

Apprentissage supervisé - Machine learning

L. Rouvière

laurent.rouviere@univ-rennes2.fr

janvier 2023

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
 - **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
 - Tutoriel : 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** \implies calcul ou estimation : ré-échantillonnage, validation croisée...
- Algorithmes versus estimateurs...
- **Classification** des algorithmes. Tous équivalents ? Cadre propice...
- ...

Première partie I

Apprentissage : contexte et formalisation

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

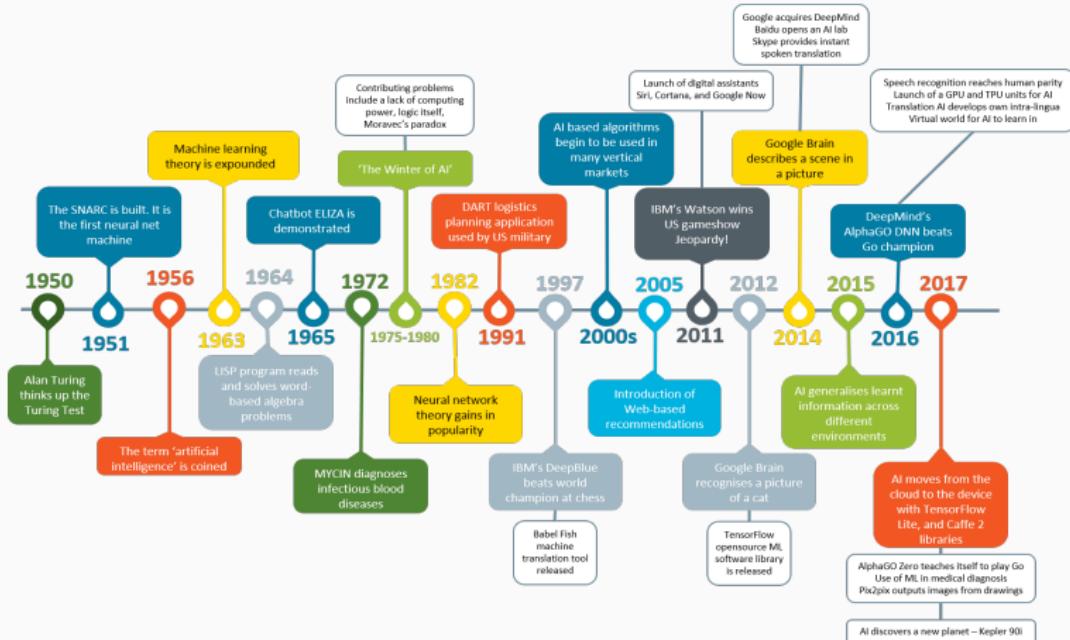
Calibrer un algorithme

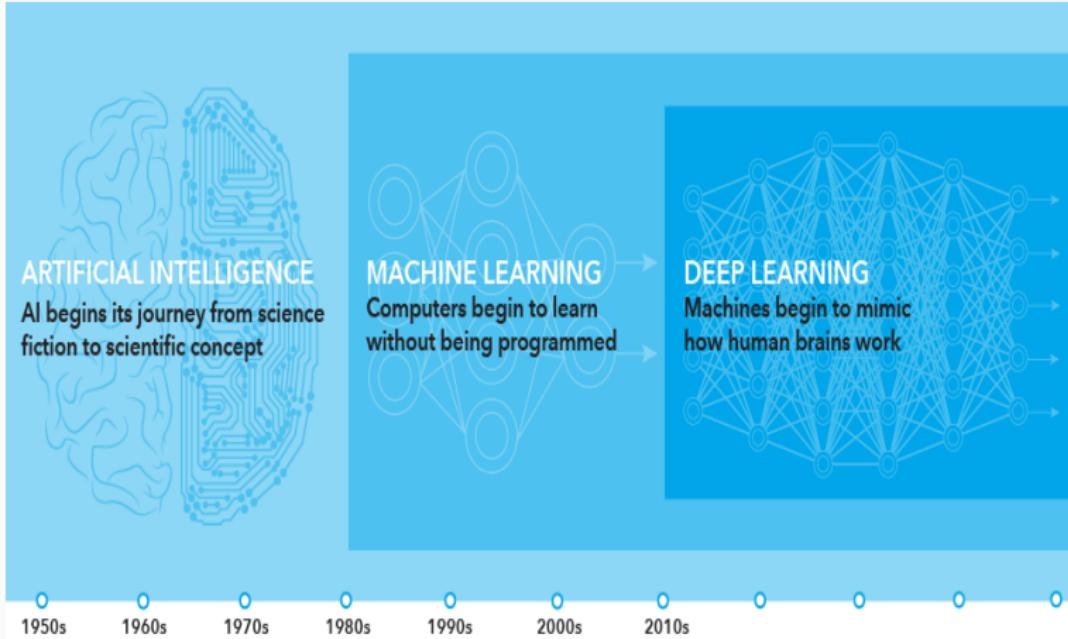
Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'une validation croisée

Un peu d'histoire





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.

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)
```

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 **puissance 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.

Quelques définitions

Intelligence artificielle (Wikipédia)

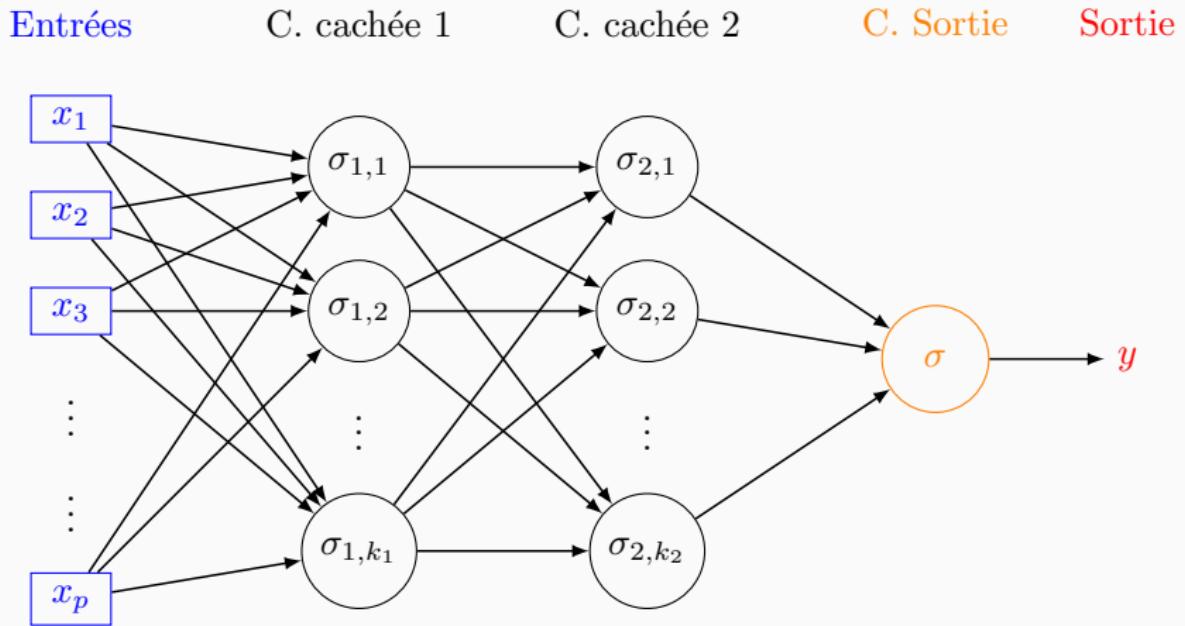
Ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine.

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)
 ⇒ création d'un programme pour IBM qui s'améliore en jouant
- Années 80 : développement du ML ⇒ l'ordinateur commence à déduire des règles à suivre en analysant seulement des données
- 1997 : Deep Blue ⇒ 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



or



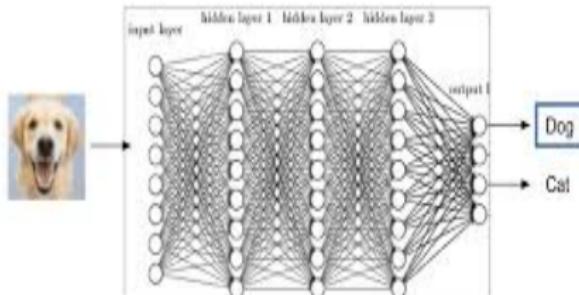
Relationship → “Dog”

Relationship → “Cat”

1. Input picture

2. Analysis through deep neural network

3. Output class



Dog: 96%

Cat: 29%

Duck: 2%

Bird: 0%



Dog: 36%

Cat: 94%

Duck: 2%

Bird: 1%

Compréhension du langage

The screenshot shows the DeepL Translator interface. At the top, there is a navigation bar with links for "DeepL Traducteur", "DeepL Pro", "Pourquoi DeepL?", "API", "Forfaits et tarifs", "Applications" (with a "GRATUIT" badge), "Commencer l'essai gratuit", "Connexion", and a menu icon. Below the navigation bar, there are two tabs: "Traduire du texte" (selected) and "Traduire des fichiers". The main area shows a translation pair: "Français (langue détectée)" on the left and "Anglais (USA)" on the right. The French input is "Introduction au machine learning est mon cours préféré." and the English output is "Introduction to Machine Learning is my favorite course." There are "Glossaire" and "X" buttons above the input field. Below the input field, there are three small icons: a speaker, a thumbs up, and a thumbs down. On the far right, there are icons for a clipboard, a magnifying glass, and a refresh symbol. At the bottom left, there is a "Dictionnaire" section with the instruction "Cliquez sur un mot pour en savoir plus à son sujet.".

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, Nook, was able to read its opponents and explain its decision-making. Photograph: switas/Getty Images/iStockphoto

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. Evertine

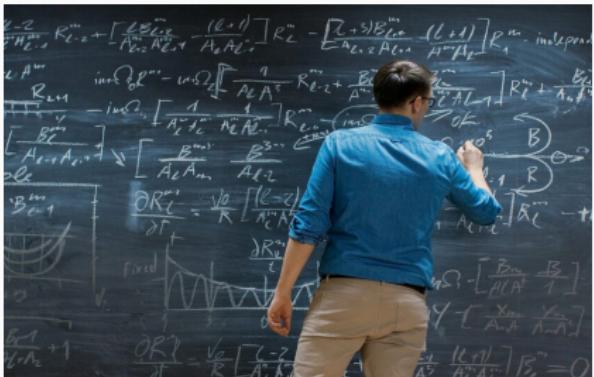
In the battle of artificial intelligence versus a human fighter pilot, it wasn't even close.

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



SHARE ARTICLE



Question: What are the eigenvalues of a 2-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 σ^2 be the variance of the first n even natural numbers, and τ^2 be the variance of the first n natural numbers. Then, we have $\tau^2 = \frac{n^2 - 1}{12}$ and $\sigma^2 = \frac{m^2 - 1}{3}$. We solve the system of equations:

$$\begin{aligned} \frac{n^2 - 1}{12} &= 10 \\ m^2 - 1 &= 36 \end{aligned}$$

This translates into the system

$$\begin{aligned} n^2 &= 121 \\ m^2 &= 48 + 1 = 49. \end{aligned}$$

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:

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

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

- 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'intelligence artificielle (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 la 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, c'est-à-dire une fraction dont le numérateur et le dénominateur ne ont pas de diviseurs communs autres que 1.

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 être un rationnel. Par conséquent, nous avons démontré que la racine carrée de 2 n'est pas un rationnel.

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**.

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]

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...

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...

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.

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...

Objectif \Rightarrow prédire

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

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 **diffèrent** :
 - recherche de **complexité minimale** en statistique \Rightarrow le modèle doit être **interprétable** !
 - **complexité moins importante** en machine learning \Rightarrow on veut "juste bien prédire".

Statistique vs apprentissage

- Les objectifs **diffèrent** :
 - 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...).

Statistique vs apprentissage

- Les objectifs **diffèrent** :
 - 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.

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.

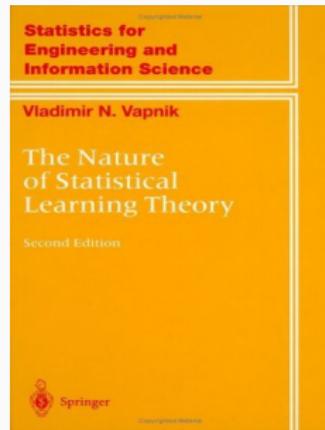
Nombreuses applications

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

Théorie de l'apprentissage statistique

Approche mathématique

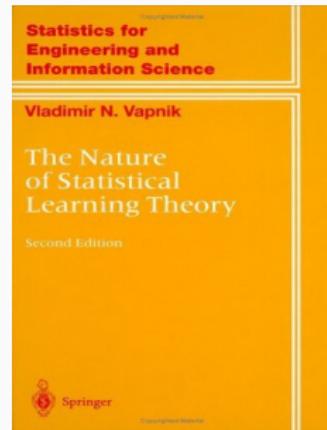
- Ouvrage fondateur : [Vapnik, 2000]



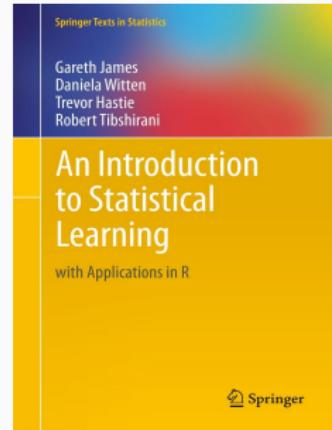
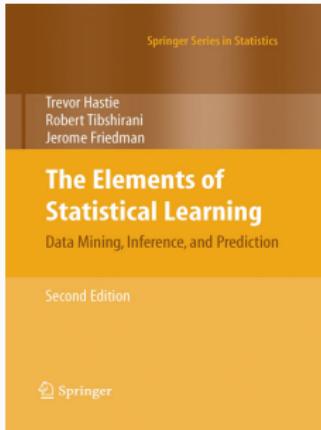
Théorie de l'apprentissage statistique

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>

- 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]
 - ...

- 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.

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Reconnaissance de l'écriture

Apprentissage statistique

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

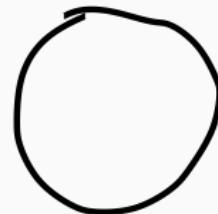
0	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
4	4	4	4	4
5	5	5	5	5
6	6	6	6	6
7	7	7	7	7
8	8	8	8	8
9	9	9	9	9

Reconnaissance de l'écriture

Apprentissage statistique

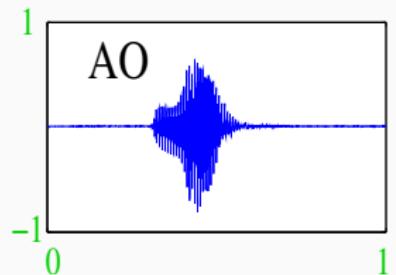
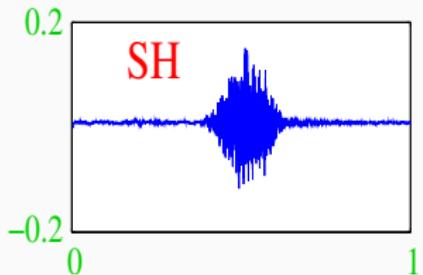
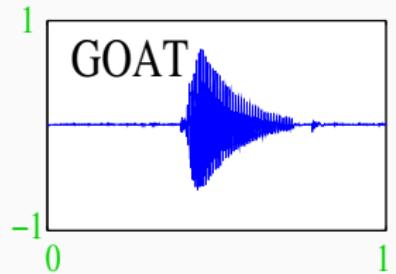
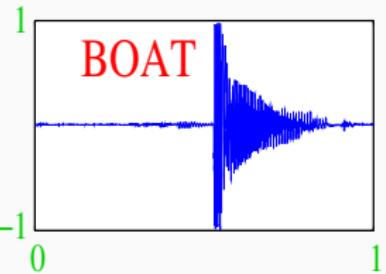
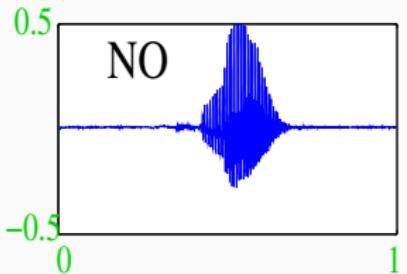
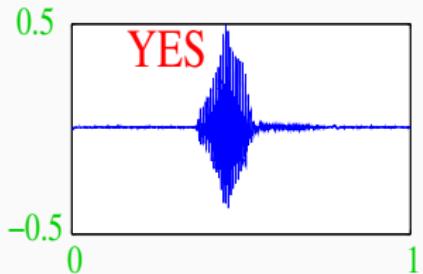
Comprendre et apprendre un comportement à partir d'**exemples**.

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

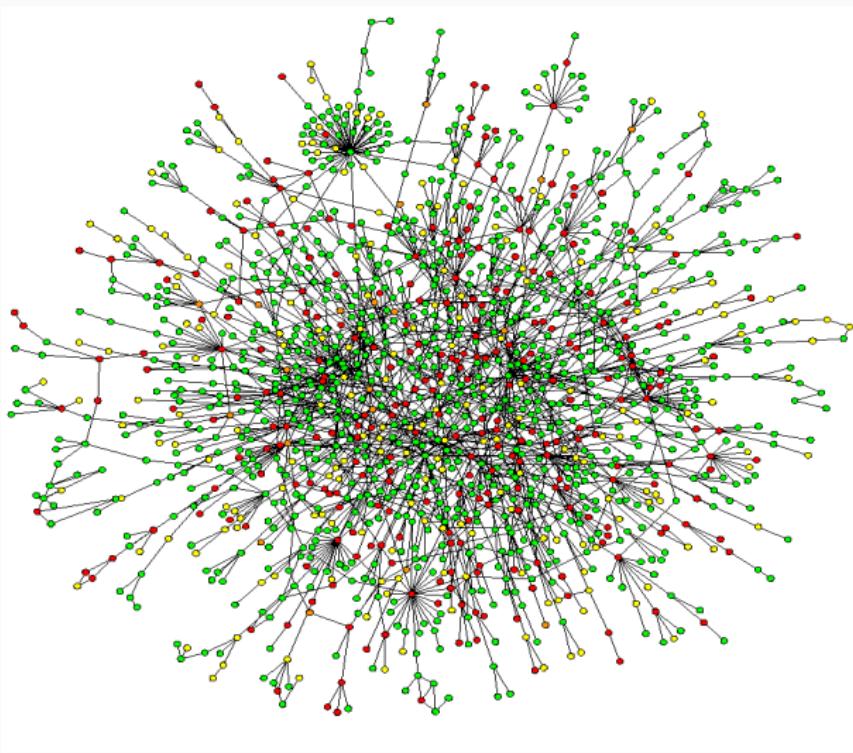


Qu'est-ce qui est écrit ? 0, 1, 2... ?

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
```

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
```

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 ?

Risques et algorithmes de prévision

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

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 $x \in \mathcal{X}$.

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

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 $x_i \in \mathcal{X}$.

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

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

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 .

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) P .

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) 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

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

où (X, Y) est indépendant des (X_i, Y_i) et de même loi P .

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) 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

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

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.

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

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

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

Aspect pratique

- La fonction de prévision optimale f^* dépend le plus souvent de la loi P des (X, Y) qui est en pratique **inconnue**.

Aspect pratique

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

Aspect pratique

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

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

Propriétés statistiques

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

Risques et algorithmes de prévision

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

- Algorithme **simple** qui permet de répondre à des problème de **régression** et de **classification**.

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

- 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

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

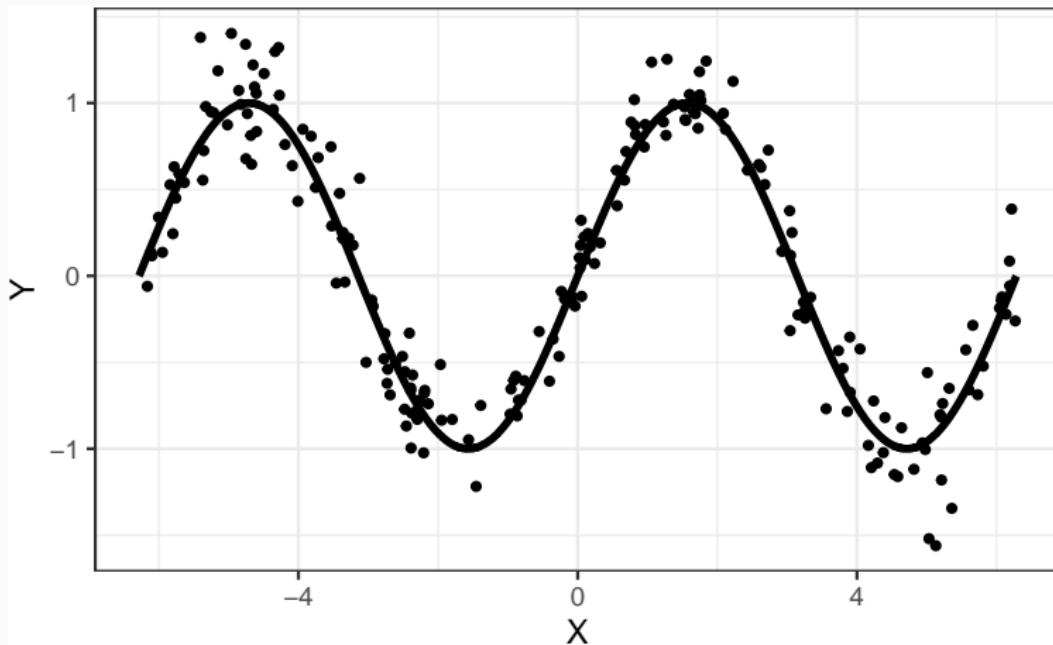
avec

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

et $\|x - x_{(k)}\|$ la k^{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

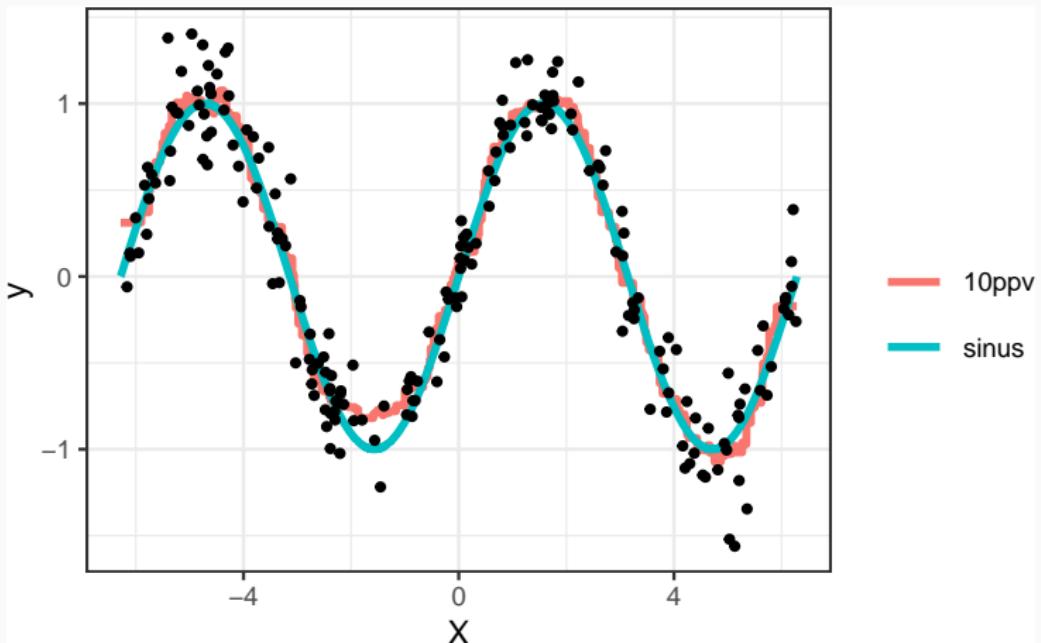


- La fonction `kknn` du package `kknn` permet d'entrainer l'algorithme des kppv

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

- La fonction `kknn` du package `kknn` permet d'entrainer 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

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

pour la prévision des **groupes**

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

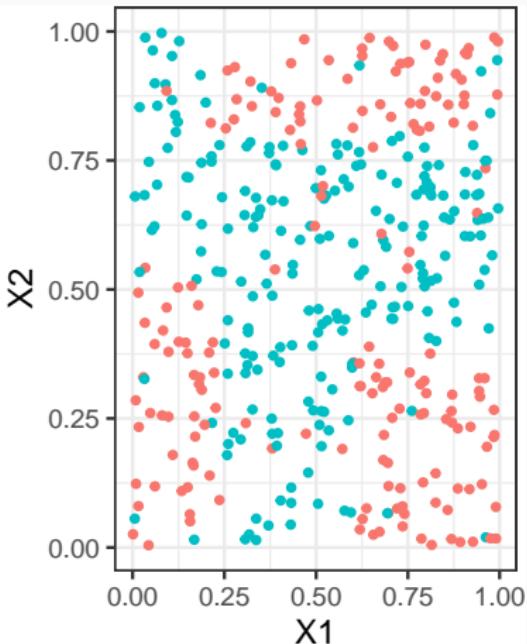
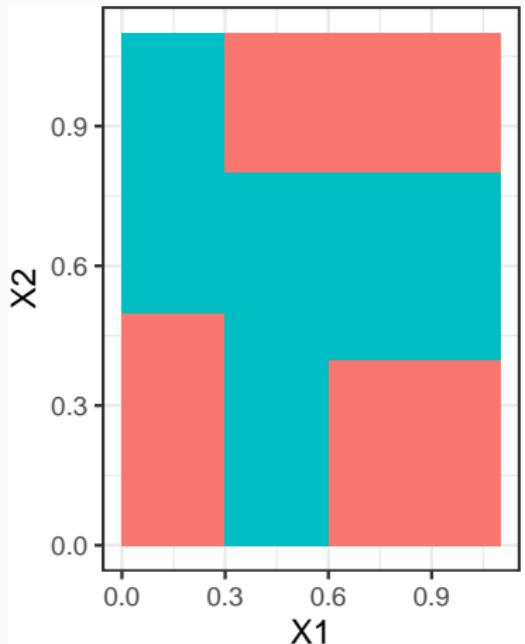
$$g_{n,k}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i \in \text{kppv}(x)} 1_{y_i=1} \geq \sum_{i \in \text{kppv}(x)} 1_{y_i=0} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

pour la prévision des **groupes** et par

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

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

Exemple

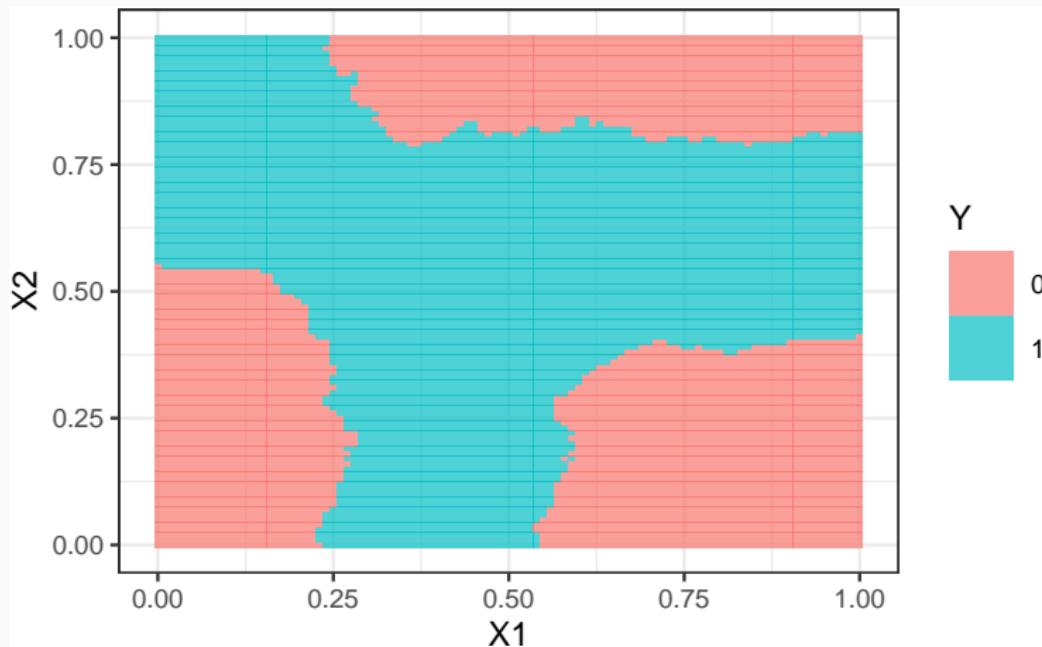


- La fonction `kknn` du package `kknn` permet d'entrainer l'algorithme des kppv

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

- 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
```



Risques et algorithmes de prévision

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

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** ℓ)).
- Un algorithme de prévision performant pour un critère ne sera **pas forcément performant pour un autre**.

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** ℓ)).
- 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 $\tilde{\mathcal{Y}}$.

- 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 $Y : \ell : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$;

- 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 $\ell : \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, K\} \rightarrow \mathbb{R}^+$;

- 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 $P(Y = k | X = x) : \ell : \{1, \dots, K\} \times \mathbb{R}^K \rightarrow \mathbb{R}^+$.

Régression

- $\mathcal{Y} = \mathbb{R}$, une prévision = un réel $\implies m : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$;

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** :

$$\ell : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$$

$$(y, y') \mapsto (y - y')^2$$

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

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

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** :

$$\ell : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$$

$$(y, y') \mapsto (y - y')^2$$

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

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

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

$$m^*(x) = E[Y|X = x].$$

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**

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

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

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

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

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

Classification binaire

- $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$, une prévision = un **groupe** $\implies g : \mathcal{X} \rightarrow \{-1, 1\}$.
- Ce cadre permet une **analyse plus fine** des différents types d'erreur.

Classification binaire

- $\mathcal{Y} = \{-1, 1\}$, une prévision = un **groupe** $\implies g : \mathcal{X} \rightarrow \{-1, 1\}$.
- 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 \implies bien prédire les négatifs :

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

- Sensibilité \implies bien prédire les positifs :

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

- Taux de faux négatifs \implies prédire négatif à tort :

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

- Taux de faux positifs \implies prédire positif à tort :

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

Erreurs binaires

- Spécificité \implies bien prédire les négatifs :

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

- Sensibilité \implies bien prédire les positifs :

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

- Taux de faux négatifs \implies prédire négatif à tort :

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

- Taux de faux positifs \implies prédire positif à tort :

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

Critères binaires

De nombreux critères s'obtiennent en combinant ces probabilités :

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

Quelques critères binaires

- **Balanced Accuracy** :

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

Quelques critères binaires

- Balanced Accuracy :

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

- F_1 -score :

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

avec

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

- Kappa de Cohen...

Quelques critères binaires

- Balanced Accuracy :

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

- F_1 -score :

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

avec

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

- 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
 $p_k(x) = P(Y = k | X = x), k = 1, \dots, K - 1.$

Classification (pour des probabilités)

- $\mathcal{Y} = \{1, \dots, K\}$, une prévision = $K - 1$ probabilités
 $p_k(x) = P(Y = k|X = x), k = 1, \dots, K - 1.$
- Les fonctions de perte sont généralement définies comme généralisation de pertes spécifiques au problème de classification binaire.

Classification (pour des probabilités)

- $\mathcal{Y} = \{1, \dots, K\}$, une prévision = $K - 1$ probabilités
 $p_k(x) = P(Y = k|X = x), k = 1, \dots, K - 1.$
- 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 $S : \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$
($S(x) = P(Y = 1|X = x)$ ou une transformation bijective de cette probabilité) \implies fonction de **score**.

Fonction de score

- Objectif d'un score : ordonner



Fonction de score

- Objectif d'un score : ordonner



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

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

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)

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

et

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

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 .

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

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

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

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

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 \implies ROC vit dans le carré $[0, 1]^2$.

Analyse de la courbe ROC

- Une proba est entre 0 et 1 \implies ROC vit dans le carré $[0, 1]^2$.
- $x(-\infty) = y(-\infty) = 1$ et $x(+\infty) = y(+\infty) = 0 \implies$ ROC part du point $(1, 1)$ pour arriver en $(0, 0)$.

Analyse de la courbe ROC

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

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

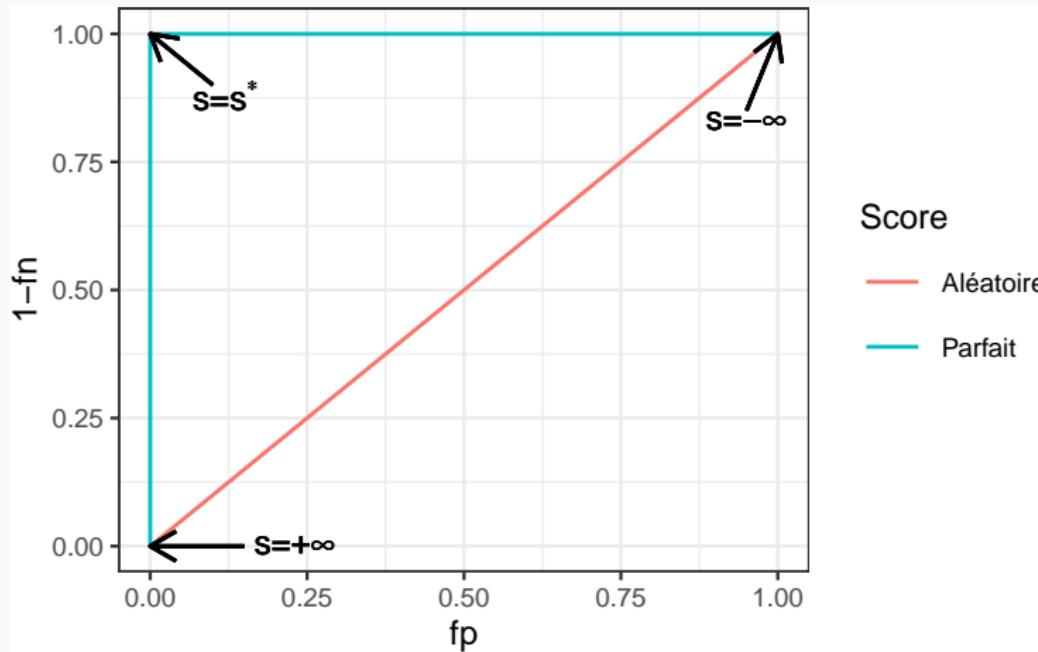
Analyse de la courbe ROC

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

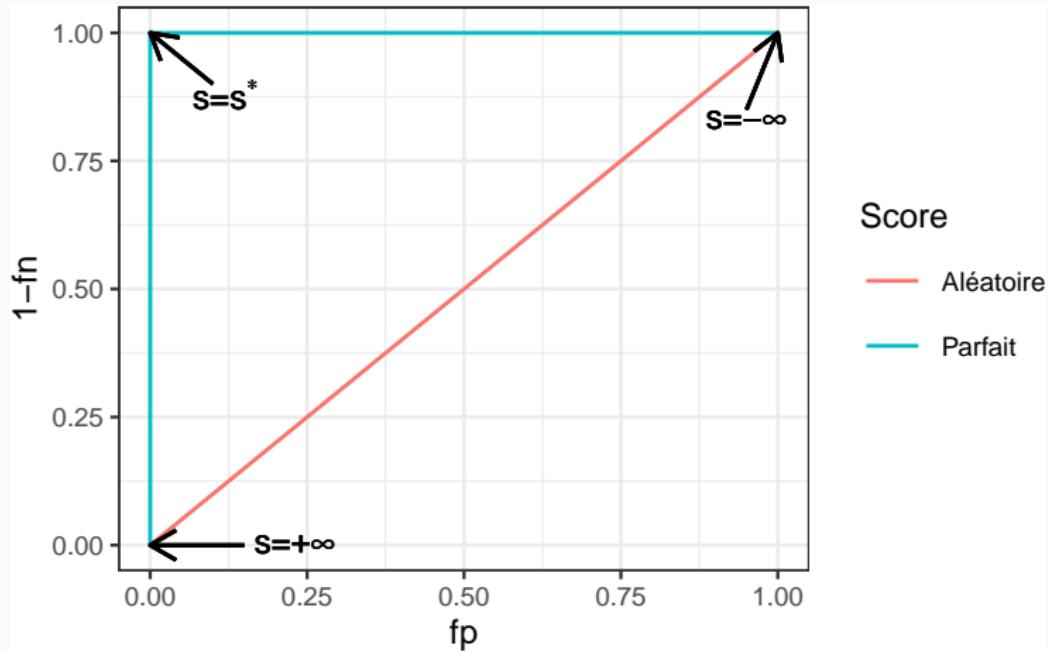
$$[(1, 1); (0, 1)] \quad \text{et} \quad [(0, 1); (0, 0)].$$

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

Visualisation

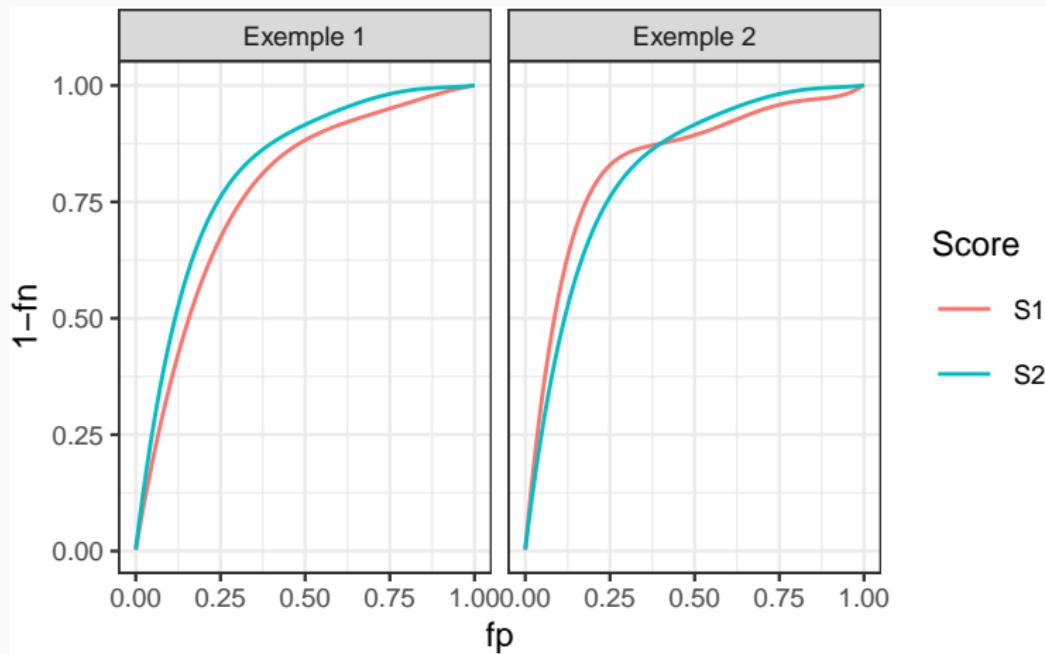


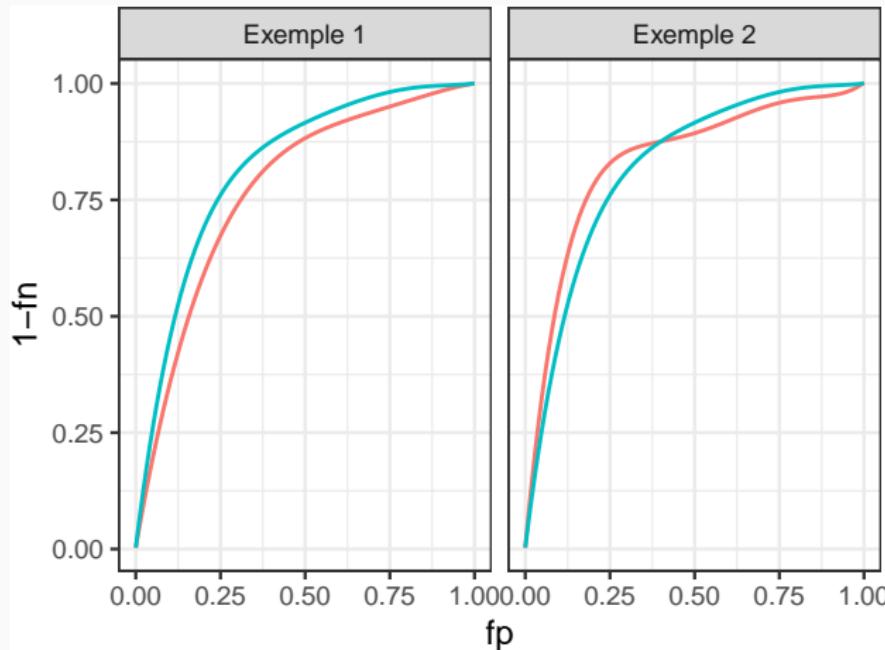
Visualisation



Interprétation

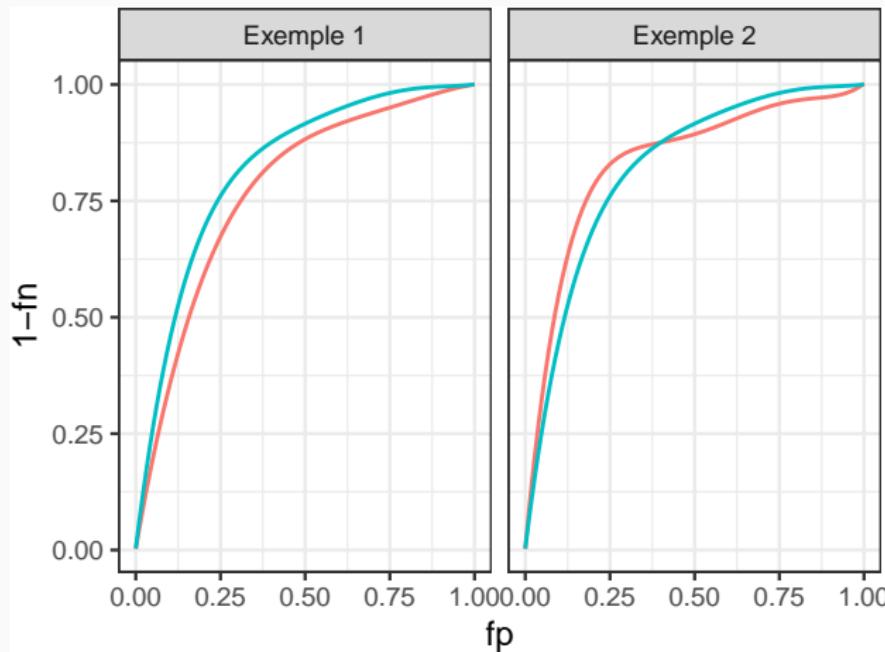
On évalue la **performance d'un score** par sa **capacité à se rapprocher** le plus vite possible de la droite $y = 1$.





Comparaison

- Exemple 1 : S2 meilleur que S1.
- Exemple 2 : il y a débat...



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

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

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

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

Interprétation

- L'AUC correspond à la probabilité que le score **ordonne correctement deux observations** prélevées aléatoirement dans les groupes -1 et 1.

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

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

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

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

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

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

Perte AUC et score optimal

- Remarquons que

$$\text{AUC}(S) = \mathbb{E}[1_{S(x_1) > S(x_2)} | Y_1 = 1, Y_2 = -1].$$

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

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

Perte AUC et score optimal

- Remarquons que

$$\text{AUC}(S) = \mathbb{E}[1_{S(x_1) > S(x_2)} | Y_1 = 1, Y_2 = -1].$$

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

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

Proposition

Le score optimal par rapport à l'AUC est

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

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	$(y - m(x))^2$	$E[Y - m(X)]^2$	$E[Y X = x]$
Classif. binaire	$1_{y \neq g(x)}$	$P(Y \neq g(X))$	Bayes
Scoring	$1_{S(x_1) > S(x_2)}$	$AUC(S)$	$P(Y = 1 X = x)$

Le package yardstick

- Nous verrons dans la section suivante que ces critères se calculent (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

- Nous verrons dans la section suivante que ces critères se calculent (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
```

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`

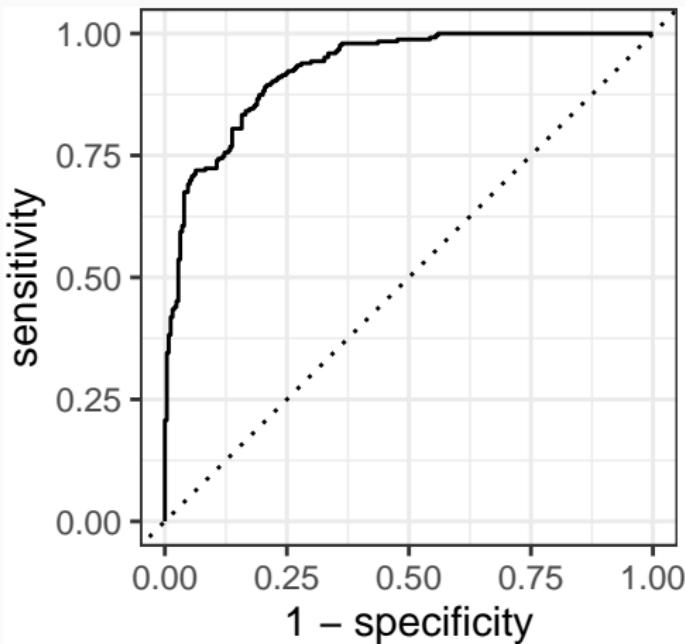
```
> tbl %>% roc_auc(truth=obs,estimate=proba,event_level="second")
## # A tibble: 1 x 3
##   .metric .estimator .estimate
##   <chr>   <chr>        <dbl>
## 1 roc_auc binary     0.926
```

- 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()
```



Risques et algorithmes de prévision

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

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

- 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.
- ...

- 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 λ à sélectionner représente la **complexité du modèle** :

- Le paramètre λ à sélectionner représente la **complexité du modèle** :

Complexité \implies compromis biais/variance

- λ petit \implies modèle peu flexible \implies mauvaise adéquation sur les données \implies biais \nearrow , variance \searrow .

- Le paramètre λ à sélectionner représente la **complexité du modèle** :

Complexité \Rightarrow compromis biais/variance

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

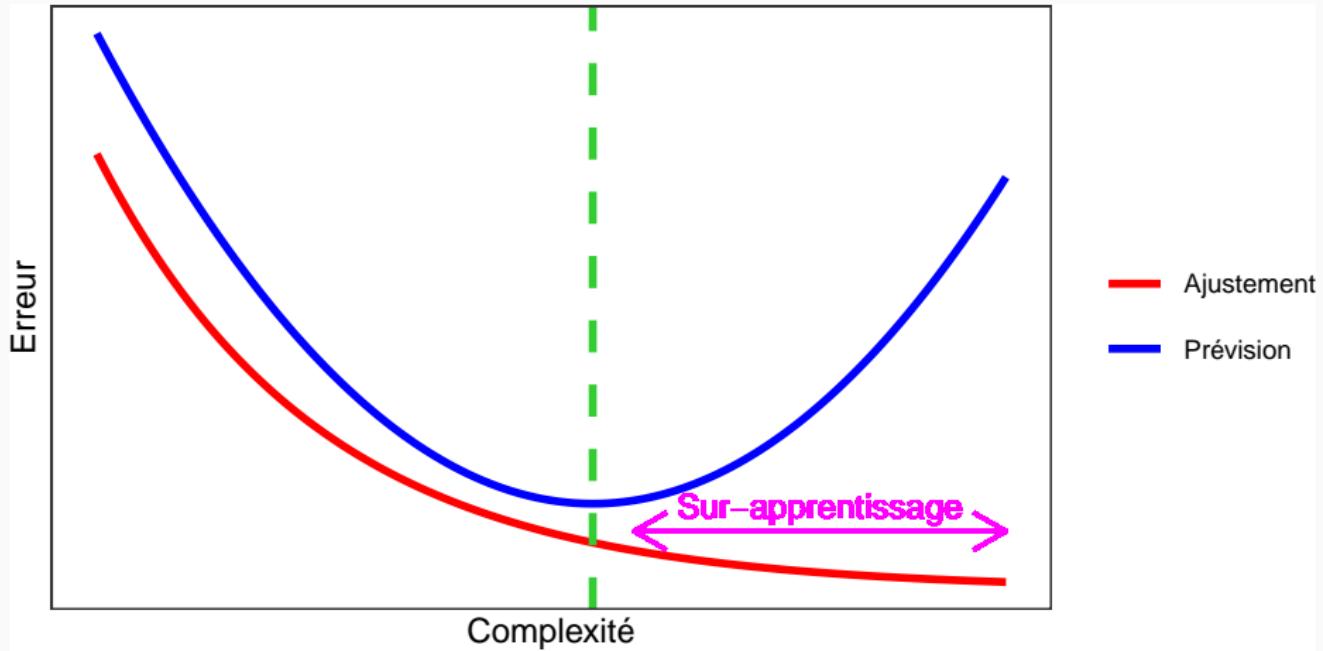
- Le paramètre λ à sélectionner représente la **complexité du modèle** :

Complexité \Rightarrow compromis biais/variance

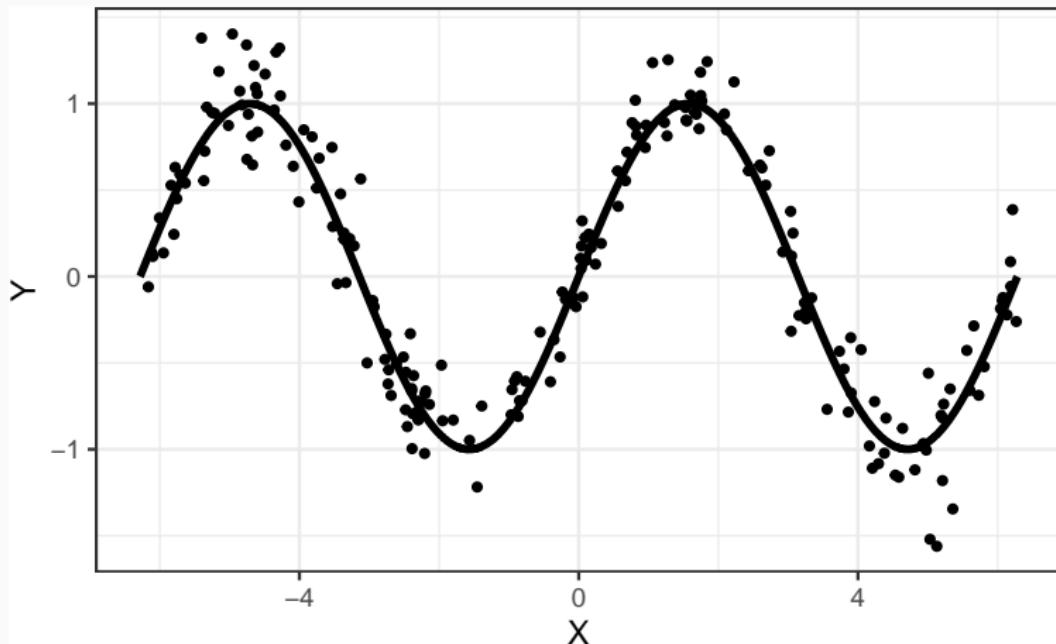
- λ petit \Rightarrow modèle peu flexible \Rightarrow mauvaise adéquation sur les données \Rightarrow biais \nearrow , variance \searrow .
- λ grand \Rightarrow modèle trop flexible \Rightarrow **sur-ajustement** \Rightarrow biais \searrow , variance \nearrow .

Overfitting

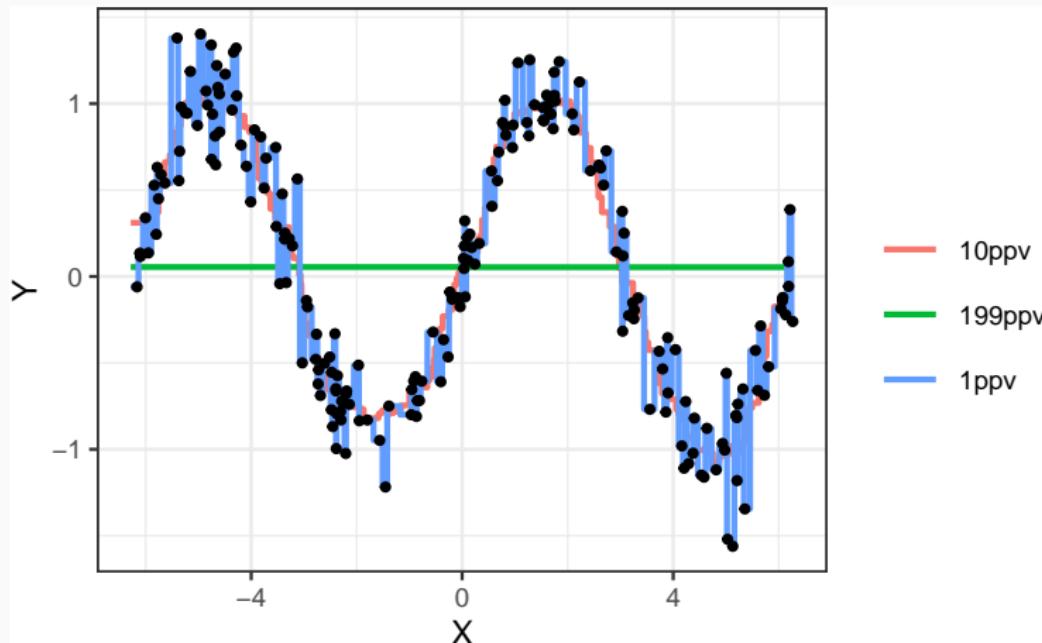
Sur-ajuster signifie que le modèle va **(trop) bien ajuster** les données d'apprentissage, il aura du **mal** à s'adapter à de **nouveaux individus**.



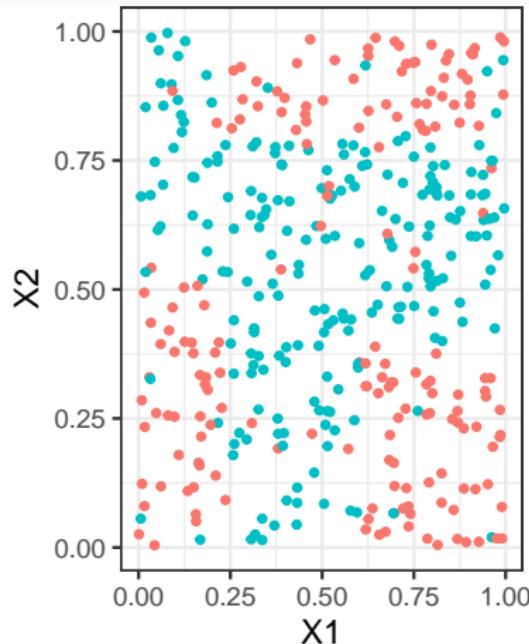
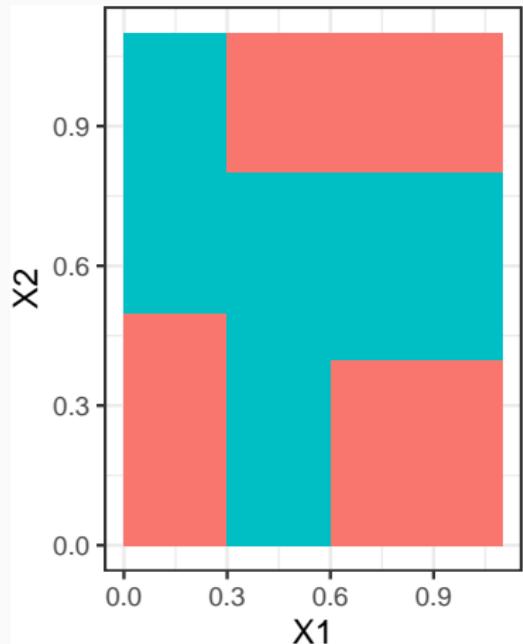
Overfitting en régression



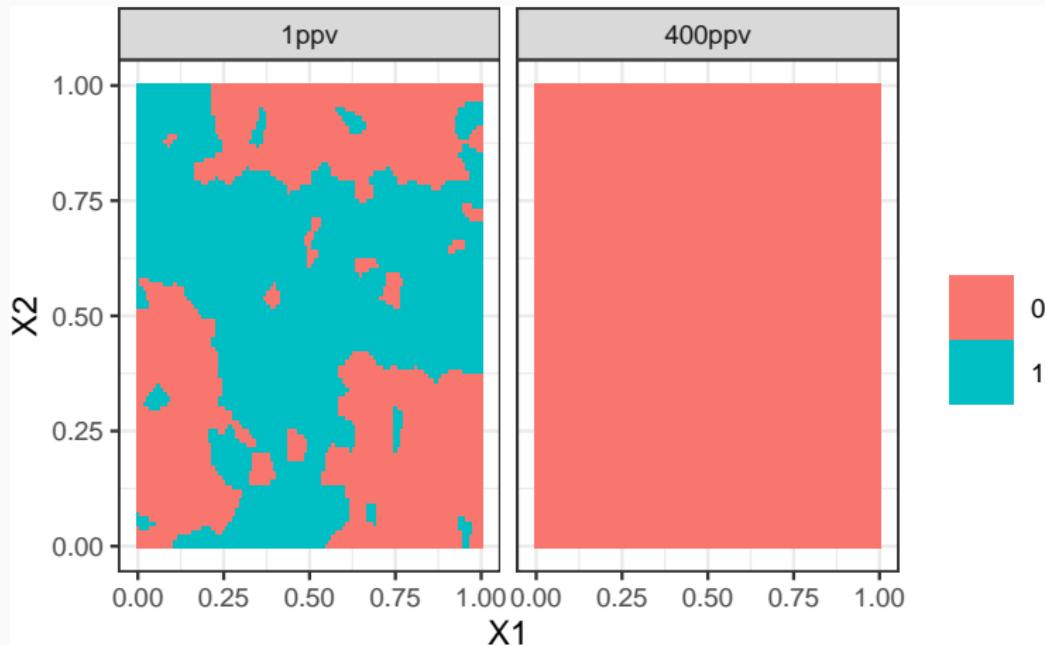
Overfitting en régression



Overfitting en classification supervisée



Overfitting en classification supervisée



Application shiny

https://lrouviere.shinyapps.io/overfitting_app/

Risques et algorithmes de prévision

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'une validation croisée

- 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 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 $V[f_n(x, \mathcal{D}_n)]$

- 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 $V[f_n(x, \mathcal{D}_n)] \implies$ mesure la dispersion des prévisions au point x par rapport à la loi des données \mathcal{D}_n .

- 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 $V[f_n(x, \mathcal{D}_n)] \implies$ mesure la dispersion des prévisions au point x par rapport à la loi des données \mathcal{D}_n .
 2. le biais $E[f_n(x, \mathcal{D}_n)] - f^*(x)$

- 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 $V[f_n(x, \mathcal{D}_n)]$ \Rightarrow mesure la dispersion des prévisions au point x par rapport à la loi des données \mathcal{D}_n .
 2. le biais $E[f_n(x, \mathcal{D}_n)] - f^*(x)$ \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

- Complexité (trop) faible $\implies \searrow$ sensibilité aux données d'apprentissage

- Complexité (trop) faible $\implies \downarrow$ sensibilité aux données d'apprentissage
 $\implies \downarrow$ dispersion et donc \downarrow variance mais

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

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

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

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

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

- 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**

- 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

- 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**.

- 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

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

- Décomposition biais/variance.

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

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

- Décomposition biais/variance.
- k grand \implies biais \nearrow - variance $\searrow \implies$ sous-apprentissage.

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

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

- Décomposition biais/variance.
- k grand \implies biais ↗ - variance ↘ \implies sous-apprentissage.
- k petit \implies biais ↘ - variance ↗ \implies sur-apprentissage.

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

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

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

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** $\mathcal{R}(f_n) = \mathbb{E}[\ell(Y, f_n(X))]$.

Risque empirique

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

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

Risque empirique

- La loi de (X, Y) étant **inconnue** en pratique, il est **impossible de calculer** $\mathcal{R}(f_n) = \mathbb{E}[\ell(Y, f_n(X))]$.
- 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 $f_n \implies$ la LGN ne peut donc s'appliquer !
- Conséquence : $\mathcal{R}_n(f_n)$ conduit souvent à une **sous-estimation** de $\mathcal{R}(f_n)$.

Risque empirique

- La loi de (X, Y) étant **inconnue** en pratique, il est **impossible de calculer** $\mathcal{R}(f_n) = \mathbb{E}[\ell(Y, f_n(X))]$.
- 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 $f_n \implies$ 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...

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Présentation

- Différentes méthodes pour estimer $\mathcal{R}(f_n)$.

Présentation

- Différentes méthodes pour estimer $\mathcal{R}(f_n)$.
- Presque toujours la même idée : séparer les données en blocs

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

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 (prédirer) sur d'autres

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 (prédirer) sur d'autres
 3. en déduire l'estimateur du risque

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 (prédirer) 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}_{app} pour construire f_n ;
 2. un échantillon de validation $\mathcal{D}_{\text{test}}$ utilisé pour estimer le risque de f_n .

Apprentissage - Validation ou Validation hold out

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

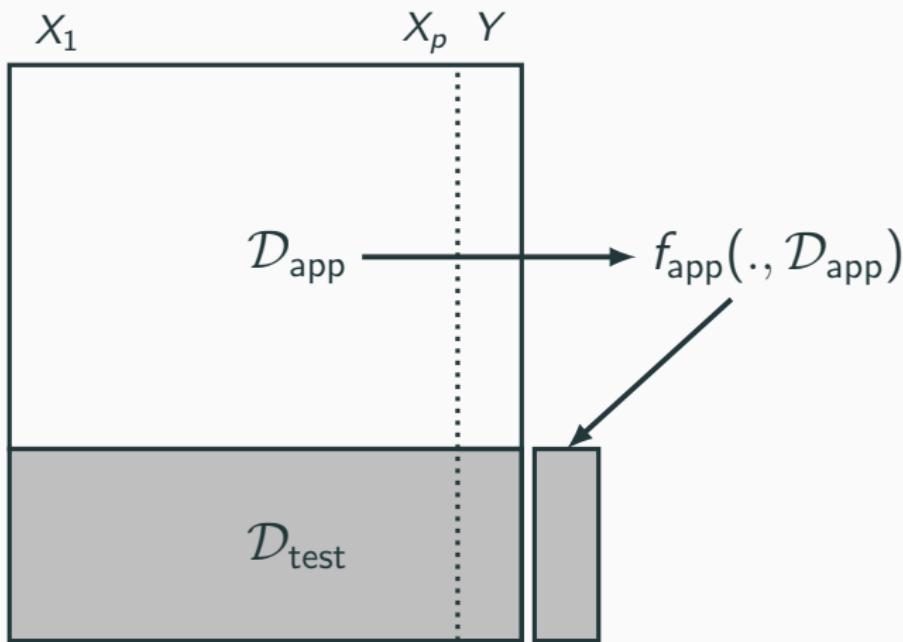
Algorithme

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}_{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 **différentes partitions**.

Algorithme - CV

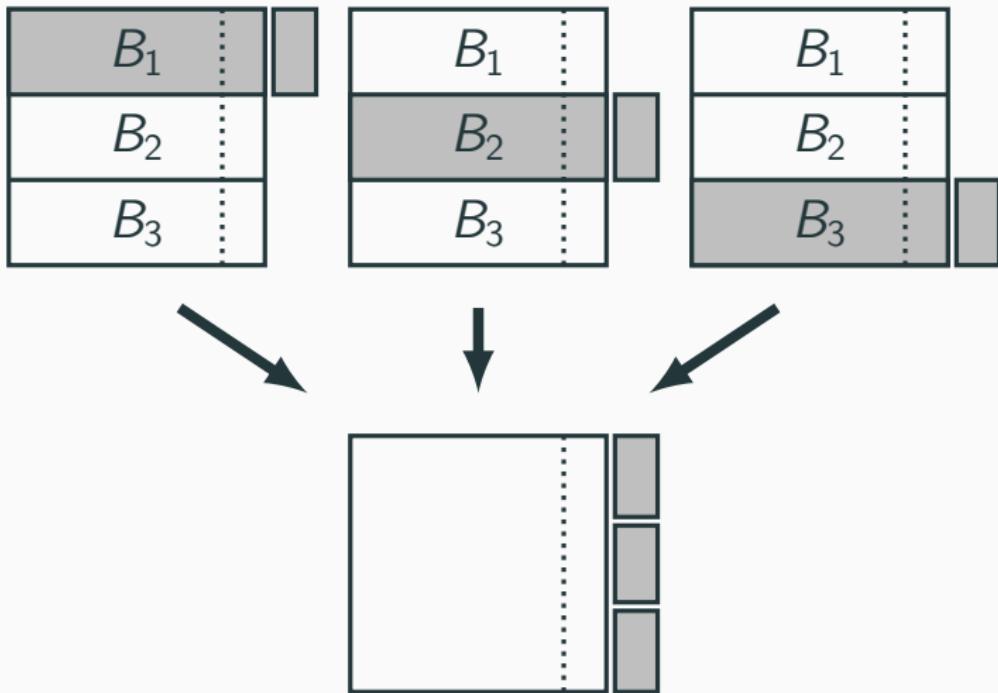
Entrée : $\{B_1, \dots, B_K\}$ une partition de $\{1, \dots, n\}$ en K blocs.

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

1. Ajuster l'algorithme de prévision en utilisant **l'ensemble des données privé du k^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 \implies **plus stable et précis**.
- **Inconvénient** : plus coûteux en **temps de calcul**.

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].

Risques et algorithmes de prévision

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Calibrer des paramètres

- Tous les algorithmes dépendent de paramètres θ 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 θ ;
- Un risque de prévision \mathcal{R} ;
- un algorithme d'estimation du risque.

Pour chaque θ 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 θ qui minimise $\widehat{\mathcal{R}}(f_{n,\theta})$.

Exemple

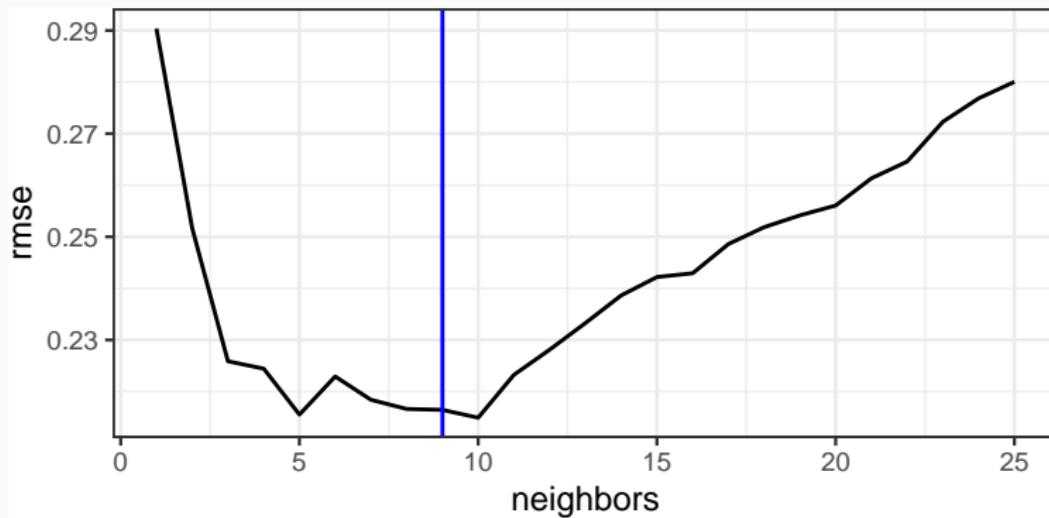
Problème : choisir k pour l'exemple du sinus.

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

Exemple

Problème : choisir k pour l'exemple du sinus.

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



Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

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...)

- 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("kknn")
```

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("kknn")
```

- 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
```

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 107

Estimation du risque

- Fonction `tune_grid`

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

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))
```

Estimation du risque

- Fonction `tune_grid`

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

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

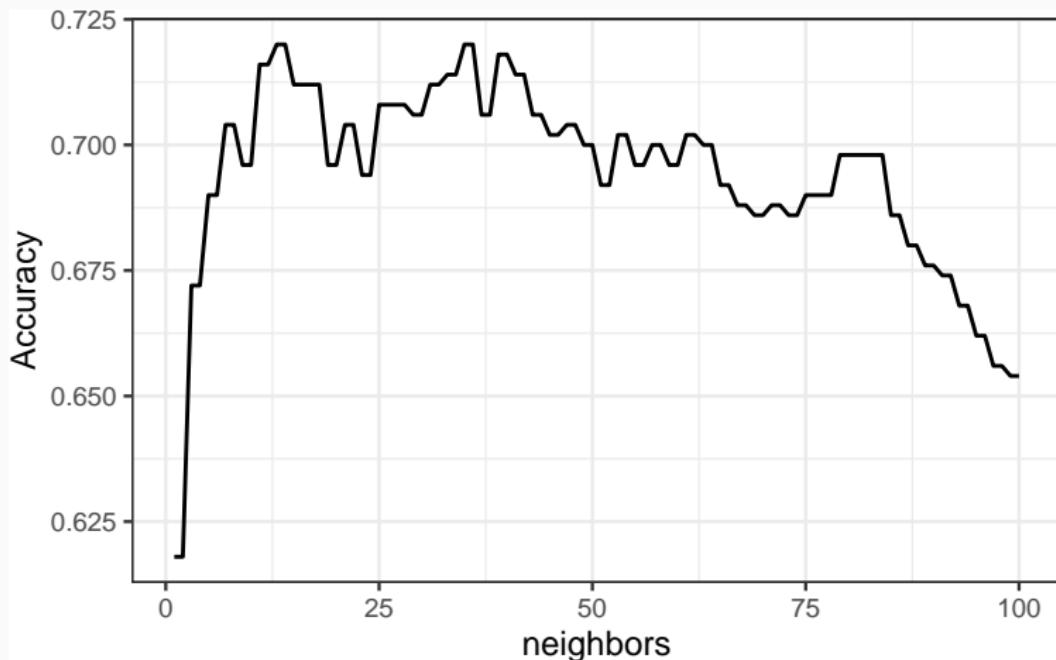
```
> ppv.cv <- ppv_wf %>%
+   tune_grid(
+     resamples = re_ech_cv,
+     grid = grille_k,
+     metrics=metric_set(accuracy))
```

- 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  0.672    10
## 6          6 accuracy binary  0.672    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
```

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 entraînant 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)
```

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.
- \implies facilement **personnalisable**.
- Aisé de changer le critère, la méthode de ré-échantillonnage...

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

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.

- 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

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

- Rappel : l'estimateur de validation croisée s'écrit

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

- On a donc

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

- 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

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

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

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

- 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

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

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

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

- 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
```

- 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.

- L'utilisateur peut ainsi choisir un algorithme de complexité minimale tel que le risque soit "proche" du risque optimal.

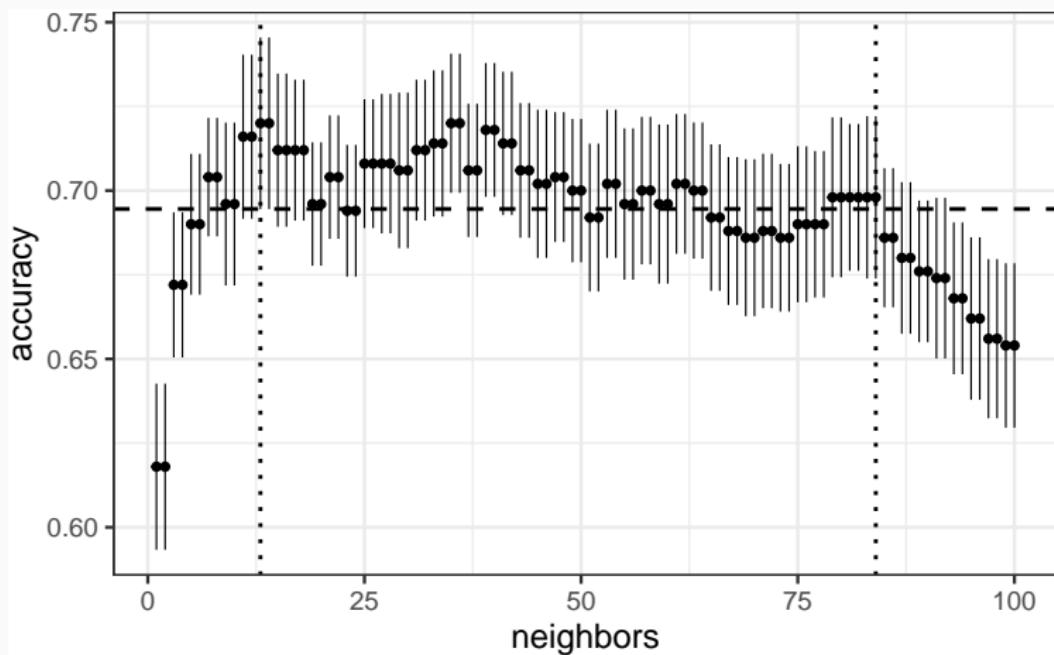
Règle one-standard-error [Breiman et al., 1984].

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

- 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 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**.

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package tidymodels

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

- Les méthodes d'**estimation du risque** sont construites à partir de prévisions sur différents blocs.

- 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.

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

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.

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 :

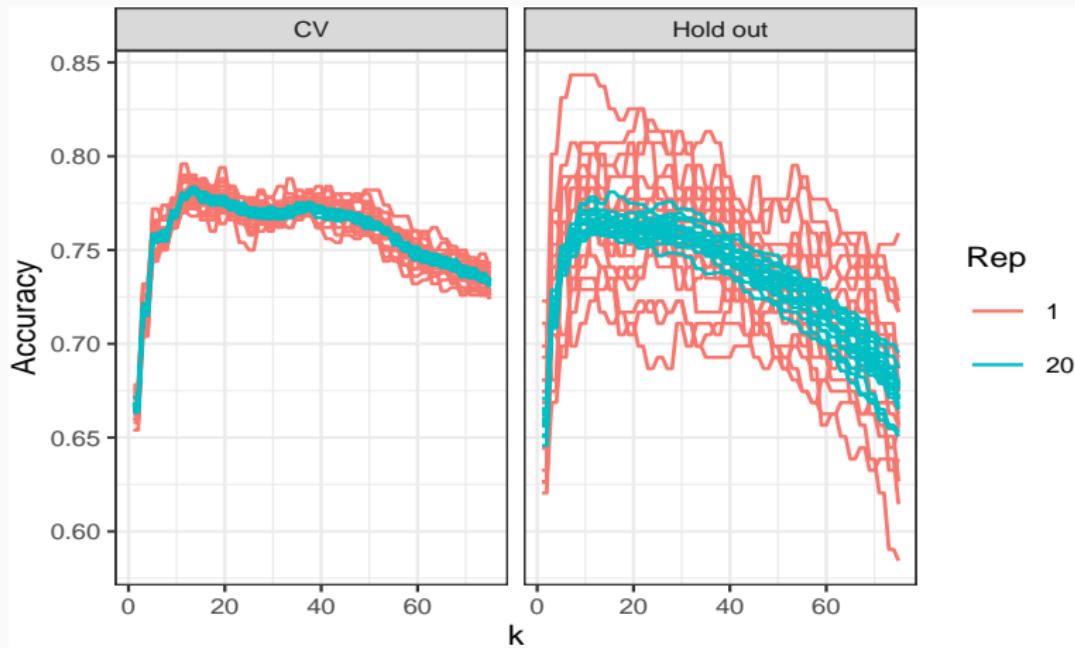
- Estimer le risque par l'algorithme choisi $\Rightarrow \widehat{\mathcal{R}}_m(f_n)$.

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.

- 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)
```

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Le package caret

- Il permet d'évaluer la performance de plus de 230 méthodes :
<http://topepo.github.io/caret/index.html>

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

```
> ctrl3 <- trainControl(method="repeatedcv",repeats=5,number=10)
> e3 <- train(Y~.,data=dapp,method="knn",trControl=ctrl3,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.
```

Machine Learning, Intelligence Artificielle, Apprentissage...

Quelques exemples

Cadre statistique pour l'apprentissage supervisé

L'algorithme des plus proches voisins

Exemples de fonction de perte

Le sur-apprentissage

Complexité versus compromis biais/variance

Estimation du risque

Ré-échantillonnage

Calibrer un algorithme

Le package `tidymodels`

Compléments

Estimer la variance d'un validation croisée

Références i

-  Besse, P. (2018).
Science des données - Apprentissage Statistique.
INSA - Toulouse.
http://www.math.univ-toulouse.fr/~besse/pub/Appren_stat.pdf.
-  Bousquet, O., Boucheron, S., and Lugosi, G. (2003).
Introduction to Statistical Learning Theory, chapter Advanced Lectures on Machine Learning.
Springer.
-  Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., and Stone, C. (1984).
Classification and regression trees.
Wadsworth & Brooks.

Références ii

-  Cléménçon, S., Lugosi, G., and Vayatis, N. (2008).
Ranking and empirical minimization of u-statistics.
The Annals of Statistics, 36(2) :844–874.
-  Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009).
The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction.
Springer, second edition.
-  James, G., Witten, D., Hastie, T., and Tibshirani, R. (2015).
The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction.
Springer.

-  Vapnik, V. (2000).
The Nature of Statistical Learning Theory.
Springer, second edition.
-  Wikistat (2020a).
Apprentissage machine — introduction.
<http://wikistat.fr/pdf/st-m-Intro-ApprentStat.pdf>.
-  Wikistat (2020b).
Qualité de prévision et risque.
<http://wikistat.fr/pdf/st-m-app-risque.pdf>.

Deuxième partie II

Arbres

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

- 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.

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

Notations

- On cherche à expliquer une variable Y par d variables explicatives X_1, \dots, X_d .

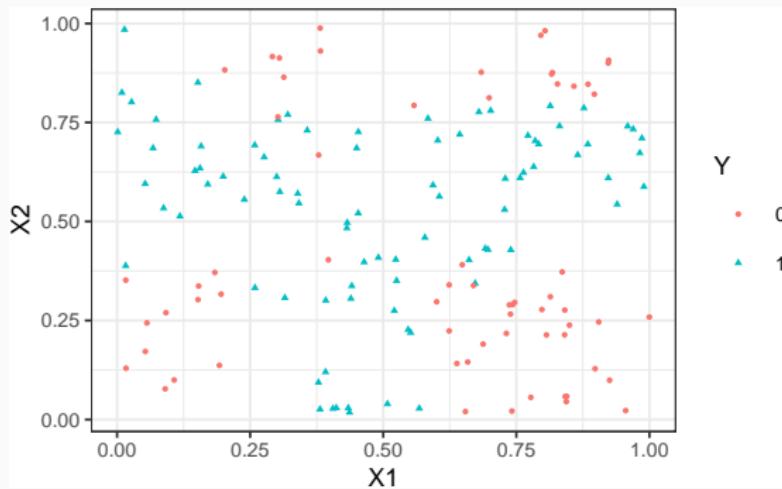
Notations

- 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.

- 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.

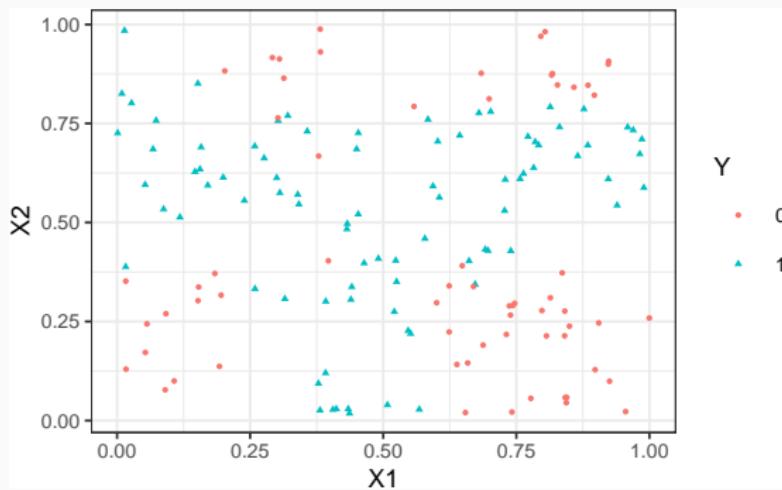
Représentation des données

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



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 $y_i \in \{0, 1\}$.

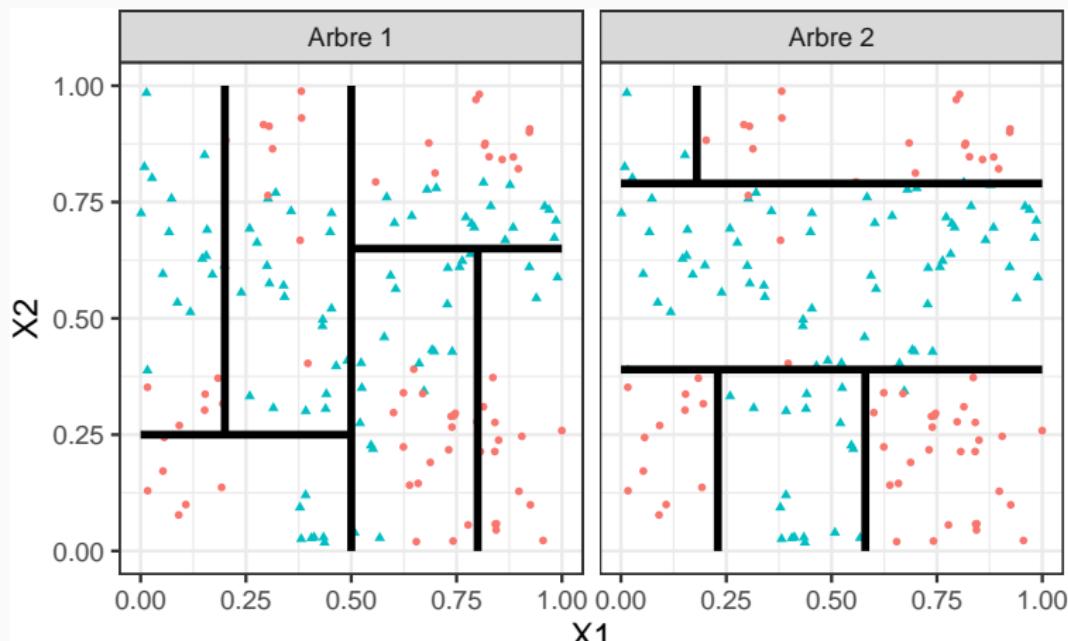


Approche par arbres

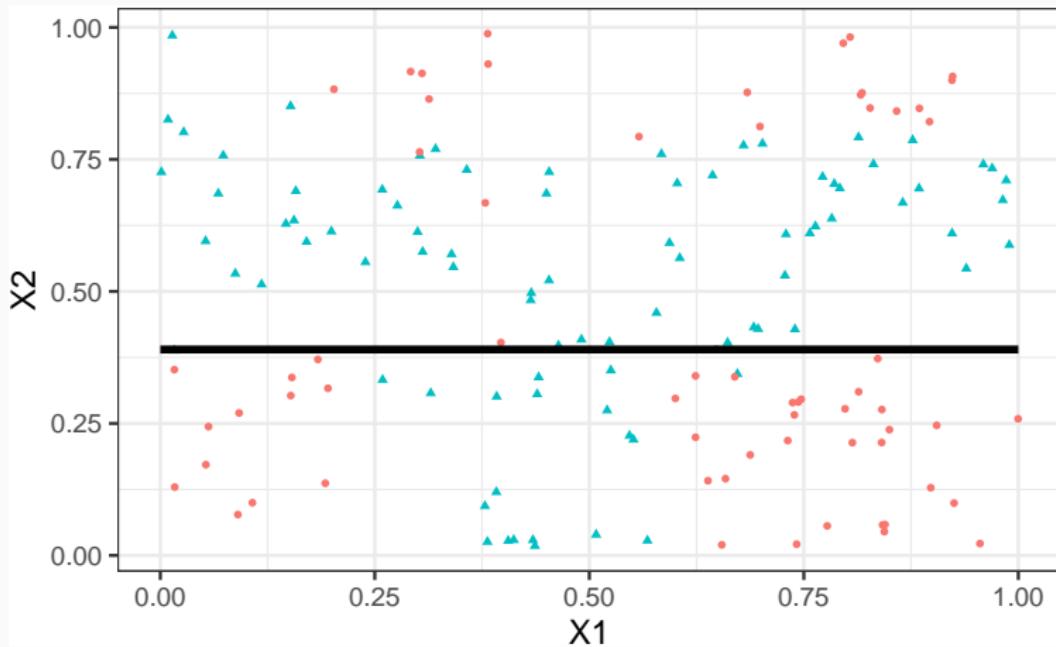
Trouver une **partition** des observations qui **sépare** "au mieux" les points rouges des points bleus.

Arbres binaires

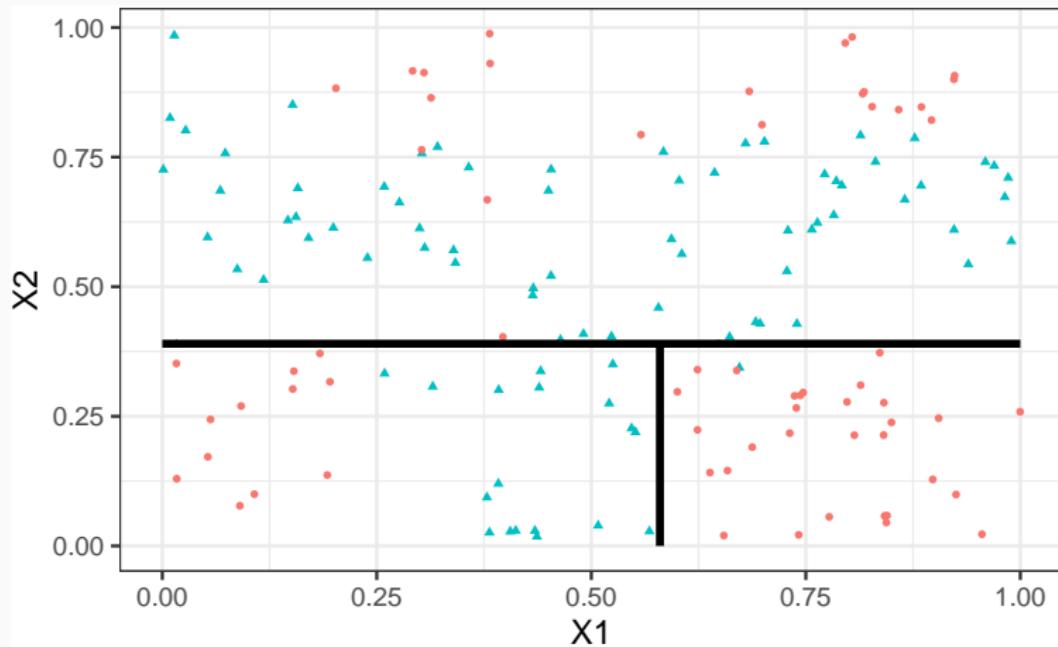
- La méthode **CART** propose de construire une partition basée sur des divisions **successives parallèles aux axes**.
- 2 exemples de partition :



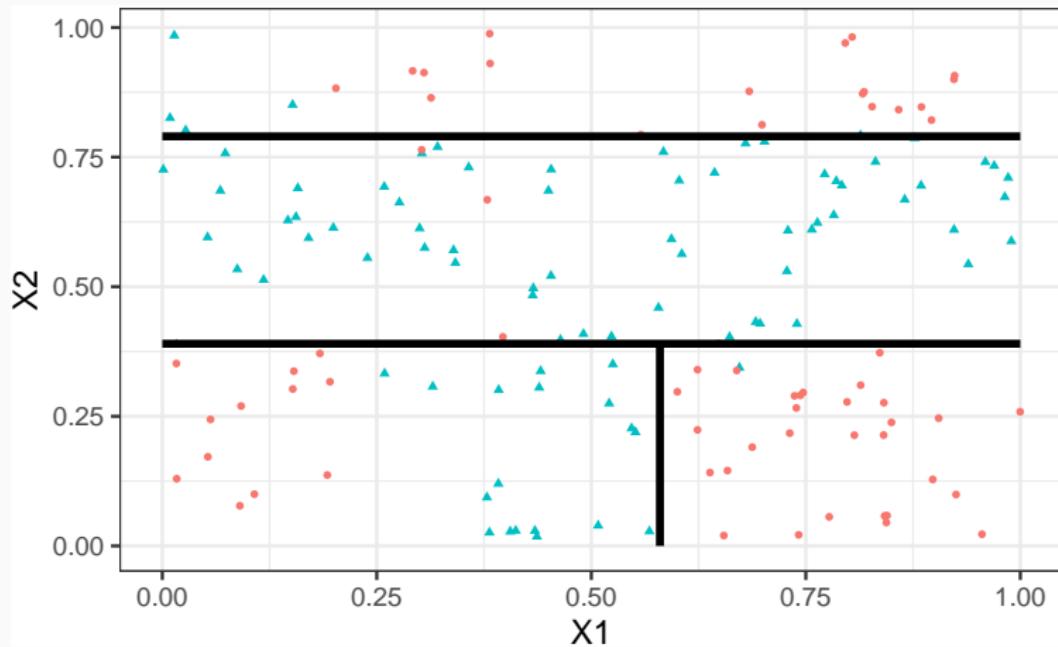
- A chaque étape, la méthode cherche une **nouvelle division** : une **variable** et un **seuil** de coupure.



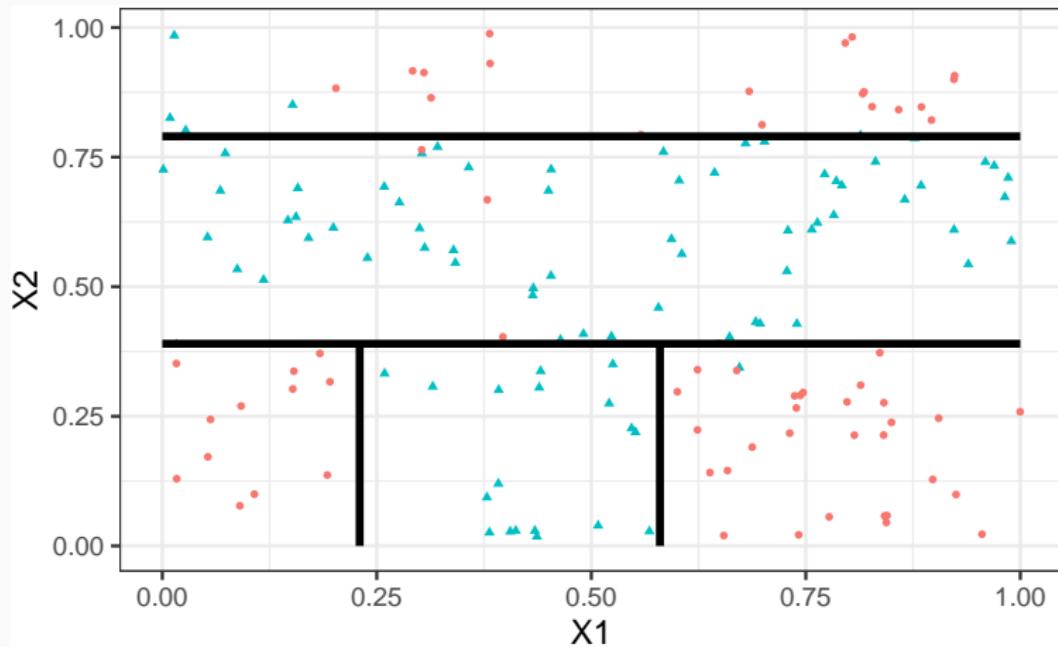
- A chaque étape, la méthode cherche une **nouvelle division** : une **variable** et un **seuil** de coupure.



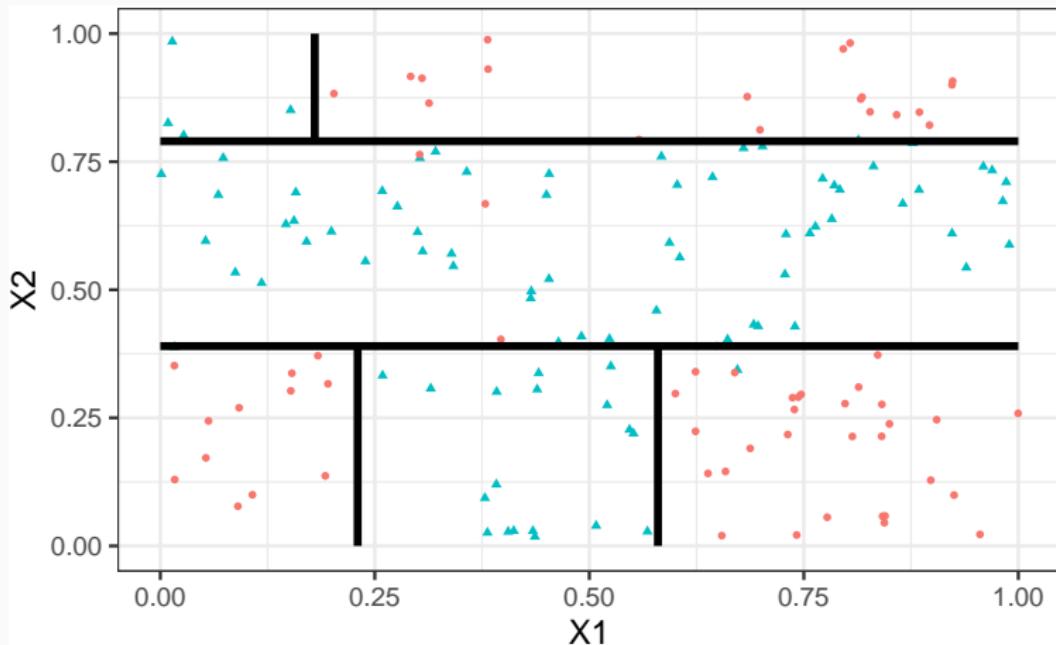
- A chaque étape, la méthode cherche une **nouvelle division** : une **variable** et un **seuil** de coupure.



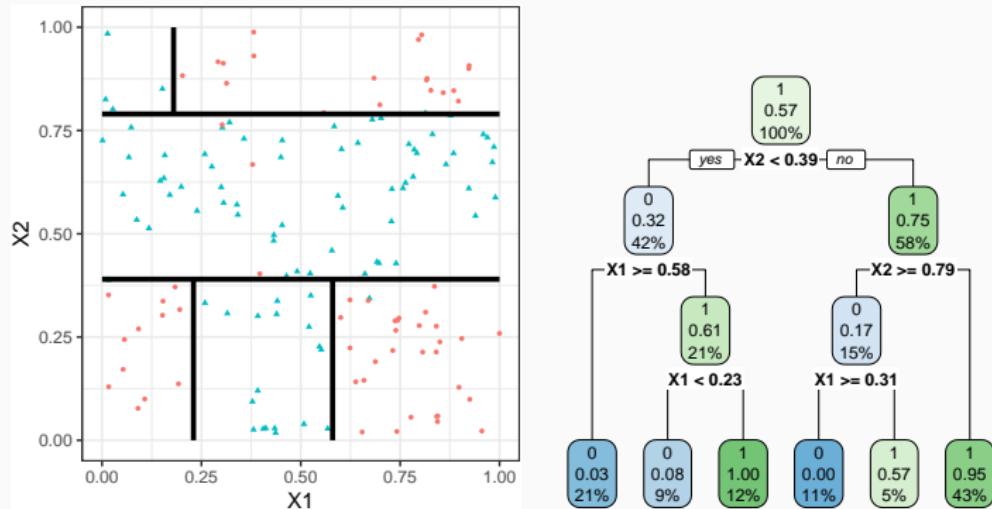
- A chaque étape, la méthode cherche une **nouvelle division** : une **variable** et un **seuil** de coupure.



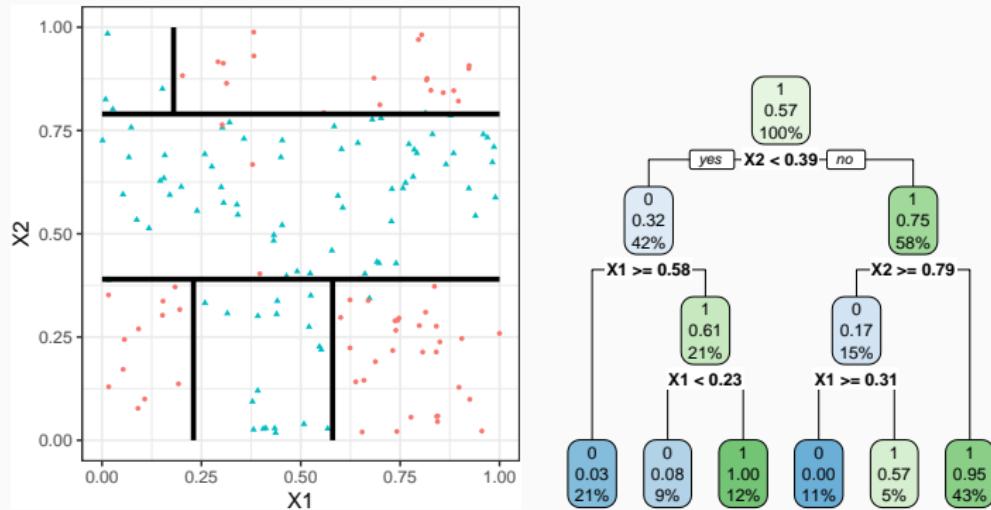
- A chaque étape, la méthode cherche une **nouvelle division** : une **variable** et un **seuil** de coupure.



Représentation de l'arbre



Représentation de l'arbre



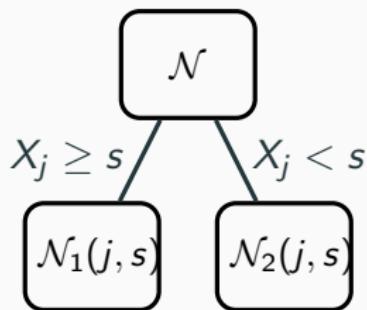
Remarque

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 nœuds 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 \implies moyenne des y_i de la feuille

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

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 \implies 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) \implies vote à la majorité :

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

3. Classification (proba) \implies proportion d'obs. du groupe k :

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

Questions

1. Comment découper un nœud ?

⇒ si on dispose d'un algorithme pour découper un nœud, il suffira de le répéter.

Questions

1. Comment découper un nœud ?

⇒ si on dispose d'un algorithme pour découper un nœud, il suffira de le répéter.

2. Comment choisir la profondeur de l'arbre ?

- Profondeur **maximale** ? (on découpe jusqu'à ne plus pouvoir)

Questions

1. Comment découper un nœud ?

⇒ si on dispose d'un algorithme pour découper un nœud, 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 ?

Questions

1. Comment découper un nœud ?

⇒ si on dispose d'un algorithme pour découper un nœud, 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" ...).

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

- 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.

- 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 \implies les deux nœuds fils sont homogènes vis-à-vis de Y .

- 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 \implies les deux nœuds fils sont homogènes vis-à-vis de Y .

Fonction d'impureté

- Objectif : mesurer l'homogénéité d'un nœud.

- 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 \implies les deux nœuds fils sont homogènes vis-à-vis de Y .

Fonction d'impureté

- Objectif : mesurer l'homogénéité d'un nœud.
- Intérêt : choisir la coupure qui maximise la pureté des nœuds fils.

Critère de découpe

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

Critère de découpe

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

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

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

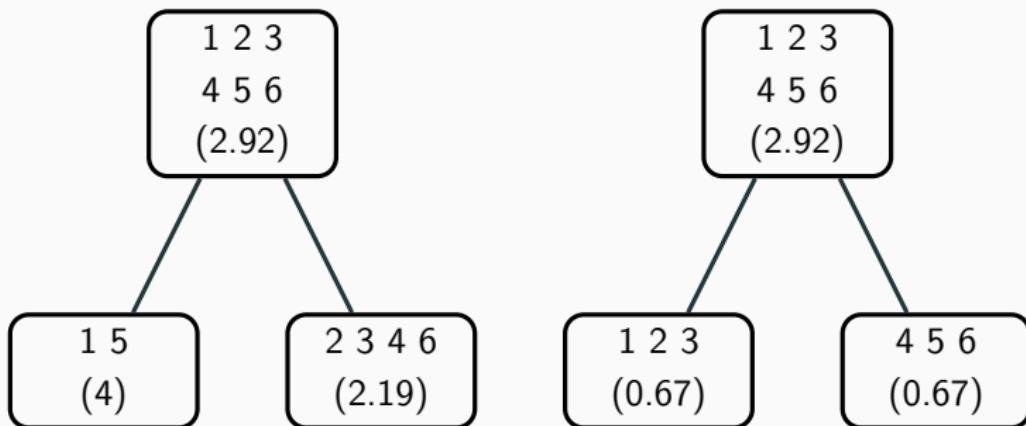
$$\mathcal{I}(\mathcal{N}) = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}} (y_i - \bar{y}_{\mathcal{N}})^2,$$

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

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

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

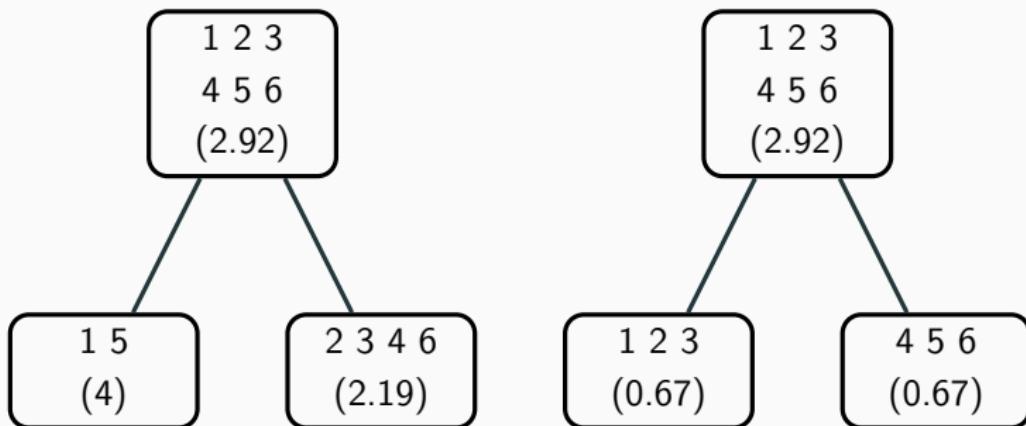
où $\bar{y}_{\mathcal{N}}$ désigne la moyenne des Y_i dans \mathcal{N} .



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

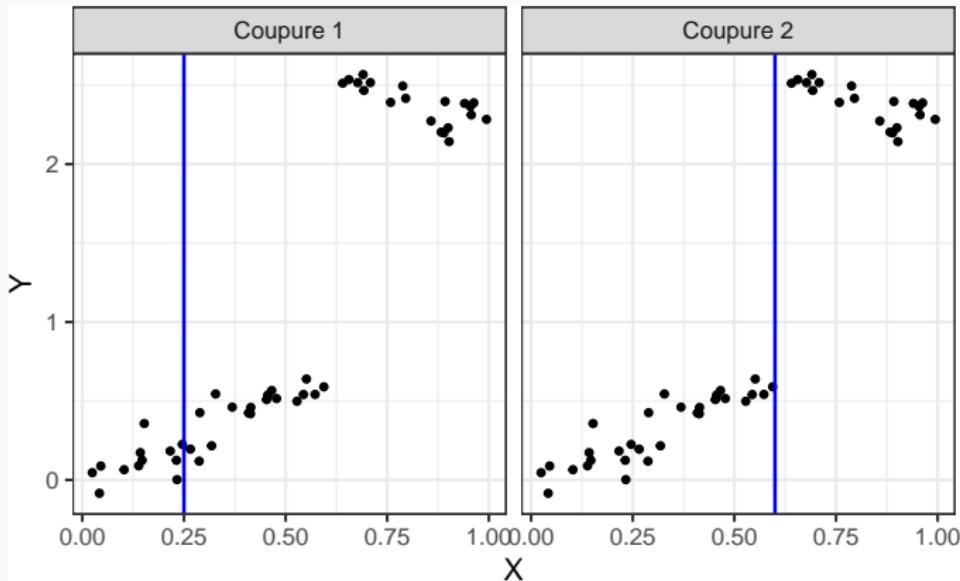
$$\mathcal{I}(\mathcal{N}) = \frac{1}{|\mathcal{N}|} \sum_{i:x_i \in \mathcal{N}} (y_i - \bar{y}_{\mathcal{N}})^2,$$

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

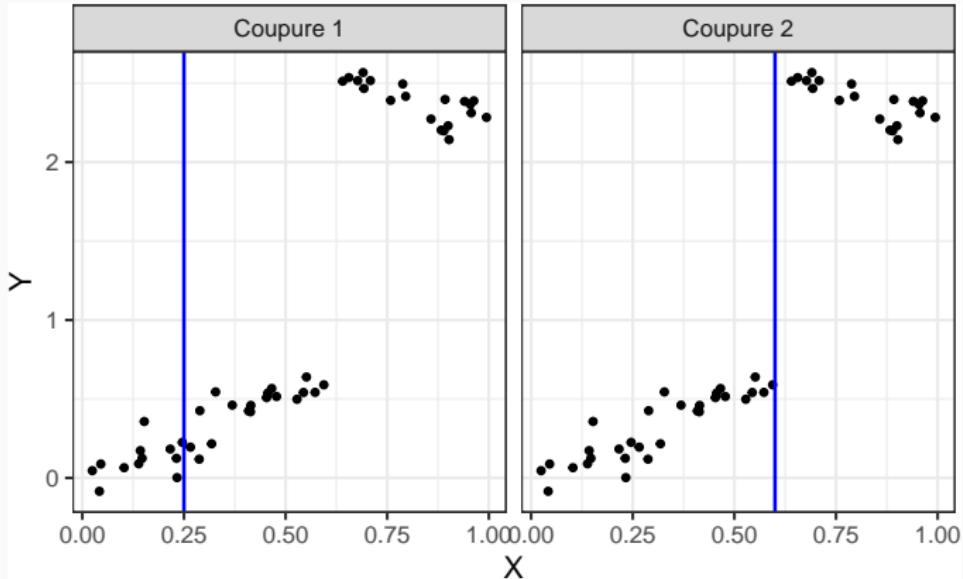


⇒ coupure de **droite** plus performante.

Exemple



Exemple



	$\mathcal{I}(\mathcal{N})$	$\mathcal{I}(\mathcal{N}_1)$	$\mathcal{I}(\mathcal{N}_2)$	Δ
Gauche	1.05	0.01	0.94	0.34
Droite	1.05	0.04	0.01	1.02

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

- Les $Y_i, i = 1, \dots, n$ sont à valeurs dans $\{1, \dots, K\}$.

- 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.

- 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 $\mathcal{I}(\mathcal{N}) = 0$

Exemples de fonctions f

- Si \mathcal{N} est pur, on veut $\mathcal{I}(\mathcal{N}) = 0 \implies$ c'est pourquoi f doit vérifier $f(0) = f(1) = 0$.

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 : $f(p) = -p \log(p)$.

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 : $f(p) = -p \log(p)$.

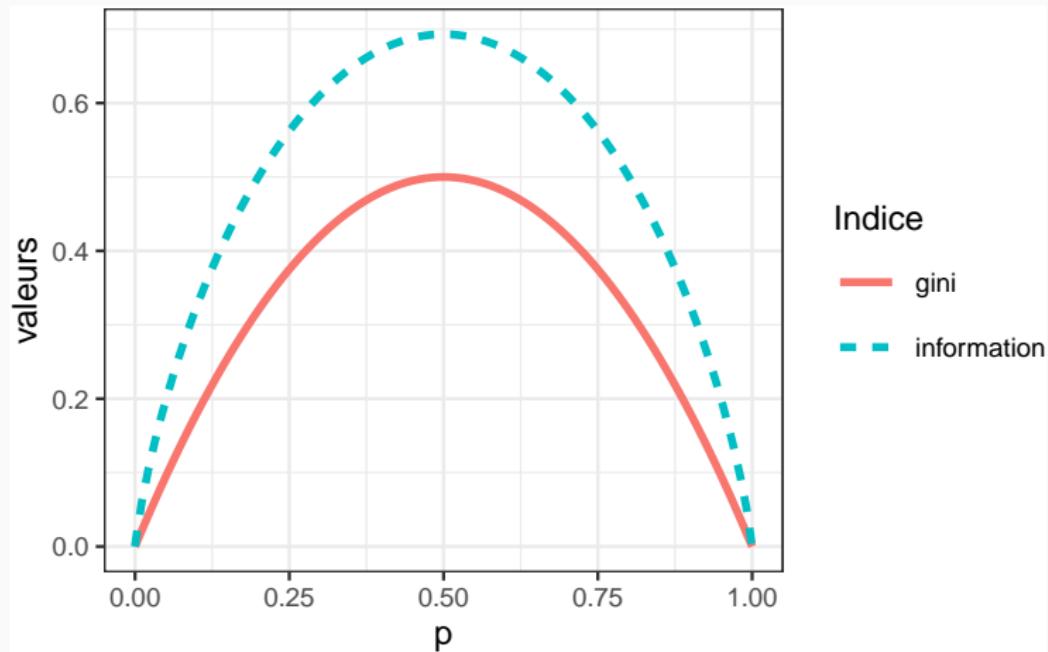
Cas binaire

Dans ce cas on a

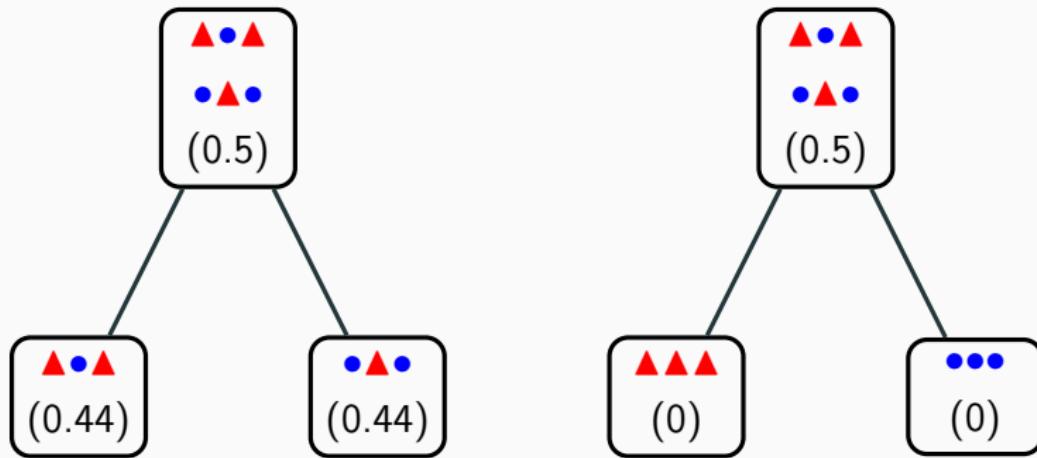
1. $\mathcal{I}(\mathcal{N}) = 2p(1 - p)$ pour Gini
2. $\mathcal{I}(\mathcal{N}) = -p \log p - (1 - p) \log(1 - p)$ pour Information

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

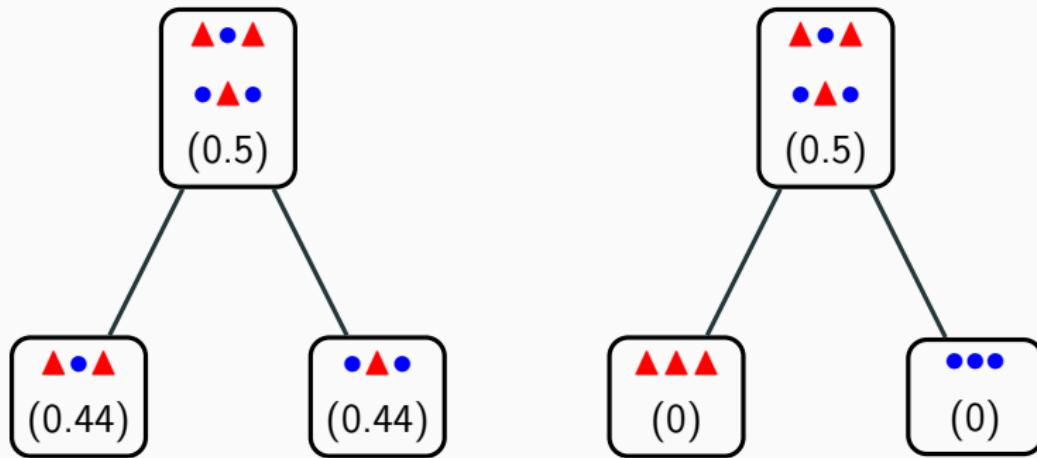
Impureté dans le cas binaire



Exemple 1

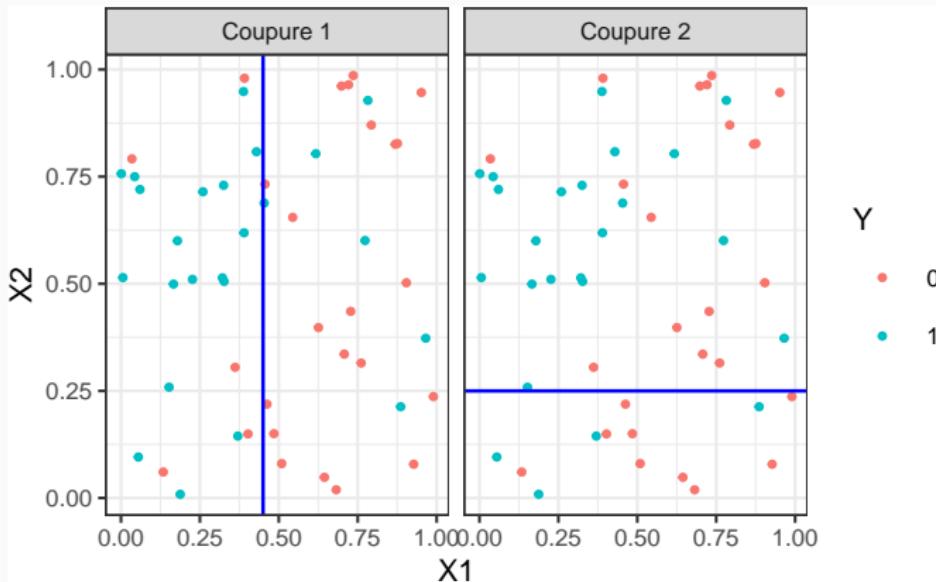


Exemple 1

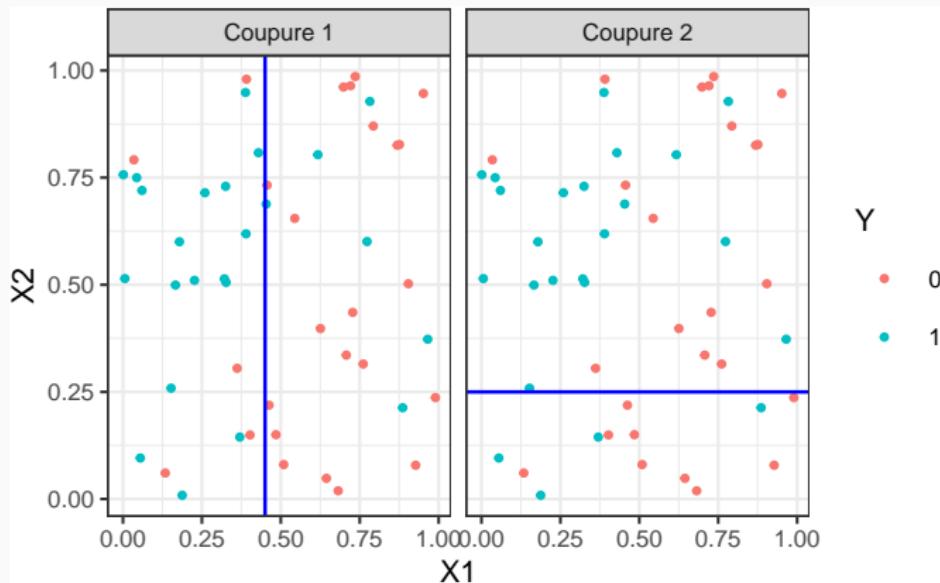


⇒ coupure de **droite** plus performante.

Exemple 2



Exemple 2



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

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

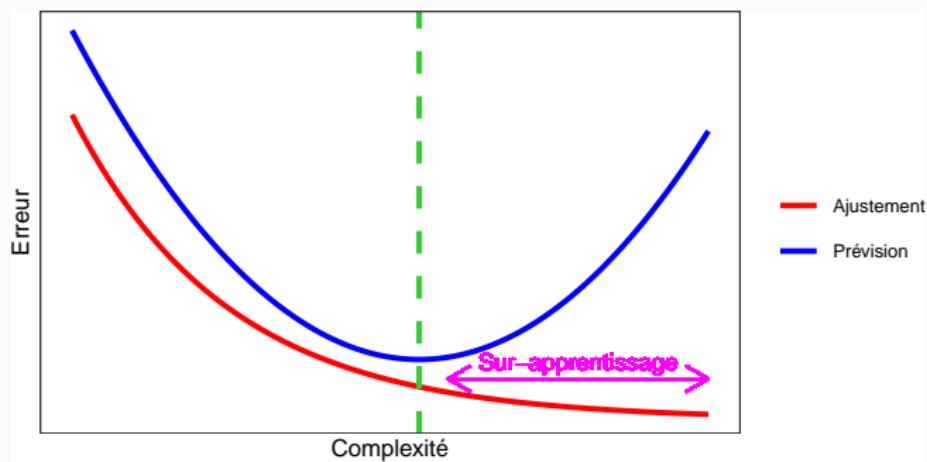
Bibliographie

Pourquoi élaguer ?

- Les coupures permettent de séparer les données selon Y
⇒ plus on coupe mieux on ajuste !

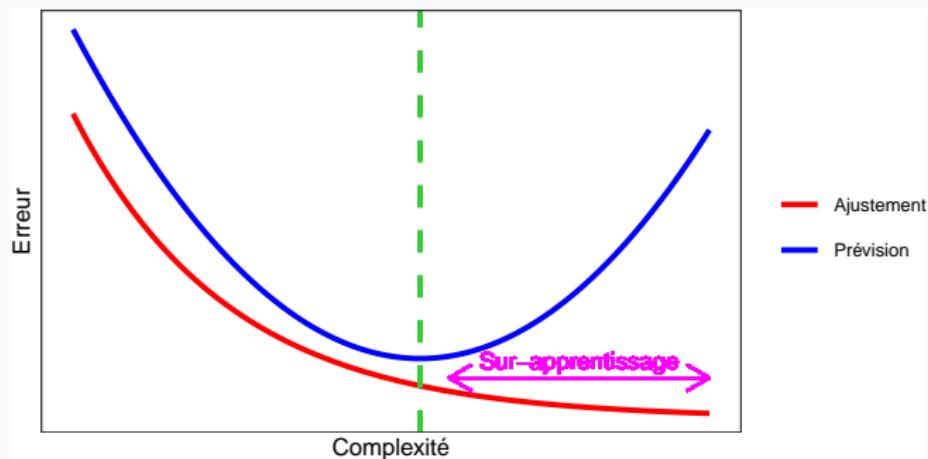
Pourquoi élaguer ?

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



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 ?

Comment faire ?

- Tester tous les arbres ?
 ⇒ possible uniquement sur de petits échantillons !
- Critère d'arrêt : ne plus découper si une certaine condition est vérifiée.

Comment faire ?

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

Comment faire ?

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

Élaguer

1. Considérer un arbre (trop) profond ⇒ 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.

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).

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

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

Construction de la suite de sous arbres

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

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

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_α qui minimise $C_\alpha(T)$ pour une valeur de α bien choisie.

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_α qui minimise $C_\alpha(T)$ pour une valeur de α 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**.

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_α qui minimise $C_\alpha(T)$ pour une valeur de α 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_α 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 $T_2 \subset T_1$

⇒ garantit une unique solution de taille minimale.

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 $T_2 \subset T_1$

⇒ garantit une unique solution de taille minimale.

Lemme 2

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

⇒ garantit une stabilité des solutions lorsque α parcourt \mathbb{R}^+ ⇒ elles vont être emboîtées les unes dans les autres.

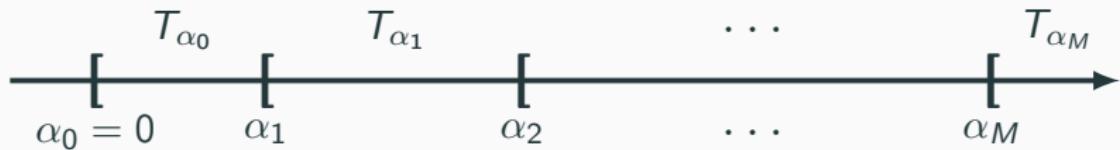
Théorème [Breiman et al., 1984]

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

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



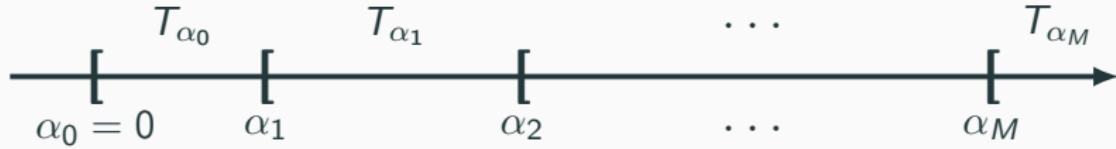
Théorème [Breiman et al., 1984]

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

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



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
```

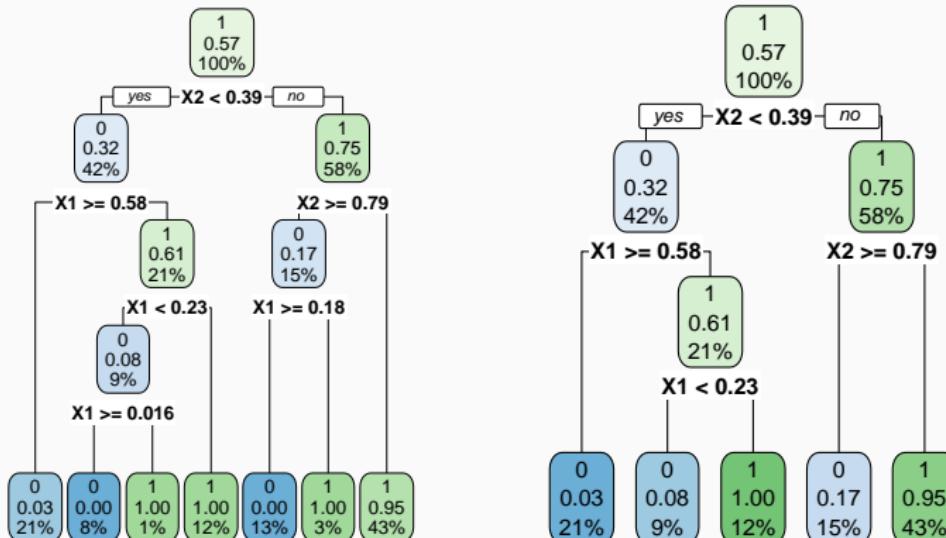
Sorties printcp

- Suite de 7 arbres emboités.
- CP : complexity parameter, il mesure la complexité de l'arbre : CP
↓⇒ complexité ↗.
- nsplit : nombre de coupures de l'arbre.
- rel.error : erreur (normalisée) calculée sur les données d'apprentissage
⇒ erreur d'ajustement.
- xerror : erreur (normalisée) calculée par validation croisée 10 blocs ⇒
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 α .

Choix de l'arbre final

- Choisir un arbre dans la suite revient à **choisir une valeur de α .**
- 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 α_m .
 3. **Sélection** du α_m qui **minimise** le risque estimé.

Choix de l'arbre final

- Choisir un arbre dans la suite revient à choisir une valeur de α .
- 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 α_m .
 3. Sélection du α_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.

1. Calculer

$$\beta_0 = 0, \quad \beta_1 = \sqrt{\alpha_1 \alpha_2}, \quad \dots \quad \beta_{M-1} = \sqrt{\alpha_{M-1} \alpha_M}, \quad \beta_M = +\infty.$$

2. Pour $k = 1, \dots, K$

2.1 Construire l'arbre maximal sur l'ensemble des données privé du k^e bloc, c'est-à-dire $\mathcal{B}^{-k} = \{(x_i, y_i) : i \in \{1, \dots, n\} \setminus B_k\}$.

2.2 Appliquer l'algorithme d'élagage à cet arbre maximal, puis extraire les arbres qui correspondent aux valeurs $\beta_m, m = 0, \dots, M \implies T_{\beta_m}(\cdot, \mathcal{B}^{-k})$.

2.3 Calculer les valeurs prédites par chaque arbre sur le bloc k : $T_{\beta_m}(x_i, \mathcal{B}^{-k}), i \in B_k$.

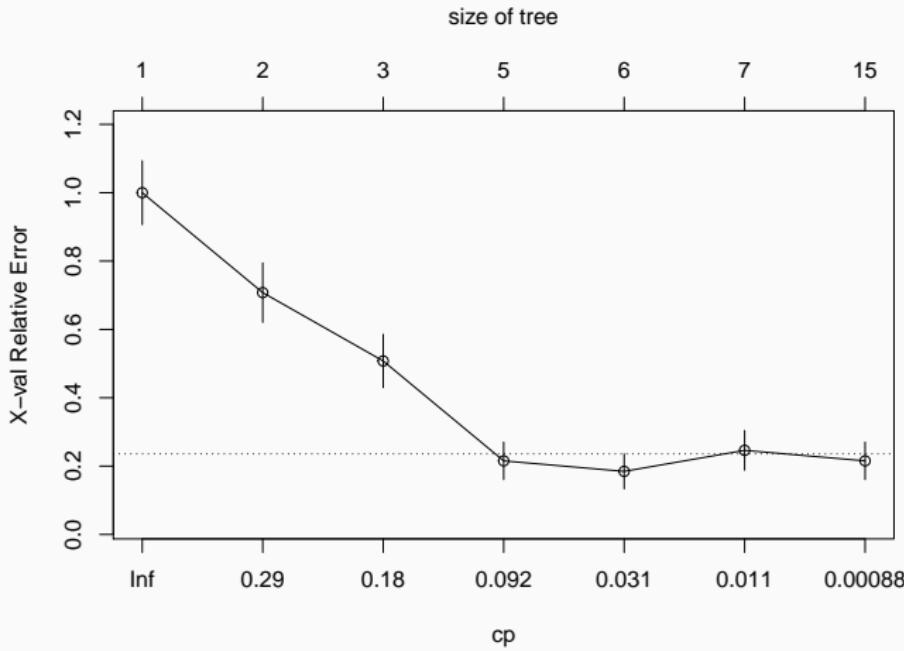
3. En déduire les erreurs pour chaque β_m :

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

Retourner : une valeur α_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 :

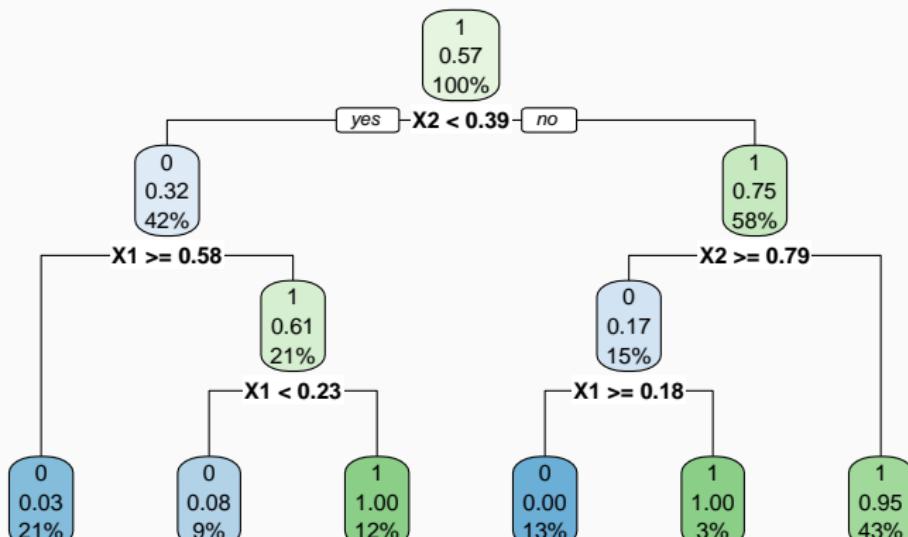
```
> cp_opt <- as_tibble(arbre$cptable) %>% arrange(xerror) %>%  
+   slice(1) %>% select(CP) %>% as.numeric()  
> cp_opt  
## [1] 0.01538462
```

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

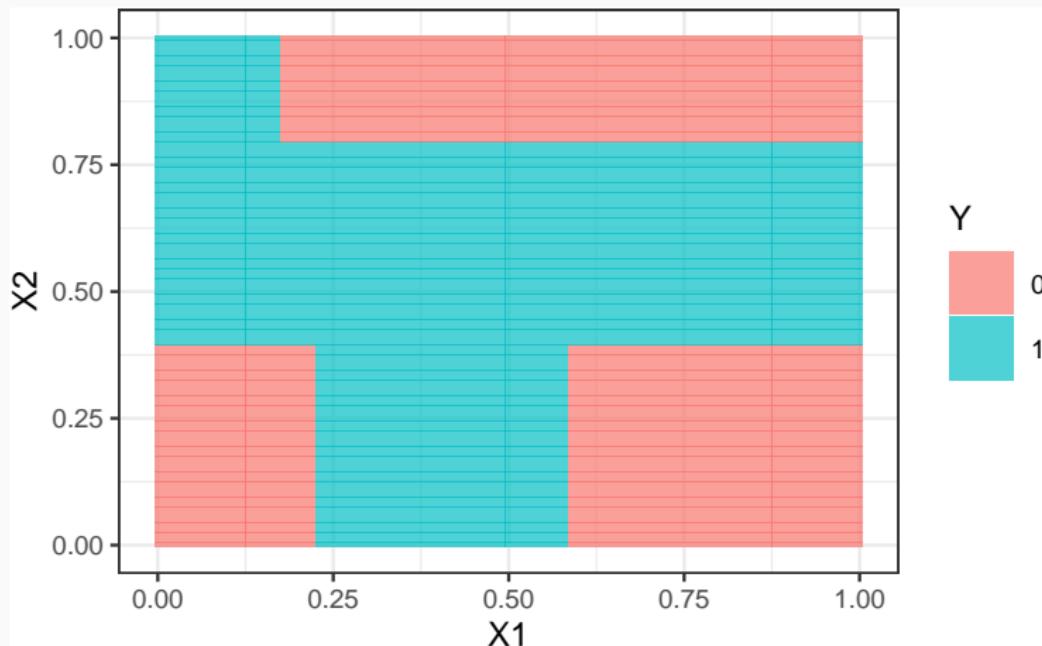
```
> cp_opt <- as_tibble(arbre$cptable) %>% arrange(xerror) %>%
+   slice(1) %>% select(CP) %>% as.numeric()
> cp_opt
## [1] 0.01538462
```

- 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 prédictes.



Prévision

- Nouvel individu :

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

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

- 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
```

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

- 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 !

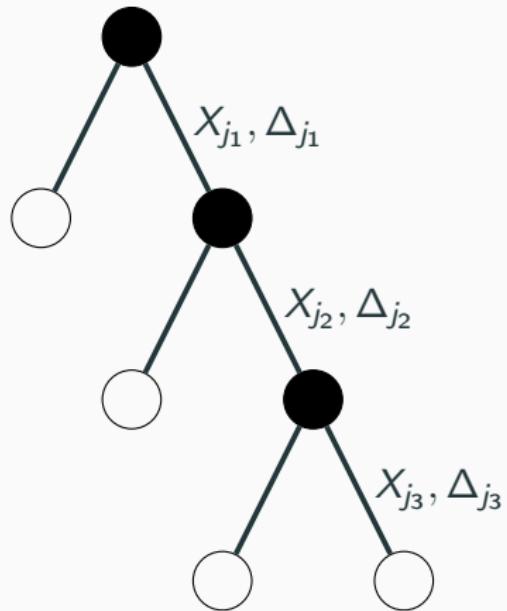
- La **visualisation de l'arbre** peut donner une idée sur l'**importance des variables** dans l'algorithme.
- **Pas suffisant !** Il se peut en effet que des variables possèdent une grande importance sans pour autant apparaître explicitement dans l'arbre !
 - Difficile de **quantifier l'importance**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

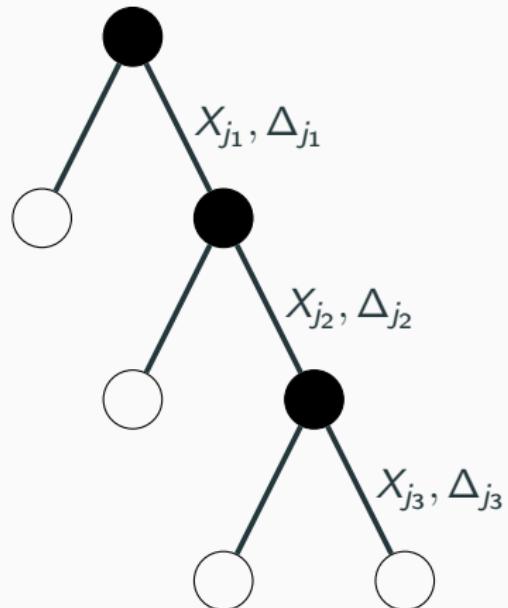
- La **visualisation de l'arbre** peut donner une idée sur l'**importance des variables** dans l'algorithme.
- **Pas suffisant !** Il se peut en effet que des variables possèdent une grande importance sans pour autant apparaître explicitement dans l'arbre !
 - Difficile de **quantifier l'importance** 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 $\Rightarrow \Delta_{j_t}$.



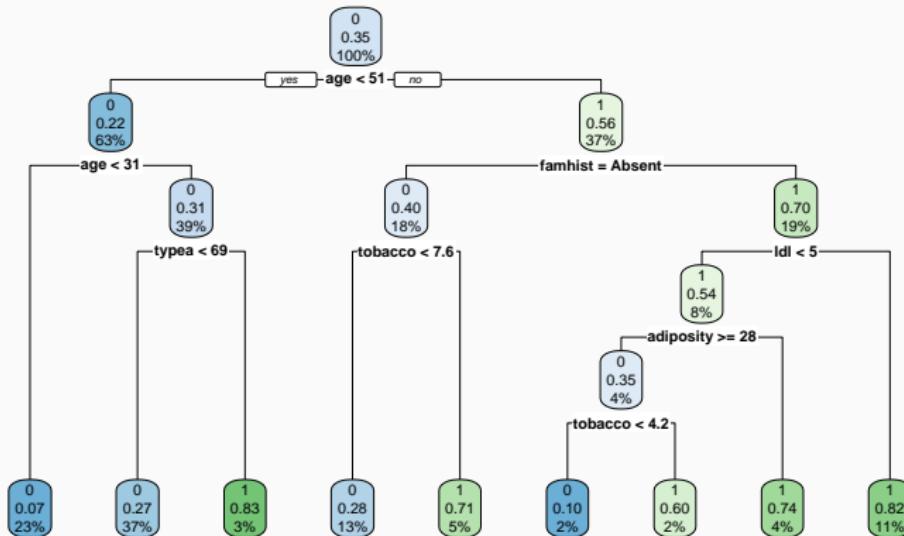


- Nœuds internes $\Rightarrow N_t, t = 1, \dots, J - 1$;
- Variables de coupure $\Rightarrow X_{j_t}$;
- Gain d'impureté $\Rightarrow \Delta_{j_t}$.

Mesure d'impureté de la variable ℓ

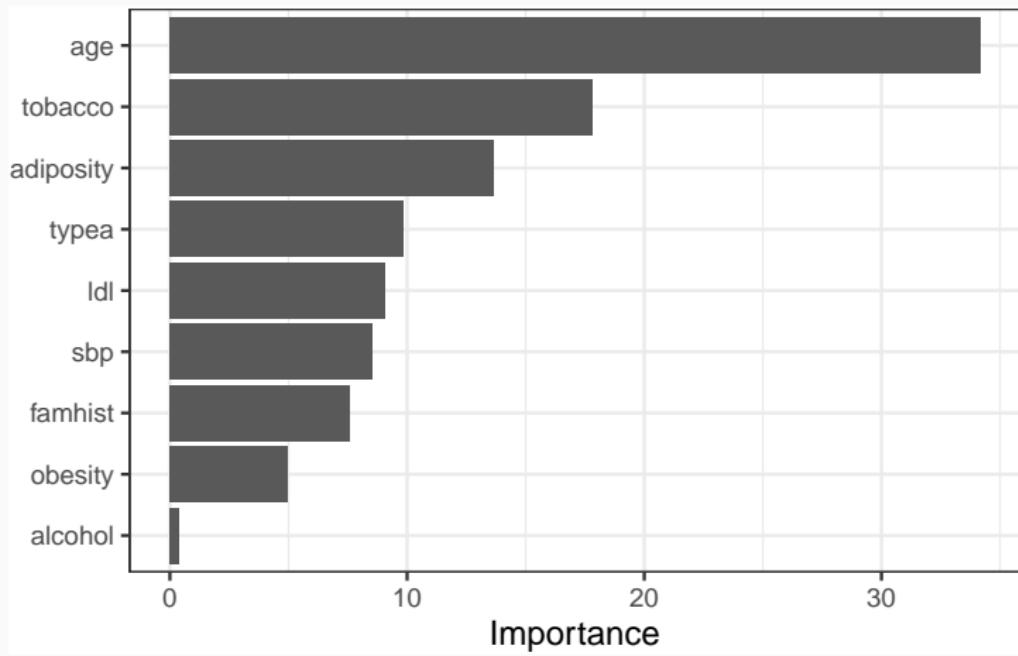
$$\mathcal{I}_\ell(T) = \sum_{t=1}^{|T|-1} \Delta_t 1_{j_t=\ell}.$$

Exemple



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

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



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).

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.
 - ⇒ Cet inconvénient sera un avantage pour des **agrégations bootstrap**
 - ⇒ **forêts aléatoires**.

Arbres

Arbres binaires

Choix des coupures

Cas de la régression

Cas de la classification supervisée

Elagage

Importance des variables

Bibliographie

Références i

-  Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., and Stone, C. (1984).
Classification and regression trees.
Wadsworth & Brooks.
-  McCulloch, W. and Pitts, W. (1943).
A logical calculus of ideas immanent in nervous activity.
Bulletin of Mathematical Biophysics, 5 :115–133.
-  Rosenblatt, F. (1958).
The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain.
Psychological Review, 65 :386–408.

-  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 III

Agrégation

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

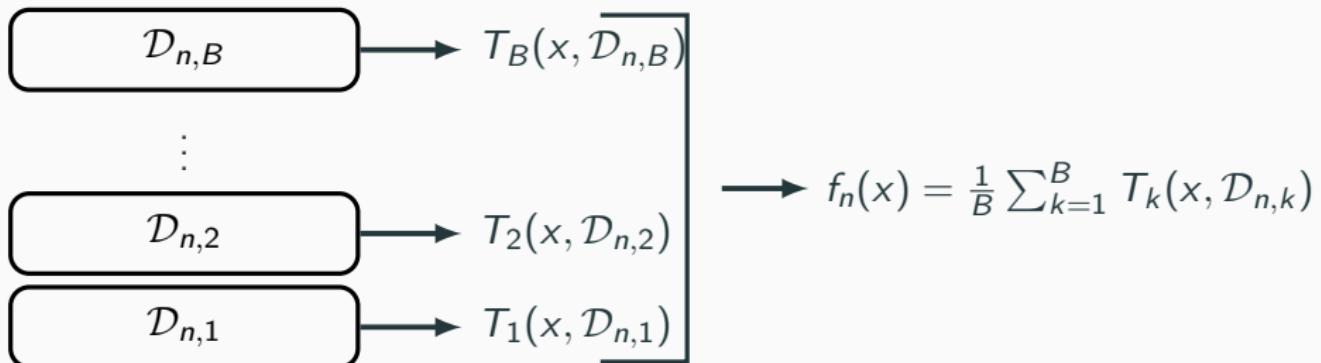
Algorithme

Choix des paramètres

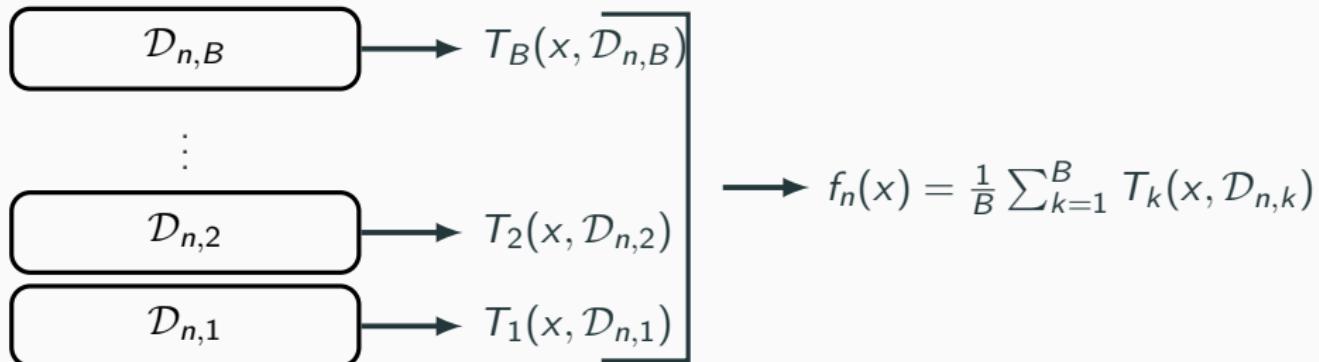
Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

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



- **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. ...

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

Algorithme

Choix des paramètres

Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

Cadre

- Idem que précédemment, on cherche à expliquer une variable Y par d variables explicatives X_1, \dots, X_d .

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 multiconnexion.

- 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 multiconnexion.
- 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.

- 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

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

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

- 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

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

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

Conséquence

- Biais non modifié.
- Variance \searrow 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 les **mêmes données** n'est d'aucun intérêt.
- Ajuster le **même algorithme** sur des **sous-échantillons disjoints** est d'un intérêt limité.

- 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...

- 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.

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

Algorithme

Choix des paramètres

Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

- 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** :

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

Idée : échantillons bootstrap

- Echantillon **initial** :

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

- Echantillons **bootstrap** : tirage de taille n avec remise

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_B

Idée : échantillons bootstrap

- Echantillon **initial** :

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

- Echantillons **bootstrap** : tirage de taille n avec remise

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_B

- 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 θ_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 $\mathcal{D}_{n,b}^* \implies T(., \theta_b, \mathcal{D}_n)$.

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...

Un algorithme pas si aléatoire que ça...

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

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

Un algorithme pas si aléatoire que ça...

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

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

Conséquence

- L'algorithme se **stabilise** (converge) lorsque $B \nearrow$.

Un algorithme pas si aléatoire que ça...

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

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

Conséquence

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

Choix de T

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

Choix de T

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

Conclusion

- Bagger ne modifie pas le biais.

Choix de T

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

Conclusion

- Bagger ne modifie pas le biais.
- B grand $\implies \mathbb{V}[f_n(x)] \approx \rho(x)\mathbb{V}[T_1(x)]$

Choix de T

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

Conclusion

- Bagger ne modifie pas le biais.
- B grand $\implies \mathbb{V}[f_n(x)] \approx \rho(x)\mathbb{V}[T_1(x)] \implies$ la variance diminue d'autant plus que la corrélation entre les prédicteurs diminue.

Choix de T

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

Conclusion

- Bagger ne modifie pas le biais.
- B grand $\implies \mathbb{V}[f_n(x)] \approx \rho(x)\mathbb{V}[T_1(x)] \implies$ 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.

Choix de T

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

Conclusion

- Bagger ne modifie pas le biais.
- B grand $\implies \mathbb{V}[f_n(x)] \approx \rho(x)\mathbb{V}[T_1(x)] \implies$ 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.

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

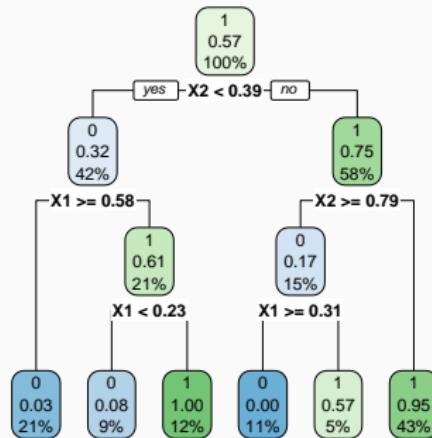
Algorithme

Choix des paramètres

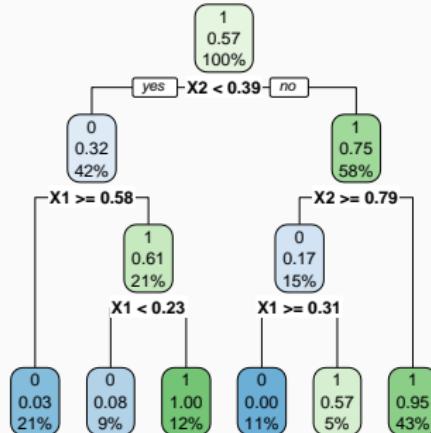
Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

Rappels sur les arbres



Rappels sur les arbres



Complexité

Profondeur

- **petite** : biais \nearrow , variance \searrow
- **grande** : biais \searrow , variance \nearrow (sur-apprentissage).

Définition

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

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.

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).

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.

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].

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

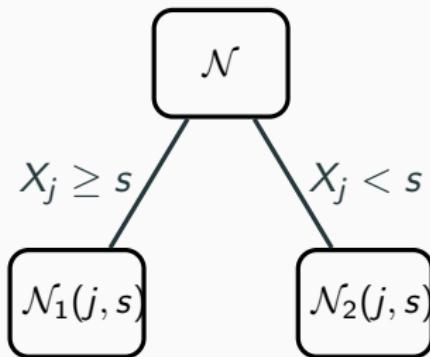
Algorithme

Choix des paramètres

Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

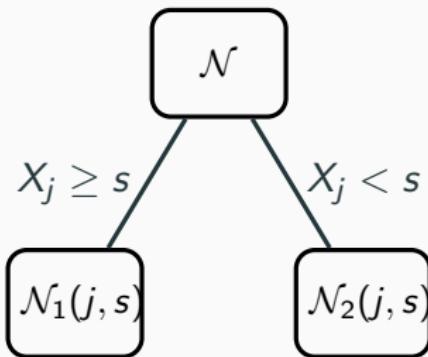
Coupures "aléatoires"



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.

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 nœud de la façon suivante :
 - 2.1 Choisir **mtry** variables au hasard parmi les d variables explicatives ;
 - 2.2 Sélectionner la meilleure coupure $X_j \leq s$ en ne considérant que les **mtry** variables sélectionnées ;
 - 2.3 Ne pas découper un nœud s'il contient moins de **min.node.size** observations.
3. On note $T(., \theta_b, \mathcal{D}_n)$ 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

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

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

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

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

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

- **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 %
```

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

Algorithme

Choix des paramètres

Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

- B réglé \implies le plus grand possible.

En pratique on pourra s'assurer que le **courbe d'erreur** en fonction du nombre d'arbres est **stabilisée**.

- 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 :

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

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**).

- 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 :

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

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.

- 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 :

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

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 $\rho(x)$.

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.

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* ↴

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

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

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.**

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 ↗

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 .

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 ↗**.
- Inversement lorsque *mtry* ↗ (**risque de sur-ajustement**).

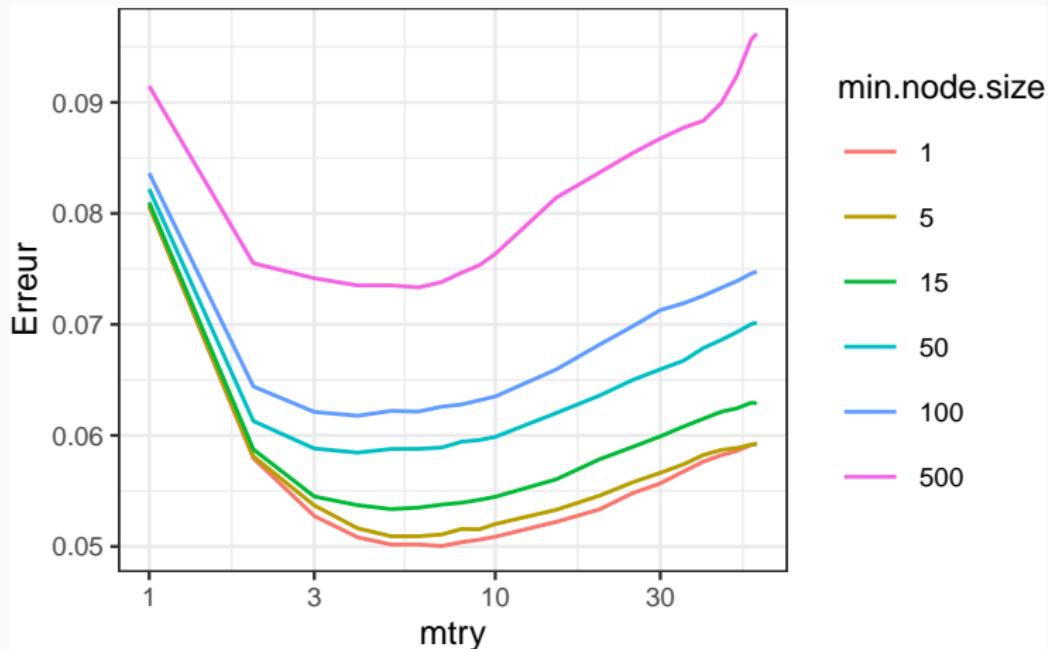
Choix de *mtry*

- 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**).

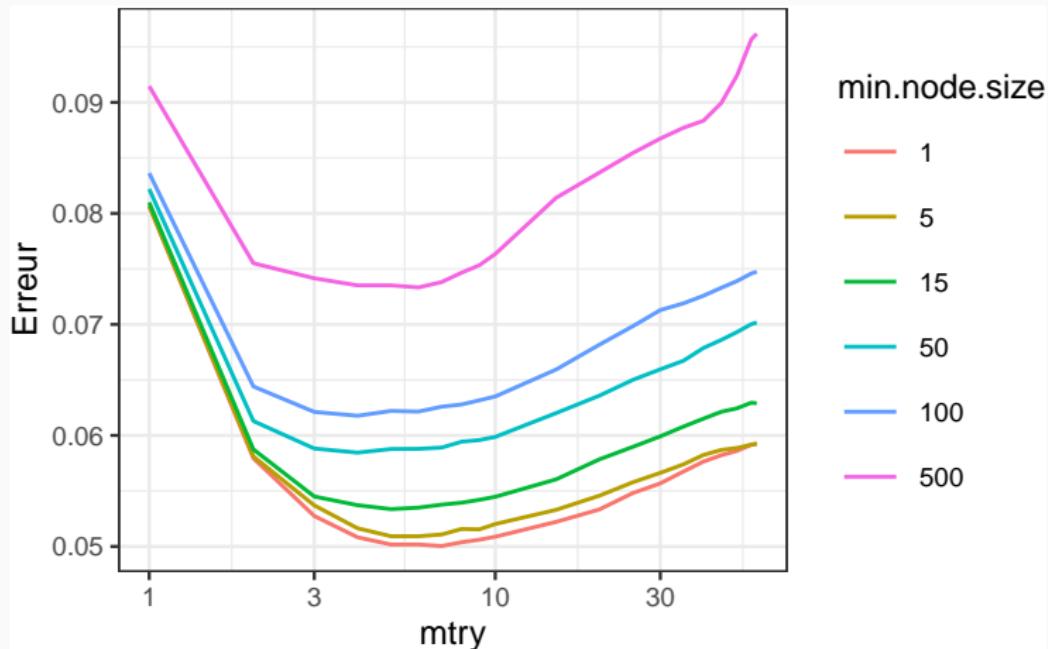
Conclusion

- 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`



- 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...

En pratique

- On peut bien entendu calibrer ces paramètres avec les approches traditionnelles mais...
- les valeurs par défaut sont souvent performantes !

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).

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)
```

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

Algorithme

Choix des paramètres

Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

- Comme pour tous les algorithmes de prévision on peut évaluer la performance des forêts aléatoires en estimant un risque par ré-échantillonnage.

- 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 couteuse en temps de calcul, au ré-échantillonnage.

- 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 couteuse en temps de calcul**, au ré-échantillonnage.
- **Idée/astuce** : utiliser les observations non sélectionnées dans les échantillons bootstraps pour estimer le risque.

OOB illustration

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

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

- 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 $\implies \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$.

OOB illustration

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

- 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 $\implies \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$.
- On calcule l'erreur selon

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

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.

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

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

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

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

⇒ 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 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 .

⇒ **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

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

avec

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

⇒ Erreur de l'**arbre *b*** calculée sur les **données OOB**.

Importance par permutation

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

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

avec

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

⇒ Erreur de l'**arbre *b*** calculée sur les **données OOB**.

- On recalcule cette erreur mais sur OOB_b où on permute les valeurs de la j^{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 OOB_b permuté et on calcule

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

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

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

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

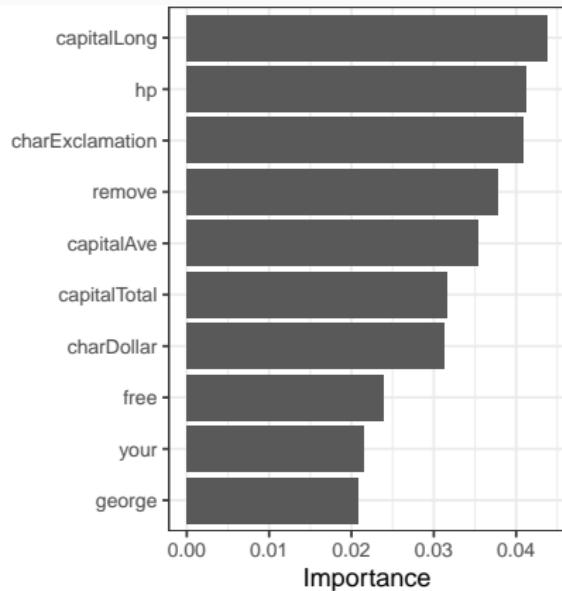
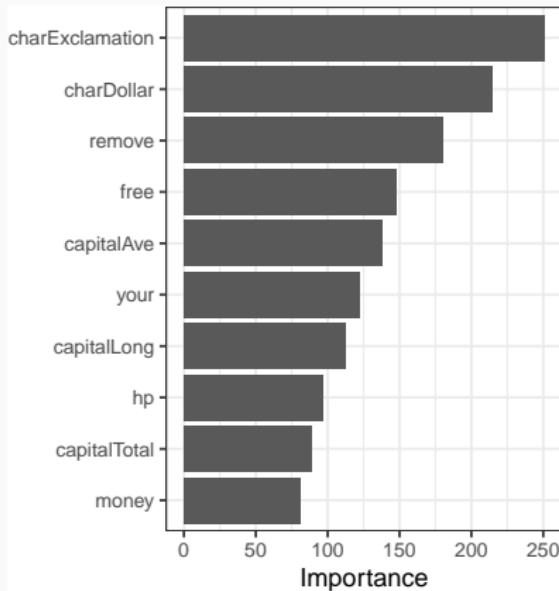
Importance par permutation

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

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.

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...)

Bagging et forêts aléatoires

Bagging

Forêts aléatoires

Algorithme

Choix des paramètres

Erreur OOB et importance des variables

Bibliographie

Références i

-  Breiman, L. (1996).
Bagging predictors.
Machine Learning, 26(2) :123–140.
-  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, Y. and Schapire, R. (1996).
Experiments with a new boosting algorithm.
In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Machine Learning*.

Références ii

-  Friedman, J. H. (2001).
Greedy function approximation : A gradient boosting machine.
Annals of Statistics, 29 :1189–1232.
-  Friedman, J. H. (2002).
Stochastic gradient boosting.
Computational Statistics & Data Analysis, 28 :367–378.
-  Genuer, R. (2010).
Forêts aléatoires : aspects théoriques, sélection de variables et applications.
PhD thesis, Université Paris XI.

-  Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2009).
The Elements of Statistical Learning : Data Mining, Inference, and Prediction.
Springer, second edition.
-  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..)
 ⇒ performance ↗ réseaux pré-entraînés ⇒ **apprentissage profond/deep learning**.