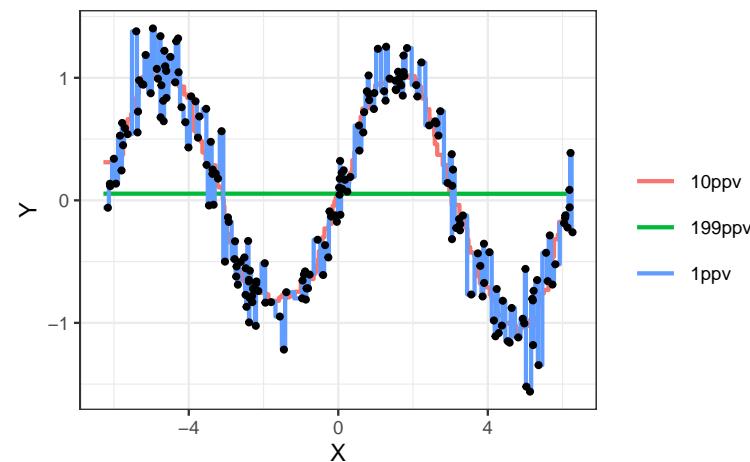
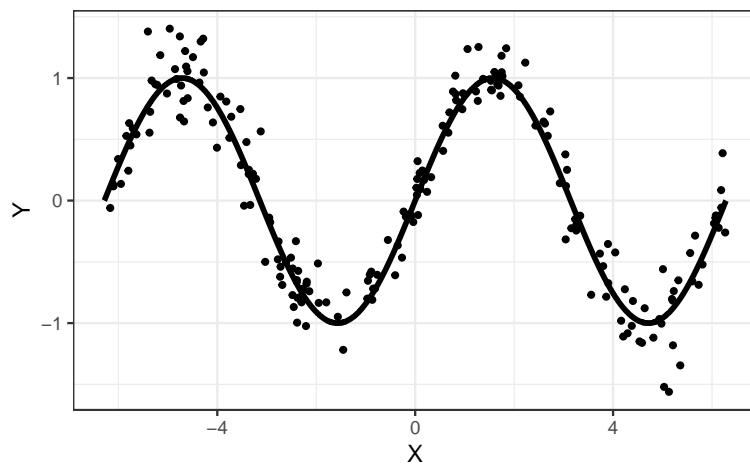
- $\lambda$  petit  $\Rightarrow$  modèle peu flexible  $\Rightarrow$  mauvaise adéquation sur les données  $\Rightarrow$  biais  $\nearrow$ , variance  $\searrow$ .
- $\lambda$  grand  $\Rightarrow$  modèle trop flexible  $\Rightarrow$  sur-ajustement  $\Rightarrow$  biais  $\searrow$ , variance  $\nearrow$ .

### Overfitting

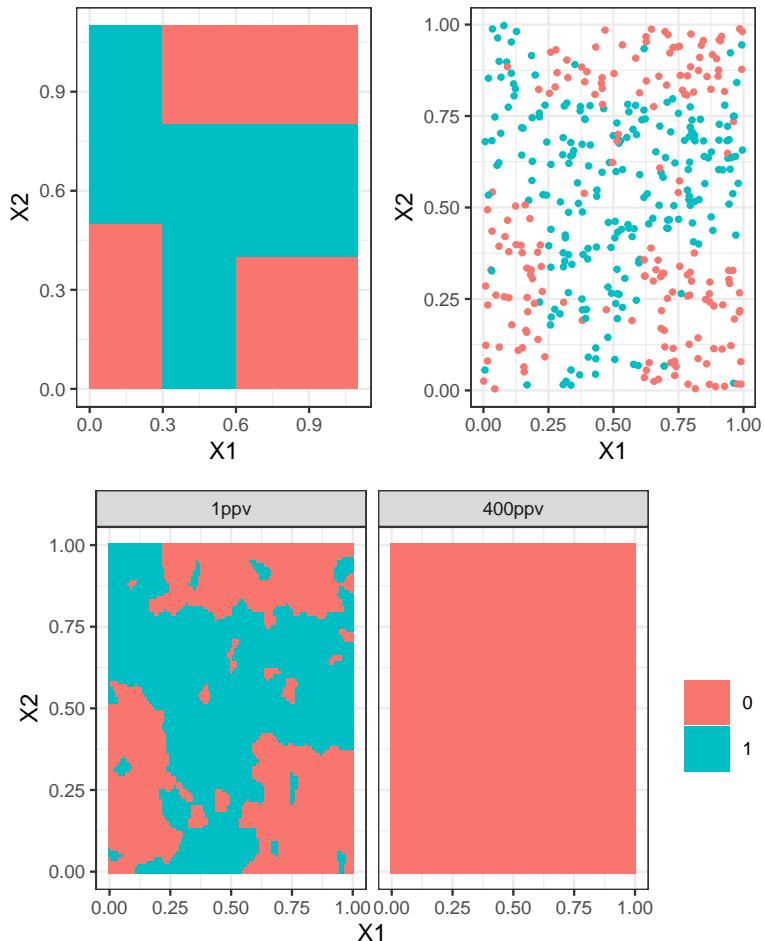
*Sur-ajuster* signifie que le modèle va (trop) bien ajuster les données d'apprentissage, il aura du mal à s'adapter à de nouveaux individus.



### Overfitting en régression



## Overfitting en classification supervisée



### Application shiny

[https://lrouviere.shinyapps.io/overfitting\\_app/](https://lrouviere.shinyapps.io/overfitting_app/)

## 1.7 Complexité versus compromis biais/variance

- 1 algorithme  $f_n(x, \mathcal{D}_n)$  peut être vu comme 1 estimateur de la fonction de prévision optimale  $f^*(x)$ .
- Comme tout estimateur, il possède des propriétés comme
  1. la variance  $\mathbf{V}[f_n(x, \mathcal{D}_n)] \Rightarrow$  mesure la dispersion des prévisions au point  $x$  par rapport à la loi des données  $\mathcal{D}_n$ .
  2. le biais  $\mathbf{E}[f_n(x, \mathcal{D}_n)] - f^*(x) \Rightarrow$  mesure l'écart entre la moyenne de ces prévisions et la fonction optimale.

### Remarque

La quête de la complexité optimale d'un algorithme se retrouve dans la recherche du meilleur compromis biais/variance.

- Complexité (trop) faible  $\Rightarrow \searrow$  sensibilité aux données d'apprentissage  $\Rightarrow \searrow$  dispersion et donc  $\searrow$  variance mais  $\nearrow$  difficulté à capturer les spécificités de la fonction à estimer  $\Rightarrow \nearrow$  biais  $\Rightarrow$  sous-apprentissage.
- Complexité (trop) grande  $\Rightarrow \nearrow$  sensibilité aux données d'apprentissage  $\Rightarrow \nearrow$  dispersion et donc  $\nearrow$  variance mais  $\Rightarrow \searrow$  biais  $\Rightarrow$  sur-apprentissage.

### Conclusion

Le sur-apprentissage se traduit généralement par une variance trop élevée due à une trop grande complexité de l'algorithme.

## L'exemple des kppv

- On peut retrouver les remarques précédentes avec des arguments mathématiques.
- *Exemple des kppv en régression* : sous des hypothèses standards en statistique non-paramétrique, on a

$$\mathbf{E}\|m_{n,k} - m^*\| = \mathbf{E} \int |m_{n,k}(x) - m^*(x)| \mu dx \leq \frac{c_1}{k} + c_2 \left(\frac{k}{n}\right)^{2/d}.$$

- Décomposition biais/variance.
- *k grand*  $\Rightarrow$  biais  $\nearrow$  - variance  $\searrow$   $\Rightarrow$  sous-apprentissage.
- *k petit*  $\Rightarrow$  biais  $\searrow$  - variance  $\nearrow$   $\Rightarrow$  sur-apprentissage.

## 2 Estimation du risque

### Rappels

- $n$  observations  $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$  i.i.d à valeurs dans  $\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$ .

### Objectif

Etant donnée une fonction de perte  $\ell : \mathcal{Y} \times \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{R}^+$ , on cherche un algorithme de prévision  $f_n(x) = f_n(x, \mathcal{D}_n)$  qui soit "proche" de l'oracle  $f^*$  défini par

$$f^* \in \operatorname{argmin}_f \mathcal{R}(f)$$

où  $\mathcal{R}(f) = \mathbf{E}[\ell(Y, f(X))]$ .

### Question

Etant donné un algorithme  $f_n$ , que vaut son risque  $\mathcal{R}(f_n)$  ?

### Risque empirique

- La loi de  $(X, Y)$  étant inconnue en pratique, il est impossible de calculer  $\mathcal{R}(f_n) = \mathbf{E}[\ell(Y, f_n(X))]$ .
- Première approche :  $\mathcal{R}(f_n)$  étant une espérance, on peut l'estimer (LGN) par sa version empirique

$$\mathcal{R}_n(f_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ell(Y_i, f_n(X_i)).$$

### Problème

- L'échantillon  $\mathcal{D}_n$  a déjà été utilisé pour construire l'algorithme de prévision  $f_n \Rightarrow$  la LGN ne peut donc s'appliquer !
- Conséquence :  $\mathcal{R}_n(f_n)$  conduit souvent à une sous-estimation de  $\mathcal{R}(f_n)$ .

### Une solution

Méthodes de ré-échantillonnage : validation croisée, bootstrap...

## 2.1 Ré-échantillonnage

### Présentation

- Différentes méthodes pour estimer  $\mathcal{R}(f_n)$ .
- Presque toujours la même idée : séparer les données en blocs
  1. entraîner l'algorithme sur certains blocs
  2. le tester (prédire) sur d'autres
  3. en déduire l'estimateur du risque
- La différence entre les différentes approches se trouve dans la manière de construire les blocs.

## Apprentissage - Validation ou Validation hold out

- Elle consiste à séparer l'échantillon  $\mathcal{D}_n$  en :
  1. un *échantillon d'apprentissage*  $\mathcal{D}_{\text{app}}$  pour construire  $f_n$  ;
  2. un *échantillon de validation*  $\mathcal{D}_{\text{test}}$  utilisé pour estimer le risque de  $f_n$ .

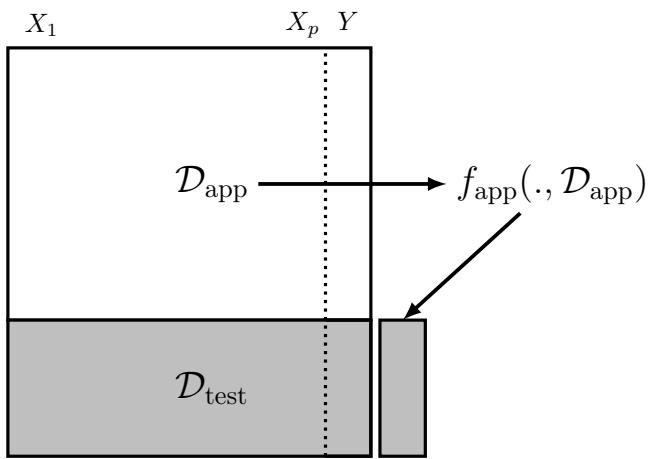
### Algorithme

Entrée :  $\{\mathcal{A}, \mathcal{T}\}$  une partition de  $\{1, \dots, n\}$  en deux parties.

1. Ajuster l'algorithme de prévision en utilisant uniquement les données d'apprentissage  $\mathcal{D}_{\text{app}} = \{(x_i, y_i) : i \in \mathcal{A}\}$ . On désigne par  $f_{\text{app}}(\cdot, \mathcal{D}_{\text{app}})$  l'algorithme obtenu.
2. Calculer les valeurs prédites  $f_{\text{app}}(x_i, \mathcal{D}_{\text{app}})$  par l'algorithme pour chaque observation de l'échantillon test  $\mathcal{D}_{\text{test}} = \{(x_i, y_i) : i \in \mathcal{T}\}$

Retourner :

$$\frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_{i \in \mathcal{T}} \ell(y_i, f_{\text{app}}(x_i, \mathcal{D}_{\text{app}})).$$



### Commentaires

Nécessite d'avoir un nombre suffisant d'observations dans

1.  $\mathcal{D}_{\text{app}}$  pour bien ajuster l'algorithme de prévision ;
2.  $\mathcal{D}_{\text{test}}$  pour bien estimer l'erreur de l'algorithme.

## Validation croisée K-blocs

- Principe : répéter la hold out sur *differentes partitions*.

### Algorithme - CV

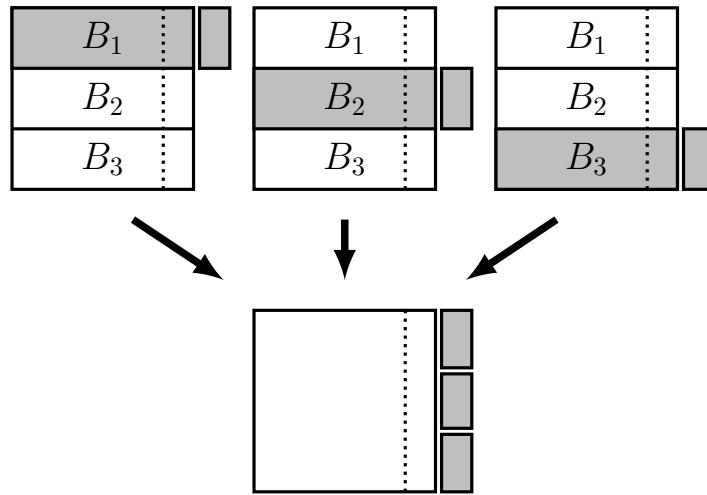
Entrée :  $\{B_1, \dots, B_K\}$  une partition de  $\{1, \dots, n\}$  en  $K$  blocs.

Pour  $k = 1, \dots, K$  :

1. Ajuster l'algorithme de prévision en utilisant l'ensemble des données privé du  $k^{\text{e}}$  bloc, c'est-à-dire  $\mathcal{B}_k = \{(x_i, y_i) : i \in \{1, \dots, n\} \setminus B_k\}$ . On désigne par  $f_k(\cdot) = f_k(\cdot, \mathcal{B}_k)$  l'algorithme obtenu.
2. Calculer la valeur prédite par l'algorithme pour chaque observation du bloc  $k$  :  $f_k(x_i), i \in B_k$  et en déduire le risque sur le bloc  $k$  :

$$\widehat{\mathcal{R}}(f_k) = \frac{1}{|B_k|} \sum_{i \in B_k} \ell(y_i, f_k(x_i)).$$

Retourner :  $\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \widehat{\mathcal{R}}(f_k)$ .



### Commentaires

- Le *choix de K* doit être fait par l'utilisateur (souvent  $K = 10$ ).
- *Avantage* : plus adapté que la technique apprentissage/validation  $\Rightarrow$  plus stable et précis.
- *Inconvénient* : plus coûteux en temps de calcul.

### Leave one out

- Lorsque  $K = n$ , on parle de validation croisée *leave one out*;
- Le risque est alors estimé par

$$\widehat{\mathcal{R}}_n(f_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ell(Y_i, f_n^{(i)}(X_i))$$

où  $f_n^{(i)}$  désigne l'algorithme de prévision construit sur  $\mathcal{D}_n$  *amputé de la i-ème observation*.

$\Rightarrow$  recommandé uniquement lorsque  $n$  est petit.

### Autres approches

- *Estimation par pénalisation* : critère ajustement/complexité,  $C_p$  de Mallows, AIC-BIC...
- *Validation croisée Monte-Carlo* : répéter plusieurs fois la validation hold out ;
- *Bootstrap* : notamment Out Of Bag ;
- voir [Wikistat, 2020b].

## 2.2 Calibrer un algorithme

### Calibrer des paramètres

- Tous les algorithmes dépendent de *paramètres  $\theta$*  que l'utilisateur doit sélectionner.
- Le procédé est *toujours le même* et peut se résumer dans l'algorithme suivant.

### Choix de paramètres par minimisation du risque (grid search)

Entrées :

- Une grille `grille.theta` de valeurs pour  $\theta$  ;
- Un risque de prévision  $\mathcal{R}$  ;
- un algorithme d'estimation du risque.

Pour chaque  $\theta$  dans `grille.theta` :

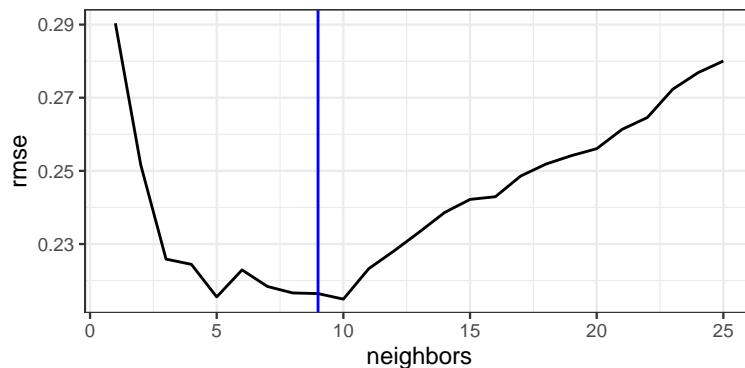
- Estimer  $\mathcal{R}(f_{n,\theta})$  par l'algorithme choisi  $\Rightarrow \widehat{\mathcal{R}}(f_{n,\theta})$

Retourner :  $\widehat{\theta}$  une valeur de  $\theta$  qui minimise  $\widehat{\mathcal{R}}(f_{n,\theta})$ .

## Exemple

Problème : choisir  $k$  pour l'exemple du sinus.

- Grille :  $\{1, 2, \dots, 25\}$  ;
- Risque : RMSE ;
- Ré-échantillonnage : validation croisée 10 blocs.



## 2.3 Le package tidymodels

### Présentation du package

- Successeur de `caret` pour conduire des projets machine learning sur R.
- Meta package qui inclut
  - `rsample` : pour ré-échantillonner
  - `yardstick` : pour les fonctions de perte
  - `recipe` : pour les recettes de préparation... des données
  - `tune` : pour calibrer les algorithmes
  - ...
- Tutoriel : <https://www.tidymodels.org>
- Le procédé de calibration d'un algorithme est *automatisé* dans `tidymodels`.
- Il faut spécifier les différents paramètres :
  - la `méthode` (logistique, ppv, arbre, randomForest...)
  - Une grille pour les `paramètres` (nombre de ppv...)
  - Le `critère de performance` (erreur de classification, AUC, risque quadratique...)
  - La méthode d'estimation du critère (apprentissage validation, validation croisée, bootstrap...)
- Nous l'illustrons à travers le *choix du nombre de voisins* de l'algorithme des  $k$ -ppv.

### Les données

- Une variable binaire à expliquer par 2 variables continues

```
> head(don.2D.500)
## # A tibble: 6 x 3
##   X1     X2 Y
##   <dbl> <dbl> <fct>
## 1 0.721 0.209 0
## 2 0.876 0.766 1
## 3 0.761 0.842 1
## 4 0.886 0.934 0
## 5 0.456 0.676 0
## 6 0.166 0.859 1
```

### Le workflow

- On commence par renseigner l'`algorithme` et la manière dont on va *choisir les paramètres*.

```
> library(tidymodels)
> tune_spec <- 
+   nearest_neighbor(neighbors=tune(), weight_func="rectangular") %>%
+   set_mode("classification") %>%
+   set_engine("knn")
```

- On crée ensuite la *workflow* :

```
> ppv_wf <- workflow() %>%
+   add_model(tune_spec) %>%
+   add_formula(Y ~ .)
```

## Ré-échantillonnage et grille de paramètres

- On spécifie ensuite la *méthode de ré-échantillonnage*, ici une validation croisée 10 blocs

```
> set.seed(12345)
> re_ech_cv <- vfold_cv(don.2D.500, v=10)
> re_ech_cv %>% head()
## # A tibble: 6 x 2
##   splits           id
##   <list>          <chr>
## 1 <split [450/50]> Fold01
## 2 <split [450/50]> Fold02
## 3 <split [450/50]> Fold03
## 4 <split [450/50]> Fold04
## 5 <split [450/50]> Fold05
## 6 <split [450/50]> Fold06
```

- Puis vient la *grille de paramètres*

```
> grille_k <- tibble(neighbors=1:100)
```

⇒ consulter <https://www.tidymodels.org/find/parsnip/> pour trouver les *identifiants* des algorithmes et de leurs paramètres.

## Estimation du risque

- Fonction `tune_grid`

```
> tune_grid(..., resamples=..., grid=..., metrics=...)
```

- Calcul du *risque* pour chaque valeur de la grille :

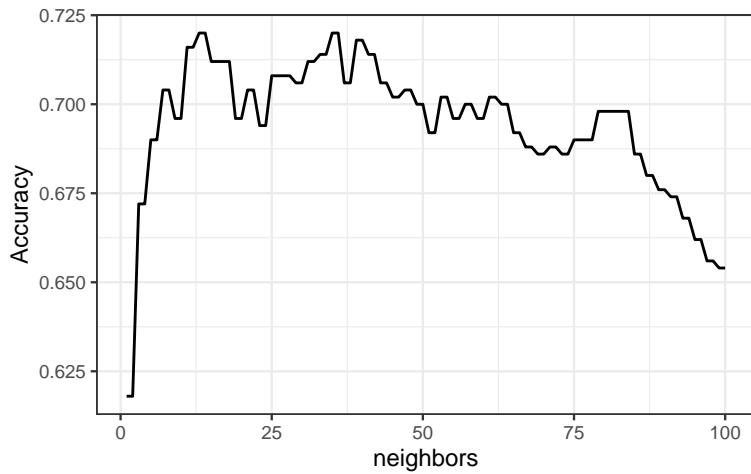
```
> ppv.cv <- ppv_wf %>%
+   tune_grid(
+     resamples = re_ech_cv,
+     grid = grille_k,
+     metrics=metric_set(accuracy))
```

- On lit les résultats avec `collect_metrics` :

```
> ppv.cv %>% collect_metrics() %>% select(1:5) %>% head()
## # A tibble: 6 x 5
##   neighbors .metric .estimator  mean     n
##       <int> <chr>    <chr>    <dbl> <int>
## 1         1 accuracy binary  0.618    10
## 2         2 accuracy binary  0.618    10
## 3         3 accuracy binary  0.672    10
## 4         4 accuracy binary  0.672    10
## 5         5 accuracy binary  0.69     10
## 6         6 accuracy binary  0.69     10
```

## Visualisation des erreurs

```
> tbl <- ppv.cv %>% collect_metrics()
> ggplot(tbl)+aes(x=neighbors,y=mean)+geom_line()+ylab("Accuracy")
```



## Sélection du meilleur paramètre

- On visualise les *meilleures* valeurs de paramètres :

```
> ppv.cv %>% show_best() %>% select(1:6)
## # A tibble: 5 x 6
##   neighbors .metric  .estimator  mean     n std_err
##       <int> <chr>    <chr>      <dbl> <int>   <dbl>
## 1        13 accuracy binary    0.72     10  0.0255
## 2        14 accuracy binary    0.72     10  0.0255
## 3        35 accuracy binary    0.72     10  0.0207
## 4        36 accuracy binary    0.72     10  0.0207
## 5        39 accuracy binary    0.718    10  0.0199
```

- et on choisit celle qui *maximise l'accuracy* :

```
> best_k <- ppv.cv %>% select_best()
> best_k
## # A tibble: 1 x 2
##   neighbors .config
##       <int> <chr>
## 1        13 Preprocessor1_Model013
```

## Algorithme final et prévision

- L'*algorithme final* s'obtient en entrainant la méthode sur *toutes les données* pour la valeur de paramètre sélectionné :

```
> final_ppv <-
+   ppv_wf %>%
+   finalize_workflow(best_k) %>%
+   fit(data = don.2D.500)
```

- On peut maintenant prédire de nouveaux individus :

```
> newx <- tibble(X1=0.3,X2=0.8)
> predict(final_ppv,new_data=newx)
## # A tibble: 1 x 1
##   .pred_class
##   <fct>
## 1 0
```

## Conclusion

- Les *choix* de l'utilisateur sont des *paramètres* de la procédure.
- ⇒ facilement *personnalisable*.
- Aisé de changer le critère, la méthode de ré-échantillonnage...

## 2.4 Compléments

### 2.4.1 Estimer la variance d'un validation croisée

- Une méthode de ré-échantillonnage renvoie un *estimateur*  $\widehat{\mathcal{R}}(f_n)$  du *risque*  $\mathcal{R}(f_n)$ .
- Comme pour tout estimateur, il est important d'*étudier ses propriétés* pour connaître sa *précision*.
- Une telle étude aidera l'utilisateur à *choisir le meilleur algorithme*.

#### Remarque

- Lorsque la méthode utilisée est *répétée sur plusieurs blocs*, il est "facile" d'estimer la *variance* de  $\widehat{\mathcal{R}}(f_n)$ .
- Nous l'illustrons avec la *validation croisée*.
- *Rappel* : l'estimateur de *validation croisée* s'écrit  $\widehat{\mathcal{R}}_{\text{CV}}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \widehat{\mathcal{R}}(f_k)$ .
- On a donc

$$\mathbf{V}[\widehat{\mathcal{R}}_{\text{CV}}(f_n)|\mathcal{D}_n] = \mathbf{V}\left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \widehat{\mathcal{R}}(f_k) \middle| \mathcal{D}_n\right] = \frac{1}{K} \mathbf{V}[\widehat{\mathcal{R}}(f_1)|\mathcal{D}_n].$$

- La variance  $\mathbf{V}[\widehat{\mathcal{R}}(f_1)|\mathcal{D}_n]$  désigne la variance de l'erreur calculée sur un des  $K$  blocs (elles sont toutes égales), on peut l'*estimer* par

$$\widehat{\mathbf{V}}[\widehat{\mathcal{R}}(f_1)|\mathcal{D}_n] = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\widehat{\mathcal{R}}(f_k) - \widehat{\mathcal{R}}_{\text{CV}}(f_n))^2.$$

- On déduit l'*estimateur du risque de validation croisée* en posant

$$\frac{1}{K(K-1)} \sum_{k=1}^K (\widehat{\mathcal{R}}(f_k) - \widehat{\mathcal{R}}_{\text{CV}}(f_n))^2.$$

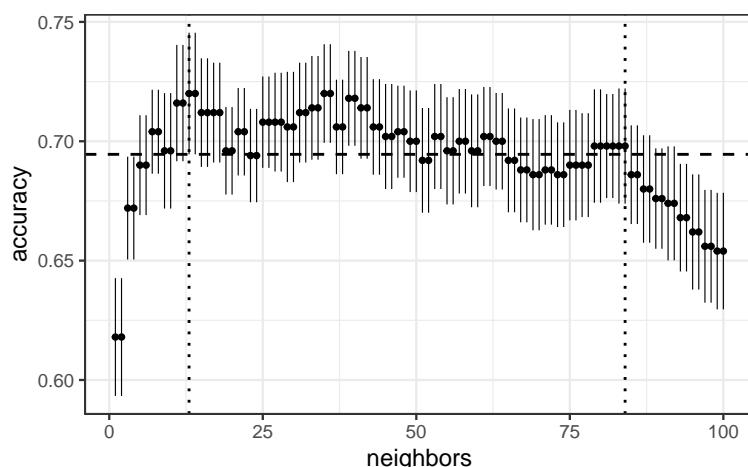
- Cette variance, ou plutôt sa racine carrée (son écart-type), est automatiquement calculée par `tune_grid` :

```
> ppv.cv %>% collect_metrics() %>% select(1:6) %>% head()
## # A tibble: 6 x 6
##   neighbors .metric  .estimator  mean    n std_err
##       <int> <chr>    <chr>     <dbl> <int>   <dbl>
## 1        1 accuracy binary    0.618    10  0.0247
## 2        2 accuracy binary    0.618    10  0.0247
## 3        3 accuracy binary    0.672    10  0.0215
## 4        4 accuracy binary    0.672    10  0.0215
## 5        5 accuracy binary    0.69     10  0.0209
## 6        6 accuracy binary    0.69     10  0.0209
```

- Il est intéressant de la *visualiser* en même temps que le risque estimé.
- L'utilisateur peut ainsi choisir un algorithme de *complexité minimale* tel que le risque soit "proche" du risque optimal.

#### Règle one-standard-error [Breiman et al., 1984].

Choisir l'algorithme de *complexité minimale* parmi ceux dont le risque ne dépasse pas le meilleur risque à un écart-type près.



- On retrouve la valeur choisie par cette règle avec la fonction `select_by_one_std_err` :

```
> ppv.cv %>% select_by_one_std_err(desc(neighbors)) %>% select(-7)
## # A tibble: 1 x 8
##   neighbors .metric  .estimator  mean     n std_err .best .bound
##       <int> <chr>      <chr>    <dbl>   <int>   <dbl> <dbl>   <dbl>
## 1         84 accuracy binary     0.698     10   0.0241   0.72   0.695
```

- On sélectionne ici *plus de voisins*, on a donc une complexité plus petite.

### 2.4.2 Stabiliser les estimateurs du risque

- Les méthodes d'*estimation du risque* sont construites à partir de prévisions sur différents blocs.
- La *variance* de ces estimateurs peut parfois se révéler élevée  $\Rightarrow \nearrow$  difficulté pour choisir le meilleur algorithme.

#### *Une solution*

Répéter les méthodes de ré-échantillonnage sur plusieurs découpages des données.

#### Algorithme : répétition du ré-échantillonnage

Entrées :

- Un algorithme d'estimation du risque (validation hold out, validation croisée).
- $M$  nombre de répétitions.

Pour  $m$  variant de 1 à  $M$  :

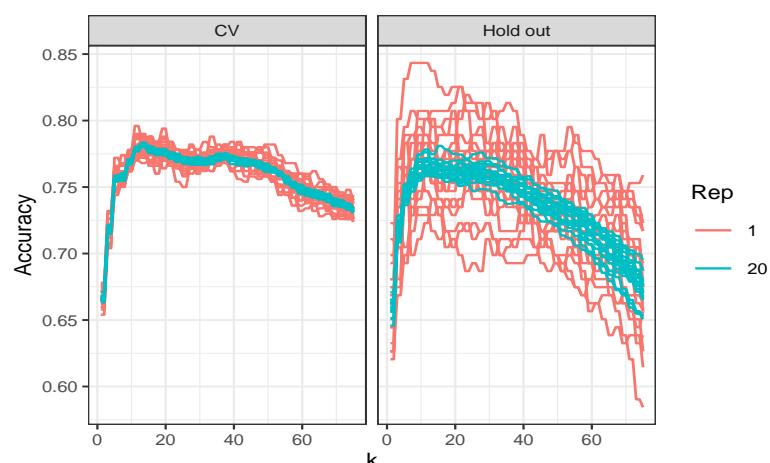
- Estimer le risque par l'algorithme choisi  $\Rightarrow \widehat{\mathcal{R}}_m(f_n)$ .

Retourner :  $\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \widehat{\mathcal{R}}_m(f_n)$ .

- *Avantages* : estimation plus précise du risque.
- *Inconvénients* : plus coûteux en temps de calcul (intéressant de paralléliser).

#### Exemple

- *Courbes de risque* par Monte Carlo sans répétition et avec 20 répétitions.



- On observe clairement une *diminution de la variabilité avec répétitions*.

#### Le coin R

- Facile à mettre en oeuvre avec `tidymodels` : il suffit de définir les découpages.
- Validation hold out répétée avec `mc_cv` :

```
> mv_cv(don.2D.500, prom=2/3, times=20)
```

- Validation croisée répétée avec `vfold_cv` :

```
> vfold_cv(don.2D.500, v=10, repeats=20)
```

## 2.5 Annexe : le package caret

### Le package caret

- Il permet d'évaluer la performance de plus de 230 méthodes : <http://topepo.github.io/caret/index.html>
- Il suffit d'indiquer :
  - la *méthode* (logistique, ppv, arbre, randomForest...)
  - Une grille pour les *paramètres* (nombre de ppv...)
  - Le *critère de performance* (erreur de classification, AUC, risque quadratique...)
  - La méthode d'*estimation du critère* (apprentissage validation, validation croisée, bootstrap...)

### Apprentissage-validation

```
> library(caret)
> K_cand <- data.frame(k=seq(1,500,by=20))
> library(caret)
> ctrl1 <- trainControl(method="LGOCV",number=1,index=list(1:1500))
> e1 <- train(Y~.,data=donnees,method="knn",trControl=ctrl1,tuneGrid=K_cand)
> e1
## k-Nearest Neighbors
##
## 2000 samples
##    2 predictor
##    2 classes: '0', '1'
##
## No pre-processing
## Resampling: Repeated Train/Test Splits Estimated (1 reps, 75%)
## Summary of sample sizes: 1500
## Resampling results across tuning parameters:
##
##     k      Accuracy   Kappa
##       1    0.620    0.2382571
##     21    0.718    0.4342076
##     41    0.722    0.4418388
##
##     61    0.718    0.4344073
##     81    0.720    0.4383195
##    101    0.714    0.4263847
##    121    0.716    0.4304965
##    141    0.718    0.4348063
##    161    0.718    0.4348063
##    181    0.718    0.4348063
##    201    0.720    0.4387158
##    221    0.718    0.4350056
##    241    0.718    0.4350056
##    261    0.722    0.4428232
##    281    0.714    0.4267894
##    301    0.714    0.4269915
##    321    0.710    0.4183621
##    341    0.696    0.3893130
##    361    0.696    0.3893130
##    381    0.688    0.3727988
##    401    0.684    0.3645329
##    421    0.686    0.3686666
##    441    0.686    0.3679956
##    461    0.684    0.3638574
##    481    0.680    0.3558050
## Accuracy was used to select the optimal model using the largest value.
## The final value used for the model was k = 261.
```

### Validation croisée

```
> library(doMC)
> registerDoMC(cores = 3)
> ctrl2 <- trainControl(method="cv",number=10)
> e2 <- train(Y~.,data=dapp,method="knn",trControl=ctrl2,tuneGrid=K_cand)
> e2
## k-Nearest Neighbors
```

```

## 
## 1500 samples
##   2 predictor
##   2 classes: '0', '1'
##
## No pre-processing
## Resampling: Cross-Validated (10 fold)
## Summary of sample sizes: 1350, 1350, 1350, 1350, 1350, 1350, ...
## Resampling results across tuning parameters:
##
##   k     Accuracy   Kappa
##   1    0.6240000  0.2446251
##  21   0.7393333  0.4745290
##  41   0.7306667  0.4570024
##  61   0.7340000  0.4636743

```

```

##  81  0.7333333  0.4632875
## 101  0.7313333  0.4593480
## 121  0.7326667  0.4624249
## 141  0.7333333  0.4640787
## 161  0.7366667  0.4708178
## 181  0.7313333  0.4602309
## 201  0.7326667  0.4626618
## 221  0.7293333  0.4559741
## 241  0.7306667  0.4585960
## 261  0.7353333  0.4676751
## 281  0.7286667  0.4537842
## 301  0.7253333  0.4463516
## 321  0.7173333  0.4294524
## 341  0.7113333  0.4168003
## 361  0.7080000  0.4099303
## 381  0.7140000  0.4213569
## 401  0.7073333  0.4073761
## 421  0.7100000  0.4126434
## 441  0.7066667  0.4054984
## 461  0.6966667  0.3844183
## 481  0.6860000  0.3612515
##
## Accuracy was used to select the optimal model using the largest value.
## The final value used for the model was k = 21.

```

## Validation croisée répétée

```

> ctrl13 <- trainControl(method="repeatedcv",repeats=5,number=10)
> e3 <- train(Y~.,data=dapp,method="knn",trControl=ctrl13,tuneGrid=K_cand)
> e3
## k-Nearest Neighbors
##
## 1500 samples
##   2 predictor
##   2 classes: '0', '1'
##
## No pre-processing
## Resampling: Cross-Validated (10 fold, repeated 5 times)
## Summary of sample sizes: 1350, 1350, 1350, 1350, 1350, 1350, ...
## Resampling results across tuning parameters:
##
##   k     Accuracy   Kappa
##   1    0.6232000  0.2438066
##  21   0.7354667  0.4665640
##  41   0.7314667  0.4585144
##  61   0.7317333  0.4592608
##  81   0.7302667  0.4568784
## 101   0.7310667  0.4589567
##
## 121  0.7320000  0.4609326
## 141  0.7322667  0.4616077
## 161  0.7336000  0.4643374
## 181  0.7340000  0.4649895
## 201  0.7332000  0.4632905
## 221  0.7325333  0.4620114

```

```

## 241 0.7316000 0.4600484
## 261 0.7305333 0.4578098
## 281 0.7286667 0.4536040
## 301 0.7238667 0.4434101
## 321 0.7189333 0.4330787
## 341 0.7136000 0.4215865
## 361 0.7122667 0.4183400
## 381 0.7098667 0.4131761
## 401 0.7090667 0.4112403
## 421 0.7058667 0.4043164
## 441 0.7001333 0.3920207
## 461 0.6952000 0.3811374
## 481 0.6872000 0.3636126
##
## Accuracy was used to select the optimal model using the largest value.
## The final value used for the model was k = 21.

```

## Critère AUC

```

> donnees1 <- donnees
> names(donnees1)[3] <- c("Class")
> levels(donnees1$Class) <- c("G0", "G1")
> ctrl11 <- trainControl(method="LGOCV", number=1, index=list(1:1500),
+                         classProbs=TRUE, summary=twoClassSummary)
> e4 <- train(Class~., data=donnees1, method="knn", trControl=ctrl11,
+               metric="ROC", tuneGrid=K_cand)
> e4
## k-Nearest Neighbors
##
## 2000 samples
##    2 predictor
##    2 classes: 'G0', 'G1'
##
## No pre-processing
## Resampling: Repeated Train/Test Splits Estimated (1 reps, 75%)
## Summary of sample sizes: 1500
## Resampling results across tuning parameters:
## 

```

##	k	ROC	Sens	Spec
##	1	0.6190866	0.5983264	0.6398467
##	21	0.7171484	0.6903766	0.7432950
##	41	0.7229757	0.6861925	0.7547893
##	61	0.7200500	0.6945607	0.7394636
##	81	0.7255567	0.6945607	0.7432950
##	101	0.7319450	0.6903766	0.7356322
##	121	0.7382452	0.6945607	0.7356322
##	141	0.7353757	0.7029289	0.7318008
##	161	0.7308549	0.7029289	0.7318008
##	181	0.7351272	0.7029289	0.7318008
##	201	0.7340050	0.7029289	0.7356322
##	221	0.7324099	0.7071130	0.7279693
##	241	0.7349028	0.7071130	0.7279693
##	261	0.7365780	0.7071130	0.7356322
##	281	0.7349749	0.6987448	0.7279693
##	301	0.7356963	0.7029289	0.7241379
##	321	0.7341493	0.6861925	0.7318008
##	341	0.7343898	0.6527197	0.7356322
##	361	0.7306385	0.6527197	0.7356322
##	381	0.7301816	0.6359833	0.7394636
##	401	0.7270957	0.6276151	0.7356322
##	421	0.7255487	0.6317992	0.7356322

```

## 441 0.7258933 0.6192469 0.7471264
## 461 0.7220619 0.6150628 0.7471264
## 481 0.7236330 0.6108787 0.7432950
##
## ROC was used to select the optimal model using the largest value.
## The final value used for the model was k = 121.

```

### 3 Bibliographie

#### Références

##### Biblio1

- [Besse, 2018] Besse, P. (2018). *Science des données - Apprentissage Statistique*. INSA - Toulouse. [http://www.math.univ-toulouse.fr/~besse/pub/Appren\\_stat.pdf](http://www.math.univ-toulouse.fr/~besse/pub/Appren_stat.pdf).
- [Bousquet et al., 2003] Bousquet, O., Boucheron, S., and Lugosi, G. (2003). *Introduction to Statistical Learning Theory*, chapter Advanced Lectures on Machine Learning. Springer.
- [Breiman et al., 1984] Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., and Stone, C. (1984). *Classification and regression trees*. Wadsworth & Brooks.
- [Clémençon et al., 2008] Clémençon, S., Lugosi, G., and Vayatis, N. (2008). Ranking and empirical minimization of u-statistics. *The Annals of Statistics*, 36(2) :844–874.
- [Hastie et al., 2009] Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, second edition.
- [James et al., 2015] James, G., Witten, D., Hastie, T., and Tibshirani, R. (2015). *The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer.
- [Vapnik, 2000] Vapnik, V. (2000). *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, second edition.
- [Wikistat, 2020a] Wikistat (2020a). Apprentissage machine — introduction. <http://wikistat.fr/pdf/st-m-Intro-ApprentStat.pdf>.
- [Wikistat, 2020b] Wikistat (2020b). Qualité de prévision et risque. <http://wikistat.fr/pdf/st-m-app-risque.pdf>.

# Deuxième partie

## Arbres

### 1 Arbres

#### Présentation

- Les arbres sont des algorithmes de prédiction qui fonctionnent en *régression et en discrimination*.
- Il existe *différentes variantes* permettant de construire des prédicteurs par arbres.
- Nous nous focalisons dans cette partie sur la *méthode CART* [Breiman et al., 1984] qui est la plus utilisée.

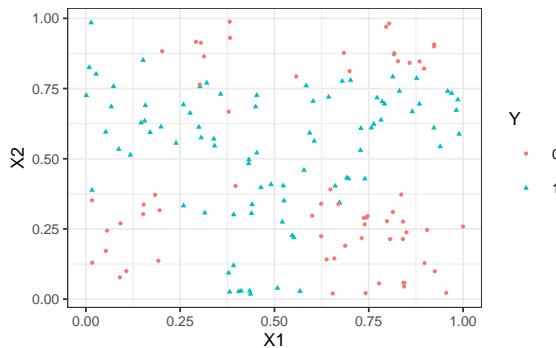
#### 1.1 Arbres binaires

##### Notations

- On cherche à *expliquer une variable*  $Y$  par  $d$  *variables explicatives*  $X_1, \dots, X_d$ .
- $Y$  peut admettre un nombre quelconque de modalités et les variables  $X_1, \dots, X_d$  peuvent être *qualitatives et/ou quantitatives*.
- Néanmoins, pour simplifier on se place dans un premier temps en *discrimination binaire* :  $Y$  admet 2 modalités (-1 ou 1). On suppose de plus que l'on a simplement 2 variables explicatives quantitatives.

##### Représentation des données

- On dispose de  $n$  observations  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  où  $x_i \in \mathbb{R}^2$  et  $y_i \in \{0, 1\}$ .

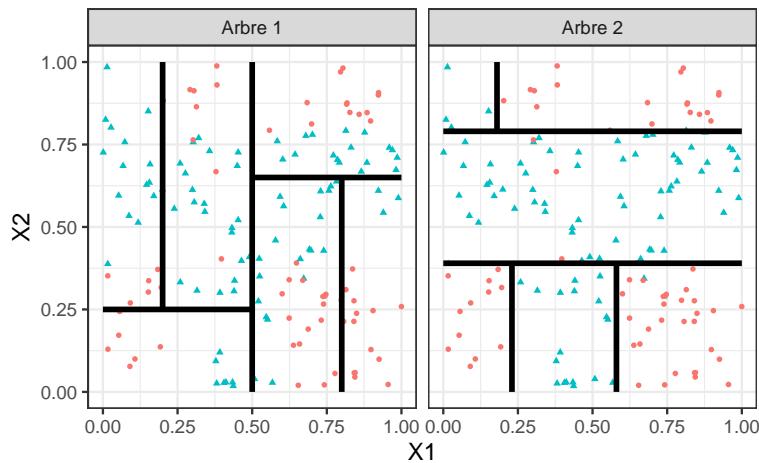


##### Approche par arbres

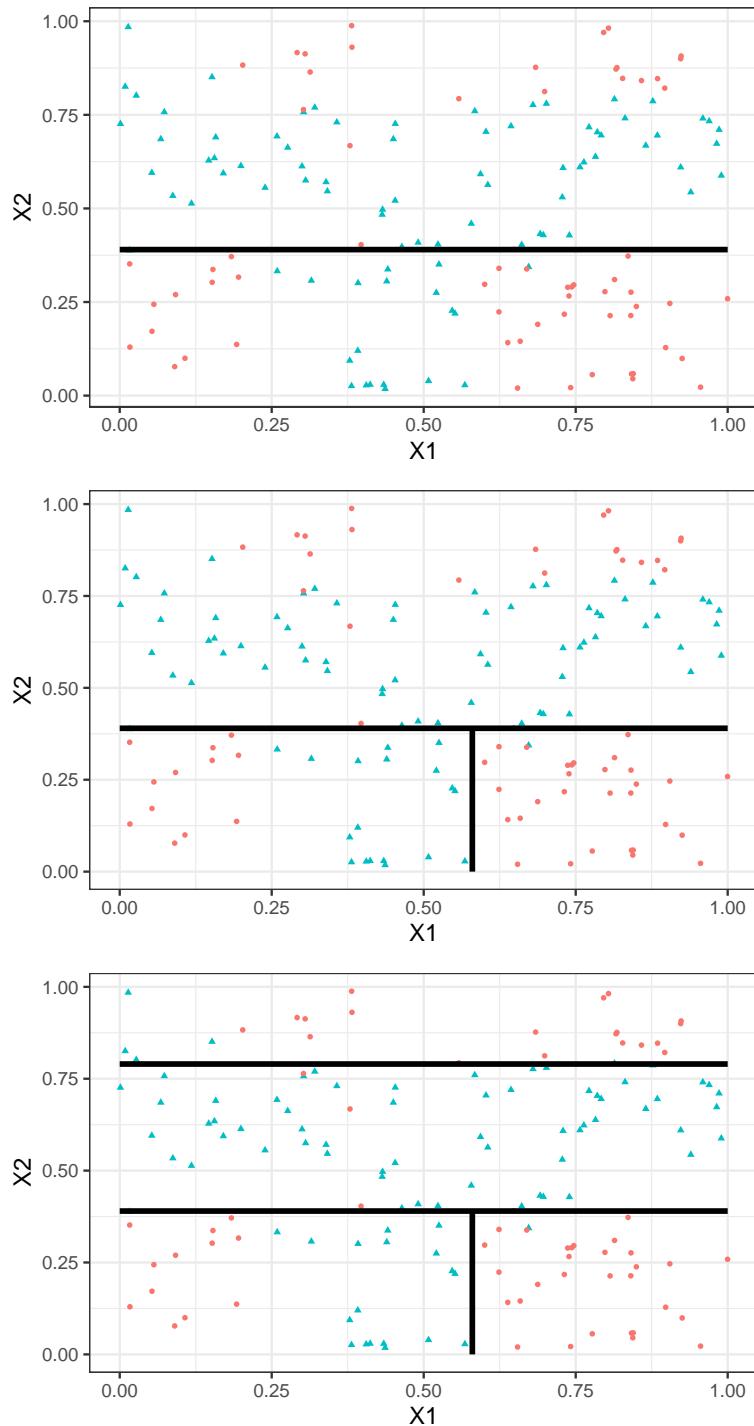
Trouver une *partition* des observations qui *sépare* "au mieux" les points rouges des points bleus.

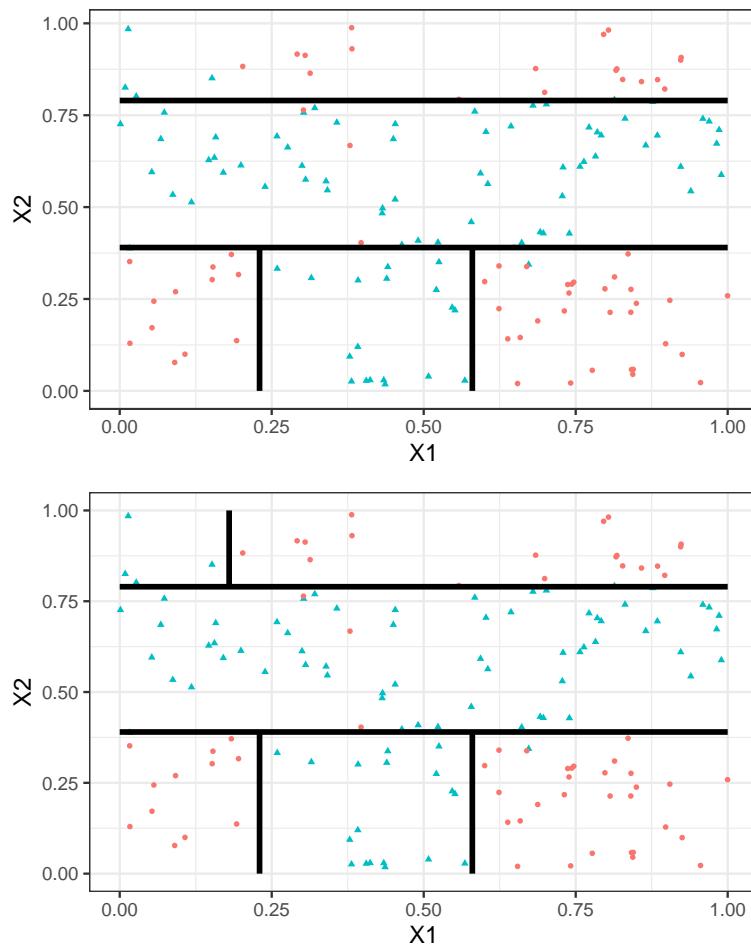
##### Arbres binaires

- La *méthode CART* propose de construire une partition basée sur des divisions *successives parallèles aux axes*.
- 2 exemples de partition :

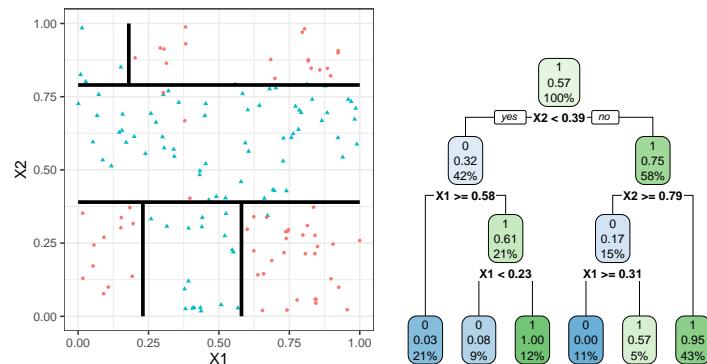


— A chaque étape, la méthode cherche une *nouvelle division* : une **variable** et un **seuil** de coupure.





### Représentation de l'arbre



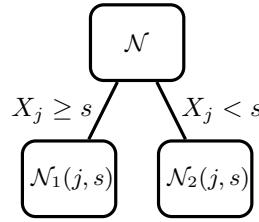
### Remarque

Visuel de *droite* plus pertinent :

- Plus d'information.
- Généralisation à plus de deux dimensions.

### Vocabulaire

- Chaque coupure divise une partie de  $\mathbb{R}^d$  en deux parties appelées *nœuds*.
- Le premier nœud, qui contient toutes les observations, est le *nœud racine*.
- Une coupure divise en noeud en deux *nœuds fils* :



- Les noeuds qui ne sont pas découpés (en bas de l'arbre) sont les *nœuds terminaux* ou *feuilles* de l'arbre.

### Arbre et algorithme de prévision

- L'arbre construit, les *prévisions* se déduisent à partir de *moyennes faites dans les feuilles*.
- On note  $\mathcal{N}(x)$  la feuille de l'arbre qui contient  $x \in \mathbb{R}^d$ , les prévisions s'obtiennent selon :

1. *Régression*  $\Rightarrow$  moyenne des  $y_i$  de la feuille

$$m_n(x) = \frac{1}{|\mathcal{N}(x)|} \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}(x)} y_i$$

2. *Classification* (classe)  $\Rightarrow$  vote à la majorité :

$$g_n(x) = \operatorname{argmax}_k \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}(x)} \mathbf{1}_{y_i=k}$$

3. *Classification* (proba)  $\Rightarrow$  proportion d'obs. du groupe  $k$  :

$$S_{k,n}(x) = \frac{1}{|\mathcal{N}(x)|} \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}(x)} \mathbf{1}_{y_i=k}.$$

### Questions

1. Comment *découper* un noeud ?

$\Rightarrow$  si on dispose d'un algorithme pour découper un noeud, il suffira de le répéter.

2. Comment choisir la *profondeur de l'arbre* ?

- Profondeur **maximale** ? (on découpe jusqu'à ne plus pouvoir) **sur-ajustement** ?
- Critère d'arrêt ?
- Élagage ? (on construit un arbre profond et on enlève des branches "inutiles"...).

## 1.2 Choix des coupures

- *Une coupure* = un couple  $(j, s) \in \{1, \dots, d\} \times \mathbb{R}$ .
- *Idée* : définir un **critère** mesure la performance d'une coupure et choisir celle qui optimise le critère.
- *Coupure performante*  $\Rightarrow$  les deux noeuds fils sont **homogènes** vis-à-vis de  $Y$ .

### Fonction d'impureté

- **Objectif** : mesurer l'homogénéité d'un noeud.
- **Intérêt** : choisir la coupure qui maximise la pureté des noeuds fils.

### Critère de découpe

- L'**impureté**  $\mathcal{I}$  d'un noeud doit être :
  1. **faible** lorsque un noeud est homogène : les valeurs de  $Y$  dans le noeud sont *proches*.
  2. **élevée** lorsque un noeud est hétérogène : les valeurs de  $Y$  dans le noeud sont *dispersées*.

### L'idée

Une fois  $\mathcal{I}$  définie, on choisira le couple  $(j, s)$  qui *maximise le gain d'impureté* :

$$\Delta(j, s) = p(\mathcal{N})\mathcal{I}(\mathcal{N}) - (p(\mathcal{N}_1(j, s))\mathcal{I}(\mathcal{N}_1(j, s)) + p(\mathcal{N}_2(j, s))\mathcal{I}(\mathcal{N}_2(j, s)))$$

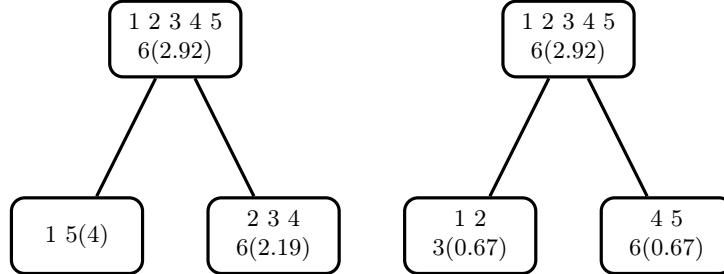
où  $p(\mathcal{N})$  représente la proportion d'observations dans le noeud  $\mathcal{N}$ .

### 1.2.1 Cas de la régression

- Une mesure naturelle de l'*impureté* d'un nœud  $\mathcal{N}$  en *régression* est la **variance** du nœud :

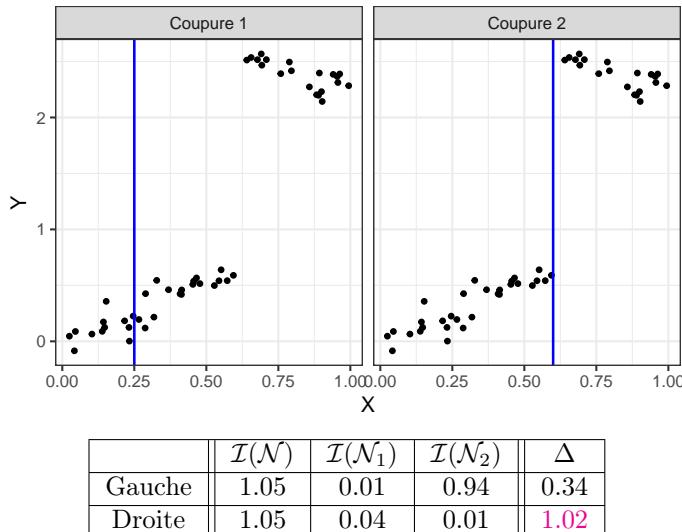
$$\mathcal{I}(\mathcal{N}) = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}} (y_i - \bar{y}_{\mathcal{N}})^2,$$

où  $\bar{y}_{\mathcal{N}}$  désigne la moyenne des  $Y_i$  dans  $\mathcal{N}$ .



⇒ coupure de *droite* plus performante.

#### Exemple



Pour aller plus vite

### 1.2.2 Cas de la classification supervisée

- Les  $Y_i, i = 1, \dots, n$  sont à valeurs dans  $\{1, \dots, K\}$ .
- On cherche une fonction  $\mathcal{I}$  telle que  $\mathcal{I}(\mathcal{N})$  soit
  - *petite* si un *label majoritaire* se distingue clairement dans  $\mathcal{N}$  ;
  - *grande* sinon.

#### Impureté

L'*impureté* d'un nœud  $\mathcal{N}$  en classification se mesure selon

$$\mathcal{I}(\mathcal{N}) = \sum_{j=1}^K f(p_j(\mathcal{N}))$$

où

- $p_j(\mathcal{N})$  représente la proportion d'observations de la classe  $j$  dans le nœud  $\mathcal{N}$ .
- $f$  est une fonction (*concave*)  $[0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^+$  telle que  $f(0) = f(1) = 0$ .

## Exemples de fonctions $f$

- Si  $\mathcal{N}$  est pur, on veut  $\mathcal{I}(\mathcal{N}) = 0 \implies$  c'est pourquoi  $f$  doit vérifier  $f(0) = f(1) = 0$ .
- Les 2 mesures d'impureté les plus classiques sont :
  1. **Gini** :  $f(p) = p(1-p)$ ;
  2. **Information** :  $f(p) = -p \log(p)$ .

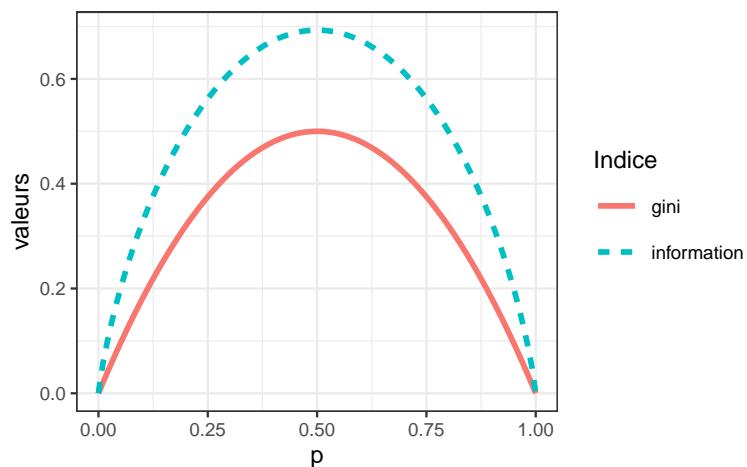
### Cas binaire

Dans ce cas on a

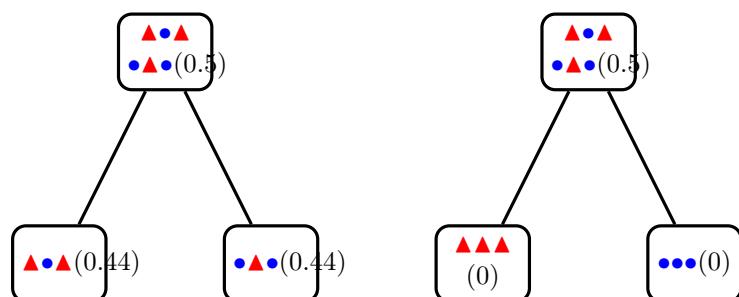
1.  $\mathcal{I}(\mathcal{N}) = 2p(1-p)$  pour **Gini**
2.  $\mathcal{I}(\mathcal{N}) = -p \log p - (1-p) \log(1-p)$  pour **Information**

où  $p$  désigne la proportion de 1 (ou 0) dans  $\mathcal{N}$ .

## Impureté dans le cas binaire

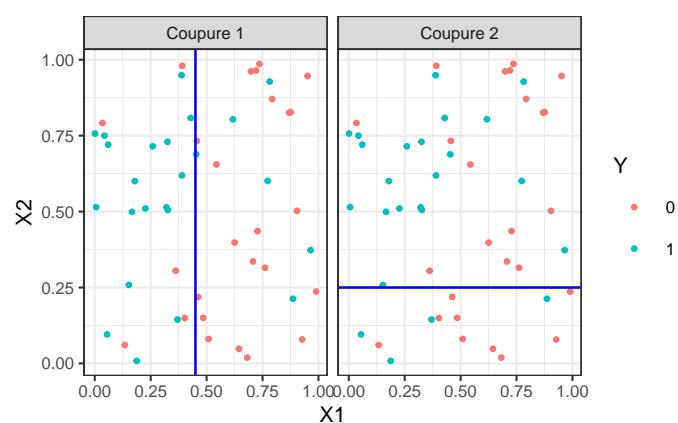


## Exemple 1



$\implies$  coupure de **droite** plus performante.

## Exemple 2

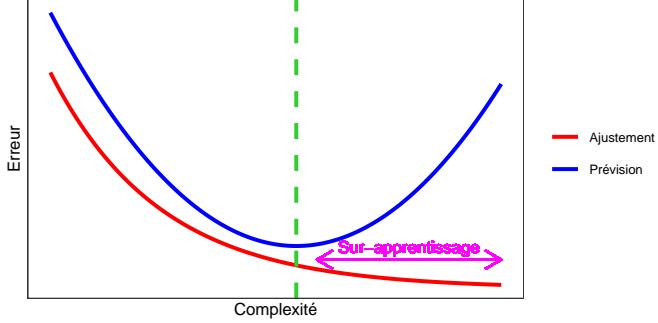


	$\mathcal{I}(\mathcal{N})$	$\mathcal{I}(\mathcal{N}_1)$	$\mathcal{I}(\mathcal{N}_2)$	$\Delta$
Gauche	0.50	0.34	0.35	0.16
Droite	0.50	0.43	0.50	0.02

### 1.3 Élagage

#### Pourquoi élaguer ?

- Les coupures permettent de séparer les données selon  $Y \Rightarrow$  plus on coupe mieux on ajuste !
- Risque de *sur-ajustement* si on coupe trop !



#### Complexité d'un arbre

Représentée par son nombre de coupures ou sa profondeur.

#### Comment faire ?

- Tester tous les arbres ?  $\Rightarrow$  possible uniquement sur de petits échantillons !
- Critère d'arrêt : ne plus découper si une certaine condition est vérifiée.  $\Rightarrow$  possible mais... une coupure peut ne pas être pertinente alors que des coupures plus basses le seront !

#### Élaguer

1. Considérer un arbre (trop) profond  $\Rightarrow$  qui sur-ajuste ;
2. Supprimer les branches peu utiles.

#### Élagage CART

- Tester tous les sous-arbres d'un arbre très profond se révèlent souvent trop couteux en temps de calcul.
- [Breiman et al., 1984] propose une stratégie d'élagage qui permet de se ramener à une suite d'arbres emboités

$$\mathcal{T}_{max} = \mathcal{T}_0 \supset \mathcal{T}_1 \supset \dots \supset \mathcal{T}_K.$$

de taille raisonnable (plus petite que  $n$ ).

- Il est ensuite possible de choisir un arbre dans cette suite par des méthodes traditionnelles :
  1. choix d'un risque ;
  2. optimisation de ce risque (par validation croisée par exemple).

Pour aller plus vite

#### Construction de la suite de sous arbres

- Soit  $T$  un arbre à  $|T|$  noeuds terminaux  $\mathcal{N}_1, \dots, \mathcal{N}_{|T|}$ .
- Soit  $R(\mathcal{N})$  un risque (d'ajustement) dans le noeud  $\mathcal{N}$  :

— *Régression* :

$$R_m(T) = \frac{1}{N_m} \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}_m} (y_i - \bar{y}_{\mathcal{N}_m})^2$$

— *Classification* :

$$R_m(T) = \frac{1}{N_m} \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}_m} \mathbf{1}_{y_i \neq y_{\mathcal{N}_m}}$$

### Définition

Soit  $\alpha \geq 0$ , le critère *coût/complexité* est défini par :

$$C_\alpha(T) = \sum_{m=1}^{|T|} N_m R_m(T) + \alpha |T|.$$

### Idée

- $C_\alpha(T)$  est un critère qui prend en compte l'*adéquation* d'un arbre et sa *complexité*.
- L'*idée* est de chercher un arbre  $T_\alpha$  qui minimise  $C_\alpha(T)$  pour une valeur de  $\alpha$  bien choisie.

### Remarque

- $\alpha = 0 \implies T_\alpha = T_0 = T_{\max}$ .
- $\alpha = +\infty \implies T_\alpha = T_{+\infty} = T_{\text{root}}$  *arbre sans coupure*.

### Question (*a priori difficile*)

Comment calculer  $T_\alpha$  qui minimise  $C_\alpha(T)$  ?

### Deux lemmes

#### Lemme 1

Si  $T_1$  et  $T_2$  sont deux sous-arbres de  $T_{\max}$  avec  $C_\alpha(T_1) = C_\alpha(T_2)$ . Alors  $T_1 \subset T_2$  ou  $T_2 \subset T_1$   
 $\implies$  garantit une unique solution de *taille minimale*.

#### Lemme 2

Si  $\alpha > \alpha'$  alors  $T_\alpha = T_{\alpha'}$  ou  $T_\alpha \subset T_{\alpha'}$ .

$\implies$  garantit une *stabilité des solutions* lorsque  $\alpha$  parcourt  $\mathbb{R}^+$   $\implies$  elles vont être *emboîtées* les unes dans les autres.

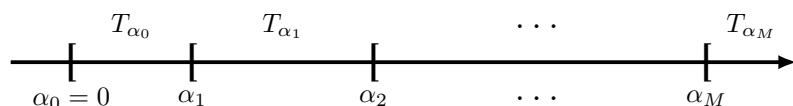
### Théorème [Breiman et al., 1984]

Il existe une suite finie  $\alpha_0 = 0 < \alpha_1 < \dots < \alpha_M$  avec  $M \leq |T_{\max}|$  et une suite associée d'arbres emboîtés  $(T_{\alpha_m})_m$

$$T_{\max} = T_{\alpha_0} \supset T_{\alpha_1} \supset \dots \supset T_{\alpha_M} = T_{\text{root}}$$

telle que  $\forall \alpha \in [\alpha_m, \alpha_{m+1}]$

$$T_m \in \underset{T \subseteq T_{\max}}{\operatorname{argmin}} C_\alpha(T).$$



### Commentaires

- Nombre de minimiseurs de  $C_\alpha(T)$  est "*petit*".
- Ils s'obtiennent en *élaguant* : en supprimant des branches.

### Exemple

- On visualise la *suite de sous-arbres* avec la fonction `printcp` ou dans l'objet `rpart` :

```

> library(rpart)
> set.seed(123)
> arbre <- rpart(Y~, data=don.2D.arbre, cp=0.0001, minsplit=2)
> arbre$cptable
##          CP nsplit rel error      xerror      xstd
## 1 0.353846154    0 1.00000000 1.00000000 0.09336996
## 2 0.230769231    1 0.64615385 0.7076923 0.08688336
## 3 0.138461538    2 0.41538462 0.5076923 0.07805324
## 4 0.061538462    4 0.13846154 0.2153846 0.05481185
## 5 0.015384615    5 0.07692308 0.1846154 0.05111769
## 6 0.007692308    6 0.06153846 0.2461538 0.05816388
## 7 0.000100000   14 0.00000000 0.2153846 0.05481185

```

## Sorties printcp

- Suite de 7 *arbres emboités*.
- *CP* : complexity parameter, il mesure la complexité de l'arbre : CP ↘ $\implies$  complexité ↗.
- *nsplit* : nombre de coupures de l'arbre.
- *rel.error* : erreur (normalisée) calculée sur les données d'apprentissage  $\implies$  *erreur d'ajustement*.
- *xerror* : erreur (normalisée) calculée par validation croisée 10 blocs  $\implies$  *erreur de prévision* (voir diapos suivantes).
- *xstd* : écart-type associé à l'erreur de validation croisée.

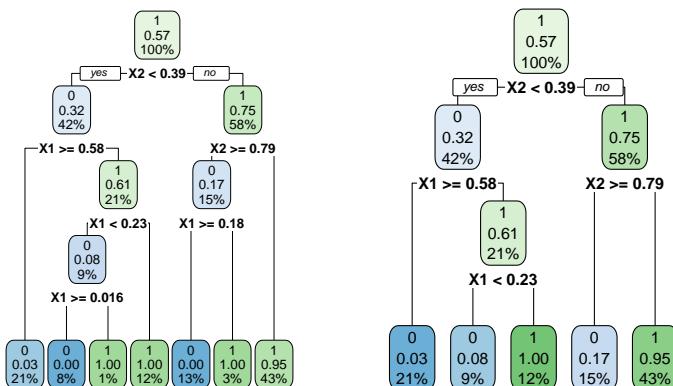
## Visualisation

- On peut les visualiser en combinant **prune** (extraction) et **rpart.plot** (tracé) :

```

> arbre1 <- prune(arbre, cp=0.01)
> arbre2 <- prune(arbre, cp=0.1)
> library(rpart.plot)
> rpart.plot(arbre1);rpart.plot(arbre2)

```



## Choix de l'arbre final

- Choisir un arbre dans la suite revient à *choisir une valeur de  $\alpha$* .
- Ce choix s'effectue généralement de façon classique :
  1. Choix d'un *risque*.
  2. *Estimation* du risque par *ré-échantillonnage* (CV par exemple) pour tous les  $\alpha_m$ .
  3. *Sélection* du  $\alpha_m$  qui *minimise* le risque estimé.

## Remarque

La fonction **rpart** effectue par défaut une validation croisée 10 blocs en prenant :

- le *risque quadratique* en régression.
- l'*erreur de classification* en classification.

## Validation croisée rpart

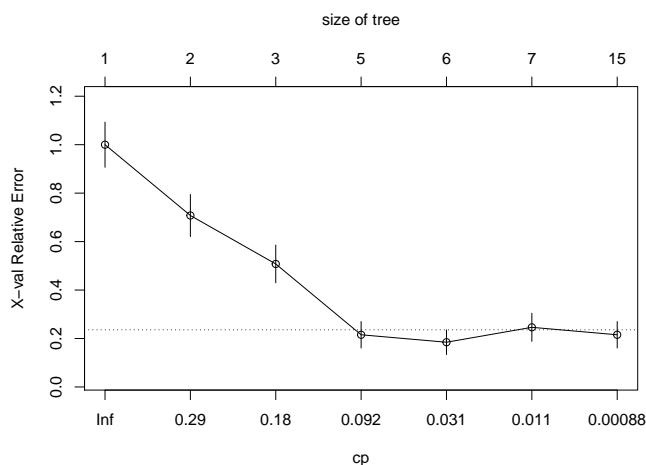
1. Calculer  $\beta_0 = 0$ ,  $\beta_1 = \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}$ , ...  $\beta_{M-1} = \sqrt{\alpha_{M-1} \alpha_M}$ ,  $\beta_M = +\infty$ .
2. Pour  $k = 1, \dots, K$ 
  - (a) Construire l'arbre maximal sur l'ensemble des données privée du  $k^e$  bloc, c'est-à-dire  $\mathcal{B}^{-k} = \{(x_i, y_i) : i \in \{1, \dots, n\} \setminus B_k\}$ .
  - (b) Appliquer l'algorithme d'élagage à cet arbre maximal, puis extraire les arbres qui correspondent aux valeurs  $\beta_m, m = 0, \dots, M \implies T_{\beta_m}(., \mathcal{B}^{-k})$ .
  - (c) Calculer les valeurs prédictives par chaque arbre sur le bloc  $k$  :  $T_{\beta_m}(x_i, \mathcal{B}^{-k}), i \in B_k$ .
3. En déduire les erreurs pour chaque  $\beta_m$  :

$$\widehat{\mathcal{R}}(\beta_m) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K \sum_{i \in B_k} \ell(y_i, T_{\beta_m}(x_i, \mathcal{B}^{-k})).$$

**Retourner** : une valeur  $\alpha_m$  telle que  $\widehat{\mathcal{R}}(\beta_m)$  est minimum.

- Les erreurs de validation croisée se trouvent dans la colonne `xerror` de l'élément `cptable`.
- On peut les visualiser avec `plotcp` :

```
> plotcp(arbre)
```

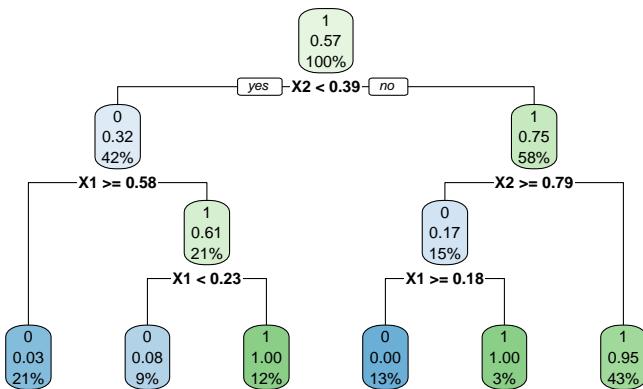


- Il reste à choisir l'arbre qui *minimise l'erreur de prévision* :

```
> cp_opt <- as_tibble(arbre$cptable) %>% arrange(xerror) %>%
+   slice(1) %>% select(CP) %>% as.numeric()
> cp_opt
## [1] 0.01538462
```

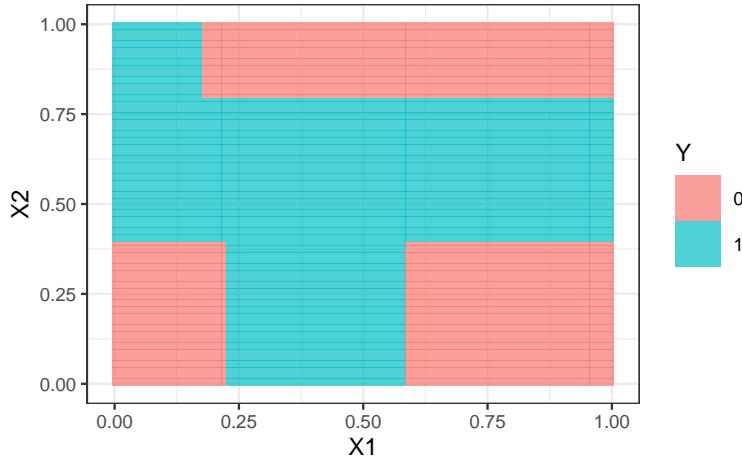
- et à le visualiser :

```
> arbre_final <- prune(arbre, cp=cp_opt)
> rpart.plot(arbre_final)
```



- 2 variables explicatives  $\implies$  on peut visualiser l'arbre final

- en coloriant le carré  $[0, 1]^2$  en fonction *des valeurs prédites*.



## Prévision

- Nouvel individu :

```
> xnew <- tibble(X1=0.4, X2=0.5)
```

- Prévision de la *classe* :

```
> predict(arbre_final, newdata=xnew, type="class")
## 1
## 1
## Levels: 0 1
```

- Prévision des *probabilités* :

```
> predict(arbre_final, newdata=xnew, type="prob")
##      0      1
## 1 0.046875 0.953125
```

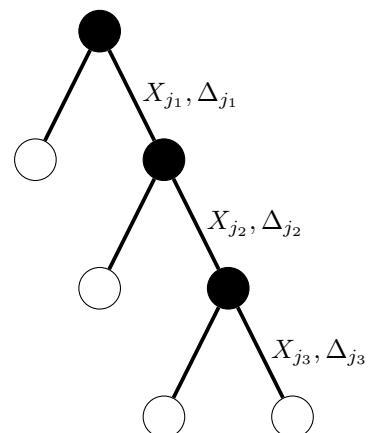
## 1.4 Importance des variables

- La *visualisation de l'arbre* peut donner une idée sur l'*importance des variables* dans l'algorithme.
- *Pas suffisant !* Il se peut en effet que des variables possèdent une grande importance sans pour autant apparaître explicitement dans l'arbre !
  - Difficile de *quantifier l'importance* juste en regardant l'arbre !
  - Il se peut en effet que des variables possèdent une grande importance *sans pour autant apparaître en haut* de l'arbre !

### *Mesure d'importance d'un arbre*

Basée sur le *gain d'impureté* des nœuds internes.

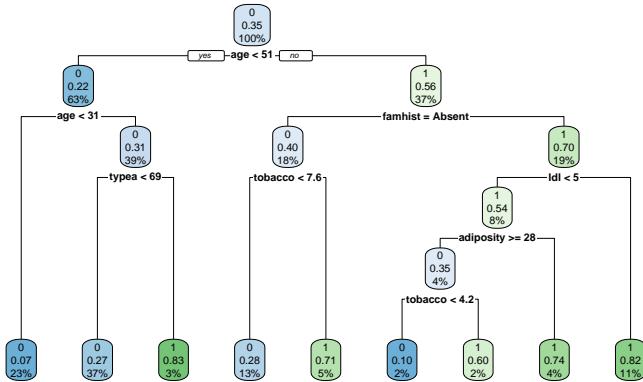
- Nœuds internes  $\Rightarrow N_t, t = 1, \dots, J - 1$  ;
- Variables de coupure  $\Rightarrow X_{j_t}$  ;
- Gain d'impureté  $\Rightarrow \Delta_{j_t}$ .



### *Mesure d'impureté de la variable $\ell$*

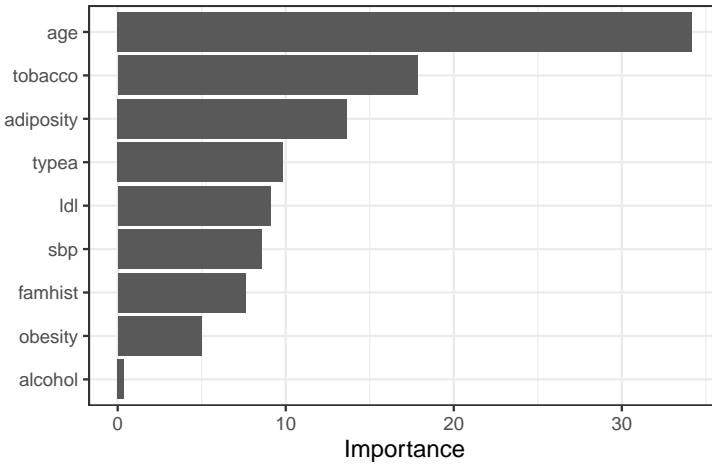
$$\mathcal{I}_\ell(T) = \sum_{t=1}^{|T|-1} \Delta_t \mathbf{1}_{j_t=\ell}.$$

## Exemple



— Visualisation des *importance* à l'aide de **vip** :

```
> library(vip)
> vip(arbre)
```



## Bilan

### 1. Avantages :

- Méthode « simple » relativement facile à mettre en œuvre.
- Fonctionne en **régression** et en **classification**.
- Résultats **interprétables** (à condition que l'arbre ne soit pas trop profond).

### 2. Inconvénients :

- Performances prédictives **limitées**.
- méthode connue pour être **instable**, sensible à de légères perturbations de l'échantillon.  $\implies$  Cet inconvénient sera un avantage pour des **agrégations bootstrap**  $\implies$  **forêts aléatoires**.

## 2 Bibliographie

### Références

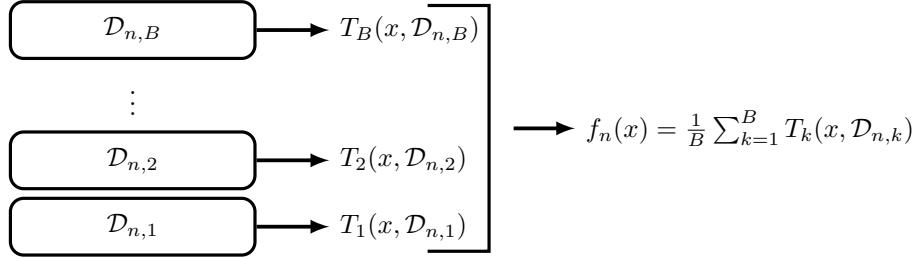
### Biblio3

- [Breiman et al., 1984] Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., and Stone, C. (1984). *Classification and regression trees*. Wadsworth & Brooks.
- [McCulloch and Pitts, 1943] McCulloch, W. and Pitts, W. (1943). A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5 :115–133.
- [Rosenblatt, 1958] Rosenblatt, F. (1958). The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65 :386–408.
- [Rumelhart et al., 1986] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and R. J. Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, pages 533–536.

# Troisième partie

## Aggrégation

- **Idée** : construire un grand nombre d'**algorithmes "simples"** et les agréger pour obtenir une seule prévision.  
Par exemple



### Questions

1. Comment choisir les **échantillons**  $\mathcal{D}_{n,b}$  ?
2. Comment choisir les **algorithmes** ?
3. ...

## 1 Bagging et forêts aléatoires

### Cadre

- Idem que précédemment, on cherche à *expliquer* une variable  $Y$  par  $d$  variables explicatives  $X_1, \dots, X_d$ .
- Pour simplifier on se place en *régression* :  $Y$  est à valeurs dans  $\mathbb{R}$  mais tout ce qui va être fait s'étend directement à la *classification binaire ou multiconcasses*.
- **Notations** :
  - $(X, Y)$  un couple aléatoire à valeurs dans  $\mathbb{R}^d \times \mathbb{R}$ .
  - $\mathcal{D}_n = (X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$  un  $n$ -échantillon i.i.d. de même loi que  $(X, Y)$ .
- Un algorithme de la forme :

$$f_n(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(x)$$

- *Hypothèse* : les  $T_1, \dots, T_b$  sont **identiquement distribuées**.

### Propriété

$$\mathbf{E}[f_n(x)] = \mathbf{E}[T_1(x)] \quad \text{et} \quad \mathbf{V}[f_n(x)] = \rho(x)\mathbf{V}[T_1(x)] + \frac{1 - \rho(x)}{B}\mathbf{V}[T_1(x)]$$

où  $\rho(x) = \text{corr}(T_1(x), T_2(x))$ .

### Conséquence

- **Biais** non modifié.
- **Variance** ↘ si  $B \nearrow$  et  $\rho(x) \searrow$ .
- Ajuster le *même algorithme* sur les **mêmes données** n'est d'aucun intérêt.
- Ajuster le *même algorithme* sur des **sous-échantillons disjoints** est d'un intérêt limité.
- Utiliser un *grand nombre d'algorithmes différents* est compliqué...

### Idée

Ajuster le même algorithme sur des **échantillons bootstraps**.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

3	4	6	10	3	9	10	7	7	1	$T_1$
2	8	6	2	10	10	2	9	5	6	$T_2$
2	9	4	4	7	7	2	3	6	7	$T_3$
6	1	3	3	9	3	8	10	10	1	$T_4$
3	7	10	3	2	8	6	9	10	2	$T_5$
$\vdots$										$\vdots$
7	10	3	4	9	10	10	8	6	1	$T_B$

## 1.1 Bagging

- Le *bagging* désigne un ensemble de méthodes introduit par Léo Breiman [Breiman, 1996].
- *Bagging* : vient de la contraction de **Bootstrap Aggregating**.
- *Idée* : plutôt que de construire un seul estimateur, en construire un grand nombre (sur des échantillons *bootstrap*) et les *agréger*.

### Idée : échantillons bootstrap

- Echantillon *initial* :
- Echantillons *bootstrap* : tirage de taille  $n$  avec remise
- A la fin, on *agrège* :

$$f_n(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(x)$$

### Algorithme bagging

Entrées :

- $B$  un entier positif;
- $T$  un algorithme de prévision.

Pour  $b$  entre 1 et  $B$  :

1. Faire un tirage aléatoire avec remise de taille  $n$  dans  $\{1, \dots, n\}$ . On note  $\theta_b$  l'ensemble des indices sélectionnés et  $\mathcal{D}_{n,b}^* = \{(x_i, y_i), i \in \theta_b\}$  l'échantillon bootstrap associé.
2. Entraîner l'algorithme  $T$  sur  $\mathcal{D}_{n,b}^* \implies T(\cdot, \theta_b, \mathcal{D}_n)$ .

Retourner :  $f_n(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T(x, \theta_b, \mathcal{D}_n)$ .

### Un algorithme pas si aléatoire que ça...

- L'*aléa bootstrap* implique que l'algorithme "change" lorsqu'on l'exécute plusieurs fois mais...

$$\lim_{B \rightarrow +\infty} \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T(x, \theta_b, \mathcal{D}_n) = \mathbf{E}_\theta[T(x, \theta, \mathcal{D}_n)] = \bar{f}_n(x, \mathcal{D}_n)$$

### Conséquence

- L'algorithme se *stabilise* (converge) lorsque  $B \nearrow$ .
- Recommandation : choisir  $B$  le *plus grand possible*.

## Choix de $T$

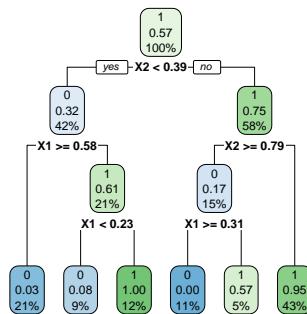
$$\mathbf{E}[f_n(x)] = \mathbf{E}[T_1(x)] \quad \text{et} \quad \mathbf{V}[f_n(x)] = \rho(x)\mathbf{V}[T_1(x)] + \frac{1 - \rho(x)}{B}\mathbf{V}[T_1(x)].$$

### Conclusion

- Bagger ne modifie pas le biais.
- $B$  grand  $\implies \mathbf{V}[f_n(x)] \approx \rho(x)\mathbf{V}[T_1(x)] \implies$  la variance diminue d'autant plus que la corrélation entre les prédicteurs diminue.
- Il est donc nécessaire d'agréger des estimateurs sensibles à de légères perturbations de l'échantillon.
- Les arbres sont connus pour posséder de telles propriétés.

## 1.2 Forêts aléatoires

### Rappels sur les arbres



### Complexité

Profondeur

- petite : biais ↗, variance ↘
- grande : biais ↘, variance ↗ (sur-apprentissage).

### Définition

- Comme son nom l'indique, une *forêt aléatoire* est définie à partir d'un ensemble d'arbres.

### Définition

Soit  $T_k(x), k = 1, \dots, B$  des prédicteurs par arbre ( $T_k : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ ). Le prédicteur des *forêts aléatoires* est obtenu par agrégation de cette collection d'arbres :

$$f_n(x) = \frac{1}{B} \sum_{k=1}^B T_k(x).$$

## Forêts aléatoires

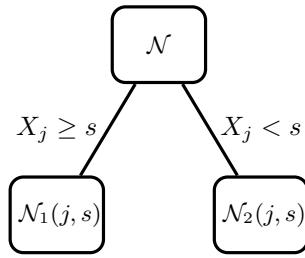
- Forêts aléatoires = *collection d'arbres*.
- Les forêts aléatoires les plus utilisées sont (de loin) celles proposées par *Léo Breiman* (au début des années 2000).
- Elles consistent à *agréger* des arbres construits sur des *échantillons bootstrap*.
- On pourra trouver de la doc à l'url

<http://www.stat.berkeley.edu/~breiman/RandomForests/>

et consulter la thèse de Robin Genuer [Genuer, 2010].

### 1.2.1 Algorithme

#### Coupures "aléatoires"



#### Arbres pour forêt

- Breiman propose de sélectionner la "meilleure" variable dans un ensemble composé uniquement de `mtry` variables choisies aléatoirement parmi les  $d$  variables initiales.
- *Objectif* : diminuer la corrélation entre les arbres que l'on agrège.

#### Algorithme forêts aléatoires

##### Entrées :

- $B$  un entier positif;
- `mtry` un entier entre 1 et  $d$ ;
- `min.node.size` un entier plus petit que  $n$ .

Pour  $b$  entre 1 et  $B$  :

1. Faire un tirage aléatoire avec remise de taille  $n$  dans  $\{1, \dots, n\}$ . On note  $\mathcal{I}_b$  l'ensemble des indices sélectionnés et  $\mathcal{D}_{n,b}^* = \{(x_i, y_i), i \in \mathcal{I}_b\}$  l'échantillon bootstrap associé.
2. Construire un arbre CART à partir de  $\mathcal{D}_{n,b}^*$  en découplant chaque noeud de la façon suivante :
  - (a) Choisir `mtry` variables au hasard parmi les  $d$  variables explicatives ;
  - (b) Sélectionner la meilleure coupure  $X_j \leq s$  en ne considérant que les `mtry` variables sélectionnées ;
  - (c) Ne pas découper un noeud s'il contient moins de `min.node.size` observations.
3. On note  $T(\cdot, \theta_b, \mathcal{D}_n)$  l'arbre obtenu.

**Retourner** :  $f_n(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T(x, \theta_b, \mathcal{D}_n)$ .

#### Type de prévision

La prévision dépend de la *nature de Y* et de ce que l'on souhaite *estimer*

- **Régression** :  $T(x, \theta_b, \mathcal{D}_n) \in \mathbb{R}$  et

$$m_n(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T(x, \theta_b, \mathcal{D}_n).$$

- **Classification** (classe) :  $T(x, \theta_b, \mathcal{D}_n) \in \{1, \dots, K\}$  et

$$g_n(x) \in \operatorname{argmax}_{k \in \{1, \dots, K\}} \sum_{b=1}^B \mathbf{1}_{T(x, \theta_b, \mathcal{D}_n)=k}, \quad k = 1, \dots, K.$$

- **Classification** (proba) :  $T_k(x, \theta_b, \mathcal{D}_n) \in [0, 1]$  et

$$S_{n,k}(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_k(x, \theta_b, \mathcal{D}_n), \quad k = 1, \dots, K.$$

#### Le coin R

- Notamment 2 packages avec à peu près la même syntaxe.
- `randomforest` : le plus ancien et probablement encore le plus utilisé.
- `ranger` [Wright and Ziegler, 2017] : plus efficace au niveau *temps de calcul* (codé en C++) .

```

> library(ranger)
> set.seed(12345)
> foret <- ranger(type ~ ., data=spam)
> foret
##  ranger(type ~ ., data = spam)
## Type: Classification
## Number of trees: 500
## Sample size: 4601
## Number of independent variables: 57
## Mtry: 7
## Target node size: 1
## Variable importance mode: none
## Splitrule: gini
## OOB prediction error: 4.59 %

```

### 1.2.2 Choix des paramètres

- $B$  réglé  $\implies$  le plus grand possible. En pratique on pourra s'assurer que la **courbe d'erreur** en fonction du nombre d'arbres est **stabilisée**.
- Pour les autres paramètres on étudie à nouveau :

$$\mathbf{E}[f_n(x)] = \mathbf{E}[T_1(x)] \quad \text{et} \quad \mathbf{V}[f_n(x)] = \rho(x)\mathbf{V}[T_1(x)] + \frac{1 - \rho(x)}{B}\mathbf{V}[T_1(x)].$$

#### Conséquence

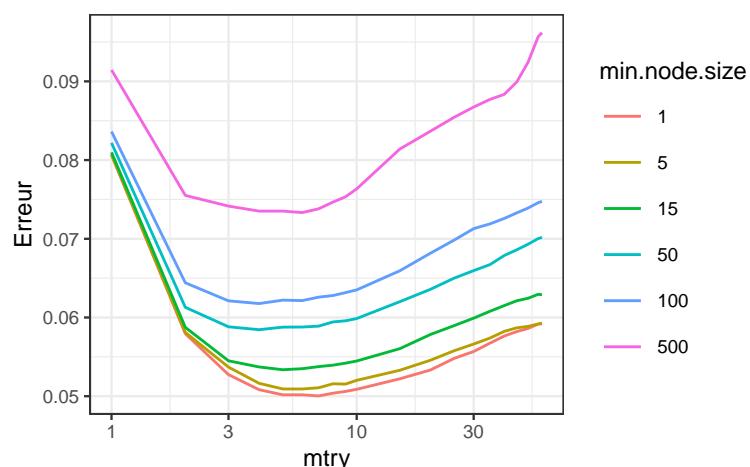
- Le biais n'étant pas amélioré par "l'agrégation bagging", il est recommandé d'agréger des estimateurs qui possèdent un **biais faible** (**contrairement au boosting**).
- Arbres "**profonds**", **peu d'observations dans les nœuds terminaux**.
- Par défaut dans `randomForest`, `min.node.size` = 5 en régression et 1 en classification.

#### Choix de `mtry`

- Il est en **relation avec la corrélation** entre les arbres  $\rho(x)$ .
- Ce paramètre a une influence sur le **compromis biais/variance** de la forêt.
- `mtry` ↘
  1. tendance à se rapprocher d'un **choix "aléatoire"** des variables de découpe des arbres  $\implies$  les arbres sont de plus en plus différents  $\implies \rho(x) \searrow \implies$  la variance de la forêt diminue.
  2. mais... le biais des arbres  $\nearrow \implies$  le **biais de la forêt**  $\nearrow$ .
- Inversement lorsque `mtry`  $\nearrow$  (**risque de sur-ajustement**).

#### Conclusion

- Il est recommandé de comparer les performances de la forêt pour **plusieurs valeurs de `mtry`**.
- Par défaut `mtry` =  $d/3$  en régression et  $\sqrt{d}$  en classification.
- Visualisation d'erreur en fonction de `min.node.size` et `mtry`



## Commentaires

`min.node.size` petit et `mtry` à calibrer.

## En pratique

- On peut bien entendu *calibrer ces paramètres* avec les approches traditionnelles mais...
- les valeurs par défaut sont souvent performantes !
- On pourra quand même faire quelques essais, notamment pour `mtry`.

## Un exemple avec `tidymodels`

1. Initialisation du `workflow` :

```
> tune_spec <- rand_forest(mtry = tune(), min_n = tune()) %>%  
+   set_engine("ranger") %>%  
+   set_mode("classification")  
> rf_wf <- workflow() %>% add_model(tune_spec) %>% add_formula(type ~ .)
```

2. Ré-échantillonnage et grille de paramètres :

```
> blocs <- vfold_cv(spam, v = 10, repeats = 5)  
> rf_grid <- expand.grid(mtry=c(seq(1,55,by=5),57),  
+   min_n=c(1,5,15,50,100,500))
```

3. Calcul des erreurs :

```
> rf_res <- rf_wf %>% tune_grid(resamples = blocs, grid = rf_grid)
```

4. Visualisation des résultats (AUC et accuracy) :

```
> rf_res %>% show_best("roc_auc") %>% select(-8)  
## # A tibble: 5 x 7  
##   mtry min_n .metric .estimator  mean     n std_err  
##   <dbl> <dbl> <chr>   <chr>    <dbl> <int>   <dbl>  
## 1     4     1 roc_auc binary    0.988    50 0.000614  
## 2     5     1 roc_auc binary    0.988    50 0.000623  
## 3     6     1 roc_auc binary    0.988    50 0.000617  
## 4     5     5 roc_auc binary    0.988    50 0.000621  
## 5     7     1 roc_auc binary    0.988    50 0.000645  
  
> rf_res %>% show_best("accuracy") %>% select(-8)  
## # A tibble: 5 x 7  
##   mtry min_n .metric .estimator  mean     n std_err  
##   <dbl> <dbl> <chr>   <chr>    <dbl> <int>   <dbl>  
## 1     4     1 accuracy binary   0.954    50 0.00159  
## 2     6     1 accuracy binary   0.954    50 0.00141  
## 3     7     1 accuracy binary   0.954    50 0.00149  
## 4     5     1 accuracy binary   0.954    50 0.00153  
## 5     8     1 accuracy binary   0.953    50 0.00146
```

## Remarque

On retrouve bien `min.node.size` petit et `mtry` proche de la valeur par défaut (7).

5. Ajustement de l'algorithme final :

```
> foret_finale <- rf_wf %>%  
+   finalize_workflow(list(mtry=7, min_n=1)) %>%  
+   fit(data=spam)
```

### 1.2.3 Erreur OOB et importance des variables

- Comme pour tous les algorithmes de prévision on peut évaluer la *performance des forêts aléatoires* en estimant un *risque par ré-échantillonnage*.
- Les tirages bootstraps permettent de définir une alternative, souvent *moins coûteuse en temps de calcul*, au ré-échantillonnage.
- *Idée/astuce* : utiliser les observations non sélectionnées dans les échantillons bootstraps pour estimer le risque.

3	4	6	10	3	9	10	7	7	1	$T_1$
2	8	6	2	10	10	2	9	5	6	$T_2$
2	9	4	4	7	7	2	3	6	7	$T_3$
6	1	3	3	9	3	8	10	10	1	$T_4$
3	7	10	3	2	8	6	9	10	2	$T_5$
7	10	3	4	9	10	10	8	6	1	$T_6$

## OOB illustration

- Les échantillons 2, 3 et 5 *ne contiennent pas* la première observation, donc

$$\hat{y}_1 = \frac{1}{3}(T_2(x_1) + T_3(x_1) + T_5(x_1)).$$

- On fait de même pour *toutes les observations*  $\Rightarrow \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$ .

- On *calcule l'erreur* selon

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{1}_{\hat{y}_i \neq y_i}.$$

## OOB définition

- Pour  $i = 1, \dots, n$  on note

$$\text{OOB}(i) = \{b \leq B : i \notin \mathcal{I}_b\}$$

l'ensemble des tirages bootstrap qui *ne contiennent pas*  $i$  et

$$f_{n,\text{OOB}(i)}(x_i) = \frac{1}{|\text{OOB}(i)|} \sum_{b \in \text{OOB}(i)} T(x_i, \theta_b, \mathcal{D}_n)$$

la prévision de la forêt en ne considérant *que les arbres pour lesquels  $i$  n'est pas dans le tirage bootstrap*.

- L'*erreur OOB* s'obtient en confrontant ces prévisions au valeurs observées, par exemple

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - f_{n,\text{OOB}(i)}(x_i))^2 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{1}_{f_{n,\text{OOB}(i)}(x_i) \neq y_i}.$$

$\Rightarrow$  erreur renvoyée par défaut dans **ranger** et **randomforest**.

## Importance des variables

Deux mesures sont généralement utilisées.

- *Score d'impureté* : simplement la moyenne des importances de  $X_j$  dans chaque arbre de la forêt :

$$\mathcal{I}_j^{\text{imp}} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \mathcal{I}_j(T_b),$$

voir chapitre sur les arbres pour la définition de  $\mathcal{I}_j(T_b)$ .

- *Importance par permutation* : comparer les erreurs de chaque arbre sur l'échantillon

1. OOB de l'arbre ;
2. OOB en permutant les valeurs de la variables  $j$ .

$\Rightarrow$  *Idée* : Si  $X_j$  est importante ces erreurs doivent être très différentes.

## Importance par permutation

- On présente ce score en régression mais rien ne change pour la classification.

- On note

$$\text{Err(OOB}_b\text{)} = \frac{1}{|\text{OOB}_b|} \sum_{i \in \text{OOB}_b} (y_i - T(x_i, \theta_b, \mathcal{D}_n))^2,$$

avec

$$\text{OOB}_b = \{i \leq n : i \notin \mathcal{I}_b\}.$$

$\Rightarrow$  Erreur de l'*arbre  $b$*  calculée sur les *données OOB*.

- On recalcule cette erreur mais sur  $\text{OOB}_b$  où on permute les valeurs de la  $j^{\text{e}}$  colonne.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1d} \\ x_{21} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2d} \\ x_{51} & \dots & x_{3j} & \dots & x_{3d} \\ x_{41} & \dots & x_{4j} & \dots & x_{4d} \\ x_{51} & \dots & x_{5j} & \dots & x_{5d} \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{3j} & \dots & x_{1d} \\ x_{21} & \dots & x_{5j} & \dots & x_{2d} \\ x_{51} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{3d} \\ x_{41} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{4d} \\ x_{51} & \dots & x_{4j} & \dots & x_{5d} \end{bmatrix}$$

- On note  $\tilde{x}_i^j$  les individus de l'échantillon  $\text{OOB}_b$  permuté et on calcule

$$\text{Err}(\text{OOB}_b^j) = \frac{1}{|\text{OOB}_b|} \sum_{i \in \text{OOB}_b} (y_i - T(\tilde{x}_i^j, \theta_b, \mathcal{D}_n))^2.$$

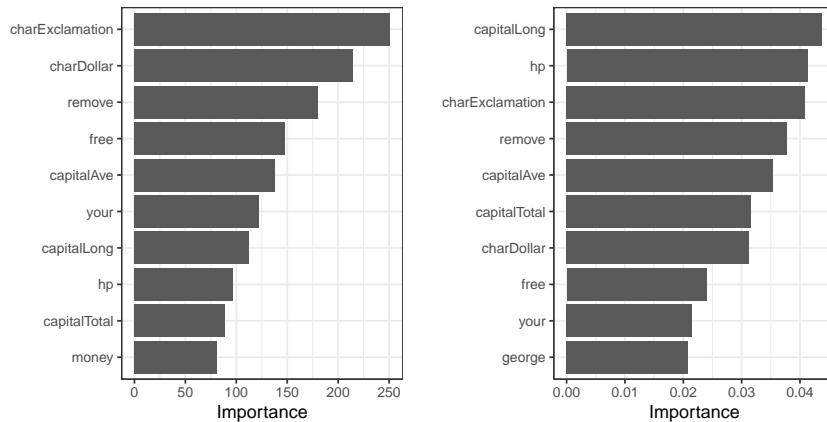
### Importance par permutation

$$\mathcal{I}_j^{\text{perm}} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B (\text{Err}(\text{OOB}_b^j) - \text{Err}(\text{OOB}_b)).$$

### Le coin R

- On peut *calculer et visualiser* facilement ces importances avec `ranger` :

```
> set.seed(1234)
> foret.imp <- ranger(type ~ ., data=spam, importance="impurity")
> foret.perm <- ranger(type ~ ., data=spam, importance="permutation")
> vip(foret.imp);vip(foret.perm)
```



### Conclusion

#### Beaucoup d'avantages

- Bonnes performances prédictives  $\implies$  souvent parmi les algorithmes de tête dans les compétitions [Fernández-Delgado et al., 2014].
- Facile à calibrer.

#### Assez peu d'inconvénients

Coté boîte noire (mais guère plus que les autres méthodes...)

## 2 Bibliographie

### Références

## Biblio4

- [Breiman, 1996] Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine Learning*, 26(2) :123–140.
- [Fernández-Delgado et al., 2014] Fernández-Delgado, M., Cernadas, E., Barro, S., and Amorim, D. (2014). Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *Journal of Machine Learning Research*, 15 :3133–3181.
- [Freund and Schapire, 1996] Freund, Y. and Schapire, R. (1996). Experiments with a new boosting algorithm. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Machine Learning*.
- [Friedman, 2001] Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation : A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29 :1189–1232.
- [Friedman, 2002] Friedman, J. H. (2002). Stochastic gradient boosting. *Computational Statistics & Data Analysis*, 28 :367–378.
- [Genuer, 2010] Genuer, R. (2010). *Forêts aléatoires : aspects théoriques, sélection de variables et applications*. PhD thesis, Université Paris XI.
- [Hastie et al., 2009] Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer, second edition.
- [Wright and Ziegler, 2017] Wright, M. and Ziegler, A. (2017). ranger : A fast implementation of random forests for high dimensional data in c++ and r. *Journal of Statistical Software*, 17(1).

## Discussion/comparaison des algorithmes

	Linéaire	SVM	Réseau	Arbre	Forêt	Boosting
Performance	■	■	■	▼	▲	▲
Calibration	▼	▼	▼	▲	▲	▲
Coût calc.	■	▼	▼	▲	▲	▲
Interprétation	▲	▼	▼	■	▼	▼

## Commentaires

- Résultats pour **données tabulaires**.
- Différent pour **données structurées** (image, texte..)  $\Rightarrow$  performance  $\nearrow$  réseaux pré-entraînés  $\Rightarrow$  **apprentissage profond/deep learning**.