

# IFT 712 - Techniques d'apprentissage

## Projet de session

Étienne Ameye  
Yanni Mansour  
Djibril Sene

Lundi, 11 décembre 2023

# Table des matières

<b>Contexte</b>	<b>3</b>
<b>1 Méthodologie</b>	<b>3</b>
1.1 Jeu de données . . . . .	3
1.2 Méthodes d'évaluation . . . . .	3
1.3 Structure du projet . . . . .	4
<b>2 Évaluation des résultats</b>	<b>5</b>
2.1 Classifieur KNN . . . . .	5
2.2 Régression logistique . . . . .	8
2.3 Machine à vecteurs de support . . . . .	12
2.4 Classifieur AdaBoost . . . . .	15
2.5 Arbre de décisions . . . . .	18
2.6 Forêt aléatoire . . . . .	22
<b>3 Conclusion</b>	<b>26</b>

# Contexte

L'objectif de ce projet a été de mettre en oeuvre et d'évaluer différentes méthodes de classification sur une base de données choisie. Ce rapport a pour but de présenter le travail effectué et les résultats obtenus.

Au sein de celui-ci seront présentés les différents algorithmes utilisés, ainsi que nos choix d'hyperparamètres, des pratiques d'entraînements et les résultats obtenus couplés à leur analyse.

Notre approche s'est concentrée sur l'optimisation des performances de chaque algorithme, en explorant différentes configurations d'hyperparamètres et en évaluant leur impact sur les résultats obtenus. Cette démarche a non seulement renforcé notre compréhension des mécanismes sous-jacents aux algorithmes, mais elle a également permis de sélectionner la solution la plus adaptée pour le problème de classification spécifique que nous avons abordé.

## 1 Méthodologie

### 1.1 Jeu de données

Nous avons choisi le jeu de données de classification de feuilles disponible sur Kaggle<sup>1</sup>. Ce jeu de données contient 990 images de feuilles de 99 espèces différentes. De ces images ont été extraites 3 caractéristiques : la marge, la forme et la texture. Chaque caractéristique est donnée comme un vecteur de 64 dimensions, pour un total de 192 dimensions.

### 1.2 Méthodes d'évaluation

Nous avons choisi de tester les classifieurs suivants :

- Un classifieur KNN
- Un classifieur logistique
- Une machine à vecteur de support
- Un classifieur AdaBoost
- Un arbre de décision
- Une forêt aléatoire

Afin de bien évaluer les performances de chaque classifieur, nous avons séparé notre jeu de données en un ensemble d'entraînement et un ensemble de test. Puisque notre jeu de données contient très peu de données par classe, nous avons fait une séparation stratifiée. De cette façon, on est garanti d'avoir autant de données dans chaque classe. La figure 1 montre la différence entre une séparation non stratifiée et une séparation stratifiée. Cette différence dans la distribution des classes pourrait mener à des biais lors de l'entraînement ou de l'évaluation.

Tous les classifieurs ont été testés et entraînés sur les mêmes ensembles. Afin d'être sûr d'avoir les performances optimales pour chaque modèle, nous avons fait une recherche d'hyperparamètres par validation croisée. Pour s'assurer d'avoir au moins une donnée par classe dans chaque pli, nous avons limité la validation croisée à seulement 5 plis.

Chaque classifieur a été entraîné avec les meilleurs hyperparamètres trouvés puis testé sur notre ensemble de test. Nous évaluerons les performances des modèles sur l'ensemble de test avec les 3 métriques suivantes :

- La précision : la proportion de données appartenant réellement à leur classe prédite
- Le rappel : la proportion des données bien classées (la justesse des prédictions pour une classe)
- Le f1-score : la moyenne harmonique de la précision et du rappel

Comme nous sommes dans une situation de classification multi-classes, on calcule ces métriques individuellement pour chaque classe. On peut ensuite calculer la moyenne sur l'ensemble des classes ou regarder la distribution des résultats pour chaque métrique. On devrait ainsi avoir une bonne idée des performances de chaque classifieur.

---

1. <https://www.kaggle.com/c/leaf-classification>

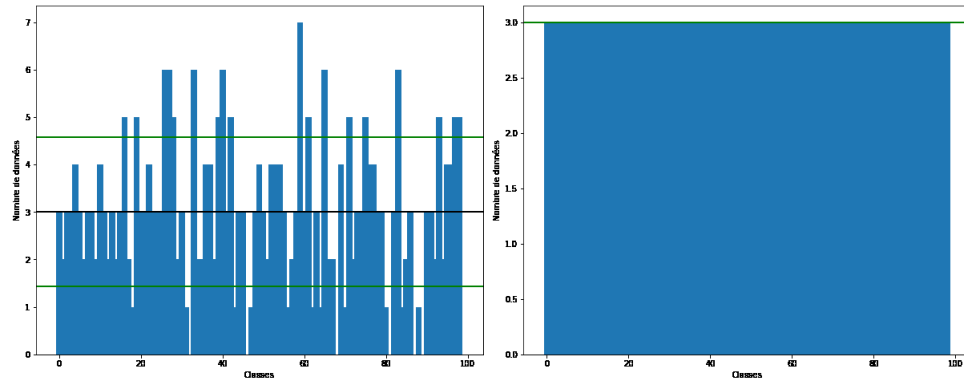


FIGURE 1 – Distribution des classes dans l’ensemble de test avec une séparation non stratifiée (à gauche) et stratifiée (à droite)

### 1.3 Structure du projet

Le code relatif à chaque classifieur se trouve dans des *notebooks* différents. Nous avons regroupé les fonctions utilitaires communes à chaque *notebook* dans le fichier *DataManagement.py*. Ce fichier contient aussi la classe **Dataset** qui sert à la lecture et à la gestion du jeu de données. Le jeu de données se trouve dans le dossier *data*, dans le fichier *train.csv*.

## 2 Évaluation des résultats

### 2.1 Classifieur KNN

Le premier classifieur que nous avons choisi de tester est le KNN. Il s'agit d'un classifieur qui prédit la classe d'une donnée selon les classes des données qui se trouve autour (qu'on appelle les voisins). L'avantage de ce classifieur est qu'il est simple et qu'il possède peu d'hyperparamètres. Il est donc assez facile à optimiser. Par contre, il peut avoir tendance à sur-apprendre les données d'entraînement. On s'attend à un bon résultat avec ce classifieur parce qu'on suppose que les feuilles doivent être significativement différentes d'une espèce à l'autre.

Les hyperparamètres du KNN sont les suivants :

- Le nombre de voisins
- La pondération associée à chaque voisin : uniforme (sans pondération) ou selon la distance
- La métrique de distance : euclidienne, manhattan ou cosinus

L'hyperparamètre le plus important est évidemment le nombre de voisins ; c'est lui qui détermine vraiment la capacité du modèle.

Les meilleurs hyperparamètres pour notre ensemble d'entraînement sont :

- Nombre de voisins : 4
- Pondération : selon la distance
- Métrique de distance : manhattan

La figure 2 montre les résultats de l'entraînement pour les différentes valeurs d'hyperparamètres. On remarque une différence significative entre la distance de manhattan et les deux autres, ce qui est plutôt inattendu. On remarque aussi qu'une pondération selon la distance est toujours meilleure qu'une pondération uniforme, ce qui est logique si nos données sont assez bien séparées.

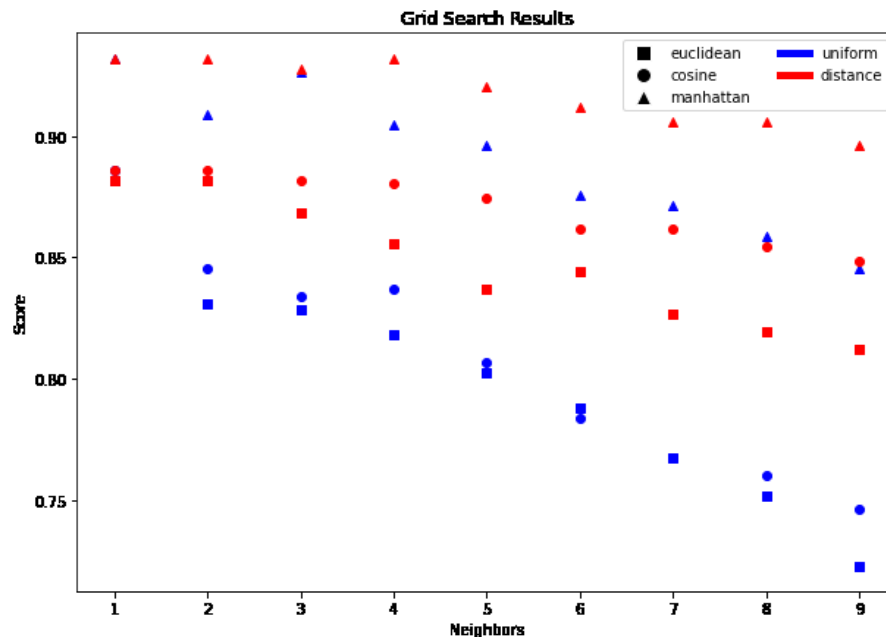


FIGURE 2 – Score du KNN selon les différents hyperparamètres

On peut voir sur le graphique que le score est décroissant lorsqu'on utilise plus que 4 voisins, et ce peu importe la distance ou la pondération. Cette décroissance s'explique par le petit nombre de données dans chaque classe dans l'ensemble d'entraînement. Plus on considère de voisins, plus on considère de points qui n'appartiennent à la même classe.

Tout cela montre que nos données semblent assez bien séparées et c'est pourquoi le classifieur KNN obtient un score aussi élevé.

Cependant, pour être sûr des performances du modèle, nous devons l'évaluer sur l'ensemble de test. Pour chacune des métriques d'évaluation, voici la moyenne calculée pour l'ensemble des classes sur les données de test :

- Précision :  $96,397 \pm 9,469$  %
- Rappel :  $95,286 \pm 13,477$  %
- F1-score :  $95,005 \pm 13,409$  %

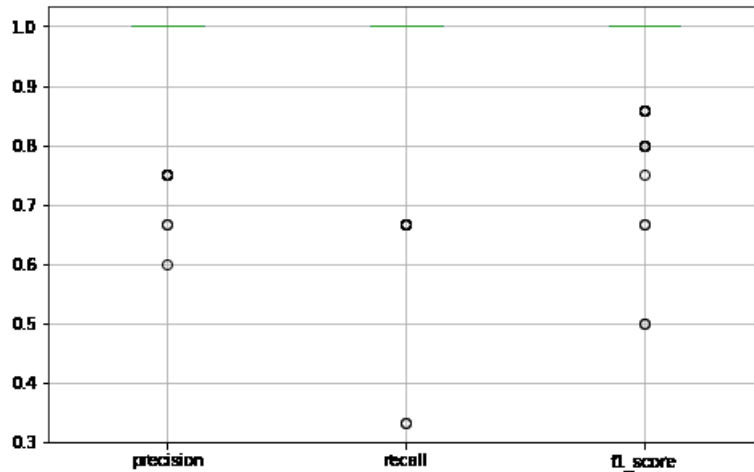


FIGURE 3 – Distribution des métriques d'évaluation pour le KNN

La figure 3 montre la distribution des classes pour chaque métrique. On peut voir que pour la grande majorité des classes, les prédictions sont parfaites (métrique à 1,0). Cependant, il y a quelques classes moins bonnes. On peut regarder sur quelles classes le modèle a fait des erreurs pour voir s'il y a une relation entre toutes les erreurs commises.

La figure 4 montre une matrice de confusion des classes pour lesquelles le modèle a commis des erreurs. On ne remarque aucune relation parmi les erreurs commises. Il s'agit donc probablement de données pour lesquelles les caractéristiques sont moins distinctes.

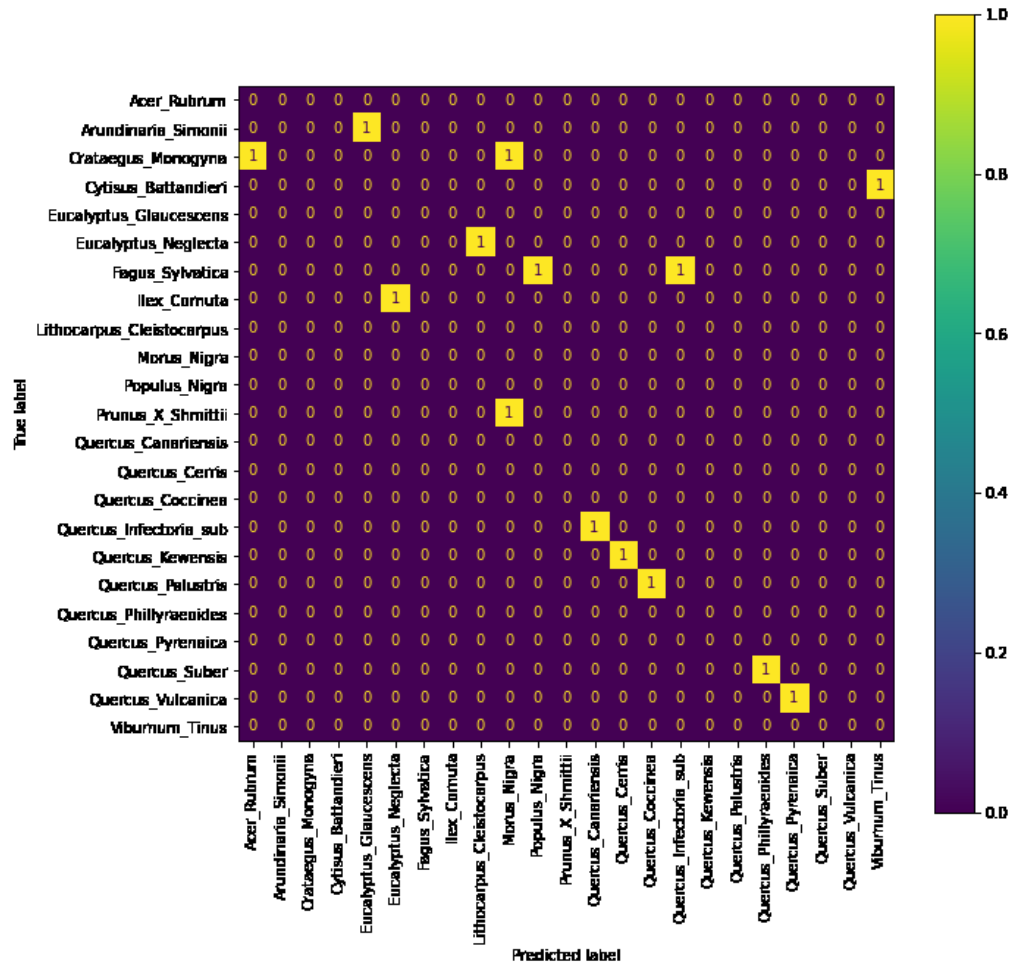


FIGURE 4 – Matrice de confusion des erreurs commises par le KNN

**Conclusion** Le classifieur KNN est optimal lorsqu'on utilise 4 voisins, la distance de manhattan et une pondération des voisins selon la distance. Avec ces hyperparamètres, le modèle performe très bien ( $> 95\%$  pour chaque métrique d'évaluation) et ne semble donc ni sous-apprendre ni sur-apprendre.

## 2.2 Régression logistique

Le deuxième modèle que nous avons choisi d'utiliser est le modèle de régression logistique. Il s'agit une technique de modélisation statistique utilisée normalement pour prédire la probabilité d'appartenance à une classe binaire en fonction de variables indépendantes. Elle est couramment utilisée dans les problèmes de classification, tels que la prédiction de la catégorie d'appartenance d'un élément parmi deux classes distinctes.

Cependant, notre problème comporte plus de deux classes, mais il est possible d'utiliser des approches adaptant la régression logistique à un modèle multi-classes. On peut en effet utiliser une approche dite "one-vs-rest" (OvR) ou multinomiale. Ces 2 approches sont disponibles via le paramètre `multi_class` de `sklearn.LogisticRegression`. La différence principale entre ces 2 méthodes est qu'en OvR, un modèle de régression est créé pour chaque classe par rapport aux autres classes combinées alors qu'avec la méthode multinomiale, toutes les classes sont gérées en même temps. Dans le cadre du modèle que nous avons créé, après avoir fait des tests de performances en changeant seulement la valeur du paramètre `multi_class`, nous n'avons pas observé de différences remarquables de performances, nous avons donc laissé le paramètre en automatique, soit en OvR.

Les hyperparamètres que nous avons choisis d'optimiser sont les suivants :

- La régularisation, contrôlée par le paramètre `C`. Plus la valeur de `C` est petite, plus la régularisation est forte.
- Le choix de la norme de pénalité, régulée par le paramètre `penalty`, qui peut être "l1" (Lasso) ou "l2" (Ridge).
- Le type de solveur utilisé pour l'optimisation, spécifié par le paramètre `solver`, il peut être de type 'liblinear', 'newton-cg', 'sag' ou 'saga'. Il détermine l'algorithme utilisé pour le problème d'optimisation du modèle.

Pour le type de solveur et la norme de pénalité, nous avons fait le choix de tous les tester dans la recherche d'hyperparamètres de notre modèle. Par contre, pour la régularisation, il s'agit d'une valeur numérique, qui peut prendre n'importe quelle valeur positive, il a donc fallu faire un choix sur la plage de données à tester. La détermination de cette plage s'est faite par tâtonnements, en testant différentes valeurs de `C` pour la recherche d'hyperparamètres. Nous avons commencé par des valeurs proches de 10, pour arriver à obtenir des scores de performances satisfaisants aux alentours de `C = 100`. Au final, la plage de valeur testée est [60; 160], avec un écart de 20 entre chaque valeur. Nous avons choisi de nous limiter le nombre de valeurs testées et leur amplitude afin d'avoir des temps de calculs raisonnables.

Après avoir effectué la recherche des meilleurs hyperparamètres, la meilleure combinaison pour l'entraînement obtenue est la suivante : `C = 160`, `penalty = 'l2'` et `solver = 'liblinear'`, avec un score de précision de 0.912.

Dans un premier temps, on remarque que la valeur de `C` est la plus élevée parmi celles présentes dans l'intervalle de recherche. Cela confirme les observations faites précédemment lors du processus de recherche des valeurs des hyperparamètres à tester. Sachant que `C` est l'inverse de la force de régularisation, cela signifie que moins la régularisation est forte, mieux notre modèle performe sur les données d'entraînement. Afin de constater l'importance de cet hyperparamètre par rapport aux autres, nous traçons les courbes représentant les différentes combinaisons d'hyperparamètres testés :

Dans un premier temps, il est important de noter que toutes les combinaisons possibles d'hyperparamètres ne sont pas présentes. Cela est dû au fait que certains solvers ne sont compatibles qu'avec certaines pénalités, comme `newton-cg` qui n'est compatible qu'avec une pénalité `l2`.

Ensuite, nous observons clairement une augmentation nette du score plus la valeur de `C` est élevée, pour toutes les combinaisons d'hyperparamètres, hormis quand le solveur est `liblinear` et la pénalité `l1`. En outre, le choix de la pénalité a également un impact important sur les performances, les courbes en rouges, représentant la pénalité `l2` sont au-dessus des bleues représentant `l1`. Cela peut s'expliquer par plusieurs raisons. La pénalité `l2` est meilleure lorsque les données possèdent des caractéristiques corrélées, ce qui est le cas pour nos données où les 3 caractéristiques sont divisées en 64 sous caractéristiques. De plus, la pénalité `l2` est souvent utilisée dans les cas où le nombre d'observations est limité comparé au nombre de classes, correspondant bien à notre jeu de données.

Enfin, pour les solvers couplés à la pénalité `l2`, nous observons que `liblinear`, `lbfgs`, `sag` et `newton-cg` obtiennent des résultats assez similaires, et avec `saga` légèrement en-dessous. Le solveur `liblinear` reste tout de même le plus



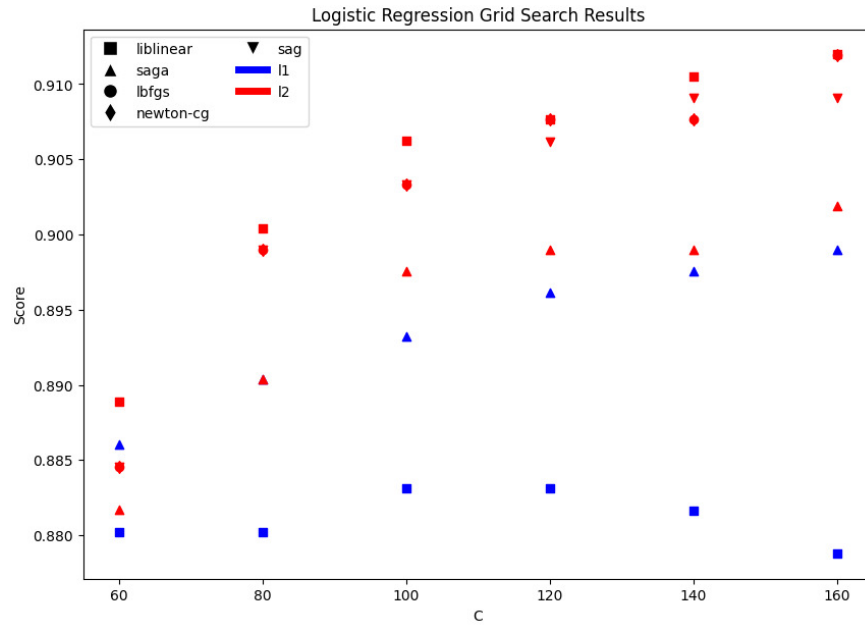


FIGURE 5 – Courbe de score du modèle Logistic Regression pour différents hyperparamètres

performant peut importe la valeur de C, mais avec une marge de moins en moins grande plus C augmente. Pour notre modèle, le choix du solver n'a donc pas d'impact significatif sur les performances par rapport aux deux autres hyperparamètres.

Pour réellement mesurer les performances du meilleur modèle sur l'ensemble d'entraînement, nous l'évaluons sur un ensemble de test composé de données que le modèle n'a jamais rencontré. Voici les valeurs moyennes des métriques de performances obtenues pour chaque classe :

- Précision :  $93,822 \pm 14,766$  %
- Rappel :  $92,929 \pm 16,682$  %
- F1-score :  $92,350 \pm 13,945$  %

Nous traçons également les boxplots correspondants :

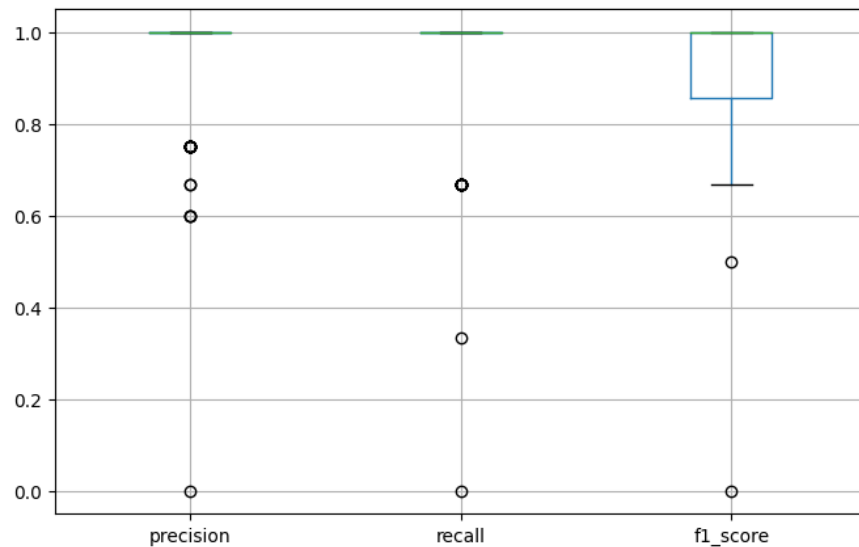


FIGURE 6 – Distribution des métriques d'évaluation pour le modèle Logistic Regression

D'abord, on remarque que les valeurs des 3 métriques de performances sont très élevées, avec 93,8% de

précision et un rappel et f1-score aux alentours de 92,3%. Comme on peut le voir dans les boxplots, les prédictions sont correctes pour la grande majorité des classes, avec seulement très peu de valeurs aberrantes (outliers). On peut cependant observer que le boxplot du f1-score est un peu plus étendu, indiquant quelques erreurs de prédictions, mais rien de critique, la médiane étant aux alentours de 0.9.

Il existe cependant des classes pour lesquelles le modèle a moins bien performé. Au total, 34 classes sur les 99 ont un f1-score non parfait, c'est-à-dire différent de 1. Cela n'est absolument pas alarmant sur les performances de notre modèle, mais indique que des points d'améliorations subsistent pour encore augmenter les performances de celui-ci.

Enfin, nous dressons la matrice de confusion qui montre toutes les erreurs de prédictions, en affichant les couples de classes où une classe prédite était différente de la classe réelle, avec le nombre d'occurrences.

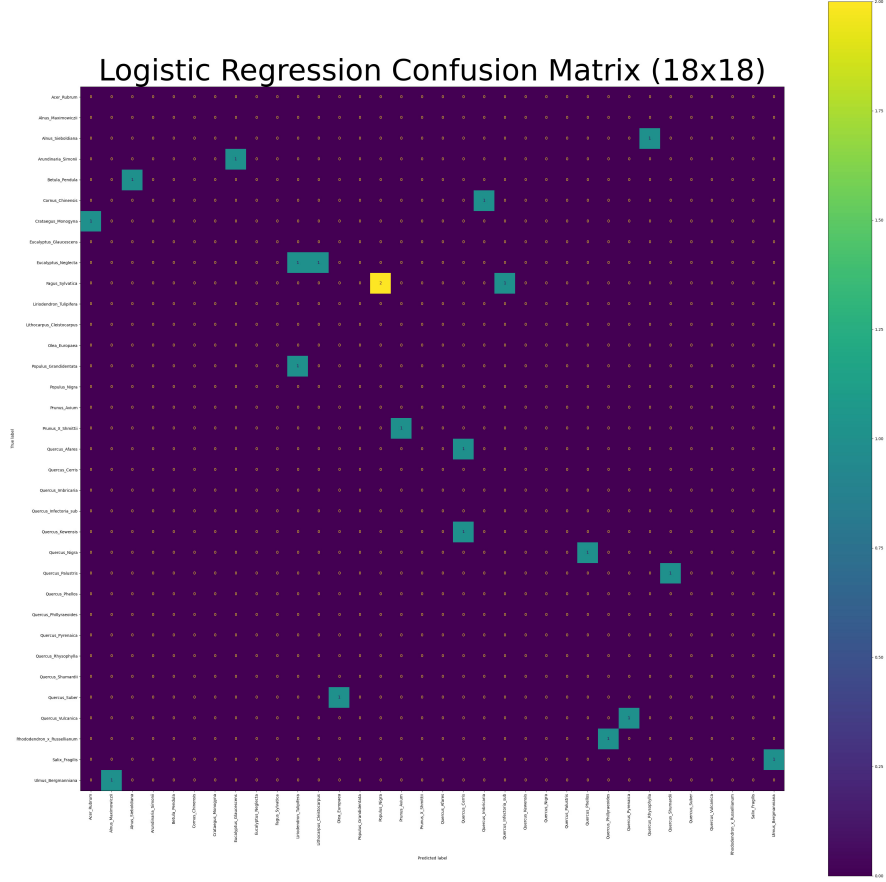


FIGURE 7 – Matrice de confusion du modèle Logistic Regression

Comme observé précédemment via les métriques de performances, nous voyons que les erreurs de prédictions sont rares et ne sont pas concentrées sur une classe en particulier. On peut seulement relever le fait que la feuille de type Falgus\_Sylvatica est la seule classe a mal avoir été prédite à 3 reprises.

**Conclusion** Malgré son origine binaire, le modèle de régression logistique s'est révélé plutôt performant pour résoudre notre problème de classification. Nous avons en ce sens adapté la régression logistique à un modèle multi-classes en utilisant l'approche OvR.

Les meilleurs hyperparamètres trouvés sont la régularisation  $C = 160$ , la norme de pénalité = 'l2' et le type de solveur 'liblinear', avec un score de précision de 91,2% sur les données d'entraînement, et des métriques de performance allant de 92 à 94% sur les données de test.

L'analyse des performances en fonction de la régularisation ( $C$ ) a révélé que des valeurs plus élevées de  $C$  (donc moins de régularisation) ont conduit à de meilleures performances sur l'ensemble d'entraînement. La pénalité  $l_2$  a également montré des performances supérieures à la pénalité  $l_1$ , probablement en raison de la nature de nos données avec des caractéristiques corrélées. Enfin, le choix du solveur n'a pas eu d'impact significatif sur les performances, particulièrement pour des valeurs de  $C$  élevées.

Les boxplots ont montré une bonne cohérence des performances avec peu de valeurs aberrantes et la matrice de confusion a identifié quelques erreurs de prédictions, mais dans l'ensemble, le modèle a bien généralisé sur l'ensemble des classes. Il y a des opportunités d'amélioration spécifiques pour certaines classes où le modèle a rencontré plus de difficultés.

En conclusion, la régression logistique s'est révélée être une approche robuste pour notre problème de classification de feuilles à 99 classes, offrant de bonnes performances sur l'ensemble de test. Des ajustements futurs pourraient inclure des stratégies spécifiques pour les classes présentant des difficultés, ainsi que l'optimisation plus poussée d'autres hyperparamètres en acceptant des temps de calculs plus élevés, pour une comparaison approfondie des performances avec le modèle actuel.

## 2.3 Machine à vecteurs de support

Notre troisième classifieur est la machine à vecteur de support. L'avantage de ce classifieur, c'est qu'il performe normalement très bien avec des données qui ont beaucoup de dimensions, ce qui est notre cas. On s'attend donc à de bon résultat.

Les hyperparamètres du SVM sont les suivants :

- Un paramètre de régularisation ( $C$ ) : plus il est grand, moins la régularisation est forte
- Le noyau : linéaire, gaussien, polynomial ou sigmoïdal
- Un paramètre gamma utilisé par les noyaux gaussien, polynomial et sigmoïdal : soit *scale*, soit *auto*

L'hyperparamètre le plus important est évidemment le noyau. C'est le noyau qui détermine quelle genre de fonction le SVM pourra apprendre. On veut donc tester le plus de noyau possible pour être sûr de trouver le bon.

Cependant, lorsqu'on utilise un noyau polynomial, on a un hyperparamètre supplémentaire : le degré. Comme rechercher le degré optimal en même temps que les autres hyperparamètres prendrait trop de temps, on l'a fait séparément et on a trouvé que le degré optimal est de 1.

Les meilleurs hyperparamètres pour notre ensemble d'entraînement sont :

- Régularisation : 6,0
- Noyau : polynomial de degré 1
- Gamma : *scale*

La figure 8 montre les résultats de l'entraînement pour les différentes valeurs d'hyperparamètres. On voit bien que le type de noyau a un impact significatif sur les performances du modèle. Le noyau linéaire est le moins performant, ce qui est normal si on suppose que les données ne sont pas linéairement séparable. Les noyaux polynomial, gaussien et sigmoïdal sont très similaires, mais le noyau sigmoïdal est toujours moins performant.

On remarque aussi que les performances du modèle atteignent un plateau à  $C=2$ . Au-delà de cette valeur, la différence de performance entre le noyau polynomial et le noyau gaussien n'est pas significative. Nous choisirons quand même le noyau polynomial pour la suite des tests.

Finalement, le paramètre gamma ne semble pas avoir d'influence sur les performances. Lorsque gamma est à *auto*, le modèle est toujours mauvais.

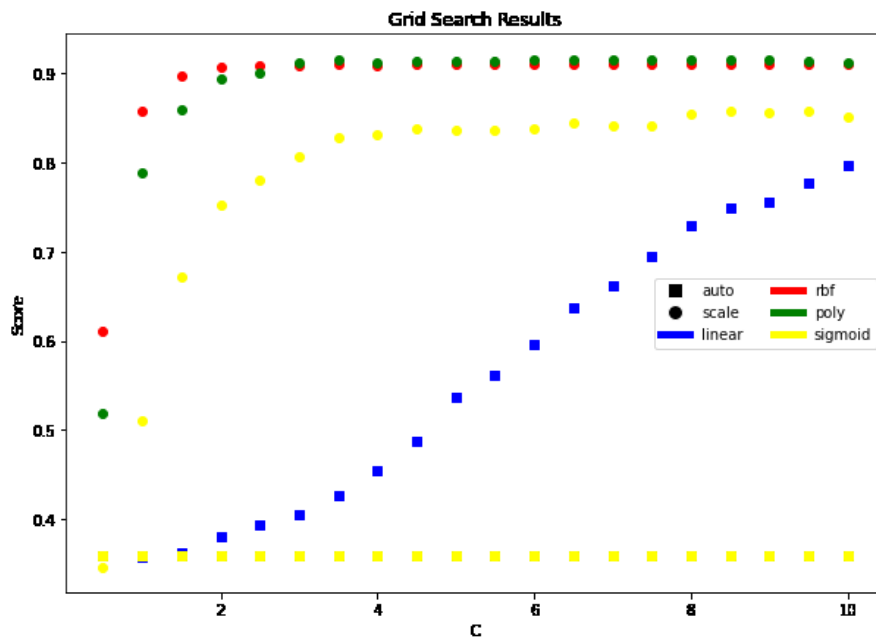


FIGURE 8 – Score du SVM selon les différents hyperparamètres

Nous avons testé le modèle avec les hyperparamètres optimaux sur l'ensemble de test. Pour chacune des métriques d'évaluation, voici la moyenne calculée pour l'ensemble des classes :

- Précision :  $95,522 \pm 10,962$  %
- Rappel :  $93,603 \pm 15,560$  %
- F1-score :  $93,271 \pm 11,723$  %

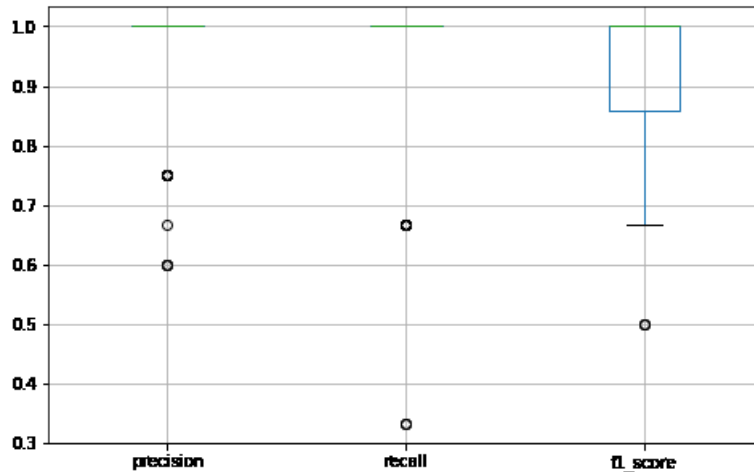


FIGURE 9 – Distribution des métriques d'évaluation pour le SVM

La figure 9 montre la distribution des classes pour chaque métrique. Encore une fois, les prédictions sont parfaites (métrique à 1,0) pour la grande majorité des classes. Si on regarde la matrice de confusion des erreurs commises, figure 10, on ne remarque aucune relation particulière. Les erreurs sont réparties assez uniformément parmi les différentes classes.

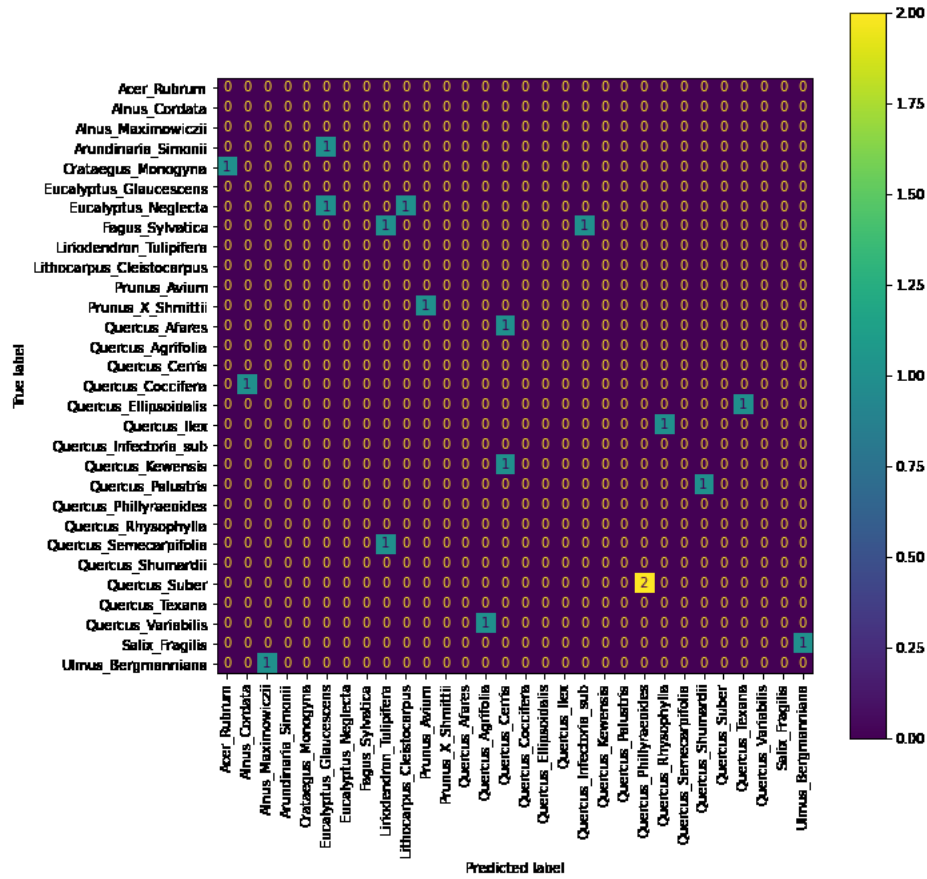


FIGURE 10 – Matrice de confusion des erreurs commises par le SVM

**Conclusion** Le classifieur SVM est optimal lorsqu'on utilise un noyau polynomial de degré 1 avec un paramètre de régularisation de 6. Cependant, un noyau gaussien avec le même paramètre de régularisation a des performances presque identique. On ne peut donc pas vraiment dire si l'un est meilleur que l'autre. Avec ces hyperparamètres, le SVM performe très bien et ne semble ni sur-apprendre ni sous-apprendre.

## 2.4 Classifieur AdaBoost

Le quatrième classifieur que nous avons sélectionné pour évaluation est l'Adaboost. Il s'agit d'un modèle qui combine plusieurs classifieurs faibles pour former un ensemble robuste et performant. L'Adaboost accorde des poids différents aux données d'entraînement, mettant davantage l'accent sur celles qui ont été mal classées par les classifieurs précédents. Cela en fait un modèle adaptatif et capable de s'ajuster aux erreurs précédentes.

L'avantage de l'Adaboost réside dans sa capacité à s'adapter à des ensembles de données complexes sans nécessiter beaucoup d'ajustements d'hyperparamètres. Cependant, il peut être sensible au bruit dans les données et à des valeurs aberrantes.

Dans notre contexte, nous anticipons des performances prometteuses avec l'Adaboost, car il est bien adapté à la classification de feuilles. Nous supposons que les caractéristiques distinctives des différentes espèces de feuilles seront correctement exploitées par l'Adaboost, conduisant ainsi à des prédictions précises et discriminantes.

Les hyperparamètres de l'Adaboost sont les suivants :

- Le nombre d'estimateurs
- Le learning rate
- Le type d'estimateur ou classifieur faible

Les hyperparamètres les plus importants est évidemment le type d'estimateur et ; c'est lui qui détermine vraiment la capacité du modèle.

Les meilleurs hyperparamètres pour notre ensemble d'entraînement sont :

- Le nombre d'estimateurs : 64
- Le learning rate : 0,01
- Le type d'estimateur ou classifieur faible : ExtraTreesClassifier

La figure 11 montre les résultats de l'entraînement pour les différentes valeurs d'hyperparamètres. On remarque une différence significative entre le classifieur SVM (qui n'a pas été tracé due à ses pauvres performances) et les deux autres.

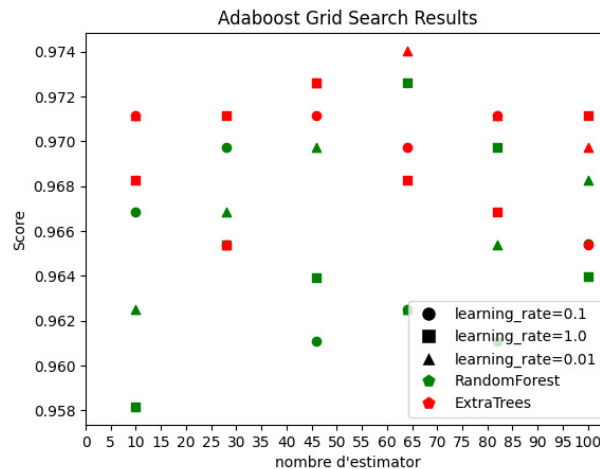


FIGURE 11 – Score de l'adaboost selon les différents hyperparamètres

On peut voir sur le graphique que le score est différent en fonction du type d'estimateur et que learning rate n'influe pas grandement le résultat. Le nombre d'estimateur influence légèrement les résultats.

Nous avons évalué les performances du modèle sur l'ensemble de test en utilisant les hyperparamètres optimaux. Pour chaque métrique d'évaluation, la moyenne a été calculée en considérant l'ensemble des classes :

- Précision :  $97,593 \pm 8,368$  %
- Rappel :  $96,633 \pm 11,163$  %
- F1-score :  $96,518 \pm 8,737$  %

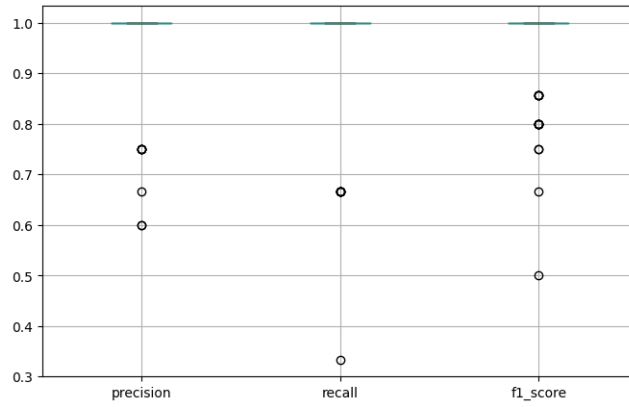


FIGURE 12 – Distribution des métriques d'évaluation pour l'adaboost

La figure 20 montre la distribution des classes pour chaque métrique. Étant donné le nombre élevé de classes (99), l'évaluation des performances pour chaque classe individuelle peut rapidement devenir impraticable. Pour obtenir une vue d'ensemble, nous analysons plutôt la moyenne des métriques à travers l'ensemble des classes. Globalement, notre modèle démontre une performance robuste, manifestant à la fois une précision et une justesse élevées.

Comme on peut le voir dans le boxplot, les prédictions sont parfaites (métriques à 1.0) pour la grande majorité des classes.

La figure ?? montre une matrice de confusion des classes pour lesquelles le modèle a commis des erreurs. On ne remarque aucune relation parmi les erreurs commises. Il s'agit donc probablement de données pour lesquelles les caractéristiques sont moins distinctes.



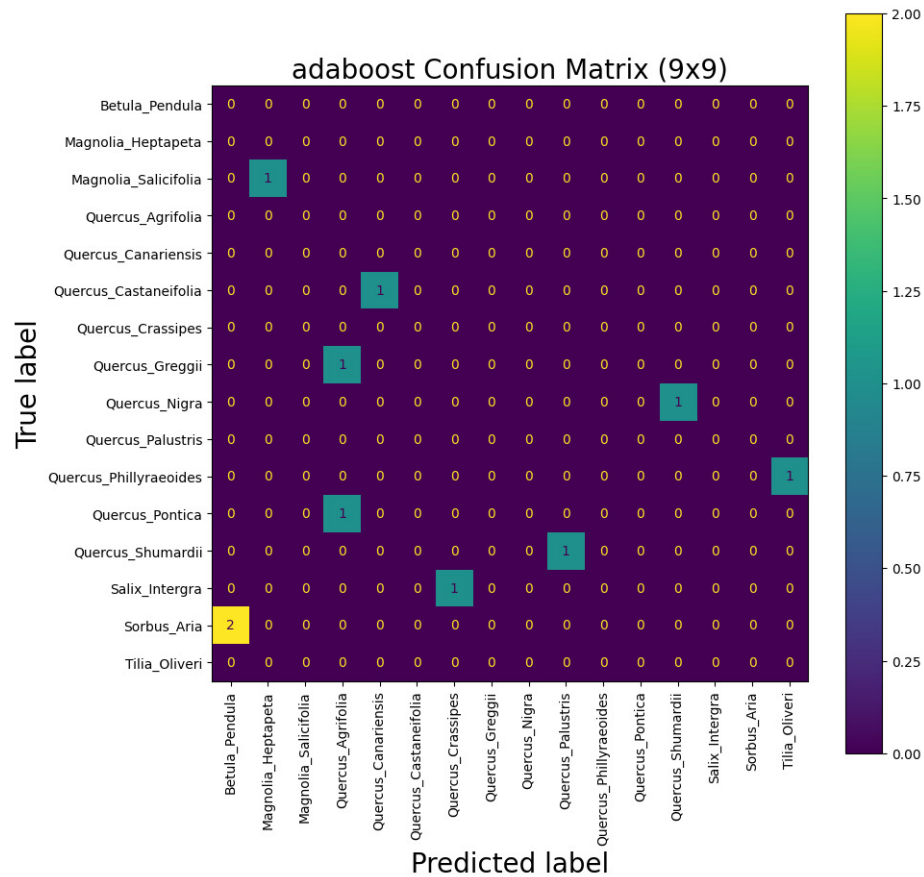


FIGURE 13 – Matrice de confusion des erreurs commises par l'adaboost

**Conclusion** Le classifieur adaboost est optimal lorsqu'on utilise un grand nombre d'estimateurs, et des classifieurs faibles adéquat. Avec ces hyperparamètres, le modèle performe très bien ( $> 96.5\%$  pour chaque métrique d'évaluation) et ne semble donc ni sous-apprendre ni sur-apprendre.

## 2.5 Arbre de décisions

Le cinquième modèle que nous avons choisi d'utiliser est l'arbre de décision. Il s'agit d'une méthode de modélisation qui prend des décisions selon une structure arborescente. Les arbres de décision sont conçus pour résoudre des problèmes de classification avec plusieurs classes, comme dans notre cas. Cette approche est particulièrement adaptée pour diviser l'espace des caractéristiques en régions, en prenant des décisions basées sur des seuils dans les caractéristiques. Les arbres de décision sont largement utilisés dans la classification en raison de leur capacité à capturer des relations complexes entre les caractéristiques et la classe cible.

Les hyperparamètres que nous avons choisi d'optimiser sont les suivants : - La profondeur maximale de l'arbre (`max_depth`). Chaque niveau de profondeur correspond à une séparation supplémentaire des données en sous-groupes. Une profondeur à `None` indique qu'il n'y a pas de restriction sur celle-ci.

- Le nombre minimal d'échantillons requis dans un nœud pour qu'il soit divisé (`min_samples_split`).
- Le critère de qualité de la division (`criterion`), qui peut être 'gini', 'entropy' ou 'log\_loss'.
- La stratégie de division aux nœuds (`splitter`), qui peut être 'best' ou 'random'.

Bien que la profondeur maximale soit souvent l'hyperparamètre le plus crucial dans les arbres de décisions, nous explorons également l'impact des autres hyperparamètres sur les performances du modèle.

Pour le critère de qualité, nous avons fait le choix de tester les 3 types disponibles, avec 'gini' qui se base sur la mesure d'impureté des classes dans un nœud, 'entropy' qui mesure l'information contenue dans un nœud et 'log\_loss' qui calcule des pertes logarithmiques. De même pour la stratégie de division aux nœuds : le splitter de type 'best' choisit la division qui maximise la mesure définie par le critère de qualité choisi, alors que 'random' choisit une division parmi un ensemble aléatoire de divisions possibles, sans forcément évaluer toutes les possibilités.

Concernant la profondeur maximale de l'arbre, nous avons procédé comme pour d'autres modèles, où nous avons effectué des tests à tâtons pour observer quelles plages de valeurs seraient intéressantes à tester lors de la recherche d'hyperparamètres. Après quelques essais, les valeurs intéressantes semblent se trouver à partir d'une profondeur proche de la centaine, allant jusqu'au millier. Également, nous avons intégré la profondeur 'None', indiquant une non-restriction sur la profondeur.

Pour le `min_samples_split`, nous avons procédé de même, en remarquant que les valeurs revenant le plus souvent dans les meilleurs modèles étaient soit 2 ou 5.

Après avoir effectué la recherche des meilleurs hyperparamètres, la meilleure combinaison pour l'entraînement obtenue est la suivante : `max_depth = None`, `min_samples_split = 5` et `criterion = 'gini'` et `splitter = 'random'` avec un score de précision de 0,615.

Pour la profondeur maximale des arbres, on constate que l'absence de limite de profondeur (`None`) semble donc être préférable. Cela suggère que permettre aux arbres de se développer sans restriction de profondeur donne de meilleurs résultats dans ce contexte. Il est important de rappeler qu'il ne s'agit que des données d'entraînement, donc il est assez normal qu'avec cette liberté au niveau de la profondeur, le modèle s'ajuste le mieux aux données d'entraînement. De plus, cela fait d'autant plus sens au vu de la grande quantité de classes que notre jeu de données possède.

On peut examiner les performances du modèle en considérant le score associé à cette limite de profondeur et évaluer l'influence des autres hyperparamètres sur ces résultats :

D'abord, nous pouvons rapidement observer que plus le nombre minimal d'échantillons requis dans un nœud pour qu'il soit divisé augmente, moins le modèle est performant. Il est assez simple d'expliquer cela, en effet si on augmente cette valeur, le modèle est contraint de créer des divisions dans les nœuds uniquement s'il y a un nombre relativement élevé d'échantillons dans ces nœuds. Cela peut conduire à un arbre de décision moins profond et plus généralisé, car les divisions ne sont autorisées que lorsque le modèle détecte des schémas plus forts dans les données. De plus, par rapport à notre jeu de données, cela peut clairement impacter les faibles différenciations pouvant exister entre certaines des 99 classes présentes, et donc faire chuter les performances du modèle.

Concernant la stratégie de division aux nœuds, la 'best' paraît être la meilleure en moyenne, par rapport à la stratégie 'random', qui arrive cependant parfois à obtenir de meilleurs résultats. Cela s'explique simplement par la nature de ces stratégies : le splitter 'best' va systématiquement choisir la division la plus bénéfique en termes de critère de qualité, alors que le random va parfois être chanceux sur ses choix de division, expliquant sa supériorité en performances par moment, mais en moyenne ses résultats seront plus faibles.

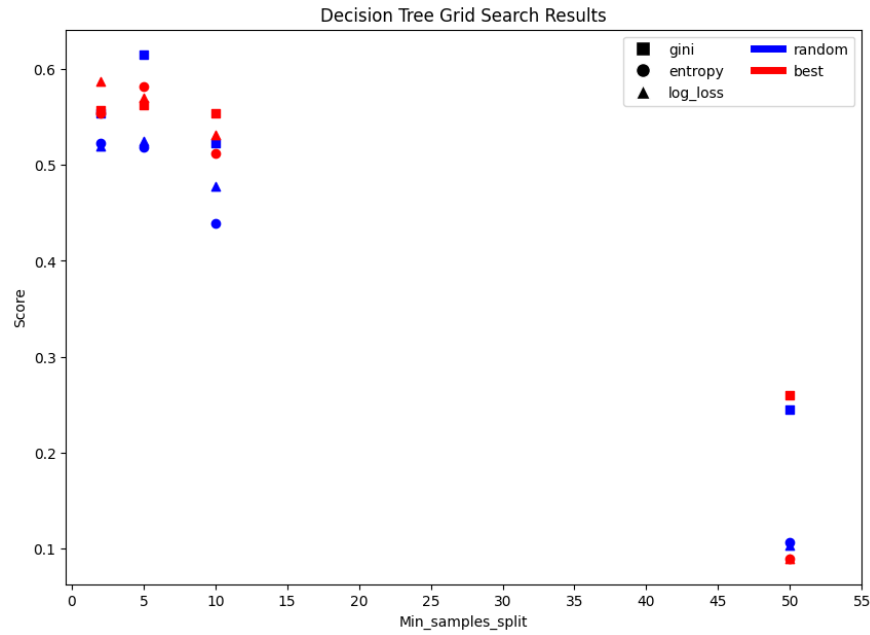


FIGURE 14 – Courbe de score du modèle Decision Tree pour différents hyperparamètres

Enfin, nous observons que le critère de division donnant les meilleurs résultats paraît être ‘gini’, malgré le fait que les autres critères possèdent des performances assez proches. D’après la littérature, le critère ‘gini’ est surtout privilégié pour alléger les temps de calculs qu’induisent les méthodes ‘entropy’ et ‘log\_loss’. Dans notre cas en particulier, le choix de ce paramètre ne possède d’impact important sur les performances du modèle.

Pour réellement mesurer les performances du meilleur modèle sur l’ensemble d’entraînement, nous l’évaluons sur un ensemble de test composé de données que le modèle n’a jamais rencontré. Voici les valeurs moyennes des métriques de performances obtenues pour chaque classe :

- Précision :  $71,125 \pm 14,766$  %
- Rappel :  $66,33 \pm 16,682$  %
- F1-score :  $66,365 \pm 13,945$  %

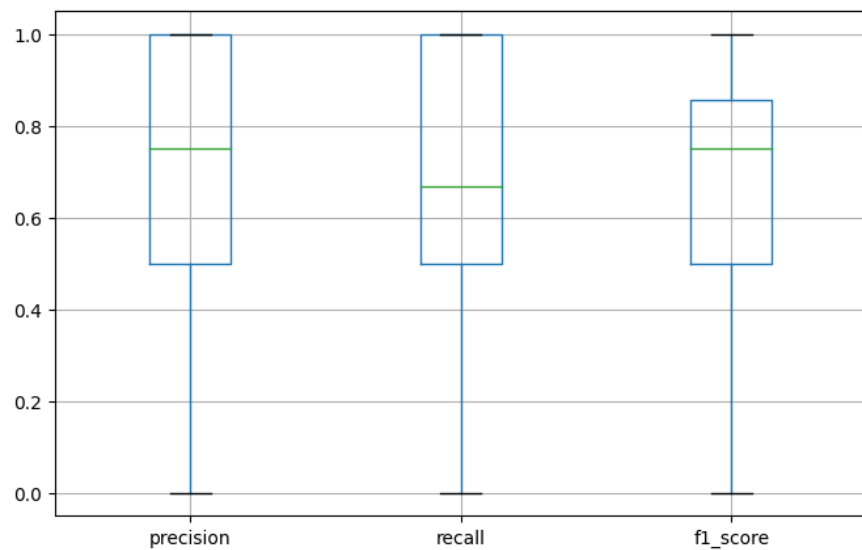


FIGURE 15 – Distribution des métriques d’évaluation pour le modèle Decision Tree

D’abord, nous remarquons que les métriques de performances sont assez faibles, entre 66 et 72%, distantes de

l'intervalle des 85 – 100% qui caractérise les bonnes performances d'un modèle. Ces observations se traduisent sur la forme des boxplots tracés, où l'écart inter-quartile est très prononcé, de l'ordre de 0.5 pour la précision et le rappel et 0.35 pour le f1-score, traduisant de nombreuses erreurs de prédiction. De plus, les extrémités des boxplots s'étendent sur l'entièreté de l'intervalle [0 ; 1].

Cependant, le point positif à retirer de ces résultats est que l'on a obtenu de meilleures performances sur l'ensemble de test comparativement aux résultats sur les données d'entraînement.

Il existe donc beaucoup de classes pour lesquelles le modèle a moins bien performé. Au total, 83 classes sur les 99 ont un f1-score non parfait, c'est-à-dire différent de 1, témoignant des faibles performances du modèle.

Enfin, nous dressons la matrice de confusion qui montre toutes les erreurs de prédictions, en affichant les couples de classes où une classe prédite était différente de la classe réelle, avec le nombre d'occurrences.

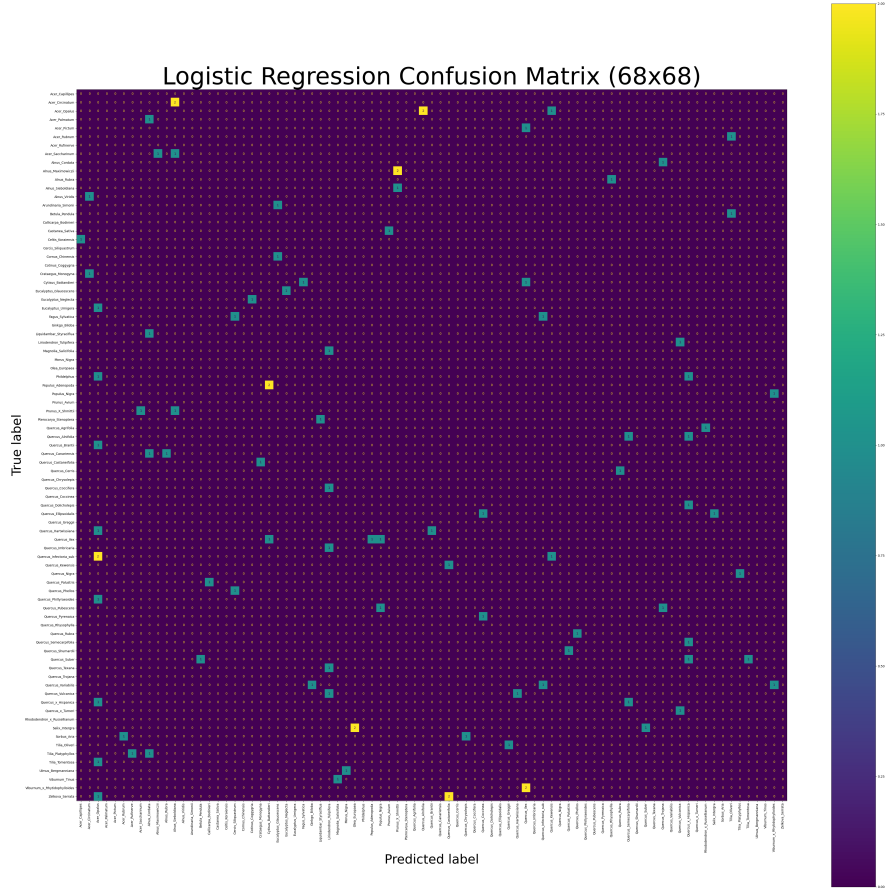


FIGURE 16 – Matrice de confusion du modèle Decision Tree

Sans forcément s'intéresser aux labels précis des classes, nous pouvons observer un grand nombre d'erreurs de prédictions étalées sur différentes classes, et se reproduisant parfois plusieurs fois pour certaines classes. Cette vue d'ensemble des mauvaises prédictions confirme les performances décevantes de notre modèle utilisant l'arbre de décision.

Ces mauvaises performances peuvent s'expliquer par différents facteurs. Tout d'abord, on peut pointer le fait que notre jeu de données n'est sans doute pas le plus optimal, avec 99 classes et seulement 10 échantillons d'entraînement par classes, l'arbre de décision n'a pas su construire un arbre différenciant de façon précise chacune des classes.

Également, lors du processus de recherche d'hyperparamètres, nous avons dû le répéter plusieurs fois car les résultats étaient très fluctuants et il était possible d'avoir des valeurs d'hyperparamètres optimaux changeantes d'une exécution à l'autre.

Enfin, les arbres de décisions ont en moyennes des performances plus basses que d'autres modèles de classification, et sont souvent utilisés dans le modèle de Random Forest, qui est le prochain modèle que nous

présentons.

**Conclusion** Pour conclure, le modèle d’arbre de décision n’a pas produit des performances convaincantes avec notre jeu de données.

Les meilleurs hyperparamètres trouvés sont la profondeur maximale d’arbre illimitée (None), le nombre minimal d’échantillon pour division d’un nœud = 5, le critère de division ‘gini’ et enfin le splitter de type ‘random’, même si pour ce dernier paramètre, il pourrait être correct d’utiliser le ‘best’. Le tout nous a permis d’obtenir une précision de 61,5% sur les données d’entraînement et des valeurs de métriques de performances allant de 66 à 72% sur les données de test.

L’analyse plus précise des hyperparamètres a mis en évidence le fait que l’absence de limite de profondeur semble préférable, ce qui suggère que permettre aux arbres de se développer sans restriction conduit à de meilleurs ajustements aux données d’entraînement.

Pour le nombre minimal d’échantillons requis pour diviser un nœud, son augmentation a conduit à des performances plus faibles, s’expliquant par le fait qu’un nombre plus élevé d’échantillons est requis pour autoriser une division, limitant considérablement le modèle dans sa caractérisation des 99 classes. Les autres paramètres de critère qualité et de splitter n’ont pas d’impact significatif sur les performances.

Enfin, les résultats de la matrice de confusion et des boxplots ont bien souligné la présence fréquente d’erreurs de prédiction, ce qui peut être attribué à la complexité du problème avec un grand nombre de classes et un faible nombre d’échantillons par classe. En résumé, bien que l’arbre de décision soit une approche populaire, les résultats obtenus soulignent les défis rencontrés dans notre contexte particulier. Une recherche d’hyperparamètres plus poussée, mais plus demande en temps de calculs, des données plus riches en nombre d’observations et des modèles plus sophistiqués comme Random Forest, pourraient être explorés pour améliorer les performances de classification.

## 2.6 Forêt aléatoire

Le sixième et dernier modèle de classifications que nous avons choisi d'utiliser est celui de la forêt aléatoire (Random Forest). Il s'agit d'une méthode de modélisation qui utilise un ensemble d'arbres de décision pour résoudre des problèmes de classification avec plusieurs classes, tout comme dans notre cas. La forêt aléatoire combine les prédictions de plusieurs arbres de décision individuels, chacun formé sur un sous-ensemble aléatoire des données d'entraînement. Cette approche permet de surmonter certaines limitations des arbres de décision individuels, que nous avons vu précédemment, en réduisant le surajustement et en améliorant la stabilité des prédictions. L'utilisation du Random Forest est bien plus répandue que les arbres de décisions simples, en raison de leur capacité à capturer des relations complexes entre les caractéristiques et la classe cible grâce à l'agrégation de multiples modèles.

Pour notre classifieur Random Forest, nous avons choisi d'optimiser les trois hyperparamètres suivants :

- Le nombre d'arbres dans la forêt (`n_estimators`).
- La profondeur maximale de chaque arbre (`max_depth`). Une profondeur à `None` indique qu'il n'y a pas de restriction sur celle-ci.
- Le nombre minimal d'échantillons requis pour diviser un nœud (`min_samples_split`).

Le paramètre `n_estimators` est clé. En effet, plus on l'augmente, plus d'arbres de décisions seront construits et utilisée pour prendre des décisions lors de la classification. Cependant, plus d'arbres générés signifie qu'un temps de calcul plus conséquent en sera résultant. Lors de la recherche d'hyperparamètres, nous nous sommes donc limités à 5 nombres d'arbres différents : 60, 70, 80, 90 et 100. Cette plage de valeur a été déterminée par des tests préalables, en observant des performances d'entraînement satisfaisantes dans cet intervalle.

Nous avons procédé de même avec le paramètre de profondeur maximale. Ce paramètre est extrêmement important et impacte fortement les performances du modèle, observation qui a aussi été faite pour le modèle du Decision Tree. Les valeurs choisies sont des profondeurs de 2, 5, 7, 100 et `None`, c'est-à-dire pas de restriction de profondeur.

Enfin, le `min_samples_split` est testé pour des valeurs de 2,5 et 10.

Contrairement au Decision Tree, nous avons fait le choix de ne pas intégrer le critère de division dans les hyperparamètres à optimiser. En effet, cet hyperparamètre a une influence quasi nulle sur nos résultats et ajoutait du temps computationnel inutile. Nous avons donc laissé la valeur par défaut qui fait que le critère utilisé est 'gini'.

Après avoir effectué la recherche des meilleurs hyperparamètres, la meilleure combinaison obtenue pour l'entraînement est la suivante : `max_depth = None`, `min_samples_split = 5` et `n_estimators = 80` avec un score de précision de 0.917. Les performances obtenues sont très satisfaisantes.

Concernant la profondeur maximale des arbres, on observe que l'absence de limite de profondeur (`None`) semble être plus avantageuse. Cela suggère que permettre aux arbres de se développer sans contrainte de profondeur conduit à de meilleures performances dans notre cas. Par conséquent, il est tout à fait normal que, avec cette liberté en ce qui concerne la profondeur, le modèle s'ajuste de manière optimale aux caractéristiques des données d'entraînement. De plus, cette approche semble particulièrement pertinente étant donné le grand nombre de classes présentes dans notre jeu de données.

Afin de mieux visualiser l'importance de cet hyperparamètre ainsi que du nombre d'estimateurs, nous avons fait le choix de représenter les courbes de performance des différentes combinaison d'hyperparamètre lorsque `min_samples_split = 5` :

Tout d'abord, nous observons que le paramètre le plus impactant sur les performances d'entraînement du modèle est la profondeur maximale d'arbre. En effet, on voit une très nette différence de performance entre 3, 5, 7 et 100 niveaux de profondeurs, avec quasiment 0.2 de score d'écart. La différence entre 100 et une profondeur illimitée est par contre quasiment inexistante, supposant que la valeur `None` s'approche des valeurs proches de la centaine. On a donc une augmentation pouvant s'apparenter à une croissance logarithmique. Les explications faites précédemment sur ce paramètre justifient les résultats obtenus.

Pour ce qui est nombre d'arbres générés par notre modèle, nous observons une croissance du score, mais très faible, plus ce nombre est élevé. Cette observation montre que l'on se trouve dans un intervalle de valeurs assez optimale. Cela signifie qu'un nombre d'arbres entre 60 et 100 permet de très bien décrire et caractériser notre jeu de données.

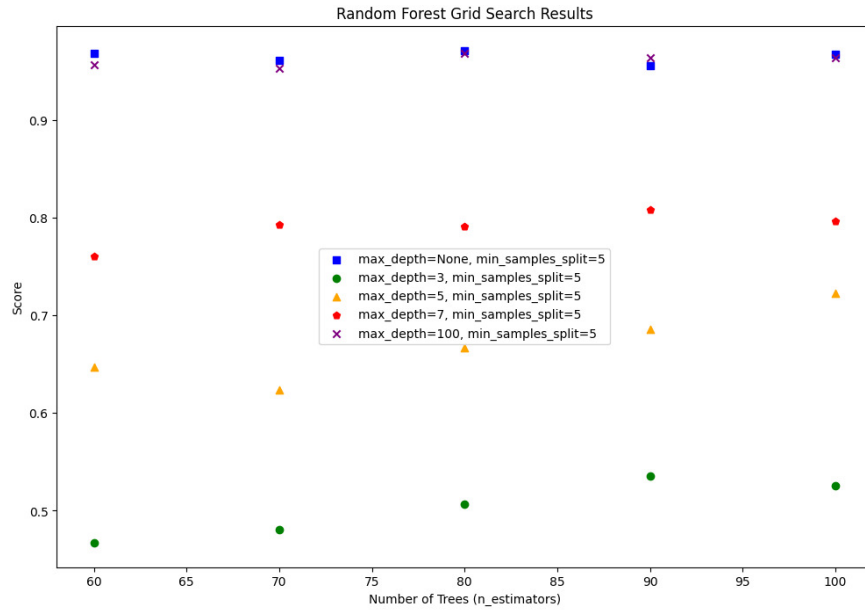


FIGURE 17 – Courbe de score du modèle Random Forest pour différents hyperparamètres

Pour réellement mesurer les performances du meilleur modèle sur l'ensemble d'entraînement, nous l'évaluons sur un ensemble de test composé de données que le modèle n'a jamais rencontré. Voici les valeurs moyennes des métriques de performances obtenues pour chaque classe :

- Précision :  $97,811 \pm 7,490$  %
- Rappel :  $97,306 \pm 9,131$  %
- F1-score :  $97,249 \pm 7,212$  %

Nous traçons également les boxplots correspondants :

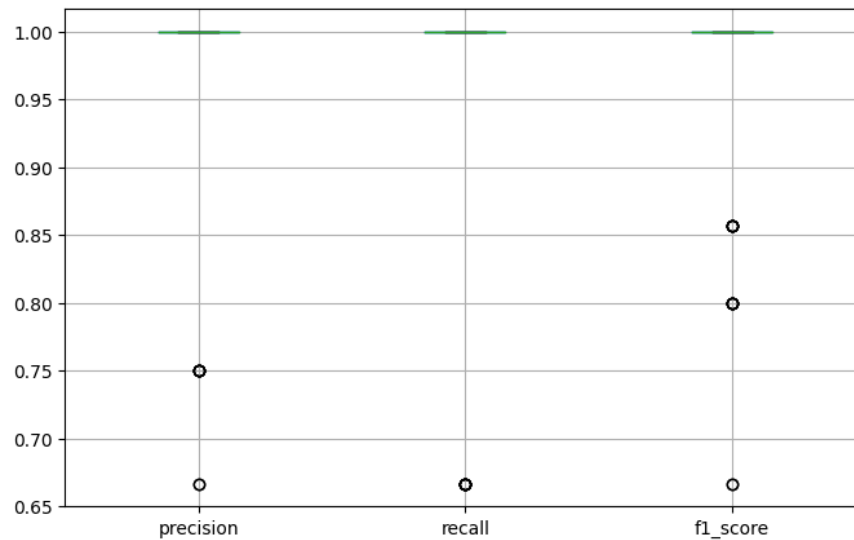


FIGURE 18 – Distribution des métriques d'évaluation pour le modèle Random Forest

Premièrement, on remarque que les valeurs des 3 métriques de performances sont excellentes, étant toutes entre 97 et 98%. Le modèle a donc très bien performé sur les données de test. Comme on peut le voir dans les boxplots, les prédictions sont correctes pour la quasi-totalité des classes, avec seulement très peu de valeurs aberrantes (outliers). Les boxplots sont en effet quasiment invisibles et tous au niveau de la valeur 1 pour les trois métriques de performances. Il existe cependant des classes pour lesquelles le modèle a moins bien performé. Au total, seulement 14 classes sur les 99 ont un f1-score non parfait, c'est-à-dire différent de

1. Cela n'est absolument pas alarmant sur les performances de notre modèle, mais indique que des points d'améliorations subsistent pour parfaire notre modèle, bien que déjà très performant. Enfin, nous dressons la matrice de confusion qui montre toutes les erreurs de prédictions, en affichant les couples de classes où une classe prédite était différente de la classe réelle, avec le nombre d'occurrences.

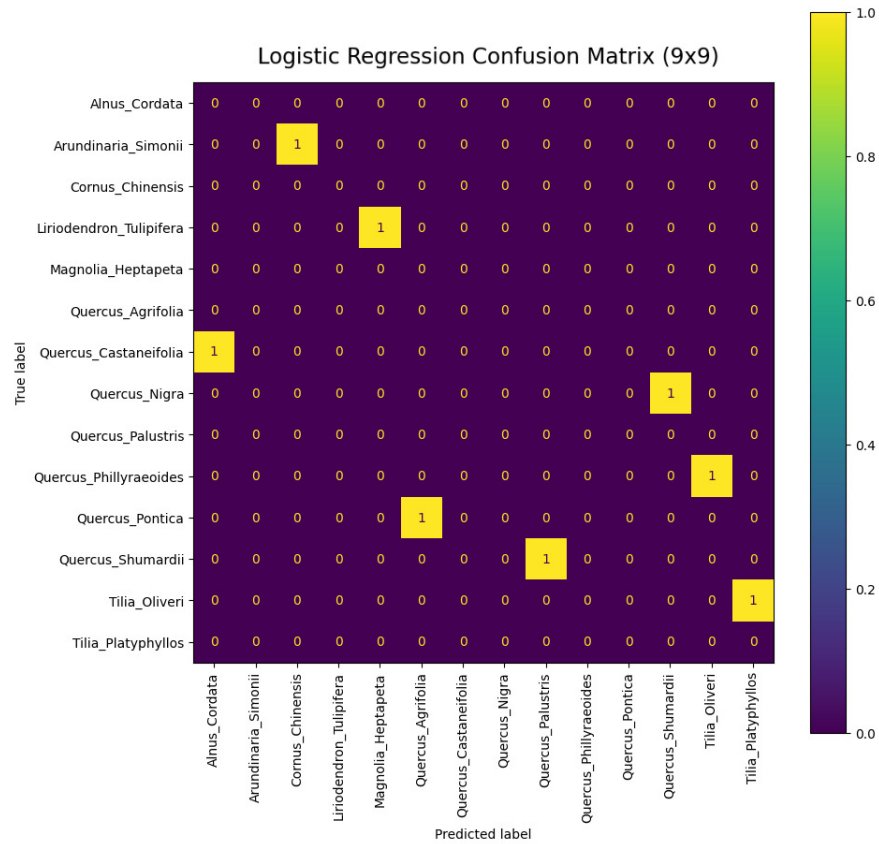


FIGURE 19 – Matrice de confusion du modèle Random Forest

Comme observé précédemment via les métriques de performances, nous voyons que les erreurs de prédictions sont très rares et ne sont pas concentrées sur une classe en particulier.

**Conclusion** Pour conclure, le modèle de régression Random Forest s'est révélé très performant pour résoudre notre problème de classification.

Les meilleurs hyperparamètres trouvés sont la profondeur  $\text{max\_depth} = \text{None}$ , le nombre minimal d'échantillons requis pour division  $\text{min\_samples\_split} = 5$  et le nombre d'arbres de la forêt  $\text{n\_estimators} = 80$ , avec un score de précision de 91,7% sur les données d'entraînement, et des métriques de performance allant de 97 à 98% sur les données de test.

En analysant les courbes de performances en fonction de la profondeur maximale et du nombre d'estimateurs, nous avons constaté que la profondeur maximale a un impact significatif sur les performances d'entraînement. Pour le nombre d'arbres, bien que le score augmente avec leur nombre, la croissance est faible, suggérant un intervalle optimal entre 60 et 100 arbres. L'évaluation sur un ensemble de test montre des performances très satisfaisantes, avec des moyennes de précision, rappel et f1-score toutes supérieures à 97%. Les boxplots associés confirment la robustesse du modèle, avec très peu de valeurs aberrantes. Seules 14 classes sur 99 présentent des f1-scores non parfaits, indiquant des points d'amélioration possibles malgré la performance globalement élevée du modèle.

En examinant la matrice de confusion, nous constatons que les erreurs de prédiction sont rares et dispersées, attestant de la qualité du modèle Random Forest dans notre contexte. En conclusion, notre modèle Random Forest s'est montré très performant et efficace pour notre jeu de données, s'adaptant parfaitement à la grande



diversité de classes existantes. La flexibilité que donnée par l'absence de profondeur d'arbre a joué un rôle important pour arriver aux performances obtenues, en plus de la robustesse habituelle d'une méthode telle que Random Forest.

### 3 Conclusion

classifieur	knn	logistique	svm	adaboost	arbre de decision	forêt aléatoire
précision	96,397	93.822	95,522	97,593	71,125	97,811
recall	95,286	92.929	93,603	96,633	66,33	97,306
f1_score	95,005	92.350	93,271	96,518	66,365	97,249

FIGURE 20 – tableau récapitulatif des performances globales des différents classifieurs

Comme on peut le voir sur le tableau récapitulatif ci-dessus, la forêt aléatoire présente les meilleurs performances suivi de peu par l'adaboost pour notre jeu de données, l'arbre de décision lui n'est adapté. Cela dit, chaque classifieurs possède ses forces et ses faibles et c'est à travers de la nature de nos données que l'on doit chercher le plus optimal pour le problème de classification.