

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

FACULTÉ DES ARTS ET DES SCIENCES

DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE ET DE RECHERCHE
OPÉRATIONNELLE (DIRO)

Rapport de stage
**Évaluation du risque de retour à
la maison**

Auteur :

Vilon SAINT-FLEUROSE
MSc, informatique
Université de Montréal

Directeur de recherche :

Dr. Michalis FAMELIS
Professeur adjoint
Université de Montréal

Superviseur :

Nicolas COALLIER
Vice-Président Exécutif,
TIC
ML+

13 juillet 2018

Table des matières

Remerciements	3
Table des figures	5
Liste des tableaux	6
Résumé	7
1 Introduction générale	8
1.1 Contexte	8
1.2 Ingénierie des exigences	9
2 Contexte théorique	14
2.1 Introduction	14
2.2 Sciences des données	15
2.3 Vue d'ensemble sur Machine Learning	19
2.4 Conclusion	30
3 Approche : Construction du modèle machine learning	31
3.1 Introduction	31
3.2 Collecte de notre ensemble de données	34
3.3 Exploration de notre ensemble de données	35
3.4 Nettoyage de notre ensemble de données	38
3.5 Transformation de notre ensemble de données	40
3.6 Modélisation des données	41
4 Implémentation de l'outil Ortho	47
4.1 Introduction	47
4.2 Construction de l'API Ortho	48
4.3 Déploiement de notre système	52

5	Évaluation	54
5.1	Évaluation du modèle machine learning	54
5.2	Evaluation de notre API Ortho	55
5.3	Limitations et travaux futurs	56
6	Travaux connexes	58
7	Conclusion générale	62
A	Annexe A	65
	Bibliography	71
	Bibliographie	71

Remerciements

Je veux commencer d'abord par remercier le Grand Dieu Tout-Puissant, le Créateur de l'univers, des cieux et de la terre qui m'a donné la vie, la santé, les opportunités et tout ce dont j'avais besoin pour faire cette grande et belle étude à l'université de Montréal. Il a rendu toutes choses possibles en ma faveur, moi qui suis pécheur et désobéissant ; immérité de toutes ces grâces. Il m'accompagnait toujours dans les moments les plus difficiles de ma vie, Il ne m'a jamais laissé seul ; surtout dans les moments où je devais payer les frais de scolarité qui étaient si énormes et impossibles à payer de mon propre compte. A un Dieu si merveilleux et si bon, je Lui dois beaucoup de reconnaissance.

Je remercie aussi ma femme qui m'a beaucoup supporté pendant plus de deux années d'études. Elle n'a jamais murmuré, ni découragé quand nous devions passer par des moments difficiles de notre vie conjugale à cause de ces études. Elle a mis toutes ses ressources disponibles pour entretenir la famille et payer mes études quand j'étais moi-même dans l'impossibilité de travailler. Vraiment, ma femme est une bénédiction dans ma vie, un cadeau venant de Dieu. Je t'aime ma chérie.

Je tiens à remercier le professeur Michalis Famelis d'avoir accepté être mon directeur de recherche et supervisé ce stage, il est toujours là pour m'encourager et me pousser vers l'avant. Il répond toujours présent à tous mes appels, il est toujours disponible pour me rencontrer, me parler et me conseiller ; même en dehors du cadre universitaire.

Je remercie Nicolas Coallier et toute l'équipe ML+ qui ont accepté que je sois leur stagiaire, ils ont placé leur confiance en moi quoiqu'ils ne me connaissent pas encore. Cette équipe, quoique jeune, est très dynamique et chaleureuse, c'est une équipe motivante qui stimule la connaissance. J'ai dû apprendre beaucoup de choses par rapport à eux. Finalement, je présente mes sincères remerciements à toute la communauté universitaire, à DIRO en particulier. Merci pour la formation prestigieuse que vous m'avez fournie. Cette formation est si solide qu'elle m'aidera rapidement à intégrer le marché du travail sans perdre de temps.

Préface

Nous développons ce rapport en vue d'achever notre étude de maîtrise en informatique faite à l'université de Montréal. Nous avons inscrit notre maîtrise avec option stage, ce qui exige la rédaction d'un rapport au terme de ces études. Nous avons, d'abord réalisé le stage à l'entreprise ML+ située à l'adresse suivante : 338, rue St-Antoine est, Montréal. C'est une jeune entreprise dynamique et spécialisée en science de données. Elle développe des outils pour aider les entreprises à prendre leurs décisions stratégiques tout se basant sur des données historiques des entreprises.

C'est une expérience enrichissante d'avoir eu l'opportunité de faire ce stage dans cette entreprise, j'ai pu apprendre beaucoup de choses tant sur machine learning que sur les sciences de données en général. Ces connaissances acquises m'ont ouvert la porte pour pouvoir rédiger ce rapport. Ce dernier permet d'évaluer le risque d'un patient de retourner chez lui après une opération contre l'arthrose (douleur ressentie au niveau des os).

Table des figures

1.1	A use-case diagram for describing our API Ortho	11
1.2	A use-case diagram for describing our Machine Learning System . .	13
2.1	Cycle de travail d'un scientifique de données	17
2.2	Vue globale de Machine learning [27]	21
2.3	Confusion Matrix representation [32]	26
3.1	Diagramme de classe de notre modèle machine learning	33
3.2	Présentation réelle de notre ensemble de données	36
3.3	Vue générale de la corrélation nos variables	45
3.4	Approach to Ensemble based Methodologies [33]	46
4.1	Django Framework web architecture [19]	49
4.2	Class diagram of our Ortho API	49
4.3	Connexion between our API and machine learning system	51
4.4	A deployment diagram of our tool	53
5.1	Sequence diagram for evaluating our API tool	57

Liste des tableaux

2.1	Échantillon de l'ensemble de données <i>California Housing Prices</i> . . .	23
2.2	Échantillon de l'ensemble de données <i>California Housing Prices</i> . . .	23
3.1	Exploration basique de notre ensemble de données	36
3.2	Description de notre variable cible	37
3.3	Comparison of ensemble methods algorithms used in our project . .	44
5.1	Gives different results of our model evaluation	55
A.1	Our whole dataset	70

Résumé

L'arthroplastie totale de la hanche et du genou permet à diminuer considérablement la douleur et améliore la fonction chez les personnes atteintes d'arthrose avancée. Selon une étude publiée en 2012 dans le journal ISRN Orthopedics, les auteurs Bronislava Bashinskaya et al. [3] ont constaté que : «Le vieillissement de la génération du "baby boom", combiné au désir de maintenir un mode de vie actif et sans douleur, entraînera une augmentation du nombre annuel de chirurgies de remplacement articulaire pratiquées dans États Unis». Dans un rapport publié en Avril 2007 par les orthopédistes Steven M Kurtz, Kevin Ong, Edmund Lau et Michael T Halpern [20], membres de l'Académie américaine des chirurgiens orthopédiques, ils ont prédit que : «D'ici 2030, la demande d'arthroplasties totales de la hanche totale devrait augmenter de 174% pour atteindre 572 000. La demande pour les arthroplasties totales du genou primaire devrait augmenter de 673% à 3,48 millions de procédures ». Face à l'augmentation continue du nombre de chirurgies de remplacement, il devient crucial aux administrateurs des hôpitaux de déterminer si les patients doivent rester à l'hôpital pour une réadaptation après leur chirurgie ou s'ils doivent être renvoyés à la maison puisque les coûts associés à une réadaptation doivent être pris en charge par les hôpitaux. Il est important de souligner que la majorité des compagnies d'assurance santé aux États Unis n'assument pas les coûts liés à la réadaptation des patients. Ces frais qui sont très élevés (entre 15,000 à 30,000 \$ par patient) doivent être assurés par les hôpitaux. Pour prendre la décision de retour ou non, les chirurgiens tiennent compte des antécédents médicaux du patient et l'état de santé du patient après l'arthroplastie, ce qui est un travail difficile à effectuer manuellement puisque le nombre de patients dans une base de données orthopédiques sont très nombreux. Dans notre projet de stage, nous avons développé un modèle de machine learning (ML) qui aide à prendre cette décision de façon automatique. Nous avons aussi construit un web API qui fait la connexion avec le modèle, ce qui est utile pour les orthopédistes qui n'ont pas de connaissances en ML. On a conçu un interface utilisateur qui rend notre système convivial et facile à utiliser.

1 | Introduction générale

1.1 Contexte

Le système de santé américain est contrôlé en majeure partie par des compagnies privées, le gouvernement américain ne finance qu'une partie minoritaire de la population. Ce système repose sur deux sources de financement. D'abord on a le financement public géré par le programme fédéral Medicare qui vise seulement les personnes âgées de plus de 65 ans et celles qui sont gravement handicapées. D'après Europusa [17], une compagnie européenne spécialisée dans l'accompagnement des européens qui veulent immigrer aux états-unis : « Cette source de financement couvre 26% de la population américaine dont 15 % sont des personnes âgées et handicapées et 11% sont des familles pauvres avec enfants. ». La deuxième source de financement qui est un financement privé touche tout le reste de la population soit 74%. L'assurance est donc majoritairement privée aux Etats-Unis. Les Américains sont assurés en général via leurs employeurs ou sinon de manière individuelle lorsque leur employeur ne propose pas d'assurance ou qu'ils travaillent comme travailleurs autonomes. La composante « assurance médicale » dans le choix d'un emploi est donc un critère important. En général le système de santé américain est échoué parce qu'une grande partie de la population se retrouve sans assurance santé. C'est un système libéral fondé sur le principe du marché et de la concurrence qui s'organise autour d'assurances privées souvent liées à l'emploi et d'une assurance maladie obligatoire.

Les compagnies d'assurance santé américaines ne couvrent pas les coûts associés à une réadaptation d'un patient après une arthroplastie (Opération ayant pour but de rétablir la forme et la mobilité d'une articulation abîmée ou bloquée.). Il revient à l'hôpital de couvrir ces coûts qui sont très élevés. Selon le docteur orthopédiste Jonah Hebert-Davies qui a fait ses études de spécialité en Orthopédie à l'université de Seattle, Washington aux États-Unis ¹, les coûts estimés sont entre

1. Pour informations sur la bibliographie du docteur, consultez <http://www.orthop.washington.edu/?q=faculty-profiles/jonah-hebert-davies-md-frcsc.html>

15,000 \$ à 30,000 \$ par patient. Ce qui revient à une grande perte financière pour les hôpitaux. La décision de maintenir ou de renvoyer un patient après une arthroplastie devient une question préoccupante dans la mesure où elle pourrait réduire le coût budgétaire des hôpitaux. Si la décision prise est de renvoyer le patient, l'hôpital est le gagnant sinon il est le perdant.

D'autres part, l'arthrose (maladie qui touche les articulations et caractérisée par la douleur et la difficulté à effectuer des mouvements articulaires [36]) touche environ 27 millions d'adultes aux États-Unis [22]. Ce qui augmente considérablement le nombre d'arthroplastie dans les hôpitaux, et aussi le poids de travail des médecins à savoir quand est-ce qu'il ya une réadaptation ou non.

Il est un travail fastidieux pour les spécialistes orthopédistes de vérifier manuellement les données médicales d'un patient pour pouvoir décider s'il doit être renvoyé ou non. Ce travail consiste en ce que les données médicales d'un dossier patient sont très volumineuses. Seulement pour déterminer les conditions médicales antécédentes du patient, quarante six (46) colonnes pré-opératoires (C'est-à-dire les conditions de santé du patient avant une opération arthroplastie) doivent être prises en compte. Pour calculer les conditions médicales, le médecin orthopédiste doit additionner toutes les valeurs des colonnes pré-opératoires après avoir substitué ces valeurs soit par un(1), soit par deux(2) ou par trois(3) comme expliqué à la section de feature engineering. En plus de calculer les conditions médicales, il y a d'autres calculs à faire comme déterminer le niveau diagnostique du patient en se basant sur les trois niveaux diagnostiques existant dans l'ensemble de données. Toutes ces démarches sont expliquées en détail dans la section de feature engineering.

Considérant le nombre grandissant d'arthroplastie dans les hôpitaux américains et tous les travaux manuels qu'un orthopédiste doit réaliser avant de décider le retour ou non d'un patient à la maison, nous estimons que créer un outil pour automatiser cette tâche est un projet pertinent. Le but de notre stage consiste à développer cet outil-là qui aidera les orthopédistes américains à prendre cette décision de façon automatique et sans perdre de temps.

1.2 Ingénierie des exigences

Nous supposons qu'il existe déjà un jeu de données disponibles contenant toutes les informations touchant un grand nombre de patients et que chaque échantillon de ce jeu de données est un dossier patient. Nous supposons aussi que ce jeu de

données possède des caractéristiques suffisantes pour décider si un patient doit être renvoyé ou non. Nous considérons aussi que ce jeu de données est composé de patients qui font l'objet d'une décision de retour. Si toutes ces conditions sont réunies, nous pouvons profiter des différentes technologies de la science de données, du *marking learning* et l'ingénierie de logiciels pour développer un outil d'aide à la décision qui aide les orthopédistes à prendre la décision de retour automatiquement.

Les technologies de la science de données sont conçues pour développer des outils qui permettent de prendre des décisions à partir d'un ensemble de données existantes. Le *machine learning* qui est un sous-ensemble de la science de données permet de modéliser à partir du même ensemble de données. Dans le chapitre 2, nous expliquons le cycle de vie du travail du *data scientist* en détail. Ce que nous proposons comme solution dans notre projet. Nous avons réalisé ce cycle complet pour implémenter notre système d'aide à la décision.

Il y a deux grandes phases impliquées dans le processus de développement de notre projet. La première phase est la construction d'un modèle *machine learning* et la deuxième est le déploiement du modèle construit, cette phase consiste en la création d'un API nommé *Ortho*, c'est une phase d'ingénierie de logiciels. Pour les deux phases, nous avons créé deux diagrammes, un diagramme de cas d'utilisation qui donne une vision globale du comportement fonctionnel de notre système et un diagramme d'états qui explique le processus du développement du modèle. Nous donnons une brève explication de chaque diagramme et leurs différents composants.

Nous commençons d'abord par le diagramme de cas d'utilisation. Il consiste en la phase de déploiement du modèle. Ce diagramme explique comment les orthopédistes peuvent utiliser notre système. la figure 1.1 représente une vue de notre diagramme, chaque cas représente une unité discrète d'interaction entre un utilisateur (*Orthopédiste* ou *administrateur*) et notre système. Voici une brève explication des acteurs et de chaque cas :

1. **Actors.** Les acteurs sont des orthopédistes et les administrateurs du système qui sont des orthopédistes ayant des droits et privilèges d'évaluer, de suivre et de gérer le modèle déployé ;
2. **Predict.** Les orthopédistes peuvent utiliser cette section en vue de prédire si les patients doivent rester à l'hôpital ou retourner chez eux. Pour accomplir cette tâche, il est obligatoire de remplir un formulaire.
3. **Fill form.** Pour prédire, il faut remplir le formulaire qui contient les informations du dossier médical du patient. On recueille les informations pertinentes

pour la prise de décision telles que les conditions médicales, les diagnostics antérieures, l'indice de masse corporelle (BMI en anglais) etc.

4. **Evaluate.** Permet d'évaluer le modèle sur de nouvelles données prédites. On peut comparer l'évaluation faite au moment de la construction du modèle et celle faite au moment de la prédiction. L'évaluation exige une authentification.
5. **Monitor.** Permet de suivre périodiquement le modèle pour déterminer si les performances s'améliorent ou si elles détériorent. Exige une authentification.
6. **Manage.** Permet d'optimiser le modèle sur de nouvelles données en essayant d'utiliser de nouveaux hyper-paramètres en vue de comparer les résultats. Exige une authentification.
7. **Authenticate.** Permet l'authentification du système. Exige un nom utilisateur et un mot de passe.

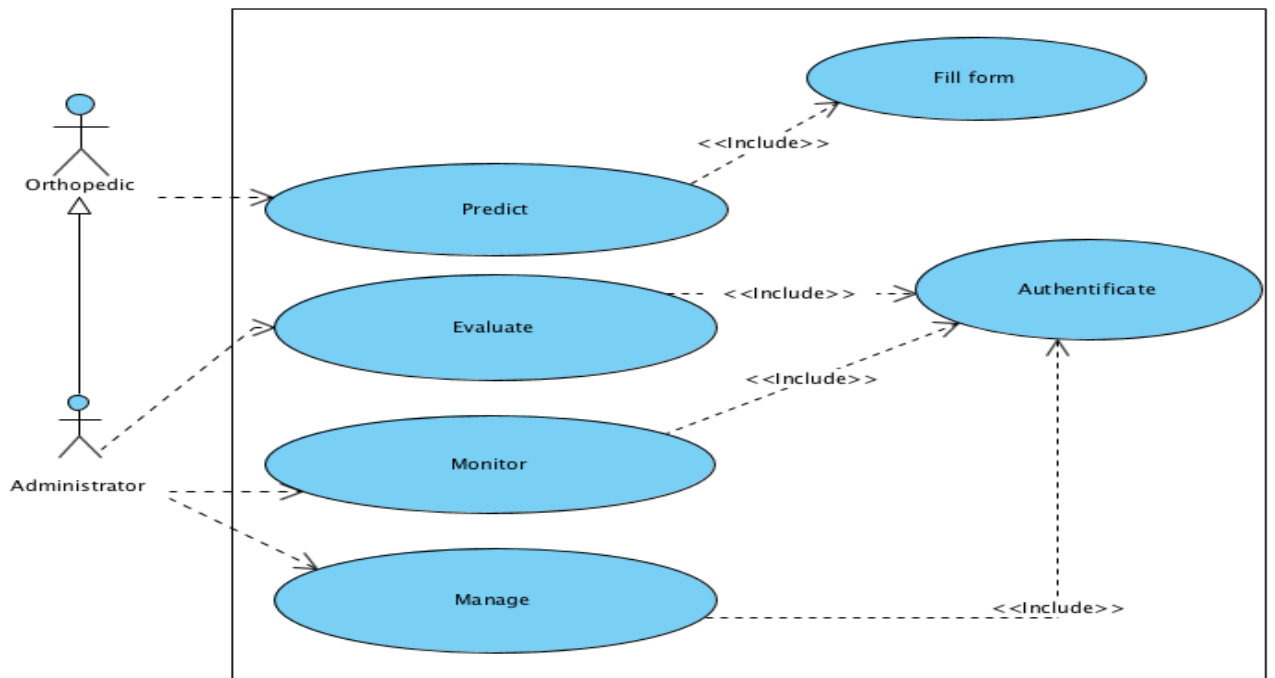


Fig. 1.1 – A use-case diagram for describing our API Ortho

Nous poursuivons avec le diagramme d'états présenté dans la figure 1.2. Il décrit les différents états qui constituent le développement de notre modèle ML. Voici un bref résumé de ce fait chaque état :

1. **API Ortho.** L'API fait la connexion entre le système du machine learning et le système du déploiement. Il accède au modèle qui a été sérialisé.

2. **Gather.** Permet de récupérer les données du dataset ;
3. **Clean.** Permet de nettoyer les données en imputant les données nulles et en supprimant les variables que ne sont pas pertinentes ;
4. **Explore.** Permet d'explorer les données pour voir les différentes corrélations qui existent entre les variables et l'étiquette ;
5. **Transform.** Création de nouvelles variables en fonction de celles qui existent déjà dans l'ensemble des données.
6. **Preprocess.** Un pré-traitement des données avant de les envoyer à l'algorithme de machine learning. Par exemple, les algorithmes de machine learning ne traitent pas les textes, il faut les convertir en valeurs numériques avant de les envoyer aux algorithmes.
7. **Train.** C'est la phase d'entraînement de modèles pour déterminer lequel est meilleur pour notre ensemble de données.
8. **Serialize.** Sauvegarde le meilleur modèle pour son utilisation future.

La suite de ce rapport est composé de plusieurs chapitres et chaque chapitre a des sections, subsections etc. Le chapitre 2 donne un contexte théorique des différents éléments qui sont importants pour notre projet. Le chapitre 3 décrit en détail la construction de notre modèle machine learning. Le chapitre 4 décrit la création de l'outil Ortho qui fait la connexion avec le modèle machine learning. Le chapitre 5 montre comment nous évaluons les différents évaluations morceaux de notre système. Le chapitre 6 détaille les travaux connexes liés au développement d'API machine learning, la technique de re-échantillonnage, aux algorithmes ensemblistes etc. Le chapitre 7 fait la conclusion de notre projet.

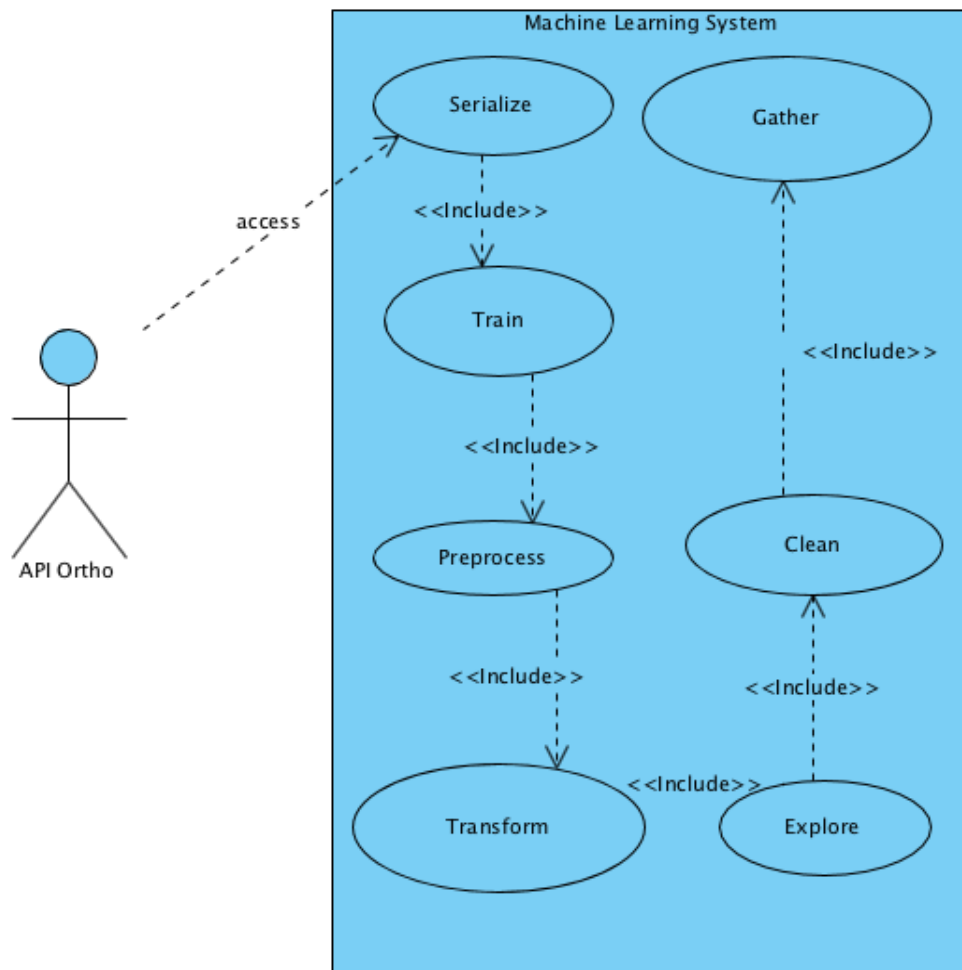


Fig. 1.2 – A use-case diagram for describing our Machine Learning System

2 | Contexte théorique

2.1 Introduction

Tout projet informatique suppose qu'on doit délivrer un produit fini et utilisable accomplissant un certain nombre d'objectifs. Il y a toujours une équipe qui travaille durement pour réaliser ou implémenter ces genres de projets. Tout développement informatique passe nécessairement par la pratique ce qui exige souvent l'application de beaucoup de concepts étudiés en théorie. Dans tout rapport portant sur la réalisation d'un projet scientifique et technique, il s'avère utile et important d'établir un contexte théorique dans le but de faire ressortir les différents cadres théoriques. Nous allons, dans ce chapitre, présenter quelques concepts théoriques importants abordés dans le cadre de notre projet.

Généralement, nous nous mettons l'accent sur un sous-ensemble de tous les concepts jugés pertinents pour la réalisation de notre projet. Par exemple, le machine learning est un champ de recherche informatique de plusieurs décennies de travaux de recherche, il est impossible de d'aborder dans un seul chapitre tout ce qui a trait au ML, par contre nous nous concentrons sur les éléments les plus essentiels pour notre projet.

La suite de ce chapitre se subdivise comme suit : la deuxième section est une approche globale sur les sciences de données. Nous estimons que c'est important parce qu'aucun modèle de machine learning ne peut être construit sans d'abord réaliser une phase d'exploration de données ; or les sciences de données peuvent être définies comme étant une combinaison entre l'exploration de données et la modélisation de données. La troisième section se porte sur le machine learning qui est le cœur même de notre projet ; comme on avait précisé au paragraphe antérieur, nous considérons seulement un sous-ensemble de concepts jugés utiles pour notre projet. La quatrième traite du problème de classification en ML ; puisque notre projet était un problème de classification, nous décidons de le consacrer une section indépendante. La cinquième et dernière se porte sur les classes déséquilibrées car notre ensemble de données était déséquilibrée.

2.2 Sciences des données

On ne peut pas parler de machine learning sans avoir parlé des sciences de données. Car la modélisation des données est une étape des sciences de données, quoique la plus importante. Les sciences de données nous permettent de prendre un ensemble de données brutes, les explorer et les modéliser dans le but d'extraire des connaissances utiles à la prise d'une décision. Comme son nom l'indique, la science des données n'est possible que lorsqu'on dispose d'un jeu de données qu'on appelle données historiques. Ces dernières sont des données recueillies à partir de la collecte d'informations. Les données peuvent être sous diverses formes, structurées ou non. D'une façon générale, pour traiter un problème en sciences de données, trois conditions sont nécessaires : (1) il faut avoir les données disponibles dans un format adéquat ; (2) définir des objectifs précis de ce qu'on veut faire avec les données ; (3) et savoir comment est-ce qu'on va procéder pour réaliser ces objectifs.

Les sciences de données peuvent être considérées comme une jonction entre l'informatique et les statistiques. Du côté de l'informatique, c'est la modélisation de données et tandis que du côté des statistiques, c'est l'exploration des données. Nous définissons la modélisation comme étant l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage sur un ensemble de données bien préparé ; on entend par *bien préparé*, quand un jeu de données ne contient pas des données nulles, vides et textuelles. Quant à l'exploration, c'est la phase de visualisation et de préparation des données brutes qui peuvent être sous diverses formes.

Les sciences de données offrent des méthodes automatisées pour l'analyse prédictive d'un ensemble de données généralement massif. Le but est d'apporter des solutions à des problèmes spécifiques. Au début de l'ère de l'intelligence artificielle, l'analyse des données massives était compliquée parce que la capacité de calcul des ordinateurs était faible. Avec l'augmentation exponentielle des capacités de ordinateurs, l'explosion quantitative des données numériques devient de moins en moins un problème. Il faut noter qu'en Machine Learning, plus on a de données, plus l'analyse prédictive est fiable. Les algorithmes d'apprentissage fonctionnent mieux avec de grandes quantités de données. Quand le jeu de données est volumineux, on peut faire facilement la validation croisée qui est une technique par laquelle on subdivise aléatoirement un ensemble de données en plusieurs parties dans le but d'obtenir un meilleur apprentissage. La grande quantité de données permet aussi une séparation de données adéquate entre l'ensemble d'entraînement et l'ensemble de test.

Grâce à la croissance de la capacité de stockage des ordinateurs, l'apparition

des algorithmes d'apprentissage puissants et la puissance de calcul des ordinateurs, la profession de *scientifique de données* a vu le jour. Yannis Chaouche¹, professeur et expert en machine learning, a publié sur le site web OpenClassrooms, un cours intitulé «*Initiez-vous au machine learning*» où il a défini le cycle de travail d'un scientifique de données. D'après lui ce cycle comprend :

1. *la récupération des données utiles à l'étude ;*
 2. *le nettoyage des données pour les rendre exploitables ;*
 3. *une longue phase d'exploration des données afin de comprendre en profondeur l'articulation des données ;*
 4. *la modélisation des données ;*
 5. *l'évaluation et interprétation des résultats ;*
 6. *la conclusion de l'étude : prise de décision ou déploiement en production du modèle.*
- (Professeur Yannis Chaouche)

La figure [25], implémentée par le professeur Yannis, nous donne une vue générale du travail d'un scientifique de données. Cette figure est une façon de schématiser les différentes étapes qu'on a définies précédemment. Comme stagiaire en science de données, nous avons suivi minutieusement, dans le cadre de notre projet, le cycle de travail complet défini par le professeur Yannis. Depuis la récupération des données jusqu'au déploiement d'un système en production. Nous expliquerons en détail dans les deux prochains chapitres comment nous implémentons ce cycle au sein de notre projet.

2.2.1 Données.

Comme nous avons précédemment dit, les données sont éminentes pour un travail de scientifique de données. S'il n'y a pas de données ou si elles ne sont pas disponibles, on ne peut rien faire. Dans les organisations les données n'ont pas les mêmes niveaux d'importance, par exemple les données juridiques sont de haute confidentialité, personne ne peut avoir accès à moins que les concernés donnent une autorisation légale. Il est toujours difficile d'obtenir les données parce que cela peut compromettre une institution ; souvent il faut signer un contrat de confidentialité qui prévoit une sanction sévère s'il y a une violation. Les données constituent la ressource principale pour qu'un scientifique de données puisse effectuer son travail correctement.

1. <https://openclassrooms.com/courses/initiez-vous-au-machine-learning/comment-resoudre-un-probleme-de-data-science>

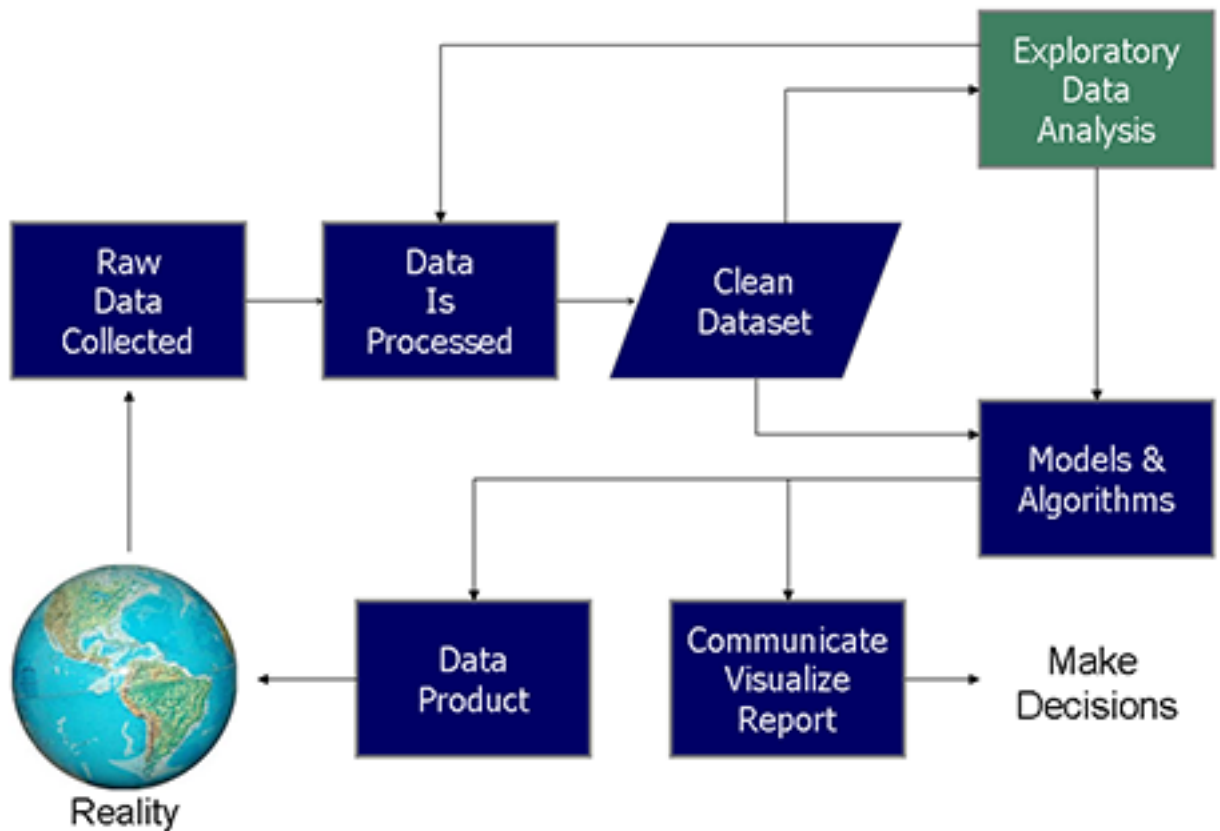


Fig. 2.1 – Cycle de travail d'un scientifique de données

2.2.1.1 Types de données

Les données, de part leurs natures, peuvent être quantitatives ou qualitatives. Pour mieux explorer un ensemble de données, il faut savoir distinguer le type de chaque donnée. Quand on parle de type de données ici, il ne faut pas confondre avec type de données qu'on a l'habitude d'utiliser en programmation informatique dans les langages à typage dynamique ; mais il faut les considérer d'un point de vue ML.

Données quantitatives. Les données quantitatives sont des données qu'on peut mesurer ou qui peuvent prendre une valeur quelconque, avec lesquelles on peut faire des calculs numériques tels que la moyenne, l'addition, la multiplication, la division

entre autres. Ces types de données permettent de répondre à la question du type «combien ». Par exemple combien de patients y-a-t-il dans la base de données? La réponse pourrait être 3200 qui est une donnée quantitative. Il existe deux catégories de données quantitatives : données quantitatives continues et données quantitatives discrètes. Les premières peuvent n'importe quelle valeur dans un ensemble de valeurs, par exemple la température, le PIB, le taux de chômage etc. Les deuxièmes ne prennent qu'un nombre limité de valeur dans un ensemble de valeur, par exemple le nombre d'enfants dans une famille, le nombre de chambres dans un appartement etc.

Données qualitatives. Les données qualitatives décrivent les qualités ou les caractéristiques. On ne peut pas les compter ni faire de calcul avec ces données, on peut les comparer ou éventuellement les trier. Les valeurs qualitatives ne peuvent pas être des nombres, sinon un ensemble de modalités; elles permettent de répondre à la question de la forme «Quel type »ou «Quelle catégorie ». On distingue aussi deux catégories de données qualitatives : données qualitatives nominales (ou catégorielles) et données qualitatives ordinales. Les premières catégories sont celles dont les modalités ne peuvent être ordonnées, par exemple la couleur des yeux, le sexe, la région d'appartenance etc. Les deuxièmes catégories peuvent être ordonnées selon un ordre logique, par exemple les tailles des vêtements, le degré d'accord à un test d'opinion (fortement d'accord, d'accord, pas d'accord ou fortement pas d'accord). [28, p. 12]

2.2.2 Problématique.

Tout projet de science de données suppose la résolution d'un problème, ce genre de projets commencent toujours par le constat d'un problème. Il faut qu'on soit en mesure de définir clairement ce qu'on veut résoudre et comment on va le résoudre. Généralement, cela demande qu'on s'asseye avec les responsables des organisations, de faire des entrevues avec eux afin de prendre connaissance des différents besoins et d'établir le pourquoi du projet. S'il n'y a pas une problématique clairement définie, le projet de science de données est impossible.

Pour conclure la section sur les sciences de données, la chose la plus importante à retenir c'est que deux conditions doivent être réunies pour qu'un projet de sciences de données soit possible : un jeu de données disponible et une définition claire des problèmes à résoudre. Pour notre projet nous avons disposé d'un ensemble de données orthopédiques et tous les objectifs étaient bien élaborés.

Dans la section qui suit nous allons voir une brève introduction sur ce quoi le machine learning, ensuite un survol sur les concepts fondamentaux du ML et finale-

ment nous nous concentrerons sur un sous-ensemble de concepts qui touchent notre projet, principalement le problème de classification. Nous n'aborderons pas dans ce rapport, la théorie sur l'exploration des données (*data mining en anglais*). Nous supposons que ceux qui lisent ce rapport ont déjà des notions élémentaires sur cette question, sinon vous pouvez consulter des documents les livres suivants : «Data mining and statistics for decision making »écrit par Stephane Tuffery ; «Principles of data mining »écrit par David Hand, Heikki Mannila et Padhraic Smyth.

2.3 Vue d'ensemble sur Machine Learning

Dans la section précédente, nous avons pu y voir plus clair sur le cycle global de travail du data scientist. Nous allons maintenant parler du machine learning dans cette section, c'est à dire la modélisation des données. Nous utilisons le machine learning probablement des dizaines de fois par jour sans même le savoir. Chaque fois que nous effectuons une recherche Web sur Google ou Bing, cela fonctionne si bien c'est parce que leur logiciel de machine learning a trouvé comment classer les pages. Lorsque Facebook ou l'application photo d'Apple reconnaît nos amis dans nos images, c'est aussi du machine learning. Chaque fois que nous lisons notre courrier électronique et qu'un filtre anti-spam nous évite d'avoir à parcourir des tonnes de spam, c'est parce que nos ordinateurs ont appris à distinguer le spam du courrier non-spam. Donc, c'est du machine learning. En 1997, Tom Mitchell, dans son livre «Machine Learning »a proposé une définition plus précise :

«On dit qu'un programme informatique apprend de l'expérience E par rapport à une certaine classe de tâches T et à la mesure de performance P , si sa performance aux tâches dans T , telle que mesurée par P , s'améliore avec l'expérience E ».
(Tom Mitchell [24, p. 2])

Nous voyons dans cette définition que le programme informatique peut être n'importe quel algorithme d'apprentissage ; l'expérience est considérée comme n'importe quelle source de connaissances auxquelles un algorithme est obligé d'apprendre, par exemple un même algorithme peut apprendre à partir des données de finance, biologie, médecine etc. ; La mesure de performance consiste à améliorer les résultats d'un algorithme tout en conservant la même expérience.

La figure 2.2 nous montre en grosso modo les techniques du machine learning, à un très haut d'abstraction. Deux grandes techniques de machine learning sont définies : Apprentissage supervisé (**Supervised learning en anglais**) et l'apprentissage non-supervisé (**Unsupervised learning en anglais**). L'apprentissage supervisé est une technique d'apprentissage avec des données étiquetées,

il existe deux types de problèmes possibles dans l'apprentissage supervisé : problème de régression qui consiste à prédire une valeur numérique comme le prix d'un appartement dans une région géographique quelconque ; et le problème de classification qui consiste à prédire une valeur booléenne (oui ou non), par exemple on peut vouloir savoir si une campagne marketing pourrait être une réussite ou un échec. L'apprentissage non-supervisé est une technique d'apprentissage non étiquetée, c'est l'idée de groupe (**Clustering en anglais**) qui prédomine. Cette figure donne une vue générale sur ce qu'est le machine learning.

Le machine learning constitue une manière de modéliser des phénomènes, dans le but de prendre des décisions stratégiques. Les algorithmes utilisés permettent, dans une certaine mesure, à un système piloté par ordinateur (un robot éventuellement), ou assisté par ordinateur, d'adapter ses analyses et ses comportements en réponse, en se fondant sur l'analyse de données empiriques provenant d'une base de données ou de capteurs. La difficulté réside dans le fait que l'ensemble de tous les comportements possibles compte tenu de toutes les entrées possibles devient rapidement trop complexe à décrire (**on parle d'explosion combinatoire**). On confie donc à des programmes le soin d'ajuster un modèle pour simplifier cette complexité et de l'utiliser de manière opérationnelle. Idéalement, l'apprentissage visera à être non supervisé, c'est-à-dire que la nature des données d'entraînement n'est pas connue [35].

2.3.1 Phases de modélisation d'un problème ML

Nous avons mentionné dans la section 2.2 portant sur les Sciences de données, qu'aucun projet de sciences de données n'est possible s'il n'y pas une problématique bien définie. Et s'il existe un problème, il existe aussi des moyens de le résoudre. Le cycle de travail d'un scientifique de données énuméré dans la section 2.2 peut être comme les principales techniques de résolution d'un problème. Dans ce cycle de travail, il y a la technique de modélisation, voyons maintenant les deux phases nécessaires à la modélisation :

1. **Phase d'entraînement.** Phase dans laquelle on dispose d'un ensemble de données d'entraînement (**trainset en anglais**) constitué de variables prédictives et une variable cible² ; les données d'entraînement proviennent des expériences antérieures. Durant cette étape l'algorithme d'apprentissage ne fait que d'apprendre à partir des exemples des données d'entraînement, il ne retourne aucune valeur. C'est pendant cette phase que la fonction d'hypothèse h (ou fonction de prédiction) est sélectionnée dans l'espace des hypothèses \mathcal{H} .

2. Les variables cibles peuvent aussi appeler *étiquettes*

2. **Phase de prédiction.** Dans la prédiction, on dispose d'un nouvel ensemble de données où les valeurs cibles ne sont pas connues et ce sont ces valeurs qu'on doit prédire. Dans ce cas la fonction de prédiction est utilisée pour calculer toutes les valeurs possibles de la variable cible et son entrée est l'ensemble des variables prédictives.

Dans la pratique, obtenir de nouvelles données est une tâche très difficile, peut prendre plusieurs mois d'attente. Par conséquent quand on a un ensemble de données, il est recommandé au scientifique de données, au moment où il construit son modèle, de le répartir en deux : données d'entraînement et données de test. L'ensemble des données d'entraînement est utilisé dans la phase d'entraînement et celui des données de test dans la phase de prédiction. Habituellement on conserve 80% des données pour l'entraînement et 20% pour le test.

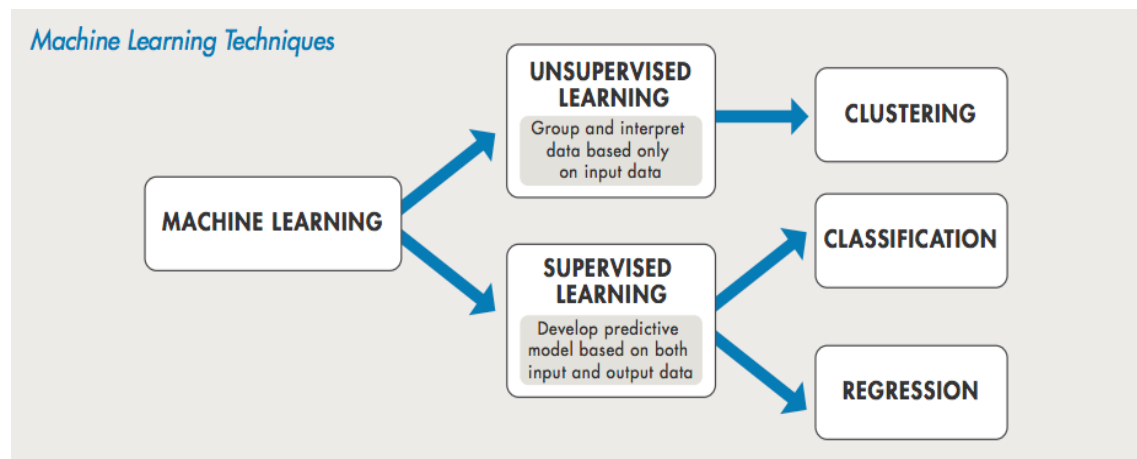


Fig. 2.2 – Vue globale de Machine learning [27]

Pour continuer nous allons passer en revue les différents types de techniques de machine learning apparues dans la figure 2.2. Elles constituent la base du machine learning. Aussi nous verrons quelques concepts importants découlés de chaque type. Nous donnerons une brève introduction de chaque thème jugé important pour la suite de ce rapport. L'idée n'est pas de tout détailler mais de présenter un aspect global de chaque concept pour faciliter la compréhension.

2.3.2 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé est formellement défini comme une fonction $h : x \rightarrow y$ où $h \in \mathcal{H}$ est la fonction d'hypothèse produite par un apprenant qui est un algorithme d'apprentissage, et \mathcal{H} est l'espace des hypothèses d'apprentissage ; x représente l'ensemble de données d'entrée de la fonction et y détermine l'ensemble

de données de sortie. La fonction d'hypothèse peut être aussi appelée fonction de prédiction, elle est sélectionnée de telle sorte qu'elle soit très rapprochée de l'ensemble de données. Une autre définition possible de l'apprentissage supervisé est un ensemble de couples d'échantillons d'entrée-sortie de la forme $(x^{(i)}, y^{(i)})$ où $x^{(i)}$ est la description d'un objet dans un espace de représentation ; $y^{(i)}$ est la variable cible désirée de l'objet ; et i est un index défini sur l'intervalle $1 \leq i \leq m$, où m le nombre d'échantillons ou d'observations dans l'ensemble de données. Le nombre de variables prédictives associées à une observation est noté comme un vecteur $\vec{x} = (x_1, \dots, x_j)$ où j est un index compris entre $1 \leq j \leq n$ et n représente la taille des variables [23, 26, 21]. Les n variables décrivant les m individus de l'ensemble de données sont représentés sous la forme d'une matrice nommée X de dimensions (m, n) qui est définie de la manière suivante :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

[28, p. 21]

et un vecteur \vec{y} défini de la manière suivante :

$$\vec{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}$$

Dans le but de faciliter la compréhension nous estimons qu'il est important de définir certains concepts utilisés dans cette définition :

- **Objet.** Un objet est une instance d'un ensemble de données, on le nomme aussi individu, observation, échantillon ou ligne.
- **Espace de représentation.** L'espace de représentation représente l'ensemble de données.
- **Variables prédictives.** L'ensemble de variables à partir desquelles on peut faire des prédictions.
- **Variable cible.** C'est une variable qu'on souhaite prédire.

Pour expliquer en clair cette définition, laissons-nous l'illustrer à travers un exemple en prenant un échantillon de l'ensemble de données « *California Housing Prices*³ ». Cet ensemble de données a été implémenté par R. Kelley Pace et Ronald

3. Cet ensemble de données est disponible sur ce site : <https://www.kaggle.com/camnugent/california-housing-prices>

Barry [2], il contient des informations sur les prix de plusieurs milliers de logements dans toutes les villes de Californie aux États-Unis. Il a 10 colonnes et 20640 lignes de données, nous l'avons utilisé dans notre stage pour mettre en pratique les différents concepts appris de ML. Pour expliquer la définition, nous choisissons seulement 5 instances de cet ensemble de données, 3 variables prédictives (*longitude*, *latitude* et *median_income*) et la variable cible qui est *median_house_value*. Le problème d'apprentissage est de prédire le prix moyen d'un logement dans une ville de Californie. L'ensemble de données de la table 2.1 est considéré comme un ensemble d'entraînement car toutes les valeurs de la variable cible sont connues. Tandis que les données la table 2.2 est l'ensemble de test puisque les valeurs de *median_house_value* sont inconnues.

longitude	latitude	median_income	median_house_value
-122.23	37.88	8.3252	452600.0
-122.22	37.86	8.3014	358500.0
-122.24	37.85	7.2574	352100.0
-122.25	37.85	5.6431	341300.0
-122.25	37.84	3.8462	342200.0

TABLE 2.1 – Échantillon de l'ensemble de données *California Housing Prices*

longitude	latitude	median_income	median_house_value
-122.24	37.85	6.005	?
-122.25	37.86	5.0519	?

TABLE 2.2 – Échantillon de l'ensemble de données *California Housing Prices*

En suivant la définition de l'apprentissage supervisé et en considérant les données de la table 2.1, la matrice de données peut être écrite de la façon suivante :

$$X = \begin{pmatrix} -122.23x_1 & 37.88x_2 & 8.3252x_3 \\ -122.22x_1 & 37.86x_2 & 8.3014x_3 \\ -122.24x_1 & 37.85x_2 & 7.2574x_3 \\ -122.25x_1 & 37.85x_2 & 5.6434x_3 \\ -122.25x_1 & 37.84x_2 & 3.8462x_3 \end{pmatrix}$$

et le vecteur \vec{y} de la façon suivante :

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} 452600 \\ 358500 \\ 352100 \\ 341300 \\ 342200 \end{bmatrix}$$

où x_1 représente *longitude*, x_2 *latitude*, x_3 *median_income* et y *median_house_value* ; $m = 5$ est le nombre d'observations (ou lignes) de l'ensemble de données ; $n = 4$ le nombre de variables prédictives.

On sait que, d'après la définition : $h(x) = y$, par conséquent on a :

$$\begin{pmatrix} -122.23x_1 & 37.88x_2 & 8.3252x_3 \\ -122.22x_1 & 37.86x_2 & 8.3014x_3 \\ -122.24x_1 & 37.85x_2 & 7.2574x_3 \\ -122.25x_1 & 37.85x_2 & 5.6434x_3 \\ -122.25x_1 & 37.84x_2 & 3.8462x_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 452600 \\ 358500 \\ 352100 \\ 341300 \\ 342200 \end{bmatrix}$$

Ce qui peut être écrit sous forme d'équations linéaires de la façon suivante :

$$\begin{aligned} -122.23x_1 + 37.88x_2 + 8.3252x_3 &= 452600 \\ -122.22x_1 + 37.86x_2 + 8.3014x_3 &= 358500 \\ -122.24x_1 + 37.85x_2 + 7.2574x_3 &= 352100 \\ -122.25x_1 + 37.85x_2 + 5.6434x_3 &= 341300 \\ -122.25x_1 + 37.84x_2 + 3.8462x_3 &= 342200 \end{aligned}$$

La plupart des algorithmes supervisés sont linéaires c'est-à-dire leurs fonctions d'hypothèse h sont une combinaison linéaire des variables prédictives et elle est écrite de la forme : $\theta_1x_1 + \dots + \theta_nx_n \equiv \vec{\theta} \cdot X$. Le vecteur $\vec{\theta}$ est défini de la façon suivante : $\vec{\theta} = \theta_1, \dots, \theta_n$ qui sont les différentes valeurs possibles de chaque variable prédictive.

La régression logistique et la classification logistique sont des exemple d'algorithmes linéaires.

2.3.3 Type d'apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé, selon le type de sorties, est divisé en deux types de problèmes : problème de classification et problème de régression. La différence entre les deux se situe au niveau du type de problème à traiter. Dans la vie réelle, les problèmes sont diverses et différents les uns des autres mais une analyse prédictive aide à catégoriser les types de problèmes à traiter et déterminer quels types d'algorithmes supervisés à utiliser. Dans les deux cadres de figure les entrées restent toujours les mêmes, il n'y a aucune distinction à ce niveau. Voyons un peu en détails les caractéristiques de chaque problème et pour pouvoir saisir la différence qui existe entre les deux.

2.3.3.1 Problème de classification

Dans un problème de classification, les types de sorties qu'on traite sont des classes. Les classes sont des variables catégorielles ou discrètes, elles permettent de déterminer si un vecteur x appartient à une catégorie de sortie, dans ce cas la variable cible est qualitative. En d'autres termes, le problème de classification est le problème d'identifier lequel d'un ensemble de catégories (sous-population) appartient à une nouvelle observation, sur la base d'un ensemble de données contenant des observations (ou instances) dont la composition est connue. Une définition plus précise et formelle a été proposée par Tom Michell :

«Un exemple est un couple (\mathbf{x}, \mathbf{u}) où $\mathbf{x} \in \mathcal{X}$ est la description ou la représentation de l'objet et $\mathbf{u} \in \mathcal{U}$ représente la supervision de \mathbf{x} . Dans un problème de classification, \mathbf{u} s'appelle la classe de \mathbf{x} et appartient à un ensemble $\mathcal{C} = \{\omega_1, \dots, \omega_C\}$. \mathcal{C} designe le nombre de classes possibles pour un objet». (Tom Mitchell [23, p. 88])

Dans la pratique, pour parler de classification, l'ensemble \mathcal{C} doit être fini et petit. Si $\mathcal{C} = 2$, on parle de classification binaire qui est le cas spécial de distinguer exactement deux classes (oui/non ou vrai/faux) ; si $\mathcal{C} > 2$, on parle de classification multiclass. L'exemple d'iris⁴ qui est un jeu de données basé sur 50 échantillons d'espèces végétales est un exemple typique de la classification multiclass. Un exemple de classification binaire est de prédire si un patient d'un certain lieu géographique peut avoir ou non le cancer si l'on dispose d'un ensemble de données médicales des patients de ce lieu. Les algorithmes d'apprentissage qui résolvent des problèmes de classification sont appelés «classifier ». L'algorithme essaye d'attribuer chaque nouvelle entrée à une classe discrète appartenant au nombre \mathcal{C} de classes. [28, 34, 16]

2.3.3.2 Mesure de performance des algorithmes de classification

L'évaluation de la performance des méthodes d'apprentissage automatique est aussi cruciale que l'algorithme lui-même, car il identifie les forces et les faiblesses de chaque algorithme d'apprentissage. Différentes mesures de performance sont utilisées pour évaluer différents algorithmes de machine learning. Pour ce projet, nous nous concentrons sur celles utilisées dans les problèmes de classification parce que notre projet est problème de classification. Les métriques de classification couramment utilisées pour évaluer la performance des problèmes de classification sont *Log-Loss*, *Accuracy*, *AUC* (*Area under Curve*) etc. Nous pouvons créer nos propres

4. page de wikipedia sur iris : https://en.wikipedia.org/wiki/Iris_flower_data_set

métriques personnalisées selon nos besoins. Le choix des métriques est très important en ML car il permet de détecter les défauts ou les erreurs de nos modèles.

2.3.3.3 Matrice de confusion

La matrice de confusion (**Confusion Matrix en anglais**) est utilisée pour trouver l'exactitude et la précision d'un modèle. Elle doit être utilisée pour des problèmes de classification binaire puisqu'il est basé sur des valeurs positives et négatives. La matrice de confusion en soi n'est pas une mesure de performance en tant que telle, mais presque toutes les métriques de performance sont basées sur la matrice de confusion et les nombres qui s'y trouvent. La figure 2.3 est une représentation de la matrice de confusion. La Actual value (**valeur actuelle**) représente la vraie valeur de l'étiquette ou la variable cible tandis que la Predicted value (**valeur prédite**) représente la valeur de prédiction.

True Positives (TP) : True Positives (**vrais positifs, en français**) sont les cas où la classe réelle du point de données était 1 (Vrai) et la prédiction est également 1 (Vrai)

True Negatives (TN) : True Negatives (**vrais négatifs, en français**) sont les cas où la classe réelle du point de données était 0 (Faux) et la prédiction est également 0 (Faux)

		Actual Value (as confirmed by experiment)	
		positives	negatives
Predicted Value (predicted by the test)	positives	TP True Positive	FP False Positive
	negatives	FN False Negative	TN True Negative

Fig. 2.3 – Confusion Matrix representation [32]

False Positives (FP) : False Positives (**faux positifs, en français**) sont les cas où la classe réelle du point de données était 0 (Faux) et la prédiction est 1 (Vrai). Faux parce que le modèle a prédit incorrectement et positivement parce que la classe prédite était positive. (1)

False Negatives (FN) : False Negatives (**faux négatifs, en français**) sont les cas où la classe réelle du point de données était 1 (Vrai) et la prédiction est 0 (Faux). Faux parce que le modèle a prédit incorrectement et négativement parce que la classe prédite était négative. (0)

Voyons comment calculer quelques métriques de classification à partir de la matrice de confusion :

1. **Accuracy :** L'exactitude (**Accuracy en anglais**) dans les problèmes de classification est le nombre de prédictions correctes faites par le modèle sur toutes les prédictions faites. $Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN}$
2. **Precision :** La précision permet de répondre à la question suivante : Quelle proportion d'identifications positives était effectivement correcte ? $Precision = \frac{TP}{TP+FP}$
3. **Recall or Sensitivity :** Le rappel permet de répondre à la question suivante : Quelle proportion de résultats positifs réels a été identifiée correctement ? $Recall = \frac{TP}{TP+FN}$
4. **F1-score :** Nous ne voulons pas vraiment avoir à la fois la précision et le rappel dans nos poches chaque fois que nous faisons un modèle pour résoudre un problème de classification. Donc, il est préférable que nous puissions obtenir un seul score qui représente à la fois la précision (P) et le rappel (R)

$$F1score = \frac{2}{\frac{1}{precision} + \frac{1}{recall}} = 2 \times \frac{precision \times recall}{precision + recall} = \frac{2TP}{TP+FN+FP}$$

2.3.3.4 Problème de régression.

Dans un problème de régression l'espace de sortie est formé par des valeurs continues. C'est le cas où l'espace de représentation \mathcal{H} est un ensemble de fonctions h à valeurs réelles. L'exemple que nous avons pris pour expliquer l'apprentissage supervisé est un problème de régression car les prix des logements sont des valeurs réelles. Établir la relation entre l'augmentation du prix d'un produit et sa demande, évaluer l'impact d'une campagne publicitaire en fonction des frais engagés sont d'autres exemples d'utilisation de la régression. La différence entre les problèmes de classification et de régression est la suivante : Dans la classification, la variable cible est qualitative c'est-à-dire c'est une variable à valeurs discrètes ou catégorielles tandis que dans la régression la variable cible est quantitative c'est une variable à valeurs continues.

2.3.4 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage supervisé est une tâche de machine learning qui consiste à inférer une fonction qui décrit la structure des données à variables non-étiquetées c'est-à-dire il n'y a pas de variable cible, toutes les données sont équivalentes (il n'y a que de variables d'entrées, pas de sortie) ; dans ce cas les algorithmes cherchent à organiser les données en groupes (**Clusters en anglais**). Chaque groupe doit comprendre des données similaires et les données distincts doivent se retrouver dans des groupes distincts. S'il existe la possibilité de trouver un partitionnement (**Clustering en anglais**) tel que les similarités des objets dans un groupe sont beaucoup plus grands que les autres groupes, on peut considérer que l'ensemble d'entraînement peut être représenté par un seul groupe structuré. La similarité entre les objets est généralement calculée selon une fonction de distance entre les couples d'échantillons. La distance communément utilisée est la distance euclidienne définie de la cette manière :

Soit une matrice X à n variables quantitatives

Soient deux échantillons (x_1, x_2)

La distance euclidienne est calculée par la formule suivante :

$$d(x_1, x_2) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{1j} - x_{2j})^2}$$

Les possibilités d'application de l'apprentissage non-supervisé sont nombreuses, par exemple on peut analyser une base de données marketing pour grouper les clients qui ont des comportements similaires auxquels on pourrait adresser des campagnes commerciales personnalisées. D'autres cas d'application serait le traitement des images, la segmentation des textes, la détection d'une anomalie dans les systèmes de contrôle entre autres. [34, 28]

Deux approches sont proposées pour partitionner un ensemble de données de façon automatique :

1. **Partitionnement hiérarchique.** C'est une approche qui consiste à repartir un ensemble de données dans une suite de groupes emboîtés les uns dans les autres ; dans ce cas les relations entre les groupes sont représentés dans une structure arborescente. Plus on est plus bas dans l'arbre, plus les objets se ressemblent. Cette méthode est applicable lorsqu'on ne connaît pas à l'avance le nombre de groupes à former.
2. **Partitionnement non-hiérarchique.** Les instances de l'ensemble des données sont réparties en un nombre k de classes. k étant une valeur fixée à l'avance.

Dans les deux approches une bonne classification (**clustering en anglais**) est réussie quand les groupes ont une forte similarité intraclasse (c'est-à-dire les objets d'un même groupe doivent se ressembler) et une fiable similarité interclasses (c'est-à-dire les objets d'un groupe distinct ne doivent pas se ressembler). [28, p. 86]

2.3.5 Classes déséquilibrées

Nous terminerons la section 2.3 sur le machine learning en abordant un sujet très important en machine learning, surtout dans un problème de la classification qui est "*Jeux de données déséquilibré*" (**Imbalanced datasets or Imbalanced Classification or Imbalanced Classes, ses différentes appellations en anglais**). C'est un problème très commun en machine learning, spécialement en classification. Nous abordons ce sujet parce que c'était l'une des principales difficultés de notre projet.

Une distribution de classe déséquilibrée est un scénario où le nombre d'observations appartenant à une classe est significativement inférieur à celui des autres classes. Ce problème prédomine dans les cas où la détection d'anomalies est cruciale comme le vol d'électricité, les transactions frauduleuses dans les banques, l'identification de maladies rares, etc. Dans ce cas, le modèle prédictif développé avec des algorithmes conventionnels pourrait être biaisé et inexact. Cela arrive parce que les algorithmes d'apprentissage automatique sont généralement conçus pour améliorer la précision en réduisant l'erreur. Ainsi, ils ne tiennent pas compte de la répartition / proportion des classes ou de l'équilibre des classes .

Jason V. Hulse et al. [18] ont proposé plusieurs techniques permettant de manipuler les classes déséquilibrées. Voyons un bref résumé de quelques-unes d'entre elles :

- **Sous-échantillonnage aléatoire.** Le sous-échantillonnage aléatoire (**Random Undersampling, en anglais**) vise à équilibrer la distribution des classes en éliminant de manière aléatoire les exemples de classes majoritaires. Ceci est fait jusqu'à ce que les instances de la majorité et de la classe minoritaire soient équilibrées.
- **Sur-échantillonnage aléatoire.** Le sur-échantillonnage aléatoire (**Random Over-Sampling, en anglais**) augmente le nombre d'instances dans la classe minoritaire en les reproduisant aléatoirement afin de présenter une représentation plus élevée de la classe minoritaire dans l'échantillon.
- **Suréchantillonnage en groupe (Cluster-Based Over Sampling, en anglais).** Dans cette technique, l'algorithme de clustering K-means est appliqué indépendamment aux instances de classe minoritaire et majoritaire.

Cela permet d'identifier les clusters dans l'ensemble de données. Par la suite, chaque grappe est suréchantillonnée de sorte que tous les clusters de la même classe ont un nombre égal d'instances et toutes les classes ont la même taille.

- **Synthetic Minority Over-sampling Technique(SMOTE)** : Cette technique est suivie pour éviter le surapprentissage qui se produit lorsque des répliques exactes d'instances minoritaires sont ajoutées à l'ensemble de données principal. Un sous-ensemble de données est pris à partir de la classe minoritaire à titre d'exemple, puis de nouvelles instances similaires synthétiques sont créées. Ces instances synthétiques sont ensuite ajoutées à l'ensemble de données d'origine. Le nouvel ensemble de données est utilisé comme un échantillon pour former les modèles de classification.
- **Modified synthetic minority oversampling technique (MSMOTE)** : C'est une version modifiée de SMOTE. SMOTE ne tient pas compte de la distribution sous-jacente de la classe minoritaire et des bruits latents dans l'ensemble de données. Pour améliorer les performances de SMOTE, une méthode modifiée MSMOTE est utilisée.

2.4 Conclusion

Le chapitre 2 a présenté une vue approche théorique de quelques grands concepts de machine learning et de sciences de données, ceux que nous jugeons être importants pour la réalisation de notre projet. Nous avons donné une brève définition de chaque concept tout en essayant d'être le plus clair et précis possible. Nous avons vu un sous-ensemble de sujets importants des différents concepts puisque ces champs d'études sont très vastes et contiennent beaucoup de choses intéressantes, mais nous avons mis accent sur ce qui nous intéresse pour notre projet. Par exemple notre projet est un problème de classification en machine learning, pour cela nous avons dédié une section à une étude brève du problème de classification. Tout en ayant le soin de définir et d'expliquer les thèmes les plus pertinents. Aussi notre dataset est déséquilibré, par conséquent nous avons mis l'accent sur c'est quoi les classes déséquilibrées et les différentes techniques permettant de les manipuler. Le chapitre 3 qui suit présentera les détails techniques de notre projet, le but est de faire sortir les différentes étapes que nous avons suivies pour arriver à un produit fini et utilisable.

3 | Approche : Construction du modèle machine learning

3.1 Introduction

La construction d'un modèle de machine learning est la première grande phase dans l'implémentation de notre solution. Le modèle estimateur (meilleur modèle entraîné en fonction d'un ensemble de données) va être utilisé pour introduire la deuxième phase, celle de la création de l'API *Ortho*. Comme nous avons déjà vu dans l'introduction le diagramme de cas d'utilisation du système machine learning. Nous proposons maintenant un diagramme de classe (figure 3.1) qui répond aux différentes exigences que nous avons décrites. Nous tenons à souligner que dans notre diagramme de classe nous ne prenons pas en compte les classes prédéfinies dans les bibliothèques de Python. Par exemple le **DataFrame** est une classe prédéfinie dans la bibliothèque **pandas**. Nous l'utilisons dans notre classe **Gather** mais elle n'est pas définie dans notre diagramme de classe.

Dans notre projet, le problème d'apprentissage est un problème de classification parce que notre variable cible est une étiquette discrète et c'est binaire parce qu'on doit décider si oui ou non le patient reste à l'hôpital après une intervention chirurgicale. Si le patient reste, la valeur de la classe est positive (c'est-à-dire 1), s'il ne reste pas ou il est renvoyé, la valeur de la classe est négative (c'est-à-dire 0). Puisque dans la majorité des cas les médecins ne gardent pas les patients à l'hôpital après l'arthroplastie, alors notre ensemble de données est déséquilibré. Plus de 80% des patients sont retournés à la maison. C'est normal parce que s'ils restent, les coûts sont couverts par l'hôpital. Constatant ce déséquilibre, nous sommes obligés d'appliquer une technique de re-échantillonnage afin d'éviter que notre modèle soit biaisé. Nous avons opté d'équilibrer notre ensemble de données en appliquant la technique *SMOTE* parce qu'elle a l'avantage d'atténuer le problème de sur-adaptation causé par le sur-échantillonnage aléatoire. Ce dernier est une technique traditionnelle qui a beaucoup d'inconvénients dont nous ne traitons

pas dans ce rapport. Si vous voulez avoir plus de connaissances sur ces techniques, vous pouvez lire ces articles [[18](#), [6](#), [14](#)].

Dans les sections qui suivent nous allons voir les différentes étapes d'implémentation de notre modèle machine learning. Nous commençons d'abord par l'obtention des données, pour ensuite continuer avec la visualisation, le nettoyage, la transformation et enfin la modélisation. Ce qui donne quasiment le cycle complet d'un travail de scientifique de données.

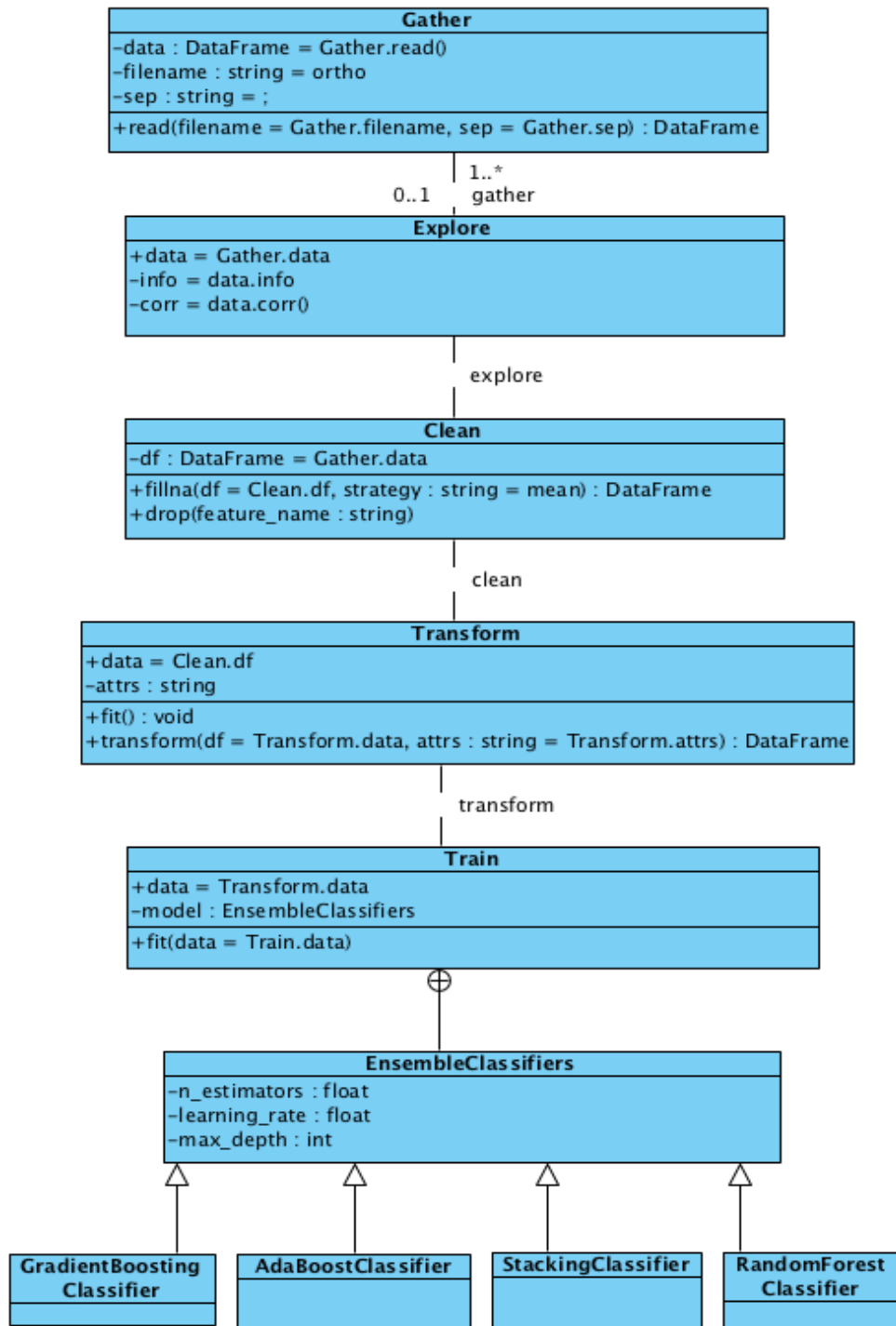


Fig. 3.1 – Diagramme de classe de notre modèle machine learning

3.2 Collecte de notre ensemble de données

Une fois qu'on décide d'attaquer un problème de machine learning, la première chose à faire est d'explorer toutes les pistes possibles pour récupérer les données. En effet, les données constituent l'expérience, les exemples qu'on va fournir à notre algorithme de machine learning afin qu'il puisse apprendre et devenir plus performant. D'après la définition de machine learning de Tom Mitchell qu'on a vue à la section 2.3, l'expérience E constitue la source des connaissances ou la source des données. Suivant cette définition pour qu'il y ait l'apprentissage, il faut disposer d'une source de données.

Nos données proviennent du département orthopédique de l'université de Seattle, Washington, États-Unis. Elles sont au nombre de 2718 lignes et 92 colonnes. C'est un ensemble de données orthopédiques très sensible. Ces données ne sont pas accessibles au public, elles sont hautement confidentielles ; pour avoir accès à ces données nous avons signé un contrat de confidentialité dont la clause est de sauvegarder secrètement ces données. En général les bases de données médicales sont des données privées et extrêmement sensibles ; d'après la loi sur la protection des informations privées, on ne peut pas accéder à ces données sans l'autorisation de ses propriétaires.

Avant de nous donner accès à ces données, on a supprimé toutes les informations personnelles du patient sauf son âge qui est une donnée pertinente pour l'analyse prédictive. Les données personnelles qu'on a supprimées sont entre autres : le nom, le prénom et l'adresse complète. L'objectif est de protéger le plus possible les informations des patients.

L'ensemble de données est hébergé sur le serveur de la compagnie pour laquelle je fais mon stage et il est disponible dans un fichier de format *csv*. La compagnie les a obtenues de l'université Seattle, assurément après une entente entre les deux entités. Nous avons eu un accès direct au serveur pour pouvoir télécharger ces données et les utiliser pour construire notre modèle.

Nous avons divisé notre ensemble de données en deux parties : un ensemble d'entraînement et un ensemble de test. 80% de l'ensemble des données est conservé pour la phase d'entraînement et 20% pour la phase de prédiction. La plus grande difficulté c'est que l'ensemble de données est peu nombreux pour construire un modèle prédictif hautement performant. En ML plus les données sont nombreuses, plus on est capable de construire de bon modèle.

Comme vous pouvez remarquer dans la classe diagramme du machine learning (figure 3.1), on a implémenté un classe nommant *Gather*. Celle-ci nous permet d'obtenir les données brutes à travers la méthode *read* qui prend en paramètre une chaîne qui contient le chemin et nom de fichier (*filename*) et un séparateur (**sep**). Le fichier contient toutes les données disponibles pour la construction du modèle et le séparateur permet de préciser comment les colonnes sont séparées entre elles, dans notre cas c'est un point virgule (;) qui les sépare.

Après avoir obtenu ces données, nous devons maintenant les explorer pour avoir des idées claires sur l'ensemble des données. La section suivante est l'étape d'exploration des données, les données obtenues sont transférées à la classe Exploration de données.

3.3 Exploration de notre ensemble de données

L'analyse exploratoire est une technique permettant de visualiser l'ensemble de données dans le but d'en prendre connaissance. Elles permettent de déterminer les relations qui existent entre les variables de notre ensemble de données. L'intérêt de la visualisation est de détecter les valeurs aberrantes et vérifier certaines hypothèses avant de choisir notre modèle comme la linéarité de certaines valeurs. Nous faisons cette démarche à l'avance parce que nous voulons obtenir de précieux conseils pour le nettoyage de données et aussi avoir des idées claires pour l'ingénierie des caractéristiques (**Feature Engineering en anglais**).

Pour l'analyse exploratoire de notre ensemble données, Tout d'abord, nous commençons par une analyse basique de l'ensemble de nos données. La table 3.1 donne une description de notre ensemble de nos données utilisé pour notre projet et la figure 3.2 donne une vue de notre ensemble de données, leur représentation, et leurs valeurs possibles. Si nous nous référons à notre classe diagramme 3.1), c'est l'attribut *info* de la classe *Explore* qui nous fournit les informations sur notre dataset. La méthode *head* nous retourne les cinq premières lignes du jeu de données.

Voyons une brève description de chaque composante de notre ensemble de données après une analyse basique de notre exploration :

Nombre de variables. Représente le nombre totale de variables ou colonnes de notre ensemble de données. Les variables prédictives sont importantes pour un modèle de machine learning puisque le modèle les utilise pour prédire des événements. Dans l'annexe A, La table A.1 donne une description de tous les variables de notre ensemble de données. Le nombre total des variables est 92. La colonne **Feature**

name représente le nom de chaque colonne. La colonne **datatype** représente le type de données et les colonnes. Et les colonnes **non-null** et **null** représentent respectivement le nombre d'échantillons non-nulls et le nombre d'échantillons nulls. Référez-vous à la table [A.1](#), pour prendre connaissance des nom de colonnes car nous allons les utiliser plus tard.

Nombre de variables	92
Nombre d'observations	2718
Nombre de variables numériques	87
Nombre de variables discrètes ou catégorielles	5
Variable cible	Discharge

TABLE 3.1 – Exploration basique de notre ensemble de données

	AGE_AT_ADMIT	ASA_SCORE	Female	Height	Weight	BMI	PreOpHgb	PreOpCr	PreOpGlucose	Warfarin	Discharge
0	57.073238	1.0	0.0	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.0	1
1	87.006160	2.0	1.0	154.9	60.7	25.297981	NaN	NaN	NaN	0.0	1
2	77.623546	3.0	0.0	177.8	90.7	28.690874	NaN	NaN	NaN	0.0	1
3	69.054073	2.0	1.0	162.5	68.9	26.092308	NaN	NaN	NaN	0.0	1
4	53.396304	2.0	1.0	167.6	83.9	29.868536	NaN	NaN	NaN	0.0	1

Fig. 3.2 – Présentation réelle de notre ensemble de données

Nombre d'observations. Représente le nombre d'échantillons (**samples or rows en anglais**) de notre ensemble de données.

Variables numériques. Ce sont les variables dont les valeurs sont numériques ou continues dans notre ensemble de données.

Variables discrètes. Ce sont les variables qui viennent sous forme de texte. Plus loin dans la section de la transformation, nous convertirons ces variables en données numériques car la majorité des algorithmes de machine learning ne reconnaissent pas les données discrètes ou textuelles.

Variable cible. C'est l'étiquette (**label or target en anglais**) de notre ensemble de données. Comme nous avons vu l'étiquette est une variable très importante pour les algorithmes supervisés car elle permet d'évaluer la valeur de sortie d'une décision. Dans notre cas c'est le *Discharge* qui est notre variable cible, elle

permet de dire si oui ou non le patient doit rester à l'hôpital pour une réadaptation.

Nom d'étiquète	Discharge
Nombre de classes positives	2421
Pourcentage de classes positives	89.072848 %
Nombre de classes négatives	297
Pourcentage de classes négatives	10.927152 %
Nombre total classes	2718

TABLE 3.2 – Description de notre variable cible

La table 3.2, quant à elle, c'est la description de notre variable target value. Dans l'ensemble de données, elle s'appelle *Discharge*. On peut remarquer que les classes positives sont significativement plus nombreuses que les classes négatives, ce qui produit un déséquilibre au niveau de l'ensemble de données. Nous avons déjà discuté des classes déséquilibrées dans la sous-section 2.3.5 et les différentes techniques pour les équilibrer.

3.3.1 Corrélation entre nos variables

Nous terminons la section d'exploration de données avec les corrélations. Ces dernières nous permettent d'examiner les relations entre les variables numériques de notre ensemble de données. La corrélation est une valeur comprise entre -1 et 1 qui représente à quel point deux entités se déplacent à l'unisson. Deux variables sont positivement corrélées lorsque l'une augmente et l'autre augmente aussi. Par exemple, Le BMI d'un patient et son poids (**Weight dans le dataset**) sont positivement corrélés, ce qui veut dire le BMI n'augmente que lorsque son poids augmente.

Dans la corrélation négative, lorsqu'une variable augmente, l'autre diminue. Par exemple, quand l'âge du patient augmente son poids diminue. Les corrélations proches de -1 ou 1 indiquent une relation forte entre les variables. Les plus proches de 0 indiquent qu'il y a une relation faible. 0 indique qu'il n'y aucune relation.

La figure 3.3 nous donne une idée comment nos variables sont corrélées entre elles. Par exemple, le poids (**Weight dans notre ensemble de données**) et le **BMI** ont une corrélation de 0.81 très proche de 1, c'est-à-dire qu'ils sont fortement relationnés. Nous pouvons déduire que les patients qui ont leur BMI plus élevé sont les plus pesants. L'objectif de la corrélation est de gagner en intuition sur les données, ce qui nous aidera tout au long du flux de travail.

Pour calculer la corrélation, nous avons utilisé la méthode **corr** de la classe **Explore** de notre diagramme de classes. Nous avons passé un peu de style en paramètre pour avoir les couleurs.

L'exploration nous donne une idée générale de notre ensemble de données, elle nous rend capable de poursuivre les autres étapes avec une marge d'erreur très faible. Nous avons vu l'exploration basique et la corrélation entre nos variables. Nous poursuivons donc avec la phase de nettoyage. La prochaine section est consacrée au nettoyage de notre ensemble de données.

3.4 Nettoyage de notre ensemble de données

Une fois l'étape exploratoire des données est terminée et que nous ayons suffisamment de connaissances des données, c'est le temps maintenant de les nettoyer. Le nettoyage des données (**Data cleaning en anglais**) consiste à éliminer les observations qu'on ne souhaite pas conserver pour la suite de l'analyse prédictive. Ce sont des informations qui peuvent être erronées, inexactes ou sans intérêt pour la phase de modélisation. Les scientifiques de données consacrent habituellement une très grande partie de leur temps au nettoyage des données parce que même les algorithmes simples peuvent apprendre des informations impressionnantes à partir d'un jeu de données correctement nettoyé.

Nous avons suivi les étapes suivantes pour nettoyer notre ensemble de données :

- **Suppression des observations indésirables.** Les observations indésirables (**Irrelevant observations, en anglais**) sont celles qui ne sont pas pertinentes pour une analyse prédictive c'est-à-dire elles n'ont aucune influence sur la prédiction, on suggère de les supprimer afin que notre modèle ne soit pas biaisé. Dans notre ensemble de données, nous n'avons pas constaté d'observations indésirables parce que chaque observation est un patient qui a fait l'objet d'une décision de retour. Toutes les observation étaient importantes pour notre analyse.
- **Observations en double.** Les observations en double (**Duplicate observations, en anglais**) surviennent le plus souvent lors de la collecte des informations, plus précisément lorsque les données proviennent de plusieurs endroits différents et qu'on essaye de les combiner pour avoir un seul ensemble de données. Dans notre cas, l'ensemble de données provient d'un seul endroit (université de Seattle), par conséquent il n'y avait pas de doublons. En plus c'est très difficile de constater des doublons dans un jeu de données médical parce que c'est très dangereux d'avoir deux instances pour un même patient.

- **Données manquantes.** Dans la vie réelle, un ensemble de données contient toujours des instances où un élément particulier peut être absent, ceci est dû parce que les administrateurs de base de données, en raison de conception, admettent que certains attributs peuvent être vides ou nuls. Pour des raisons très pratiques, la plupart des algorithmes d'apprentissage ne fonctionnent pas avec des valeurs nulles, il faut, d'une manière ou d'une autre, trouver un moyen de les gérer. Deux stratégies sont couramment recommandées pour traiter les valeurs manquantes :

1. Suppression des observations qui ont des valeurs manquantes (**Drop-ping en anglais**). On élimine toutes les instances qui ont des données vides ou nulles.
2. Imputation des valeurs manquantes en fonction d'autres observations où toutes les valeurs sont présentes (**Imputing en anglais**). Dans l'imputation, il y a plusieurs méthodes de remplissage : On peut remplir en remplaçant les valeurs nulles soit par "**zéro (0)**", soit par la valeur moyenne "**mean**" ou par la valeur moyenne "**median**".

Après avoir essayé les deux techniques de traitement des valeurs manquantes, nous nous rendons compte que la stratégie d'**imputation** nous donne de meilleurs résultats. Pour arriver à cette affirmation, nous avons essayé plusieurs modèles avec leurs différentes évaluations, puis nous comparons les résultats pour décider lequel est meilleur.

En résumé pour nettoyer notre ensemble de données nous avons rempli les valeurs vides et nulles en utilisant la méthode du calcul de la moyenne car elle nous donne de meilleurs résultats toujours en comparant les différents résultats de chaque méthode en vue de sélectionner le meilleur. Nous avons développé une fonction qui fait automatiquement le choix du meilleur résultat. Nous tenons à souligner que notre ensemble de données a eu beaucoup de valeurs nulles, c'est la deuxième difficulté de notre projet après les classes déséquilibrées. La méthode **fillna** de la classe **Clean** a été utilisée pour remplir les données manquantes de notre ensemble de données. Elle prend en paramètres un jeu de données et la stratégie de remplissage et retourne un jeu de données sans données manquantes. Une fois qu'on a un ensemble de données correctement nettoyé, on peut poursuivre avec la phase de transformation de données.

3.5 Transformation de notre ensemble de données

La transformation de données se repose sur l'ingénierie des caractéristiques (**Feature Engineering en anglais**) qui est une technique qui consiste à créer de nouvelles variables prédictives à partir de celles qui sont déjà disponibles ou à supprimer des variables impertinentes. La transformation permet soit l'ajout ou la suppression de variables non-étiquetées, mais généralement elle consiste en la création de nouvelles variables surtout quand on dispose d'une petite quantité de variables. La transformation est aussi une tâche précieuse qui permet au scientifique de données d'améliorer la performance d'un modèle puisqu'elle permet de mettre en évidence les informations clés, de se concentrer sur ce qui est important et d'apporter une certaine expertise au domaine.

Dans notre projet, nous avons trouvé beaucoup de variables impertinentes. Par exemple, pendant la phase d'exploration nous avons remarqué que le "**Weight**" est une variable impertinente car elle très corrélée avec le "**BMI**". La raison est parce que deux variables prédictives ne doivent pas avoir une trop grande corrélation, cela peut biaiser le modèle et nous donne des résultats trompeurs. Pour cette raison, on a décidé de maintenir le "**BMI**" et supprimer le "**Weight**". Du même coup nous nous sommes rendus compte que le "**RawDX**" et "**GHOA**" stockent des données similaires sauvegardées dans des formes différentes. Et on a maintenu le "**RawDX**" et laissé tomber le "**GHOA**". La méthode **drop** de la classe **Clean** est utilisée pour supprimer les features non pertinents.

Le feature engineering est l'étape qui précède la modélisation. Il prend en entrée le jeu de données brutes et produit en sortie un jeu de données préparé pour l'étape de la modélisation. Le modèle prend en entrée le jeu de données produit par le processus du feature engineering.

Nous avons fait notre feature engineering en deux étapes :

1. Premièrement, les features **Dx1**, **Dx2**, **Dx3** qui existent déjà dans notre dataset doivent être combinés entre eux pour créer un nouveau feature appelé **degree_dx** qui est le niveau général diagnostique du patient. Nous soulignons que **Dx1**, **Dx2**, **Dx3** représentent respectivement : premier niveau diagnostique, deuxième niveau diagnostique et troisième niveau diagnostique du patient. En combinant ces trois diagnostics, nous créons un niveau général diagnostique du patient.

Logique de création : On regroupe ces colonnes (**Dx1**, **Dx2**, **Dx3**) suivants la logique si les 3 sont présents (c'est-à-dire si les 3 ont valeurs non-null), on donne la valeur de 3 ; si uniquement **Dx2** et **Dx1** sont présents, on

donne la valeur de 2 ; si uniquement DX1 on donne la valeur de 1 si aucune valeur n'est présente, on donne la valeur 0. Le feature résultant se nomme **degree_dx**

2. Deuxièmement, nous créons un nouvel autre feature appelé **medcond** qui détermine les conditions médicales du patient. Nous nous basons sur l'ensemble de caractéristiques pré-opératoires du patient. Par exemple son niveau de glucose, les quantités d'hémoglobine blanches et d'hémoglobines rouges. Ces features sont au nombre de 46 au total.

Logique de création : On prend toutes les colonnes de conditions médicales (**PreOpHgb** à **Depression**, ils sont au nombre de 46 dans le dataset) : On donne la valeur 1 lorsqu'on trouve une valeur non-nulle à chacune des conditions sauf pour les colonnes suivantes :

- On donne la valeur 2 pour les colonnes suivantes : [**PreOpHgb, PreOpGlucose, pulm circ, other neuro, chronic pulm**]
- On donne la valeur 3 pour les colonnes suivantes [**PreOpC, Paralysis, renal failure, liver failure**]

La classe Transform de notre diagramme de classe fait toutes les transformations que nous venons de décrire dans cette section. La méthode **transform** prend en paramètre le jeu de données nettoyé et les attributs à transformer et elle retourne un jeu de données transformé lequel nous allons utiliser comme entrée de l'étape suivante sur la modélisation.

3.6 Modélisation des données

La modélisation est un processus d'entraînement de modèles. Il consiste à décrire comment choisir le meilleur modèle qui s'adapte à la problématique qu'on étudie et les raisons pour lesquelles le modèle choisi est meilleur. Ici, meilleur modèle ne veut pas dire qu'un algorithme est meilleur qu'un autre mais tout dépend du cas qu'on étudie.

Toutes les étapes que nous venons de détailler dans les sections précédentes constituent des étapes préparatoires pour la modélisation. Dans l'étape d'exploration de données, nous nous sommes rendus compte que notre ensemble de données était déséquilibré.

Puisque notre ensemble de données est déséquilibré, nous ne pouvons pas utiliser les algorithmes de classification simples tel que LogisticRegression, TreeDecisionClassifier, LinearClassifier etc. Nous avons utilisé l'approche des méthodes d'ensemble qui consiste à combiner plusieurs classificateurs simples pour donner

un classificateur fort. L'image 3.4 donne une approche générale sur le fonctionnement et la construction des méthodes d'ensemble. **Data** représente l'ensemble de données d'origine, (**C1**, **C2**, ... , **Cn**) sont les différents algorithmes de classification faibles qu'on combine pour donner en entrée à **Vote Classifier**. **Strong Classifier** est l'algorithme de classification fort qu'on obtient.

Dans le chapitre sur "*Contexte théorique*" nous avons vu comment manipuler les données déséquilibrées en ré-échantillonnant (**resampling en anglais**) les données d'origine pour fournir des classes équilibrées. Nous avons vu toutes les avantages à utiliser les techniques SMOTE que les autres. Dans la sous-section qui suit sur la modélisation, nous allons brièvement examiner une autre approche, à savoir la modification des algorithmes de classification existants pour les rendre appropriés aux ensembles de données déséquilibrés.

3.6.1 Méthodes d'ensemble

L'objectif principal de la méthodologie d'ensemble (**Ensemble methods en anglais**) est d'améliorer la performance des classificateurs uniques. L'approche consiste à construire plusieurs classificateurs à deux étapes à partir des données originales, puis à agréger leurs prédictions [1]. Les méthodes d'ensemble sont nombreuses, mais nous allons brièvement définir les trois plus importantes : Bagging, Boosting et Random Forest.

3.6.1.1 Bagging

Bagging (Bootstrap aggregating) est une approche de construction d'ensemble qui utilise différents sous-ensembles de données d'apprentissage avec une méthode de classification unique. Étant donné un ensemble d'apprentissage de taille t , Bagging attire des instances aléatoires t de l'ensemble de données avec remplacement (à l'aide d'une distribution uniforme). Ces t instances sont apprises, et ce processus est répété plusieurs fois. Étant donné que le tirage au sort est effectué avec remplacement, les instances tirées contiendront des doublons et des omissions par rapport à l'ensemble d'apprentissage initial. Chaque cycle à travers le processus aboutit à un classificateur. Après la construction de plusieurs classificateurs, les sorties de chaque classificateur sont combinés pour produire la prédiction finale [37].

3.6.1.2 Boosting

Une autre approche appelée «Boosting» utilise également une méthode d'apprentissage unique avec différents sous-ensembles de données d'apprentissage. Sa

structure globale est similaire à celle de la méthode Bagging, à la différence qu'elle conserve la trace de la performance de l'algorithme d'apprentissage et se concentre sur les cas qui ne sont pas correctement appris. Au lieu de choisir les instances t d'apprentissage à l'aide d'une distribution uniforme de manière aléatoire, les exemples d'apprentissage sont sélectionnés en favorisant les instances qui ne sont pas bien classées. Après plusieurs cycles, la prédiction est réalisée selon un vote pondéré des prédictions de chaque classificateur. Ainsi, les poids sont proportionnels à la précision de chaque classificateur sur son ensemble d'apprentissage. L'algorithme le plus connu de l'approche Boosting, appelée « AdaBoost » [37].

3.6.1.3 Stacking

Le stacking est similaire au boosting : vous appliquez également plusieurs modèles à vos données d'origine. La différence ici est, cependant, que vous n'avez pas juste une formule empirique pour votre fonction de poids, plutôt que vous introduisez un méta-niveau et utilisez un autre modèle / approche pour estimer l'entrée avec les sorties de chaque modèle pour estimer les poids ou, en d'autres termes, pour déterminer quels modèles fonctionnent bien et ce qui est mal donné ces données d'entrée [15].

3.6.1.4 Random Forest

Les forêts aléatoires (plus connus sous **Random Forest**) sont une combinaison d'arbres de décision, où chaque arbre dépend des valeurs d'un vecteur aléatoire indépendamment échantillonné et avec la même distribution pour tous les arbres de la forêt. L'erreur de généralisation d'une forêt d'arbres dépend de la force des arbres individuels dans la forêt et de la corrélation entre eux. L'utilisation d'une sélection aléatoire de caractéristiques pour diviser chaque nœud donne des taux d'erreur qui se comparent favorablement à AdaBoost. [1]

Pour notre projet nous avons entraîné quatre algorithmes ensemblistes comme on peut constater dans notre classe diagramme 3.1 ; deux d'entre eux sont des algorithmes de boosting, un algorithme stacking et le random forest classification. La table 3.3 présente une comparaison des différents résultats obtenus en entraînant ces quatre types d'algorithmes ensemblistes différents. Pour sélectionner le meilleur algorithme, nous avons développé des processus automatiques en nous basant sur les scores de chaque modèle. Le meilleur modèle va être celui du meilleur score obtenu.

Nous tenons compte aussi des metrics d'évaluation comme "Precision and Recall". Ces derniers nous permettent de déterminer la performance de notre modèle à classer les classes positives et celles qui sont négatives. Le but de notre projet

Algorithm	Metrics		
	Accuracy score	Precision	Recall
GradientBoostingClassifier	0.83	0.93	0.89
AdaBoostClassifier	0.85	0.93	0.90
StackingClassifier	0.78	0.91	0.84
RandomForestClassifier	0.82	0.91	0.90

TABLE 3.3 – Comparison of ensemble methods algorithms used in our project

était d’obtenir la précision en dessus de 90%. Généralement, dans la pratique une telle précision est acceptable pour pouvoir fier le modèle.

Vous pouvez constater à la table 3.3 que nous obtenons des résultats différents pour chaque algorithme. Pour faire le choix du bon algorithme, notre API machine learning est capable d’évaluer chaque algorithme de façon indépendante et itérativement pour déterminer le meilleur modèle, tout en combinant les différents résultats de chaque metric. Dans ce cas, c’est l’**AdaBoostClassifier** qui serait le modèle estimé meilleur.

Après avoir déterminé le meilleur modèle à partir des processus automatiques. La dernière étape qui nous reste à faire est la sérialisation de notre modèle pour son utilisation future soit dans la phase de déploiement. Parce qu’un modèle doit être capable de prédire de nouvelles données (**online data**). La section qui vient expliquera en détail comment nous avons procédé pour déployer notre modèle c’est-à-dire le rendre accessible à des utilisateurs qui ne connaissent rien en machine learning.

Table of correlation between some features of our dataset

	AGE_AT_ADMIT	ASA_SCORE	Female	Height	Weight	BMI	PreOpHgb	PreOpCr	PreOpGlucose	Warfarin	Discharge
AGE_AT_ADMIT	1	0.081	0.12	-0.22	-0.22	-0.11	-0.2	0.17	0.16	0.044	-0.25
ASA_SCORE	0.081	1	0.027	-0.035	0.037	0.064	-0.21	0.04	0.058	0.03	-0.057
Female	0.12	0.027	1	-0.7	-0.35	0.049	-0.31	-0.24	0.073	-0.029	-0.16
Height	-0.22	-0.035	-0.7	1	0.48	-0.11	0.26	0.24	-0.0078	0.029	0.15
Weight	-0.22	0.037	-0.35	0.48	1	0.81	0.24	0.09	-0.047	0.022	0.063
BMI	-0.11	0.064	0.049	-0.11	0.81	1	0.087	-0.053	-0.012	0.021	-0.023
PreOpHgb	-0.2	-0.21	-0.31	0.26	0.24	0.087	1	-0.2	-0.14	-0.18	0.2
PreOpCr	0.17	0.04	-0.24	0.24	0.09	-0.053	-0.2	1	-0.036	0.06	-0.14
PreOpGlucose	0.16	0.058	0.073	-0.0078	-0.047	-0.012	-0.14	-0.036	1	0.04	-0.24
Warfarin	0.044	0.03	-0.029	0.029	0.022	0.021	-0.18	0.06	0.04	1	-0.11
Discharge	-0.25	-0.057	-0.16	0.15	0.063	-0.023	0.2	-0.14	-0.24	-0.11	1

Fig. 3.3 – Vue générale de la corrélation nos variables

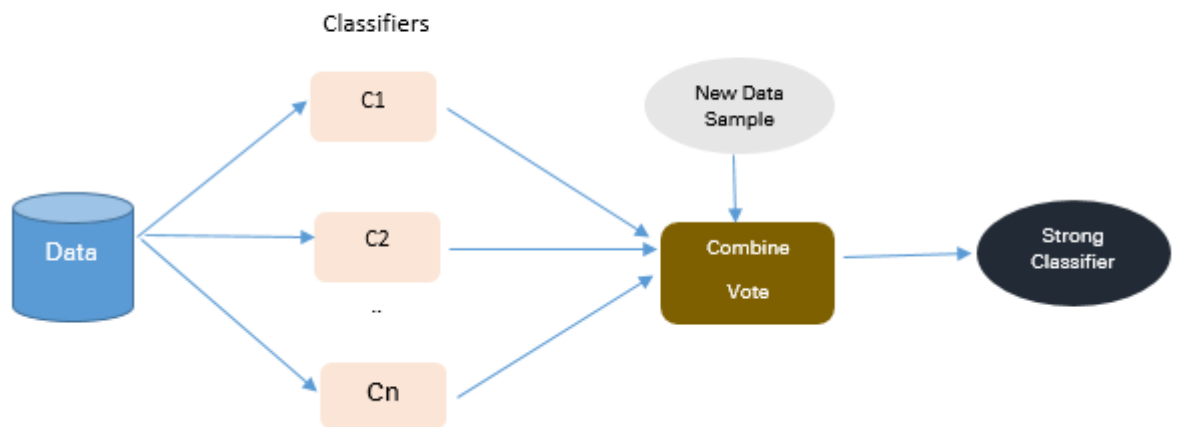


Fig. 3.4 – Approach to Ensemble based Methodologies [33]

4 | Implémentation de l'outil Ortho

4.1 Introduction

Les systèmes modernes d'apprentissage automatique facilitent la construction d'un système de décision de base. Cette facilité, cependant, est un peu décevante. Construire et déployer un premier système de décision a tendance à bien fonctionner, et les résultats peuvent être assez impressionnants pour les bonnes applications. L'ajout d'un autre système se passe généralement aussi bien. Cependant, d'étranges interactions peuvent commencer à apparaître d'une manière qui serait impossible du point de vue de l'ingénierie logicielle. Changer une partie du système affecte une autre partie du système, même si des tests isolés peuvent suggérer que cela est impossible.

Le problème est que les systèmes basés sur l'apprentissage automatique peuvent avoir des propriétés très subtiles qui sont très différentes des systèmes logiciels plus traditionnels. En partie, cette différence vient du fait que les sorties des systèmes d'apprentissage automatique ont des comportements beaucoup plus complexes que les composants logiciels typiques. Cela vient aussi en partie du fait de la nature probabiliste des jugements que de tels systèmes sont appelés à faire.

Cette complexité et cette subtilité rendent la gestion de ces systèmes plus délicate que la gestion de systèmes logiques traditionnels, bien modularisés, basés sur des micro-services. Les systèmes complexes d'apprentissage profond peuvent évoluer pour montrer des comportements pathologiques «changer quoi que ce soit, tout changer», même s'ils apparaissent superficiellement comme des micro-services bien conçus avec de hauts degrés d'isolation [8].

Compte tenu de cette complexité qui existe au niveau des applications de machine learning, nous avons décidé de construire un API Ortho pour faire le dé-

ploiement de notre modèle, de telle sorte que s'il faut faire un changement dans la phase d'entraînement du modèle, cela n'affectera pas tout le système en général.

4.2 Construction de l'API Ortho

Les API (Application Program Interfaces) sont des méthodes de communication logicielle développées sur une norme particulière. De nombreuses entreprises ont leurs propres API publics qui résolvent des problèmes spécifiques pour les développeurs. En transmettant à leur API un paramètre en entrée, l'utilisateur peut recevoir une sortie sans avoir besoin de savoir (ou de comprendre) comment la tâche sous-jacente est effectuée. Les API permettent une fonctionnalité multi-plateforme, rendue possible par une norme agnostique de plate-forme, telle que la spécification REST. La beauté des API est qu'elles sont super accessibles - que vous construisiez une application mobile, des appareils IoT, un serveur ou que vous souhaitiez simplement trouver un moyen de communiquer entre vos propres micro-services, les API vous y aident [7].

Pour communiquer avec notre modèle, nous avons construit un API en Django framework web en suivant l'architecture présentée dans la figure 4.1. Voyons un peu cette architecture :

User. Ce sont les utilisateurs des systèmes développés. Ils utilisent un interface web de Django pour réaliser leurs tâches.

Django. C'est le moteur web de Django. Il se compose de toutes les bibliothèques internes du framework.

URL. C'est un fichier de python contenant tous les URLs autorisés par l'application dont nous développons.

View. C'est la couche métier de toute application Django. Il fait la liaison entre le model et le template.

Model. Le modèle est utilisé pour stocker et maintenir les données. C'est le backend où la base de données est définie. Dans notre cas, le model va être le modèle machine learning que nous avons construit.

Template. Tout ce qui a trait à la présentation. Tout ce que l'utilisateur peut voir.

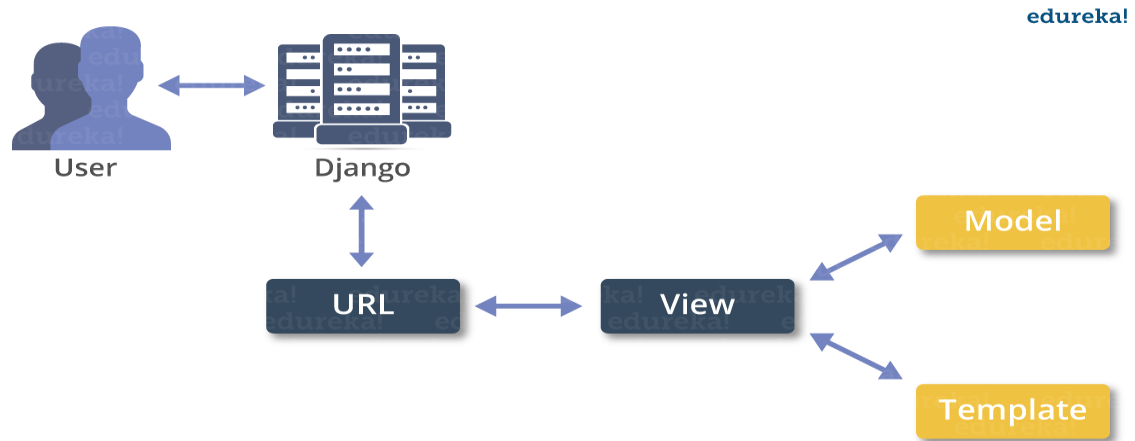


Fig. 4.1 – Django Framework web architecture [19]

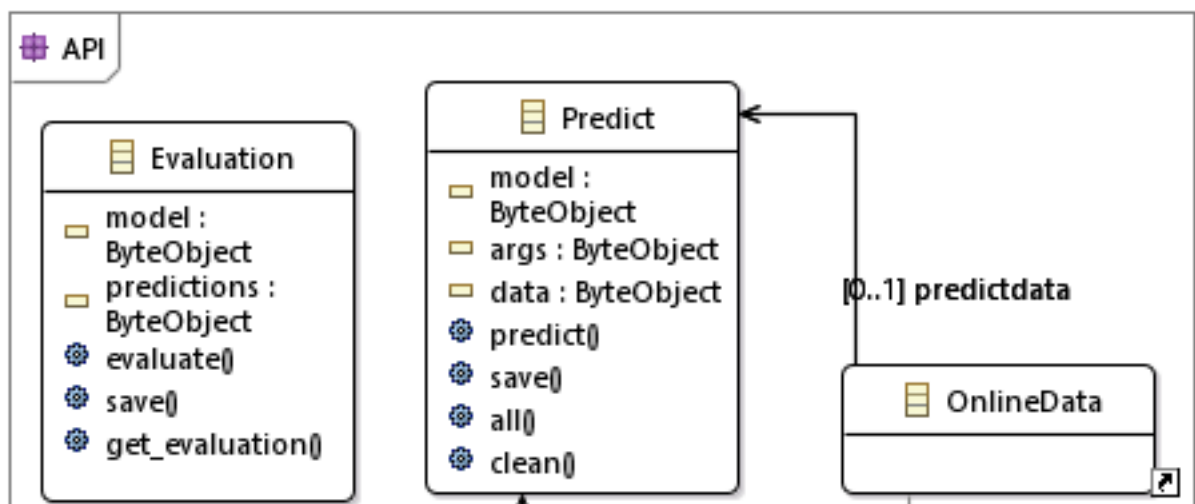


Fig. 4.2 – Class diagram of our Ortho API

Notre API prend un formulaire web de Django en entrée et retourne un message de décision. Le framework django fait la validation du formulaire avant d'appeler l'API. Si tous les champs du formulaire sont bien validés et toutes les valeurs obligatoires sont présentes, alors l'API prend le formulaire et fait un pré-traitement des données. S'il trouve des données optionnelles qui sont vides ou nulles, il les remplace par "NaN" et s'il trouve des champs booléens, il les remplace par 0 si

c'est **No** et par **1** si c'est **Yes**.

Le diagramme de classe présenté dans la figure 4.3 permet de répondre à deux des cas d'utilisation que nous avons défini dans le diagramme de cas d'utilisation. Mais nous allons voir brièvement le fonctionnement de ce diagramme dans l'API :

Predict. La classe qui répond à l'exigence **Predict** défini à l'introduction. Elle trois attributs et quatre méthodes. L'attribut **model** est le modèle machine learning désérialisé. L'attribut **args** est un dictionnaire qui stocke la décision rendue par le modèle et un message de prédiction. La méthode **predict** calcule la prédiction en fonction des données du formulaire. La méthode **save** permet de sauvegarder les prédictions après avoir rendu une décision.

Evaluation. La classe d'évaluation permet de répondre à l'exigence **evaluate** défini dans le diagramme de cas d'utilisation à l'introduction générale. Elle contient deux attributs et trois méthodes. L'attribut **model** obtient le modèle du machine learning construit. L'attribut **predictions** est une liste de toutes les prédictions qui ont déjà traitées par le modèle. L'opération **evaluate** permet de d'évaluer le modèle en fonction de l'ensemble de **prédictions**. L'opération **save** sauvegarde le résultat de l'évaluation.

La construction de l'API Ortho est un travail d'ingénierie de logiciels, ce qui permet de combiner ensemble deux champs d'études de l'informatique (**Machine learning et Software Engineering**) décrit dans la classe digramme présenté à la figure 4.3. Il faut relater que les modèles de machine learning ont besoin d'une couche d'ingénierie de logiciels pour leur rendre accessible aux utilisateurs qui ne comprennent rien en machine learning. Dans la vraie vie, ceux qui utilisent les modèles ne connaissent rien ni en machine learning ni en software engineering. C'est pourquoi dans tout lieu où il y a une équipe de data scientist qui travaillent, il y a aussi une équipe de développement de logiciels.

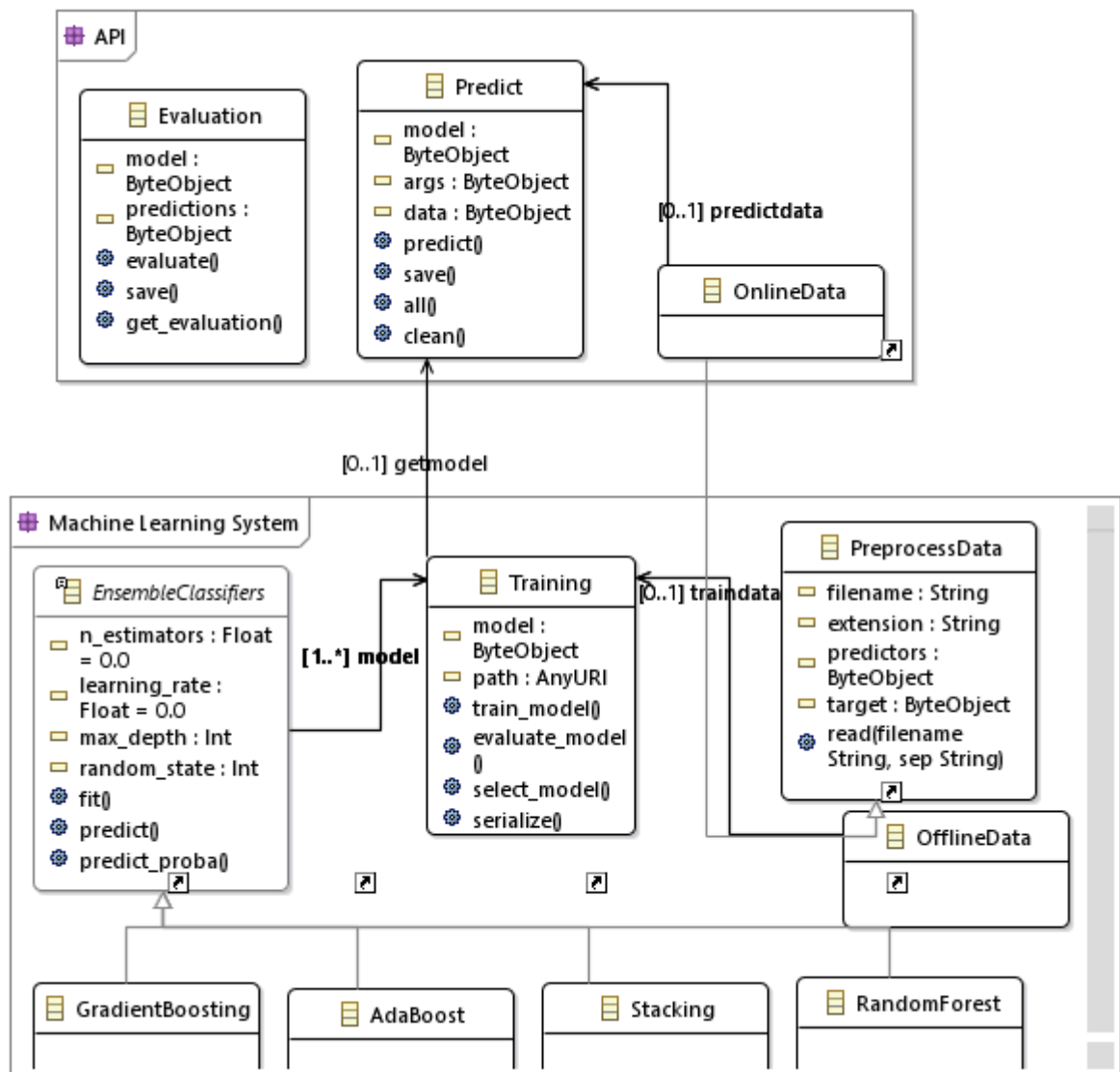


Fig. 4.3 – Connexion between our API and machine learning system

4.3 Déploiement de notre système

Le système que nous développons a eu deux grandes phases de développement comme mentionné dans l'introduction. En plus, nous avons utilisé Django comme framework web qui a des fonctionnalités prédéfinies que nous utilisons dans notre projet. Maintenant nous allons montrer comment nous combinons tous ces morceaux ensemble pour donner un système. Le diagramme de déploiement présenté à la figure 4.4 donne une vue générale des différentes connexions de chaque système. Voyons une brève description de chaque noeud de notre diagramme de déploiement :

Seattle University Data Server. C'est le serveur de données de l'université Seattle. Ce serveur contient la base de données des patients qui ont subi des arthroplasties aux États-Unis. C'est notre source de données.

Machine Learning System. C'est notre système ML que nous avons développé dans le chapitre 3. Il contient cinq composantes.

Web Repository. C'est le dépôt web qui contient notre modèle machine learning.

Deployment System. Le système de construction de notre API Ortho et l'environnement Django.

Server web. L'hébergeur du site web Ortho predictions. Le service va être en ligne.

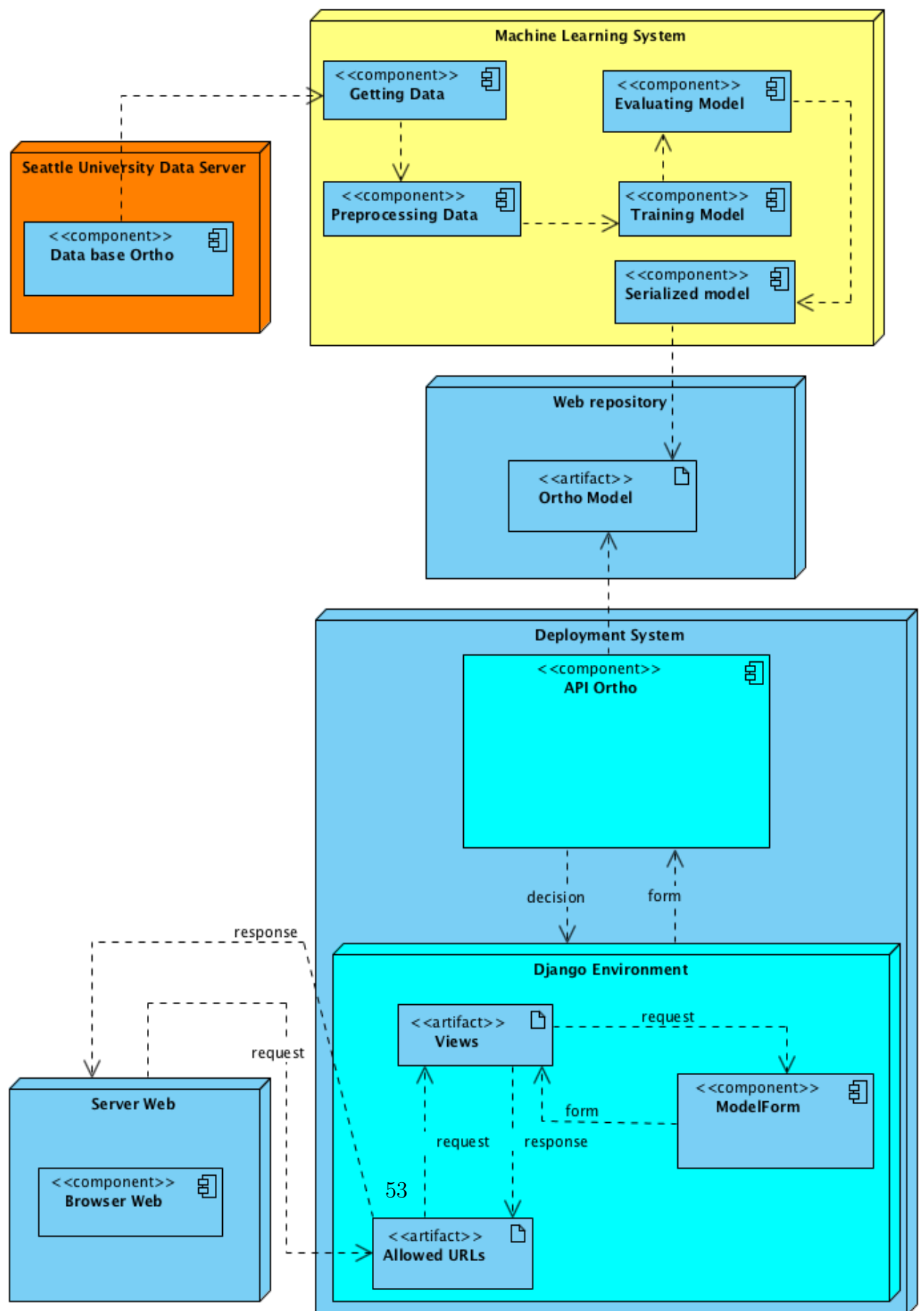


Fig. 4.4 – A deployment diagram of our tool

5 | Évaluation

5.1 Évaluation du modèle machine learning

L'évaluation des algorithmes d'apprentissage automatique est une partie essentielle de tout projet. Le modèle peut nous donner des résultats satisfaisants lorsqu'il est évalué à l'aide d'une métrique, par exemple **precision_score**, mais il peut donner de mauvais résultats lorsqu'il est évalué par rapport à d'autres mesures, telles que **logarithmic_loss** ou toute autre mesure de ce type. Évaluer un projet de machine learning est différent d'évaluer les projets de génie logiciels traditionnels. La différence est que pour évaluer de tels projets, il faut tenir compte des différentes théories de machine learning permettant de faire des évaluations sur des modèles. Ce que nous avons déjà dans la sous-section 2.3.1 portant sur la "**Mesure de performance des algorithmes de classification**" au chapitre "**Contexte théorique**".

Pour évaluer notre modèle, nous avons séparé notre ensemble de données en deux (Train Set et Test Set). Le train set a été utilisé pour construire le modèle et le test set pour faire l'évaluation du modèle. Nous avons séparé le jeu de données comme suit : 80% pour le train set et 20% pour le test set. Puisque notre jeu de données était déséquilibré, nous n'avons pas ré-échantillonné (resampling en anglais) notre ensemble de test, parce que les nouvelles données que le modèle va prédire se seront jamais ré-échantillonné. D'autres raisons de ce choix est que si nous ré-échantillonons l'ensemble de test, il est fort probable que le modèle soit biaisé, ce qui provoquera de fausses prédictions.

La table 5.1 donne les résultats de l'évaluation de notre modèle sélectionné comme le meilleur. On pourrait constater que cette table est ressemblée à la table de comparaison des différents algorithmes entraînés dans le projet (table 3.3). La raison est que pour comparer et sélectionner les différents algorithmes, il faut d'abord évaluer chaque algorithme. C'est comme une évaluation anticipée. Une interprétation sommaire de cette évaluation est que 8% des prédictions faites par le modèle est erroné et 92% sont correctement classées. Pour faire cette interpre-

Model's name	AdaBoostClassifier
Precision score	0.9291845493562232
Recall score	0.9002079002079002
Area under Curve	0.8511029411764706
F1 score	0.914466737064414

TABLE 5.1 – Gives different results of our model evaluation

tation, nous nous tenons compte du ” **Precision score** ” de la table 5.1.

5.2 Evaluation de notre API Ortho

Pour évaluer notre API, nous avons construit un diagramme de séquence qui montre comment les orthopédistes peuvent utiliser l’API pour prédire un retour. Et l’API à son tour se connecte au repository du machine learning pour charger le modèle sérialisé par le système machine learning. La figure 5.1 est la classe diagramme qui montre les interactions entre les orthopédistes et ses différents objets impliqués dans le scénario de la prédiction.

Nous allons décrire brièvement les différents messages qui permettent à un orthopédiste de réussir une prédiction.

1. **Fill form and press predict.** Quand l’orthopédiste accède à la page de la prédiction, il doit remplir le formulaire et ensuite appuyer sur le bouton Predict pour envoyer le formulaire ;
2. **Validate Form.** Le moteur Django est engagé de faire la validation automatique du formulaire selon les critères qu’on avait précisés dans l’étape de conception du formulaire ;
3. **Form is validated.** Si le formulaire est validé, Django retourne un message que la validation est vraie c’est-à-dire le formulaire est bien rempli ;
4. **Predict decision using the validated form.** Le formulaire rempli est passé à l’API comme paramètre. L’API fait le traitement du formulaire tel que nous avons vu dans la phase de construction de l’API.
5. **Load model.** L’API charge le modèle qui est hébergé dans le repository de machine learning. Le repository peut être le serveur de la compagnie ou le cloud ;
6. **Model loaded.** L’API utilise le modèle pour faire la prédiction utilisant

le formulaire pré-traité et rendu sous forme d'un dataframe (un objet de la classe DataFrame de la librairie Pandas) ;

7. **Decision predicted.** L'API rend la décision si le patient doit retourner ou rester à l'hôpital ;
8. **A message with the decision.** Une réponse en format de chaîne de caractère est rendu à l'utilisateur dans ce cas l'orthopédiste. Cette réponse est le message de la décision.

5.3 Limitations et travaux futurs

Notre projet est loin d'être exhaustif, il reste beaucoup de choses à faire mais les parties essentielles du projet sont réalisées. Nous pouvons considérer tout ce que nous avons fait jusqu'à présent dans ce projet comme étant une première version du système. Pour le moment, on peut utiliser le système pour faire la prédiction et l'évaluation de notre modèle déployé. C'est-à-dire n'importe quel orthopédiste peut utiliser le système pour prédire si son patient doit rester à l'hôpital et s'il doit retourner chez lui après une arthroplastie. Pour que le médecin orthopédiste puisse faire ces prédictions, il doit, préalablement remplir un formulaire web qui contient les champs nécessaires pour compléter un dossier médical.

Comme travaux futurs, nous prévoyons inclure les modules qui gèrent le monitoring et management du modèle. Et aussi la gestion des sessions puisque tout le monde peut avoir accès au module de prédictions mais les modules monitoring et management sont réservés aux administrateurs du système.

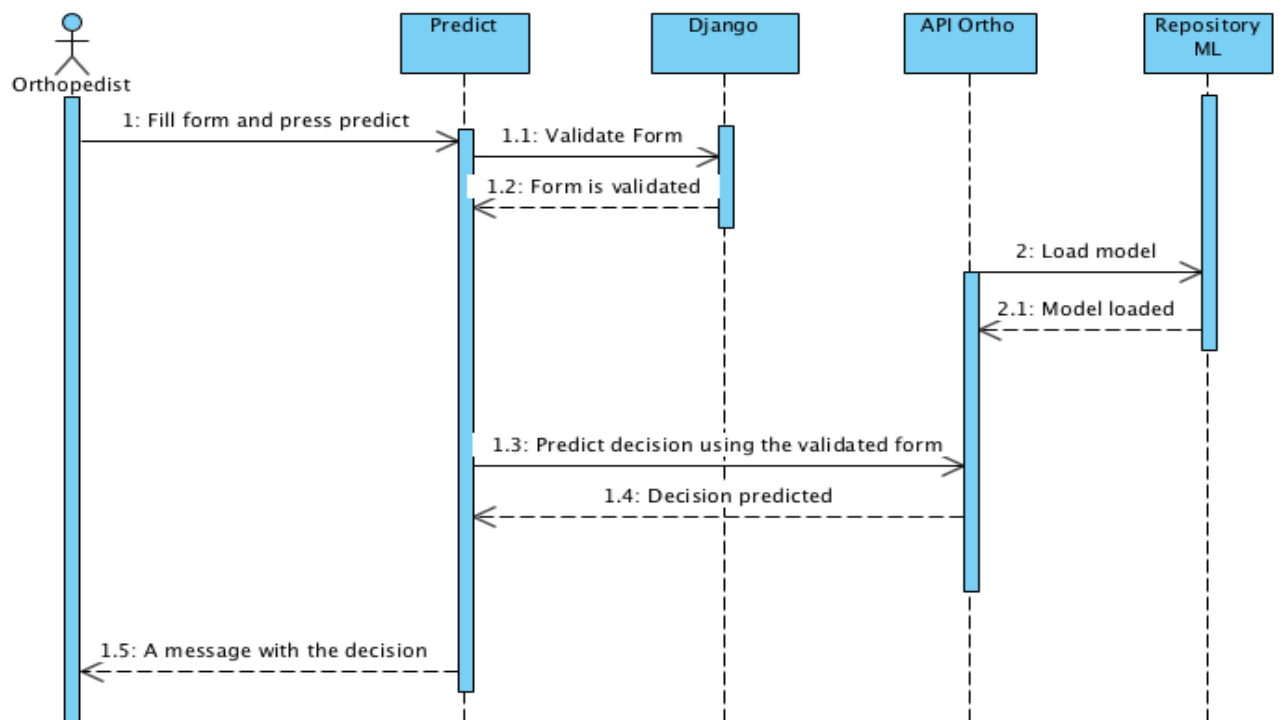


Fig. 5.1 – Sequence diagram for evaluating our API tool

6 | Travaux connexes

Nous n'avons pas trouvé de travaux connexes directement liés à notre domaine c'est-à-dire aucun organisme n'a encore développé de systèmes liés au risque de retour des patients après une arthroplastie. Par contre nous avons trouvé des projets qui ont des points similaires par rapport à notre projet tels que les classes dés-équilibrées, la technique SMOTE, le problème de classification et les algorithmes ensemblistes. Aussi nous avons trouvé des APIs conçus pour être utilisés dans l'apprentissage automatique.

MLlib, une bibliothèque d'apprentissage automatique distribuée de Apache Spark (plateforme populaire adaptée aux tâches d'apprentissage machine itératives) a été présenté par Xiangrui Meng et al. [13]. La bibliothèque cible les paramètres d'apprentissage à grande échelle qui bénéficient du parallélisme des données ou du parallélisme des modèles pour stocker et exploiter des données ou des modèles. MLlib consiste en des implémentations rapides et évolutives d'algorithmes d'apprentissage standard pour les paramètres d'apprentissage communs, y compris la classification, la régression, le filtrage collaboratif, la mise en grappe et la réduction de la dimensionnalité. Il fournit également une variété de statistiques sous-jacentes, d'algèbre linéaire et de primitives d'optimisation. Écrit dans Scala et utilisant des bibliothèques d'algèbre linéaire (basées sur C++) sur chaque nœud, MLlib inclut des API Java, Scala et Python, et est publié dans le cadre du projet Spark sous la licence Apache 2.0. MLlib fournit une API de haut niveau qui exploite l'écosystème riche de Spark pour simplifier le développement de pipelines d'apprentissage automatique de bout en bout. Dans notre projet, nous avons conçu notre propre API spécifique à nos besoins.

MXNet est une bibliothèque d'apprentissage automatique multi-langages pour faciliter le développement d'algorithmes ML, en particulier pour les réseaux neuronaux profonds. Incorporé dans le langage hôte, il mélange l'expression symbolique déclarative avec le calcul tensoriel impératif pour maximiser l'efficacité et la flexibilité. Il offre une différenciation automatique pour dériver des dégradés. MXNet est efficace en termes de calcul et de mémoire et fonctionne sur divers sys-

tèmes hétérogènes, allant des périphériques mobiles aux clusters GPU distribués. La conception de l'API et l'implémentation du système de MXNet ont été réalisés par Tianqi Chen et al. [12]. Nous avons préféré de développer notre propre API en fonction de nos besoins et notre ensemble de données. En machine learning, il n'y a pas d'API meilleur que d'autres, tout dépend du contexte de développement qu'on se trouve et la situation à laquelle on fait face. Souvent, il vaut mieux de développer ses propres outils spécifiques et adaptés à ce qu'on veut faire.

Une étude a été réalisée par Lars Buitinck et al. [10] sur l'API scikit-learn et de la manière dont elle mappe les concepts et les tâches d'apprentissage automatique sur les objets et les opérations dans le langage de programmation Python. Ils ont montré comment une API cohérente à travers le paquet rend scikit-learn très utile dans la pratique : expérimenter avec différents algorithmes d'apprentissage est aussi simple que de substituer une nouvelle définition de classe. Grâce à des interfaces de composition telles que Pipelines, Feature Unions et méta-estimateurs, ces blocs de construction simples conduisent à une API puissante et capable d'accomplir une grande variété de tâches d'apprentissage dans une petite quantité de code facile à lire. Par le biais du typage de canard, l'API cohérente conduit à une bibliothèque qui est facilement extensible, et permet aux estimateurs définis par l'utilisateur d'être incorporés dans le flux de travail scikit-learn sans héritage d'objet explicite. Notre API est aussi connecté à l'API scikit-learn pour donner de bons résultats dans notre projet. Par exemple, notre API doit accéder à notre modèle de machine learning conçu en utilisant les algorithmes classificateurs de la librairie scikit-learn. Cette technique produit de bons résultats puisque l'API scikit-learn a été conçu pour être utilisé de cette manière.

Alberto Fernández et al. [9] ont fourni une analyse expérimentale approfondie qui permettra de déterminer le comportement des différentes approches proposées dans la littérature spécialisée. Tout d'abord, ils ont utilisé des schémas de binarisation, c'est-à-dire, un par rapport à un et un par rapport à tous, afin d'appliquer les approches standard à la résolution de problèmes de classes binaires déséquilibrées. Deuxièmement, ils ont appliqué plusieurs procédures ad hoc qui ont été conçues pour le scénario d'ensembles de données déséquilibrés avec plusieurs classes. Leur étude expérimentale inclut plusieurs algorithmes bien connus de la littérature tels que les arbres de décision, les machines à vecteurs de support et l'apprentissage par instance, avec l'intention d'obtenir des conclusions globales à partir de différents paradigmes de classification. Tandis que dans notre projet nous avons utilisé les algorithmes ensemblistes qui donnent de meilleurs résultats que les algorithmes simples utilisés dans cette étude.

Sreejita Ghosh et al. [11] ont réalisé un travail dans le domaine biomédical, un taux de détection élevé de maladies éventuellement rares est généralement hautement souhaitable alors que des erreurs dans la classe majoritaire (par exemple des témoins sains) peuvent être plus acceptables. Par conséquent, l’optimisation de la précision prédictive globale est souvent inadaptée. Ils ont analysé un grand ensemble de données de GC / MS urinaires de 829 contrôles et 68 patients souffrant de l’un des trois troubles stéroïdiens innés. Ils ont utilisé 2 algorithmes comparables capables de gérer de grandes quantités de données manquantes. En outre, ils ont comparé différentes stratégies pour traiter les données fortement déséquilibrées, y compris le sous-échantillonnage, le sur-échantillonnage et l’introduction de coûts par classe. Dans cette étude, ils ont utilisé SMOTE pour équilibrer mais ils n’ont pas utilisé les algorithmes ensemblistes qui sont conçus pour être adaptés aux jeux de données déséquilibrés.

Rukshan Batuwita and Vasile Palade [4] ont démontré que les SVM (Support Vector Machines) pourraient produire des résultats sous-optimaux avec des jeux de données déséquilibrés, malgré c’est une technique d’apprentissage automatique très populaire. Autrement dit, un classificateur SVM formé sur un ensemble de données déséquilibré peut produire des modèles sous-optimaux qui sont biaisés vers la classe majoritaire et ont une faible performance sur la classe minoritaire, comme la plupart des autres paradigmes de classification. Diverses techniques de pré-traitement et d’algorithmique des données ont été proposées dans la littérature pour atténuer ce problème pour les SVM. Il existe des méthodes qui ont utilisé la combinaison des deux méthodes externes et internes pour résoudre le problème de déséquilibre de classe pour les SVM. La méthode hybride de l’ensemble des machines à noyau (HKME) combine un SVM binaire standard et un classificateur SVM à une classe pour résoudre le problème du déséquilibre de classes. La différence avec notre projet, c’est que nous avons utilisé des techniques dédiées pour faire le resampling, non pas des techniques combinées comme proposé dans cet article.

Rok Blagus and Lara Lusa [5] ont appliqué SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling TEchnique) à des données déséquilibrées de classe à haute dimension (à la fois simulées et réelles) et ont également utilisé des résultats théoriques pour expliquer le comportement de SMOTE. Les principales conclusions de leur analyse sont :

- dans le réglage de faible dimension SMOTE est efficace pour réduire le problème de déséquilibre de classe pour la plupart des classificateurs ;
- SMOTE n’a pratiquement aucun effet sur la plupart des classificateurs formés aux données de grande dimension ;

- lorsque les données sont de haute dimension SMOTE est bénéfique pour les classificateurs k-NN si la sélection de variables est effectuée avant SMOTE ;
- SMOTE n'est pas bénéfique pour les classificateurs d'analyse discriminante, même dans le cadre de basse dimension ;
- sous-échantillonnage ou, pour certains classificateurs, l'ajustement de coupe est préférable à SMOTE pour les tâches de prédiction de classe de grande dimension.

Dans cette étude, les auteurs ont décrit les avantages d'utiliser SMOTE mais ils n'ont pas proposé les algorithmes qui fonctionnent mieux avec cette technique. Si vous utilisez SMOTE dans vos projets, vous ne pouvez pas utiliser les algorithmes classiques de machine learning parce que les résultats peuvent être biaisés facilement. Il faut toujours utilisé les classificateurs fort comme les ensemblistes.

7 | Conclusion générale

Nous avons développé un outil qui permet aux orthopédistes américains de déterminer de façon automatique quand un patient doit retourner chez lui après une arthroplastie et quand il doit rester à l'hôpital pour une réadaptation. Le projet était important parce que les compagnies d'assurance de santé américaine ne couvrent pas les frais relatifs à la réadaptation d'un patient qui sont très élevés soit environ \$ 30,000 par réadaptation. Ces coûts doivent être couverts par les hôpitaux et les compagnies d'assurance ne couvrent que les arthroplasties qui sont les opérations. Nous avons dit également, il est très fastidieux pour un médecin de vérifier manuellement un dossier patient compte tenu du volume des informations. Grâce à notre outil les docteurs orthopédistes américains peuvent prédire automatiquement la décision à prendre après une arthroplastie.

Pour développer cet outil, nous avons démontré comment nous pouvons combiner les techniques de machine learning et celles du software engineering pour aboutir à l'implémentation d'un système complet. Par conséquent, notre projet a été divisé en deux grandes phases qui, elles-mêmes, contiennent plusieurs étapes. Dans la première phase du projet, on a réalisé le cycle de travail complet d'un data scientist depuis l'obtention des données jusqu'à la modélisation (étape qui consiste à entraîner différents modèles machine learning en vue de sélectionner le meilleur qui répond à notre problématique). Cette phase se termine par la sérialisation du modèle estimé meilleur en vue de son utilisation future. Dans la deuxième phase, nous avons vu le déploiement de notre modèle machine learning sérialisé. Cette phase est la conception de notre API Ortho. Ce dernier a été conçu en utilisant le framework web Django que nous avons décrit dans le chapitre 4.

Pour chaque phase de notre projet, nous avons construit un diagramme de cas d'utilisation expliquant les différentes exigences que notre système doit satisfaire et nous avons donné une brève explication de chaque cas d'utilisation dans l'introduction générale. Dans les chapitres 3 et 4 nous avons dessiné deux diagrammes de classe, un pour chaque diagramme de cas d'utilisation dans le but d'expliquer les différentes opérations nécessaires pouvant satisfaire les exigences que nous avons

décrites. Nous avons vu un diagramme de déploiement permettant de connecter les différents noeuds facilitant le déploiement du système.

Difficultés rencontrées. Les développements des projets de machine learning peuvent avoir des problèmes différents l'un de l'autre. Les facteurs qui déclenchent ces problèmes peuvent être liées soit au développement technique du projet, soit à l'administration ou aux interdictions légales. Pour réaliser ce projet de stage, nous n'étions pas exempts de ce problème, nous avons fait face à des difficultés techniques et parfois même administratives comme tout autre projet dans un sens général. La liste suivante donne une vue générale de quelques-unes que nous avons rencontrées :

- La première difficulté que nous avons eu c'est de combiner le machine learning et le software engineering. Puisqu'au début du stage je n'ai pas eu de connaissances en machine learning ;
- choisir la meilleure technique de ré-échantillonnage (resampling) est une difficulté car aucune technique n'est supérieure à d'autres, tout dépend de la problématique étudiée. Pour choisir le SMOTE, il a fallu qu'on essaye plusieurs techniques et comparer les résultats pour déterminer le meilleur en fonction de notre jeu de données ;
- le choix de l'algorithme était une autre difficulté puisque les algorithmes traditionnels ne fonctionnent pas sur un jeu de données déséquilibré. Même pour choisir un algorithme ensembliste est difficile car chacun a une approche différente l'une de l'autre. Par exemple les algorithmes boosting sont séquentiels tandis que les bagging sont avec remplacement. Donc le choix devient difficile ;
- l'ensemble de données était très petit pour faire l'entraînement des modèles. En machine learning plus votre ensemble de données est petit, plus votre modèle n'est pas fiable. Trouver de nouvelles données est difficile puisque ça doit prendre six mois environ à cause des démarches administratives à entreprendre ;
- les données médicales sont des données très sensibles. Avoir accès à ces données est difficile car c'est interdit par la loi.

Leçons apprises. Puisque nous soutenons que nous avons rencontré des problèmes dans le développement de notre projet, il est primordial de faire ressortir les différentes leçons que nous avons apprises à partir de ces difficultés. Voici deux grandes leçons que j'ai apprises au cours du développement de ce projet :

- **Combinaison de plusieurs spécialités.** Nous avons appris que toutes les spécialités informatiques peuvent se combiner les unes avec les autres.

Par exemple un API développé en Software engineering peut être utilisé pour connecter à des modèles développés en machine learning. On peut aussi utiliser les diagrammes UML pour décrire un système de machine learning ou n'importe quel autre système en général. De même que les sciences ne sont pas isolées entre elles, de même aussi les spécialités informatiques ne sont pas isolées entre elles ;

- **Technologies apprises.** Au début de ce projet, nous ne savions rien ni en machine learning ni en python. Maintenant nous savons utiliser toutes les bibliothèques de machine learning de python telles que scikit-learn, mlxtend, pandas, matplotlib, numpy, scipy etc. Nous avons appris à développer en Django un framework web de python dont nous avons utilisé pour le développement de notre API.

Notre outil va être déployé sur le serveur web de la compagnie pour laquelle je fais le stage (ML+). L'outil va être en ligne et son utilisation sera gratuite pour tous les orthopédistes américains qui veulent uniquement prédire un retour. Mais ceux qui veulent évaluer, suivre et gérer un modèle doivent être d'abord administrateur du système. Pour être administrateur, il faut contacter de ML+ et vous aurez un compte qui vous donnera accès ; néanmoins certaines conditions peuvent être appliquées tel que un frais unique. Le code de source de notre projet est disponible sur Github et le lien pour y accéder est le suivant : <https://github.com/top1986/NewInternshipProject>.

A | Annexe A

Feature name	datatype	non-null	null	Comments
Side	Categorical	2718	0	Détermine si c'est à gauche ou à droite du patient a eu son arthroplastie. Deux valeurs possibles : R (pour Right en anglais) et L (Pour Left en anglais)
Procedure	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient a eu une procédure dans le passé
RawDx	Categorical	2718	0	Diagnostic brute du patient
PriorContralateral	Boolean	2703	15	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PriorContralateral</i>
TSA	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>TSA</i>
RTSA	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>RTSA</i>
Tendon Transfer	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Tendon Transfer</i>
Dx1	Categorical	2718	0	Représente diagnostique 1
Dx2	Categorical	176	2542	Représente diagnostique 2
Dx3	Categorical	2	2716	Représente diagnostique 3
GHOA	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>GHOA</i>
AVN	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>AVN</i>
RCT	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>RCT</i>

FailedRCR	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>FailedRCR</i>
ComboRCT	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>ComboRCT</i>
RCTA	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>RCTA</i>
IA	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>IA</i>
PTA	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PTA</i>
PHFx	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PHFx</i>
PHFxSequelae	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PHFxSequelae</i>
Other	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Other</i>
AGE_AT_ADMIT	Numerical	2718	0	L'âge du patient
ASA_SCORE	Numerical	2716	2	Les commentaires sont à venir
Gender	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est un <i>Gender</i>
Female	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient est un <i>Female</i>
Discharge	Boolean	2718	0	On veut savoir si oui ou non le patient doit retourner chez lui
Height	Numerical	2293	425	La hauteur du patient
Weight	Numerical	2301	417	Le poids du patient
BMI	Numerical	2283	435	L'indice de masse corporelle (IMC)- BMI en anglais
PreOpHgb	Numerical	272	2446	Hémoglobines blanches du patient
PreOpCr	Numerical	255	2463	Conditions pré-opératoires du patient
PreOpALC	Numerical	157	2561	Conditions pré-opératoires du patient
PreOpGlucose	Numerical	253	2465	Glucose du patient

arrhythmias	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>arrhythmias</i>
valvular	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>valvular</i>
pulm circ	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>pulm circ</i>
PVD	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PVD</i>
HTNw/oCx	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>HTNw/oCx</i>
HTNw/Cx	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>HTNw/Cx</i>
Paralysis	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Paralysis</i>
other neuro	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>other neuro</i>
chronic pulm	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>chronic pulm</i>
DMw/oCx	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>DMw/oCx</i>
DMw/Cx	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>DMw/Cx</i>
hypothyroid	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>hypothyroid</i>
renal failure	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>renal failure</i>
liver failure	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>liver failure</i>
PUD	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PUD</i>
AIDS	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>AIDS</i>
L0oma	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>L0oma</i>

Mets	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Mets</i>
solidCaw/oMets	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>solid-Caw/oMets</i>
RA/CVD	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>RA/CVD</i>
coagulopathy	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>coagulopathy</i>
obesity	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>obesity</i>
weightLoss	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>weightLoss</i>
fluidElectrolyte	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>fluidElectrolyte</i>
bloodLossAnemia	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>bloodLossAnemia</i>
DeficiencyAnemia	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>DeficiencyAnemia</i>
EtOH	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>EtOH</i>
Drugs	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Drugs</i>
Psychosis	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Psychosis</i>
Depression	Boolean	2092	626	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Depression</i>
Plavix	Numerical	2482	236	Les commentaires sont à venir
Dabigatran	Boolean	2482	236	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Dabigatran</i>
Enoxaparin	Numerical	2482	236	Les commentaires sont à venir
Rivaroxaban	Numerical	2482	236	Les commentaires sont à venir
Warfarin	Numerical	2482	236	Les commentaires sont à venir

PreOpNarcotic	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PreOpNarcotic</i>
PreOpBloodThinner	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PreOpBloodThinner</i>
PreOpSteroids	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PreOpSteroids</i>
PreOpInsulin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PreOpInsulin</i>
PreOpDMMeds	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>PreOpDM-Meds</i>
Oxycodone	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Oxycodone</i>
Hydrocodone	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Hydrocodone</i>
Vicodin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Vicodin</i>
percocet	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>percocet</i>
Oxycontin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Oxycontin</i>
Dilaudid	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Dilaudid</i>
Aspirin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Aspirin</i>
Warfarin.1	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Warfarin.1</i>
Coumadin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Coumadin</i>
Plavix.1	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Plavix.1</i>
Clopidogrel	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Clopidogrel</i>

Prednisone	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>Prednisone</i>
insulin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>insulin</i>
humulin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>humulin</i>
lantus	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>lantus</i>
lispro	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>lispro</i>
aspart	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>aspart</i>
metformin	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>metformin</i>
glipizide	Boolean	900	1818	On veut savoir si oui ou non le patient est atteint de <i>glipizide</i>

TABLE A.1 – Our whole dataset

Bibliographie

- [1] D. Amina and D. Soumia. Etude comparative des methodes ensemblistes de classification des donnees medicales. *Universite Abou Bakr Belkaid de Tlemcen*, 2017.
- [2] R. K. P. . R. Barry. Sparse spatial autoregressions. *Statistics & Probability Letters*, 1997.
- [3] B. Bashinskaya, R. M. Zimmerman, B. P. Walcott, and V. Antoci. Arthroplasty utilization in the united states is predicted by age-specific population groups. *ISRN Orthopedics*, 2012.
- [4] R. Batuwita and V. Palade. Class imbalance learning methods for support vector machines. *Singapore-MIT Alliance for Research and Technology Centre*, 2012.
- [5] R. Blagus and L. Lusa. Smote for high-dimensional class-imbalanced data. *BMC Bioinformatics*, February 2013.
- [6] P. K. Chan and S. J. Stolfo. Toward scalable learning with non-uniform class and cost distributions : A case study in credit card fraud detection. *American Association for Artificial Intelligence*, 1998.
- [7] Datmo. Deploying a machine learning model as an api with datmo, falcon, gunicorn, and python. <https://blog.datmo.io/deploying-a-machine-learning-model-as-an-api-with-datmo-falcon-gunicorn-and-python-1e422fa5fa49>, 2012.
- [8] T. Dunning and E. Friedman. *Machine Learning Logistics*. O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472., 2017.
- [9] A. F. et al. Analysing the classification of imbalanced data-sets with multiple classes : Binarization techniques and ad-hoc approaches. *ELSEEVIER*, 2013.
- [10] L. B. et al. Api design for machine learning software : experiences from the scikit-learn project. *arXiv*, 2013.

- [11] S. G. et al. Comparison of strategies to learn from imbalanced classes for computer aided diagnosis of inborn steroidogenic disorders. *European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning*, 2017.
- [12] T. C. et al. Mxnet : A flexible and efficient machine learning library for heterogeneous distributed systems. *arXiv*, 2015.
- [13] X. M. et al. Mllib : Machine learning in apache spark. *Journal of Machine Learning Research*, 2016.
- [14] Y. T. et al. Spam sender detection with granular svm on highly imbalanced mail server behavior data. *International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition*, April 2008.
- [15] S. Exchange. Bagging, boosting and stacking in machine learning. <https://stats.stackexchange.com/questions/18891/bagging-boosting-and-stacking-in-machine-learning>, November 2012.
- [16] A. C. M. . S. Guido. *Introduction to machine learning with Python*. O'REILLY, 2016.
- [17] <https://www.europusa.com>. Comment fonctionne le système de santé et les assurances aux etats-unis ? <https://www.europusa.com/assurance/pourquoi-et-comment-choisir-une-bonne-assurance-sante/comment-fonctionne-le-systeme-de-sante-et-les-assurances-aux-etats-unis/>, 2007.
- [18] T. M. K. . A. N. Jason Van Hulse. Experimental perspectives on learning from imbalanced data. *Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning*, 2007.
- [19] A. Johari. Django tutorial – web development with python django framework. <https://www.edureka.co/blog/django-tutorial/>, September 2017.
- [20] C. J. Lavernia, V. H. Hernandez, and M. D. Rossi. Payment analysis of total hip replacement. *Centers for Medicare and Medicaid Services*, pages <http://www.larkinhospital.com/larkinorthopedics/wp-content/uploads/2014/01/Payment-Analysis-of-Total-Hip-Replacement1.pdf>, 2007.
- [21] S. Marsland. *Machine Learning An algorithm perspective*. Chapman & Hall/CRC, 2009.

- [22] W. J. H. Michael Masaracchio and al. Timing of rehabilitation on length of stay and cost in patients with hip or knee joint arthroplasty : A systematic review with metaanalysis. *PLOS ONE*, 2017.
- [23] T. Mitchell. *Apprentissage artificiel, concepts et algorithmes*. Groupe Eyrolles, 2003.
- [24] T. M. Mitchell. *Machine Learning*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math ; (March 1, 1997), 1997.
- [25] Openclassrooms. Initiez-vous au machine learning. <https://openclassrooms.com/courses/initiez-vous-au-machine-learning/comment-resoudre-un-probleme-de-data-science>, 2014.
- [26] M. M. e. J.-L. R. Pirmin Lemberger, Marc Batty. *Big Data et Machine Learning*. Maitrise d'ouvrage des projets informatiques, 2014.
- [27] M. K. A. . C. Ram. A review on machine learning : Trends and future prospects. *Research Cell : An International Journal of Engineering Sciences*, 25(63019) :<http://ijoes.vidyapublications.com/>, November 2017.
- [28] Éric Biernat et Michel Lutz. *Data science : Fondamentaux et études de cas*. Yann LeCun, 2015.
- [29] E. D. Science. Data cleaning. <https://elitedatascience.com/data-cleaning>, 2011.
- [30] E. D. Science. Exploratory analysis. <https://elitedatascience.com/exploratory-analysis>, 2011.
- [31] E. D. Science. Feature engineering. <https://elitedatascience.com/feature-engineering>, 2011.
- [32] M. J. Towler. Confusion matrix. <https://alearningaday.com/2016/09/14/confusion-matrix/>, September 2014.
- [33] A. Vidhya. How to handle imbalanced classification problems in machine learning? <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/03/imbalanced-classification-problem/>, 2011.
- [34] F. C. . A. Vinciarelli. *Machine Learning for Audio, Image and Video Analysis*. British Library Cataloguing, 2008.
- [35] Wikipedia. Apprentissage automatique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage_automatique, 2011.

- [36] Wikipedia. Arthrose. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Arthrose>, 2011.
- [37] H. K. Zouari. *Contribution à l'évaluation des méthodes de combinaison parallèle de classifieurs par simulation*. Laboratoire PSI - FRE CNRS 2645, Décembre 2004.