



MASTER 2 MIAGE

Mémoire de fin d'études

Interprétabilité et explicabilité
des modèles boîtes noires

Auteur :
Damien JAIME

Tuteur :
Emmanuel HYON

Promotion 2019-2020

Remerciements

Ce mémoire symbolise la fin de cinq années d'études dans le supérieur. Je tiens tout d'abord à remercier tous les professeurs et les intervenants que j'ai rencontrés, qui m'ont instruit et permis d'évoluer.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon tuteur pour ce mémoire, monsieur Emmanuel HYON, pour m'avoir orienté, conseillé, mis a disposition de nombreuses ressources et pistes de réflexions.

Je remercie aussi monsieur Pascal Poizat, mon responsable de Master, pour son encadrement et ses conseils dans la réalisation de ce mémoire.

LISTE DES ACRONYMES

IA	<i>Intelligence artificielle</i>
NN	<i>Réseau de neurones (Neuronal Network)</i>
DNN	<i>Réseau de neurones profond (Deep Neuronal Network)</i>
RGPD	<i>Règlement Général sur la Protection des Données</i>
NLP	<i>Traitement automatique du langage naturel (Natural Language Processing)</i>
SVM	<i>Machine à vecteurs de support (Support Vector Machine)</i>
TE	<i>Ensemble d'arbres (Tree Ensemble)</i>

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
1 Contexte : un besoin d'explicabilité	3
1.1 Impact social de l'intelligence artificielle	4
1.2 L'éthique	5
1.3 Fiabilité et confiance	8
1.4 Performance	9
2 État de l'art	10
2.1 Interprétabilité et explicabilité	10
2.2 Ouvrir les boîtes noires	13
2.3 Approches utilisées	19
3 Application	25
3.1 Mise en évidence de biais	25
3.2 Améliorer la fiabilité	31
3.3 Performance	37
Annexes	40
.1 Revue des méthodes explicatives	41
.2 Description des méthodes explicatives	42

INTRODUCTION

Nous sommes au quotidien en contact avec une multitude de boîtes noires, c'est-à-dire un système cachant sa logique interne à l'utilisateur. L'utilisateur ne pouvant pas savoir ce qu'il se passe dans le système, de nombreuses questions se posent. Notamment sur la confiance à accorder en ces systèmes, mais aussi d'un point de vue éthique particulièrement sur les questions de discrimination et de protection de la vie privée de l'utilisateur.

Avec l'avènement de l'intelligence artificielle dans l'aide à la prise de décision, la problématique de compréhension de ces systèmes est devenu un des enjeux majeurs de notre génération. En effet, comment peut-on être assuré que notre modèle est réellement fiable ? Notre modèle a-t-il involontairement hérité de biais présent dans ses jeux de données d'entraînement ? Quel degré de compréhension est-il nécessaire de fournir et pour quelle complexité ? Ces questions sont très importantes dans le domaine médical par exemple où un faux négatif peut être très problématique, car à la différence des faux positifs il n'y a pas de vérification postérieure effectuée par l'humain. Par ailleurs, nombreux sont les cas où une intelligence artificielle a hérité de biais involontaire présent dans ses jeux de données d'entraînement engendrant différents types de discriminations. Comme par exemple l'intelligence artificielle de recrutement de l'entreprise Amazon qui rejetait automatiquement les CVs contenant le mot "femme"[Das18].

Depuis 2016, en Europe, le Règlement Général de l'Union européenne sur la Protection des Données (RGPD) impose un droit à l'explication des décisions algorithmiques prise au sujet d'un utilisateur [Bry16]. Or les raisons des décisions de ces algorithmes étant très abstraites même pour la personne l'ayant créée, un problème se pose et les utilisateurs ne peuvent pas réellement utiliser ce droit à l'explication.

En plus des questions d'éthique et de protections des utilisateurs, expliquer ces boîtes noires sera d'une très grande aide pour les entreprises afin de créer des produits plus sûrs, plus efficacement et les aider à mieux gérer les problèmes de responsabilité.

Pour toutes ces raisons, fournir une explication à un système de décision type boîte noire est un sujet de parfaite actualité suscitant de nombreuses attentes et tables rondes. Le "Gartner hype cycle for Emerging Technologies" de 2019 place ce sujet (Explainable AI) dans le pic des attentes et suppose une maturité dans les cinq à dix ans.

L'objectif de ce mémoire est donc de comprendre comment un système boîte noire et plus spécifiquement comment une intelligence artificielle est amenée à prendre une décision. Pour cela, nous allons analyser les différentes méthodes existantes dans la littérature et les appliquer à plusieurs cas concrets. Afin de savoir si expliquer ces systèmes boîte noire nous permettrait de résoudre les problèmes auxquels ils sont confrontés et pour lesquels ils sont tant critiqués. Les applications porteront donc sur les questions d'éthique, de fiabilité et de performance.

Le reste de ce mémoire sera organisé en plusieurs parties. Tout d'abord, nous commencerons par contextualiser afin de bien comprendre les différentes problématiques et dérives existantes. Nous enchaînerons par la suite avec un état de l'art divisé en deux parties : la première sera axée sur des définitions et présentations d'éléments conceptuels portant sur l'interprétabilité et de l'explicabilité, tandis que la seconde traitera des différentes méthodes et outils existant afin d'expliquer différents types de boîte noire. La suite consistera donc à appliquer ces méthodes afin d'évaluer leurs capacités à rendre un système de décision compréhensible par l'homme et de voir si ces explications permettent de palier aux problématiques décrites précédemment.

Chapitre 1

CONTEXTE : UN BESOIN D'EXPLICABILITÉ

Expliquer les modèles de décisions boîtes noires est un besoin se faisant de plus en plus ressentir et suscitant de nombreux débats et tables rondes dans la communauté scientifique. Les entreprises recherchent avant toute chose la performance et ce au détriment de la transparence des algorithmes utilisés. En effet dans le domaine du machine learning il existe une multitude d'algorithmes pouvant être utilisés afin de fournir une prédiction, mais il existe une corrélation non négligeable entre les performances et la transparence de notre modèle comme le montre la figure 1.1. En général, plus notre modèle est performant, plus il est difficile à comprendre.

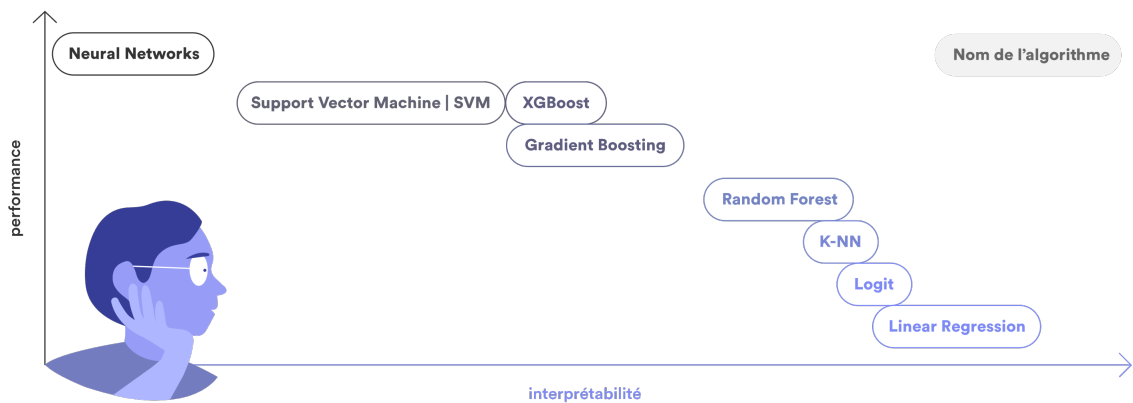


FIGURE 1.1 – Lien entre la performance et l'interprétabilité d'un algorithme de machine learning. *Source [Goo18]*

À l'heure actuelle, le réseau de neurones artificiel fait partie des algorithmes les plus performante et est le plus couramment utilisée. La non-explicabilité de ces modèles posent des problèmes de fiabilité, d'éthique et de responsabilité. Ce floue accentue aussi la méfiance et la peur des personnes envers l'intelligence artificielle, et entraîne un problème de compréhension entre les Data Scientist et les expert métier qui en plus de ne pas comprendre comment fonctionne le modèle ne comprennent pas non plus les raisons de son résultat. Aussi, expliquer ces modèles permettrait d'améliorer notre conformité à la loi (notamment vis-à-vis de la RGPD évoqué en introduction) ainsi que d'augmenter les performances de nos modèles. Cette nouvelle problématique présente donc de nombreux enjeux de tailles.

Ce besoins d'explicabilité se fait tellement ressentir qu'il devient un enjeu de taille même pour les plus hautes instances de l'état. Ainsi, en 2017, le Premier Ministre Français Édouard Philippe confie au mathématicien et député Cédric Villani une mission parlementaire d'information sur la stratégie française et européenne à adopter en matière d'intelligence artificielle. Communément appelé "Rapport Villani" [Vil18], il consacre toute une partie sur les questions d'éthique et arrive au constat suivant : le principal problème vient du fait que l'IA est une boîte noire. L'explicabilité de l'IA est un aspect fondamental de ce rapport et Villani donne des pistes pour améliorer ce domaine :

- **L'audit des IA** : Villani propose *"La constitution d'un corps d'experts dotés des compétences requises semble nécessaire pour procéder à des audits d'algorithmes et de bases de données sur pièce, et procéder à des tests par tout moyen requis."* L'idée est donc d'effectuer des contrôles dans les entreprises afin de palier à toutes dérives.
- **L'évaluation citoyenne des IA** : L'idée est la même que la précédente, mais appuie le fait que le contrôle, en plus d'être mis en place par un organe public, doit aussi provenir de la société civile.
- **Soutenir la recherche sur l'explicabilité** : L'IA et son explicabilité étant des disciplines récentes, le gouvernement se doit d'investir dans la recherche et de favoriser une collaboration étroite entre pouvoirs publics, laboratoires de recherche et industriels.

1.1 Impact social de l'intelligence artificielle

Dans son livre "Weapons of Math Destruction" [ONe16] l'américaine Cathy O'Neil qui a une formation en mathématiques, a été trader, puis data scientist dénonce l'impact social engendré par l'utilisation permanente des modèles

prédictifs dans nos vies. Le sous-titre de ce livre, qui en résume le propos, est "Comment le big-data augmente les inégalités et menace la démocratie". Pour commencer, Cathy O'Neil souligne le fait qu'un modèle prédictif ne peut pas couvrir la complexité du vrai monde, que les modèles se basent sur des comportements passés et classent les individus en tribus de façon arbitraire alors que la réalité est beaucoup plus complexe. De ce fait, le risque d'erreur est important et les probabilités ne reflètent pas forcément la réalité. Un autre problème est que les jeux de données utilisés ne sont pas nécessairement fiables ou adaptées au modèle et que ces modèles reflètent les choix subjectifs de leurs concepteurs. Le dernier problème majeur soulevé est que ces modèles sont opaques et qu'il n'est pas possible, contrairement au jugement humain, de faire appel en cas de désaccord. En outre, il est possible de camoufler des choix subjectifs (jugements raciaux ou discriminatoires par exemple) en créant un modèle émettant les prédictions allant dans le sens voulu afin de dédouaner la responsabilité sur le modèle.

L'intelligence artificielle aura donc pour effet de renforcer le déterminisme social et ainsi d'augmenter les inégalités. Là encore, expliquer ces décisions permettrait de prévenir des potentiels dérives et rendre l'explication obligatoire, dans certains cas, permettrait de remettre la responsabilité sur les concepteurs de ces modèles.

1.2 L'éthique

De nombreux cas très exposés dans les médias nous montrent que l'incompréhension à l'égard de l'IA peut amener à des problèmes du point de vue éthique. La question de l'éthique est souvent ramenée à deux aspects principaux : la discrimination et la protection des données privées des usagers.

1.2.1 La discrimination

La question essentielle à se poser est de savoir comment une intelligence artificielle est amenée à prendre des décisions discriminante. Dans un article, Barocas et Selbst distinguent cinq façons par lesquelles une intelligence artificielle pourrait aboutir à une discrimination [Sol16]. Ces cas sont uniquement des cas involontaires et ne prennent pas en compte une discrimination délibérée qui pourrait bien évidemment être possible.

- **Définition des variables cibles et des étiquettes de classes** : le but d'une intelligence artificielle est de découvrir des corrélations dans

des jeux de données. Ainsi, certain choix de variables cibles ou d'étiquettes de classes peuvent amener à faire des corrélations discriminatoire. Un exemple trivial serait de considérer un modèle permettant de savoir si un employé fait du travail de qualité, l'entreprise choisira de prendre en compte les retards des employés dans son modèle d'évaluation. Les personnes défavorisées habitant souvent loin de leur lieu de travail, ont plus souvent tendance à être en retard à cause des embouteillages et des problèmes de transport. Ces employés habitant loin, seront jugés comme faisant du travail de moins bonne qualité ce qui n'est pas forcément le cas. Si on ajoute à cela le fait que les personnes issus de l'immigration sont en moyenne plus pauvre et habitent en moyenne plus loin des centres villes, nous pouvons arriver involontairement à une IA discriminante par le simple fait d'utiliser l'étiquette "retard" dans l'évaluation des performances d'un employé.

- **Les données d'apprentissage** : les données d'apprentissage peuvent contenir des biais qui seront ensuite appris par notre modèle. L'exemple de l'IA de recrutement de l'entreprise Amazon qui rejetait les CVs contenant le mot "femme"[Das18] évoqué en introduction le montre bien. Cette IA avait enfaîte appris en analysant tous les profils recrutés par Amzon dans le passé, or les personnes recrutées étaient dans l'ensemble majoritairement des hommes et très majoritairement pour les postes technique. L'IA a donc déduis qu'il était préférable de recruter des hommes.
- **La collecte des données d'apprentissages** : Les lieux dans lesquels sont récoltées les données d'apprentissage sont aussi déterminant. Par exemple si l'on récolte des données concernant la criminalité dans un quartier avec des personnes issus majoritairement de l'immigration, l'IA aura plus tendance à considérer les immigrés comme de potentiels criminels par rapport aux personnes non-imigrées et inversement si on choisit un quartier avec des personnes majoritairement non-imigrées.
- **La sélection des caractéristiques** : Afin que l'IA puisse s'entraîner, il faut lui fournir des données qui sont en réalité une représentation simplifiée de notre monde. Ainsi, son créateur doit faire des choix pour sélectionner les caractéristiques qui constitueront cette représentation. Ce choix peut par concours de circonstance involontairement découler sur de la discrimination il faut donc les choisir avec parcimonie.
- **Données indirect** : Certaines données peuvent inclure des données indirect. Par exemple : *"un jeu de données qui ne contient pas de données explicites sur l'orientation sexuelle peut tout de même la dévoiler. Une étude de 2009 a montré que les liens d'"amis" sur Facebook révèlent par une méthode de prédiction précise l'orientation*

sexuelle des utilisateurs. Entre autre, le pourcentage d'"amis" s'identifiant comme homosexuels serait fortement corrélé avec l'orientation sexuelle de l'utilisateur concerné[Bor18].

Mieux comprendre le fonctionnement de nos algorithmes permettrait donc de mieux se prémunir des discriminations involontaires. Aussi on pourrait prendre en compte l'explication en plus de la prédiction afin de fournir un résultat optimal. Par exemple, aux États-Unis, un algorithme appelé Compas est utilisé par les juges pour évaluer la probabilité pour un prévenu de se faire arrêter à nouveau dans les deux ans à venir. Cet algorithme est beaucoup remis en cause, car il est jugé "non-pertinant" et "discriminatoire" par certaines personnes alors que d'autres ont grandement confiance en lui, deux camps s'affrontent donc. Dans ce cas-là, fournir une explication conjointement à la prédiction permettrait de mettre tout le monde d'accord, ainsi nous pouvons prendre en compte la prévision et déterminer si dans le cas précis elle est issue d'un jugement non-pertinant, discriminatoire ou autre.

Pour répondre aux problèmes d'éthique, le rapport Villani préconise, en plus de l'explicabilité des décisions, de penser l'éthique dès la conception. Notamment en intégrant ces problématiques dans la formation des ingénieurs et chercheurs en IA, ainsi qu'en instaurant une "étude d'impact sur les discriminations" aux acteurs mettant en oeuvre de tels algorithmes.

1.2.2 Protection des données

L'apprentissage d'une intelligence artificielle requière un très grand nombre de données, parmi lesquelles peuvent se trouver des données personnelles. L'utilisation d'un modèle pourrait donc aussi nécessiter de fournir des données personnelles afin d'effectuer une prédiction. L'utilisation de ces données jugées critiques est problématique, car des restrictions et des règles de protection en découlent. Tel qu'évoqué dans l'introduction, le RGPD par l'addition de plusieurs de ses articles implique un "droit à l'explication", car des données personnelles de l'utilisateur sont utilisées. Ce droit a été démontré par Seth Flaxman et Bryce Goodman [Bry16], ce qui a donc pour effet d'accentuer le besoin d'explicabilité des modèles de décision boîtes noires. En effet, pour le moment ce droit est inaccessible par les usagers et les entreprises éprouvent des problèmes de responsabilités. En plus des données personnelles, l'intelligence artificielle met en évidence des angles morts dans la législation actuelle. En effet, de nombreuses données jugé non-personnelles sont collectées et ce sans aucun contrôle car la législation ne prend en compte que les données à

caractère personnel. La collecte de nombreuses données jugées non-personnelles pouvant, par corrélation, découler sur des informations personnelles, un flou juridique existe. Mais, interdire la collecte de données aurait pour effet d'empêcher le développement de ces nouvelles technologies utiles et prometteuses, la question est donc de définir où mettre le curseur entre la protection des utilisateurs et le développement des technologies. La solution souvent évoquée est l'anonymisation qui consiste à collecter des données personnelles, mais à retirer toutes informations permettant de remonter jusqu'à la personne à qui appartient ces données. La collecte de données est une question épineuse qui sera sûrement amenée à faire évoluer la loi.

1.3 Fiabilité et confiance

Deuxièmement, expliquer les décisions prises par un modèle boîte noire permettrait d'augmenter la fiabilité que l'on lui accorde. Le modèle peut très bien fonctionner dans la plupart des cas, mais il est possible qu'il réagisse mal dans un certain cas bien spécifique. Avec l'absence de compréhension du fonctionnement interne de notre modèle, nous pouvons ne pas prévoir ce cas spécifique qui représente un risque. Le domaine médical par exemple est en attente d'une plus grande fiabilité de ses modèles en effet, une erreur peut avoir des conséquences graves et mettre en danger des personnes. La manière classique de mesurer la fiabilité d'un modèle est de calculer sa précision (accuracy), cela consiste simplement à diviser le nombre de prédictions correctes par le nombre de prédictions total. Cette méthode indispensable ne permet pas à elle seule de juger la fiabilité de notre modèle, admettons que nous arrivons à une précision de 100% rien ne nous dit que dans un cas très particulier notre modèle ne nous donnera pas une prédiction fautive. La compréhension de la logique interne de notre modèle sera donc un facteur supplémentaire afin d'appuyer la fiabilité que l'on lui donne.

De plus, un sondage publié par OpinionWay[Opi17] montre que 30% des Français ont peur d'un jugement porté par l'intelligence artificielle dans le domaine financier et 21% dans le domaine médical. L'incompréhension de la logique interne des algorithmes décisionnels tend à accentuer la méfiance envers ces technologies. Fournir une explication permettrait d'augmenter l'acceptation de ces nouvelles technologies par le grand public.

1.4 Performance

Expliquer la logique interne d'un modèle pourrai aussi être utile durant son développement afin de comprendre par exemple pourquoi il ne fonctionne pas bien dans certains cas voir même pourquoi il ne converge pas du tout. Ce qui aurai pour effet de simplifier son développement et améliorer sa compétitivité.

Mais l'explication a un coût, outre le temps de développement, fournir une explication à chaque prédiction augmentera le temps nécessaire à la prise de décision. Deux facteurs principaux entrent en jeu, le premier est le temps de calcul, le deuxième est le temps nécessaire à la lecture et à la compréhension de l'explication par un humain. Ainsi, dans certains domaines où la décision doit être prise extrêmement rapidement, fournir une explication ne sera pas possible pour la prise de décision, mais on pourrait imaginer qu'elle puisse être fournie à posteriori afin d'expliquer pourquoi le modèle a pris une telle décision pour des questions de responsabilité par exemple.

De plus, l'explication n'est pas exempte des prérequis classiques. Elle se doit elle aussi d'être précise, robuste et fiable, ainsi l'explicateur (entité fournissant l'explication) devra être testé et approuvé par des personnes compétentes dans le domaine de la prédiction cible. On pourrai donc l'évaluer et instaurer un seuil minimum de précision par exemple. Un autre aspect important à prendre en compte est la robustesse, on pourrai par exemple se poser les questions suivantes : l'explicateur fournit-il la même explication deux fois de suite pour une même instance ? Pour deux modèles entraînés avec le même code et le même jeu de données, l'explication pour une instance donnée est-elle la même ? L'explicateur est-il sensible aux potentiels bruits blancs (hasard ne pouvant être modélisée) de l'instance ?

Il est nécessaire garder en tête que l'explication est l'interprétation d'un modèle qui interprète le monde réel, nous ne devons pas donner une confiance aveugle à notre explication ni même à notre prédiction sous prétexte qu'elle est fournie avec une explication.

Chapitre 2

ÉTAT DE L'ART

2.1 Interprétabilité et explicabilité

Dans le domaine du machine learning, les mots interprétabilité et explicabilité sont très souvent utilisés conjointement et il peut être difficile au premier abords d'en saisir la différence. De plus, il existe de nombreuses définitions différentes pour ces termes et tous les experts ne s'accordent pas forcément à ce sujet. Après l'analyse de différentes propositions, nous nous accorderons, dans ce mémoire, à donner les définitions suivantes :

L'interprétabilité est le fait de pouvoir observer l'effet d'une cause dans un système c'est-à-dire de pouvoir prédire les changements dans la sortie lorsque l'on change une variable d'entrée.

L'explicabilité, quant à elle, est le fait d'expliquer dans des termes compréhensibles par l'homme la mécanique interne de notre système.

Afin de bien saisir la différence, le site *KDnuggets* nous invite, dans un article[Gal18], à voir les choses comme si nous faisons une expérience scientifique à l'école : L'expérience peut être interprétable dans la mesure où vous pouvez voir ce que vous faites et ses effets, mais elle n'est vraiment explicable qu'une fois que vous avez creusé la chimie derrière ce que vous pouvez voir se produire.

Créer un modèle interprétable implique de prendre en compte plusieurs facteurs :

Interprétabilité globale et local L'interprétabilité d'un modèle est dite *globale*, lorsque l'on comprend sa logique dans sa totalité, nous sommes donc en mesure d'en expliquer toutes les solutions. À contrario, elle

sera dite *local*, lorsqu'il est possible d'expliquer seulement une ou plusieurs solutions spécifiques. Un problème complexe pourra ainsi être découpé en un sous problème plus simple afin de pouvoir expliquer une partie des solutions comme le montre la figure 2.1 ci-dessous. Sur cette figure, nous voyons à gauche la totalité du problème où les parties en bleu et en rouge correspondent aux domaines de prédiction de deux classes et où les croix et les ronds correspondent à des instances spécifiques de notre problème. On voit donc que le problème n'est pas linéaire et est assez complexe. Fournir une explication global à notre modèle de prédiction serait donc compliqué et pas forcément pertinent, or nous pouvons voir que la majorité des instances spécifiques se trouvent sur un problème simple et linéaire. L'explication local consiste donc à fournir une explication uniquement aux instances correspondantes à notre problème linéaire.

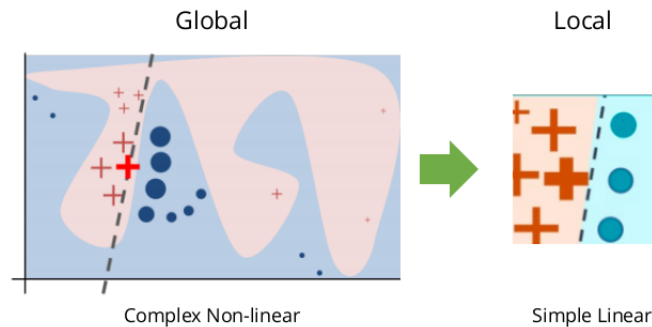


FIGURE 2.1 – Un problème global complexe pouvant être expliqué à échelle local. *Source : [MTR16]*

Limatation temporel Le temps que l'on peut allouer pour fournir une explication à notre modèle est aussi à prendre en compte. En effet, fournir une explication peut prendre du temps et cette explication peut être longue à appréhender pour un être humain. Dans certains contextes où la prise de décision devra être effectuée rapidement, il sera préférable d'avoir une explication simple, compréhensible et fournis rapidement par la machine. Dans d'autres cas, nous pourrons prendre le temps d'aborder une explication plus complexe et détaillée.

La cible de l'explication La nature de l'expertise de l'utilisateur est aussi un facteur à prendre en compte dans le choix de l'explication que nous voulons lui apporter. En effets, un expert dans le domaine

aura tendance à préférer une explication exhaustive et précises qu'une explication simple et opaque et inversement pour une personne moins à l'aise.

Pré-requis d'un modèle interprétable :

En plus de prendre en compte les facteurs précédemment évoqués, un modèle interprétable doit être capable de satisfaire une liste de choses souhaitées. L'article "A survey of methods for explaining black box models"[RGU18] met en avant, après une analyse de différents états de l'art traitant de ce sujet, les desiderata d'un modèle interprétable :

Interprétabilité Dans quelle mesure le modèle ou la prédiction sont compréhensifs par l'homme. Ce sujet est encore en débat afin de savoir comment mesurer cette interprétabilité.

Précision Dans quelle mesure le modèle interprétable prédit avec précision les différentes instances. La précision d'un modèle peut être faite avec le *score de précision* (accuracy score), il s'agit simplement d'un rapport entre les observations correctement prédites et les observations totales. La précision est l'indicateur de base afin de calculer la précision d'un modèle, ce score fonctionne mieux si les faux positifs et les faux négatifs ont un coût similaire. Si le coût des faux positifs et des faux négatifs est très différent, il vaut mieux regarder le *F1-score*. Le F1-score est la moyenne pondérée de la précision et du rappel.

$$F1Score = 2 * \frac{Recall * Precision}{Recall + Precision}$$

Où la *précision* est le rapport des observations positives correctement prédites au total des observations positives prévues. Et le *recall* (rappel) est le rapport des observations positives correctement prédites à toutes les observations dans la classe réelle.

Éthique Si notre modèle traite des données personnelles, il devra garantir en plus une protection contre toutes formes de discrimination ainsi qu'une protection de la vie privée des personnes concernées.

Ces différents aspects jouent un rôle important quant à la confiance qu'un utilisateur va apporter à notre modèle interprétable. De plus d'autres notions viennent s'ajouter, notamment pour les modèles d'exploration de données et d'apprentissage automatique. Il est important de respecter des critères tels que la *robustesse*, la *causalité*, l'*évolutivité* et la *généralité*. Cela signifie

qu'un modèle doit garantir un certain niveau de performance indépendamment des données d'entrée (robustesse), et que les changements d'entrée dû à une perturbation affectent le comportement du modèle (causalité). Enfin, étant donné que nous pouvons utiliser le même modèle avec une multitude de données d'entrée et dans différents cas d'applications, il est préférable d'avoir des modèles portables possédant un minimum de restriction (évolutivité, généralité).

2.2 Ouvrir les boîtes noires

Cette section se base principalement sur l'article "A survey of methods for explaining black box models"[RGU18] qui passe en revue cinquante-quatre méthodes aillant pour but d'ouvrir différentes boîtes noires, en nous fournissant une classification exposée dans un tableau disponible en annexe 1 et 2. Cette revue permet de distinguer différents types de problèmes, d'explicateurs, de boîtes noires, de données d'entrée ainsi que différentes restrictions sur le modèle. Mais cette section est aussi complétée autre autre par le livre de Christoph Molnar "Interpretable Machine Learning" [Mol19] résumant l'essence de l'interprétabilité dans le machine learning et différentes autres ressources citées dans cette section. Nous allons commencer par expliquer les différentes caractéristiques.

2.2.1 Types de problèmes

Nous pouvons distinguer deux grand types de problèmes. Le premier, la rétro-ingénierie, consiste à trouver une explication à un modèle déjà existant. Pour cela, nous allons utiliser des algorithmes externe à notre modèle afin de déduire une explication. Ce type de problème sera divisé en trois sous-problèmes : explication du modèle, explication du résultat et inspection de la boîte noire. Le second type de problème consiste à créer directement un modèle prédictif interprétable qui nous fournira une explication à ses résultats de lui même.

Explication du modèle

Ce problème consiste à fournir un modèle interprétable et transparent capable d'imiter le comportement d'une boîte noire et de nous fournir un prédicat compréhensible par l'homme.

Étant donnée un prédicateur de boîte noire b et un ensemble de données D , le problème d'explication du modèle consiste à trouver une fonction f

telle que $f(b,D)=c$ où c est un prédicateur compréhensible capable d'imiter le comportement de b et dérivable afin d'obtenir une explication.

Explication du résultat

Ce problème consiste à fournir un résultat interprétable, c'est-à-dire que le modèle devra fournir le résultat avec une explication sur les raisons qui l'ont poussé à donner cette prédiction. Il n'est pas nécessaire d'expliquer la logique interne du système mais seulement le processus de décision pour une instance donnée (interprétation local).

Inspection de la boîte noire

Ce problème consiste à fournir une représentation visuelle ou textuelle afin de comprendre le fonctionnement interne de notre boîte noire (interprétation globale).

Étant donnée un prédicateur de boîte noire b et un ensemble de données D , le problème d'explication du modèle consiste à trouver une fonction f telle que $f(b,D)=V$ où V est une représentation du fonctionnement de la boîte noire.

Conception transparente

Ce problème consiste à créer un modèle prédictif transparent qui soit directement interprétable globalement ou localement. Il fournira donc de lui même une explication à ses prédictions sans que l'on ait besoin d'utiliser des algorithmes externe à notre modèle.

2.2.2 Types d'explicateurs

Il existe différentes méthodes afin de fournir une explication à un modèle type boîte noire, nous allons dans cette sous-section présenter les principales :

- **Arbre de décision (Decision Tree)** : L'arbre de décision exploite un arbre qui a pour noeuds des conditions, les arcs correspondent à la valeur d'une variable d'entrée et les feuilles correspondent aux différents labels possible. La figure 2.2 montre un exemple trivial d'arbre de décision. Ainsi, la décision sera simplement expliquée en exprimant les chemins de l'arbre empruntés.
- **Règles de décision (Decion Rules)** : Utilisé pour expliquer le modèle, le résultat ainsi que pour la conception transparente. Il est aussi possible de transformer un arbre en un ensemble de règles. Les règles de décisions sont simplement des conditions IF-THEN :

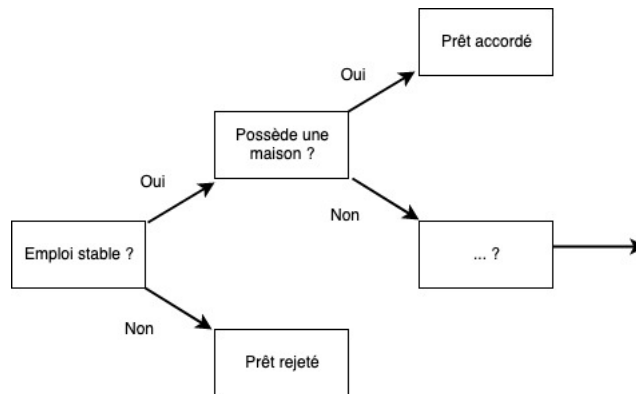


FIGURE 2.2 – Exemple d'un arbre de décision

if condition1, condition2, condition3 then outcome

- **Importance des variables (Features Importance)** : Solution souvent utilisée, elle consiste à trouver les entrées de la boîte noire pour lesquelles les poids sont les plus importants. Par exemple, pour une classification d'image, de trouver les pixels dans l'image jouant un rôle important dans notre prédiction. Comme le montre la figure 2.3 tirée de l'article "*Explainable Artificial Intelligence : Understanding, Visualizing and Interpreting Deep Learning Models*" [WSa17].

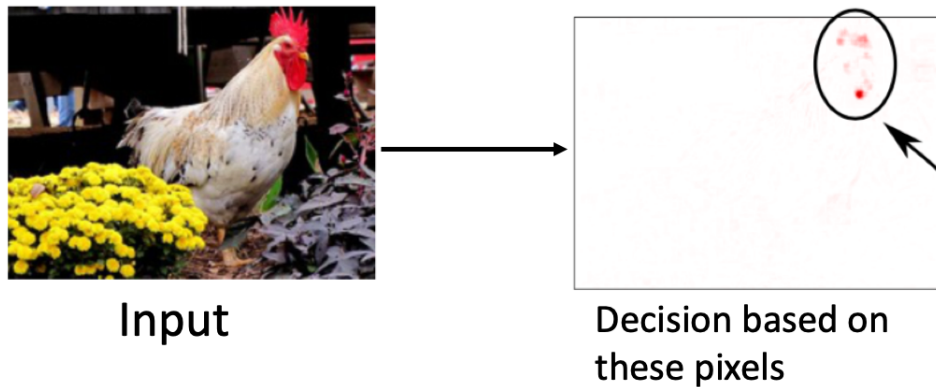


FIGURE 2.3 – Importance des fonctionnalités : explication de la prédiction "coq"

- **Salient Mask** Généralement utilisé pour expliquer localement les réseaux de neurones profonds (DNN), le salient mask permet de mettre en évidence visuellement les parties déterminantes de l'entrée analysée. L'article "*Real Time Image Saliency for Black Box Classifiers*" [Pio17]

décrit son fonctionnement et la figure 2.4 montrant un exemple de salient mask est tirée de cet article.

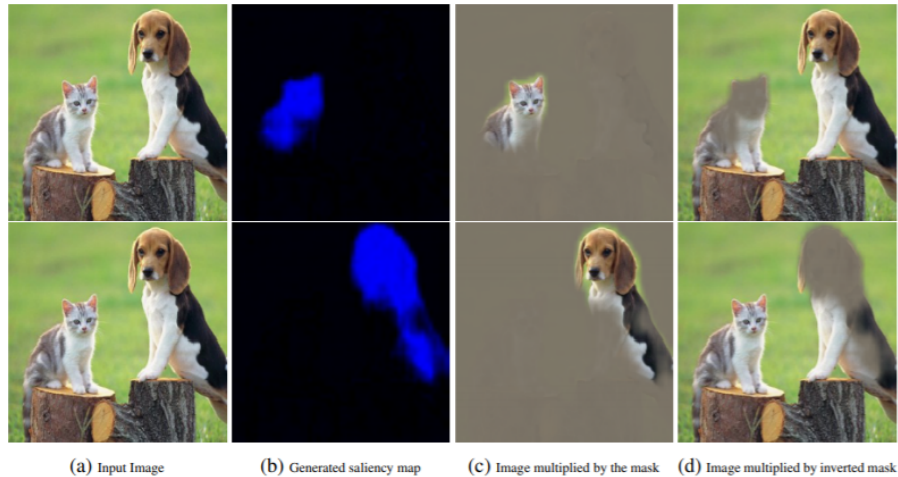


FIGURE 2.4 – Masque saillant : explication de la prédiction chien et chat

- **Analyse de sensibilité (Sensitivity Analysis)** : Généralement utilisée pour l'inspection de boîte noire. L'analyse de sensibilité consiste à évaluer l'incertitude statistique du résultat d'une boîte noire avec les différentes sources d'incertitude dans ses entrées. En d'autres termes, cela consiste à modifier des variables d'entrées afin de voir si cela a un impact sur le résultat en sorti et donc de savoir comment elles affectent notre prédiction.
- **Diagramme de dépendance partielle (Partial Dependence Plot)** : Ces graphiques permettent de comprendre l'effet d'une ou deux variables d'entrée sur la sortie du modèle. Le but étant de montrer si la relation entre une caractéristique d'entrée et la sortie est linéaire, monotone ou plus complexe. Par exemple, appliqué à un modèle de régression linéaire, les tracés de dépendance partielle montrent toujours une relation linéaire. Nous sommes limités par une ou deux variables à la fois, car une variable donne une représentation en 2 dimensions du problème et deux variables fournissent donc une représentation 3 en dimensions. Par exemple, la figure 2.5 tirée du livre [Mol19] montre trois diagrammes de dépendances différents sur trois valeurs d'entrées (la température, l'humidité et la vitesse du vent) et leurs impacts linéaires sur la prédiction du nombre de vélos.
- **Sélection de prototype (Prototype Selection)** : Cet explicateur consiste à retourner, avec le résultat, un exemple très similaire à l'enregistrement classifié, afin de préciser avec quel critère la prédiction a

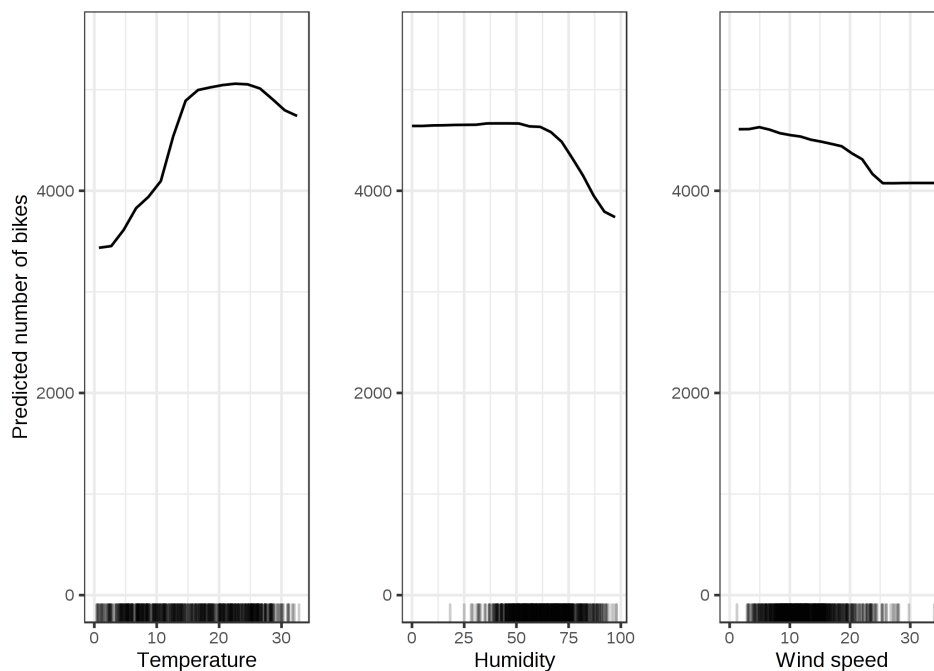


FIGURE 2.5 – Exemple de diagramme de dépendance partielle.

été renvoyée.

- **Activation des neurones (Neurons Activation)** : L'analyse d'un réseau de neurones permet aussi de comprendre son comportement. Cela consiste à analyser les neurones activés ou non pour chaque entrées passées en argument à notre modèle.

2.2.3 Spécificité de la boîte noire

Le type d'explicateur à utiliser dépend aussi de notre boîte noire, de ses restrictions et des données d'entrée utilisées. Nous distinguons principalement trois types de données d'entrées : les données tabulaires, textuelles et les images.

Données d'entrées

- **Tabulaire** : Dans une donnée tabulaire, chaque enregistrement partagent le même ensemble de caractéristiques qui sont de type textuel, numérique ou booléen. La donnée la plus couramment utilisée est le fichier csv.
- **Image** : Le modèle prévisionnel le plus couramment utilisé est la

prédiction d'image, cela comprend aussi l'exploitation de vidéos. Pour pouvoir être traité, l'image est transformée en une liste de nombres de la taille de l'image (hauteur x largeur) où chaque nombre de la liste correspond à la couleur d'un pixel. Ces images peuvent être traitées telles quelles par la boîte noire ou être pré-traitées afin qu'elles aient toutes la même taille ou de leur appliquer un filtre par exemple.

- **Textuel** : Souvent utilisé pour le traitement automatique du langage naturel (NLP), cette donnée est logiquement dépendante de la langue utilisée à l'entraînement de notre boîte noire (un modèle entraîné en français ne pourra pas prendre un texte anglais en entrée). Un exemple sera un modèle de classification de sujet ou bien de détection de spam dans une boîte mail.

Type de boîtes noires

Dans ce mémoire, nous nous concentrons sur l'apprentissage supervisé résolvant des problèmes de classification, les familles de boîtes noires énumérées dans cette sous-section répondent donc à ces critères et sont elles-mêmes découpées en sous-familles.

- **Réseau de neurones (NN)** : Un neurone artificiel (appelé perception) prend un certain nombre d'entrées et associe un poids à chacune afin de leur donner une importance (pouvant être positive ou négative). Le neurone nous donnera en sortie l'addition de chaque entrée multipliée par leurs poids respectifs, cette sortie correspond à la prédiction de notre neurone. L'apprentissage consiste donc à donner des exemples à notre neurone afin d'ajuster les poids associés aux entrées. Un réseau de neurones consiste à ajouter une couche intermédiaire de neurones (appelé layer) entre les données d'entrées et le neurone fournissant la prédiction. Cette couche a pour effet d'augmenter la complexité de notre modèle et donc de pouvoir détecter plus de patterns dans notre entrée.
- **Réseau de neurones profond (DNN)** : Un réseau de neurones profond est un réseau de neurones contenant une multitude de couches dans le but de résoudre des problèmes non-linéaire complexe. Il existe de nombreuses architectures différentes de réseaux de neurones profonds, certains réseaux peuvent contenir des milliers voir même des millions de neurones. Nous en verrons un exemple dans la partie application.
- **Ensemble d'arbres (TE)** : Utilisé notamment en fouille de données et en apprentissage automatique, les méthodes d'ensemble combinent des algorithmes d'apprentissage afin d'améliorer le pouvoir prédictif

des algorithmes qu'ils combinent. Ils combinent les prédictions de différents arbres de décision, chacun étant formé sur un sous-ensemble indépendant des données d'entrée. Nous en verrons un exemple dans la partie application.

- **Machine à vecteurs de support (SVM)** : Couramment utilisé, les SVM reposent sur la distance entre la frontière de séparation et les échantillons les plus proches cette distance est appelée la marge. La frontière de séparation entre nos classes de prédiction est choisie comme celle qui maximise la marge, le problème est donc de trouver la frontière séparatrice optimale. Cette méthode permet donc uniquement de résoudre des problèmes linéaires, pour pouvoir traiter un problème non-linéaire le SVM va transformer l'espace de représentation des données d'entrées en un espace de plus grande dimension où il existe une probabilité de trouver une séparation linéaire.

Accessibilité de la boîte noire

Le dernier facteur à prendre en compte pour choisir notre explicateur de boîte noire est l'accessibilité de la boîte noire. Il faudra donc se poser les questions suivantes :

Puis-je sonder le modèle autant de fois que je le souhaite ? Ai-je accès au code source du modèle ? Ai-je accès aux jeux de données qui ont servi à l'entraînement du modèle ? Le modèle va-t-il perturber mes données d'entrée

Par exemple si nous ne pouvons pas sonder la boîte noire autant de fois que l'on désire, nous ne pourrons pas utiliser d'explicateur de type rétro-ingénierie. À l'inverse si nous n'avons pas accès au code du modèle, nous ne pourrons pas créer directement un modèle prédictif interprétable.

2.3 Approches utilisées

Face à ce besoin d'explicabilité grandissant, les entreprises peuvent préférer se tourner vers des modèles moins performant mais plus explicable afin de contourner la problématique de la boîte noire. Ainsi, nombreuse sont les entreprises qui se détournent de l'apprentissage profond au profit de l'apprentissage par arbre de décision ou les modèles linéaires par exemple qui fournissent un résultat plus compréhensibles et interprétable. Mais, la recherche dans ces domaines n'a pas évolué depuis un certain temps et l'éventail des algorithmes disponibles est assez limité.

Sur-couche explicative

Le but étant d'essayer de fournir à l'utilisateur des éléments approximatifs permettant de comprendre son modèle boîte noire, comme par exemple identifier les variables d'entrée les plus importantes dans la prise de décision du modèle. Comme le montre la figure 2.6, la sur-couche explicative vient se greffer après la prédiction du modèle.

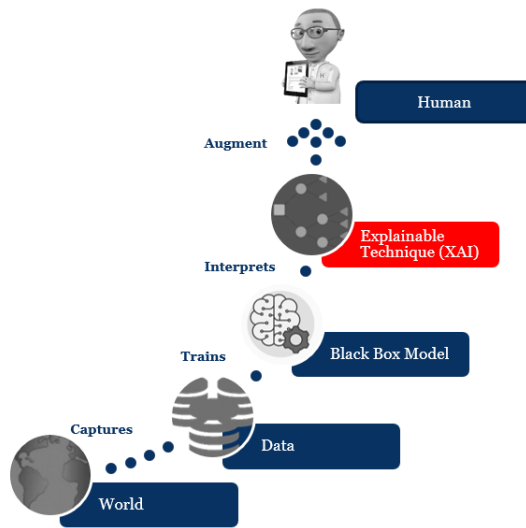


FIGURE 2.6 – Position de la sur-couche explicative dans le processus de prédiction. *Source : [Kau18]*

Différents outils proposent une approche permettant de livrer des éléments de compréhension approximatif pour un modèle boîte noire simple. Nous allons présenter les deux outils les plus populaires, LIME et SHAP.

2.3.1 LIME

LIME signifie Local Interpretable Model-Agnostic Explanations (explications locales interprétables par modèle-agnostique). L'objectif est donc de fournir une interprétation local à un modèle de classification ou de régression (model agnostic) en se basant sur l'importance des variables comme vu précédemment. L'idée est de sonder la boîte noire autant de fois que nécessaire en perturbant la donnée d'entrée ce qui aura pour effet de produire un résultat différent à chaque fois. Pour une prédiction d'image, nous devons récupérer l'image d'entrée pour laquelle nous voulons expliquer la prédiction et définir

une multitude de zones perturbations qui seront affichées ou non comme le montre la figure 2.7.

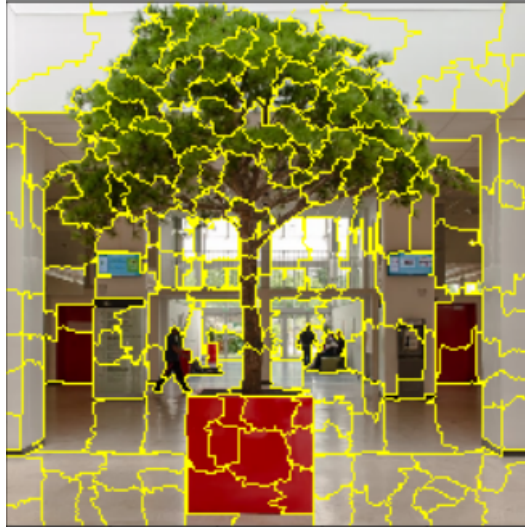


FIGURE 2.7 – Exemple de zones de perturbations sur une image

À partir de ces zones perturbations, nous allons générer une multitude d'image en cachant ou non chaque zone et les donner en entrée à notre modèle (entre cinquante et cent-cinquante images dans la plupart des cas). Il faudra donc stocker les prédictions effectuées par notre modèle pour chaque perturbation. Une fois que toutes les perturbations sont effectuées il est alors possible de récupérer les coefficients qui composent la droite de la régression linéaire et ainsi de déduire l'importance des zones de perturbations dans la prédiction. Notre exemple porte sur une image, mais LIME accepte aussi des données d'entrée de type tabulaire ou textuel et le principe reste le même.

Par exemple dans la figure 2.8 tirée de l'article original de la présentation de LIME[MTR16] : L'image originelle (a) est donnée à notre boîte noire qui prédit "Guitare électrique", "Guitare acoustique" et "Labrador". Nous constatons que le modèle s'est trompé sur la reconnaissance de la guitare électrique et nous utilisons LIME afin de comprendre ce qu'il s'est passé. LIME va prendre notre image (a) et la dériver de plusieurs façons en cachant certaines parties et envoyer ces nouvelles images à notre modèle. Le but étant de trouver les parties qui une fois cachées font que le modèle ne prédit plus la même chose. Puis une fois les trois classes trouvées, nous obtenons une explication où l'on voit les parties de l'image aillant joué un rôle dans la prédiction de chaque labels de notre modèle.

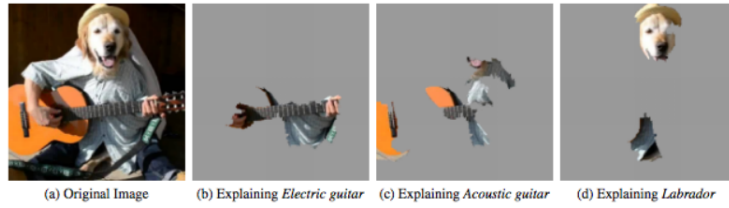


Figure 4: Explaining an image classification prediction made by Google's Inception network, highlighting positive pixels. The top 3 classes predicted are "Electric Guitar" ($p = 0.32$), "Acoustic guitar" ($p = 0.24$) and "Labrador" ($p = 0.21$)

FIGURE 2.8 – Source : LIME Paper [MTR16]

Une librairie Python est disponible afin d'utiliser l'algorithme LIME simplement sur nos modèles. Cette librairie a été créée par Marco Tulio Ribeiro qui est un des auteurs du papier original de LIME [MTR16], le code source de cette librairie est disponible sur le GitHub de son auteur [Rib16]. Cette librairie, disponible via le gestionnaire de paquets "pip", rend l'interprétation local d'un modèle très accessible, elle met à notre disposition entre autre trois méthodes majeures : LimeTabularExplainer, LimeImageExplainer et LimeTextExplainer permettant de fournir une explication local à tout type de données d'entrées. Nous aurons, dans la partie application, l'occasion d'utiliser LIME afin de voir s'il pourrait servir à rendre nos modèles de classification plus fiable.

2.3.2 SHAP

Un an après la sortie de LIME, un nouvel outil fait son apparition afin de compenser entre autre le fait de ne pas pouvoir fournir une interprétation globale, cet outil s'appelle SHAP. SHAP signifie SHapley Additive exPlanations, c'est une méthode permettant de fournir une interprétation globale ou local à notre modèle. Cette méthode est basée sur la valeur de Shapley issus de la théorie des jeux, il est donc nécessaire dans un premier temps d'expliquer brièvement cette valeur de Shapley.

La valeur de Shapley introduit par Shapley en 1953, permet de répartir les gains équitablement dans un jeu coopératif. Le but étant que tous les joueurs coopérant ensemble reçoivent un certain gain en fonction de leur contribution.

Proposée par Lundberg et al. dans l'article [Sco19] faisant suite à l'article [Sco17], SHAP reprends l'idée de la valeur de Shapley afin d'expliquer toutes sortes de modèle de machine learning. Le but étant d'associer une valeur égale à la contribution dans la prédiction de chaque caractéristique

d'entrées. SHAP commence donc par déduire la contribution des caractéristiques pour chaque instance et moyenne les résultats obtenus afin de donner la contribution globale de chacune de ces caractéristiques

Prenons par exemple un modèle permettant de prédire le prix d'un logement. Une multitude de caractéristiques sont données en entrées à notre modèle afin d'estimer le prix du logement, le but de SHAP est donc de définir pour chacune de ces caractéristiques leur impact monétaire sur le prix final du logement. Il interrogera donc la boîte noire avec une multitude de cas différents afin d'isoler le prix de chaque caractéristique. Prenons le cas de la figure 2.9 où l'on veut expliquer la prévision de 310 000 euros pour un logement de 50m², au premier étage, près d'un parc et où les animaux sont interdits.

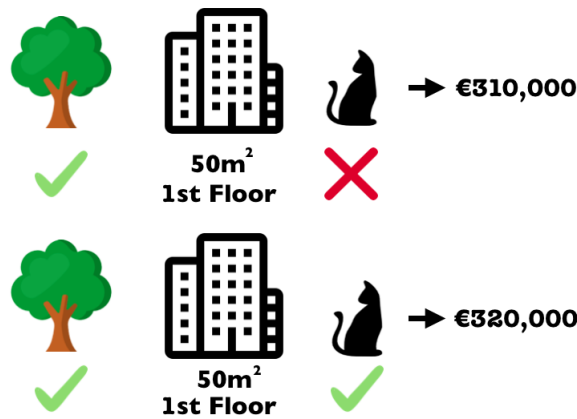


FIGURE 2.9 – Exemple de l'explication du coût d'un logement avec SHAP.
Source : [Mol19]

SHAP va donc recréer la même l'instance et la donner en entrée à la boîte noire en autorisant les animaux afin d'en déduire le coût (dans notre exemple 10 000 euros). Cette opération sera effectuée sur toutes les caractéristiques du problème afin de trouver la contribution de chacune pour chacune des instances de notre jeu de donnée. L'interprétation globale sera ensuite donnée en faisant la moyenne de ces contributions. Cela peut sembler trivial dans cet exemple mais il peut exister des dépendances entre les caractéristiques qui modifient leurs coût en fonction de la présence ou non d'une ou plusieurs autre(s) caractéristique(s).

Une librairie Python est disponible afin d'utiliser SHAP simplement sur nos modèles. Cette librairie a été créée par Scott Lundberg qui est un des auteurs des papiers originaux de SHAP cités plus haut, le code source de cette librairie est disponible sur le GitHub de son auteur [Lun18]. Cette librairie, disponible via le gestionnaire de paquets "pip", rend l'interprétation global et local et d'un modèle très accessible. Elle met à notre disposition différents types d'explicateurs permettant de fournir une explication global et local à différents types de boîtes noires et pour différents types de données d'entrées. Elle met aussi à notre disposition plusieurs graphiques permettant d'illustrer ses interprétations, ce qui simplifie la compréhension et la rend plus agréable. Nous aurons, dans la partie application, l'occasion d'utiliser la librairie python de SHAP et de voir des exemples de graphiques générés dans l'objectif de savoir si SHAP peut servir à détecter des problèmes d'ordre discriminatoire.

2.3.3 Limites de ces implémentations

Aujourd'hui, de nombreuses implémentations de ces méthodes sont utilisées, mais elles essuient aussi quelques critiques et ne conviennent pas dans tous les cas de figures. Premièrement, ces algorithmes représentent un coût non négligeable. Ces méthodes basées sur des simulations et interrogeant notre modèle plusieurs fois pour une seule prédiction, peuvent poser des problèmes de performances lorsque l'on manipule un très grand nombre de données. Aussi la pertinence des explications fournies sont sujettes à débat, en effet ce sont des approximations et rien ne nous garantit que ces explications correspondent réellement au fonctionnement de notre modèle. Ces explications pourraient même donner l'effet inverse à celui escompté, en effet on peut arriver dans des cas où l'on fait confiance à notre modèle grâce à ces explications alors qu'elles ne sont pas fondées et ainsi prendre une décision critique appuyée sur une explication erronée.

Il est donc nécessaire d'utiliser ces algorithmes avec parcimonie et en aillant bien conscience qu'ils ne fournissent que des approximations de notre problème. Mais ce genre d'approches sont très bénéfiques pour la recherche, elles nous permettent d'apporter de nouvelles solutions ainsi que de mettre en lumière de nouvelles problématiques.

Chapitre 3

APPLICATION

Nous avons vu dans le chapitre 1 de ce mémoire que l'utilisation d'algorithmes de type boîtes noires dans l'aide à la prise de décision soulevait des questions, notamment sur l'éthique, la fiabilité et la performance. Dans cette partie, nous allons mettre en application nos recherches présentées dans l'état de l'art afin de déterminer si l'interprétabilité d'un modèle boîte noire nous permettrait de résoudre ces problèmes.

3.1 Mise en évidence de biais

L'objectif de cette partie est de démontrer que rendre un modèle boîte noire interprétable permettrait de mettre en évidence des biais discriminatoire. Pour cela, nous allons créer un modèle prédictif à partir d'un jeu de données comportant possiblement des biais, puis d'utiliser l'outil SHAP afin d'essayer de mettre en évidence les éventuels biais présents dans notre jeu de données. Le code de cette section est disponible sur mon GitHub [Jai20c] et suit, entre autre, le tutoriel de "Towards Data Science"[Dat19]

3.1.1 Le jeu de données

Afin de savoir si utiliser une méthode de compréhension de boîtes noires aurait permis de mettre en évidence les biais présents dans l'intelligence artificielle dite sexiste de l'entreprise Amazon (évoquée dans l'introduction de ce mémoire), nous appliquerons ces méthodes sur un exemple similaire. Pour rappel, cette IA rejetait les CVs de femmes car elle avait été entraînée en se basant sur les personnes employées par l'entreprise dans le passé et que ces personnes étaient majoritairement des hommes, l'IA a donc conclu qu'il était préférable d'embaucher un homme plutôt qu'une femme.

Pour cette expérimentation, nous allons utiliser un jeu de données qui nous donne des informations sur des étudiants ainsi que leurs notes à différents examens. Les données d'entrée de notre modèle seront donc de type tabulaire. Ce jeu de données disponible ici [Kim12] ressemble à cela (Figure 3.1) :

1	gender	race/ethnicity	parental level of education	lunch	test preparation course	math score	reading score	writing score
2	female	group B	bachelor's degree	standard	none	72	72	74
3	female	group C	some college	standard	completed	69	90	88
4	female	group B	master's degree	standard	none	90	95	93
5	male	group A	associate's degree	free/reduced	none	47	57	44
6	male	group C	some college	standard	none	76	78	75
7	female	group B	associate's degree	standard	none	71	83	78

FIGURE 3.1 – Jeu de donnée des performances des étudiants

À noter, que ce jeu de données est fictif et généré aléatoirement. Notre objectif est de créer un modèle qui prédira la moyenne d'un étudiant en fonction de son sexe, de son ethnie, du niveau d'éducation de ses parents, de son régime alimentaire et de sa préparation aux tests. Pour ce faire, le jeu de données a été modifié en retirant les trois colonnes de scores afin d'en créer qu'une seule correspondant à la moyenne des trois. Nous obtenons donc le résultat présenté dans la figure 3.2 :

1	gender	race/ethnicity	parental level of edu	lunch	test preparation course	average
2	female	group B	bachelor's degree	standard	none	72.66666667
3	female	group C	some college	standard	completed	82.33333333
4	female	group B	master's degree	standard	none	92.66666667
5	male	group A	associate's degree	free/reduced	none	49.33333333
6	male	group C	some college	standard	none	76.33333333
7	female	group B	associate's degree	standard	none	77.33333333

FIGURE 3.2 – Jeu de donnée final

Une fois notre modèle entraîné à prédire la moyenne potentielle d'un étudiant à partir de ces caractéristiques, on pourrai imaginer l'utiliser pour le recrutement universitaire. Mais (en dépit du fait que ces caractéristiques ne sont pas très pertinentes) notre modèle de recrutement est-il réellement fiable ? Pourrait-il être discriminant pour certaines ethnies ou pour un certain sexe ? Nous allons essayer de le découvrir en comprenant comment les caractéristiques d'entrée influent sur notre prédiction.

3.1.2 Création du modèle prédictif

La première étape sera donc de créer un modèle prédictif et de l'entraîner sur notre jeu de données. Pour ce faire, nous allons utilisé l'algorithme des

forêts d'arbres décisionnels (random forest) qui fait partie de la famille des ensembles d'arbres vu dans l'état de l'art partie 2.2.3. Cet algorithme reposant sur l'apprentissage par arbre de décision consiste à effectuer un apprentissage en parallèle sur de multiples arbres de décision construits aléatoirement et entraînés sur des sous-ensembles de données différents selon le principe du bagging. Le bagging consiste à réduire la variance d'un arbre de décision afin de palier à son instabilité. Les prédictions de tous ces arbres sont ensuite moyennées afin de nous donner un résultat.

Afin de créer notre modèle, nous allons utiliser une bibliothèque Python destinée à l'apprentissage automatique appelée Scikit-learn (sklearn)[Cou10]. Cette bibliothèque a été initiée en 2007 par David Cournapeau en tant que projet Google Summer of Code qui est un programme organisé par l'entreprise Google où des étudiants travaillent pendant l'été sur un projet pour lequel l'étudiant a postulé. Open source et comptant de nombreux collaborateurs, cette bibliothèque mettant à notre disposition une multitude d'outils pour le machine learning est devenue la référence dans son domaine notamment grâce à sa complétude et sa simplicité d'utilisation.

Avec Scikit-learn, la création de forêts d'arbres décisionnels se fait à l'aide d'une classe appelée *RandomForestRegressor*, mais avant de l'utiliser nos données doivent être adaptées afin d'y être compatible. Dans un premier temps, il est nécessaire d'enlever la colonne "average" car ce ne sera pas une caractéristique d'entrée mais la valeur à prédire (target). De plus, les forêts d'arbres décisionnels ne peuvent pas prendre en données d'entrée un tableau contenant des valeurs qualitatives (non-numérique). Afin d'être adapté à notre modèle, notre jeu de données a donc dû être encodé en créant une colonne par variable dans le but de n'avoir que des entrées numériques, par exemple la colonne "gender" devient deux colonnes "female" et "male" prenant 0 ou 1 comme valeur. Cette transformation des données est appelée "encodage one-hot" ou "encodage 1 parmi n". Pour ce faire, Scikit-learn met à notre disposition une classe : *"from sklearn.preprocessing import OneHotEncoder"* nous permettant de procéder simplement à cet encodage. Ainsi, pour notre jeu de données, nous passons de cinq colonnes d'entrée à dix-sept colonnes qui sont :

```
['x0_female' 'x0_male' 'x1_group A' 'x1_group B' 'x1_group C' 'x1_group D' 'x1_group E' 'x2_associate's degree' 'x2_bachelor's degree' 'x2_high school' 'x2_master's degree' 'x2_some college' 'x2_some high school' 'x3_free/reduced' 'x3_standard' 'x4_completed' 'x4_none']
```

Où "x0" correspond à la transformation de la première colonne, "x1" à la transformation de la deuxième colonne et ainsi de suite.

Maintenant que nos données sont prêtes, nous allons créer notre modèle à l'aide de la classe *RandomForestRegressor*. Pour ce faire, il nous suffit de l'initialiser en choisissant, pour notre cas, : la profondeur maximale des arbres (six dans notre cas), le nombre d'arbres dans la forêt (dix dans notre cas). Puis de l'entraîner à l'aide de la fonction *"fit"* prenant en argument les caractéristiques d'entrées et la colonne que l'on souhaite prédire (average dans notre cas).

3.1.3 Explication de notre prédiction

Notre modèle étant prêt, nous allons pouvoir nous demander s'il n'a pas été biaisé involontairement par notre jeu de données. Pour ce faire, nous allons utiliser l'outil d'interprétation Python SHAP vu dans notre état de l'art. La première chose à faire est de déterminer la valeur de Shapley de notre modèle. Pour ce faire, la librairie SHAP met à notre disposition une fonction prenant en paramètre notre modèle ainsi que nos données d'entraînement. Comme décrit dans l'état de l'art partie 2.3.2, cette fonction va sonder notre modèle de multiple fois en faisant varier les données d'entrées afin de déterminer l'impact de ces données sur notre prédiction.

Une fois notre valeur de Shapley obtenue, nous pouvons afficher différent graphique afin de mieux comprendre les raisons de nos prédictions. La figure 3.3 est un graphique généré par la fonction *"summary_plot avec pour type "bar"* de SHAP fournissant une explication globale de notre modèle de type importance des variables (features importance). L'importance des variables est calculée en moyennant la valeur absolue des valeurs de Shapley de chaque variable pour chaque exemple de notre jeu de données.

On voit donc sur notre graphique que la non-préparation aux tests et qu'un régime alimentaire équilibré sont les deux entrées ayant le plus d'impact sur notre prédiction, mais nous ne sommes pour le moment pas en mesure de savoir si cet impact est positif ou négatif.

Afin d'entrer plus dans le détail, SHAP nous offre d'autres graphiques comme par exemple la figure 3.4 toujours généré avec la fonction *"summary_plot"*. Sur ce graphique, chaque point représente une valeur de Shapley pour la variable pour chacune des instances. Les points rouges représentent

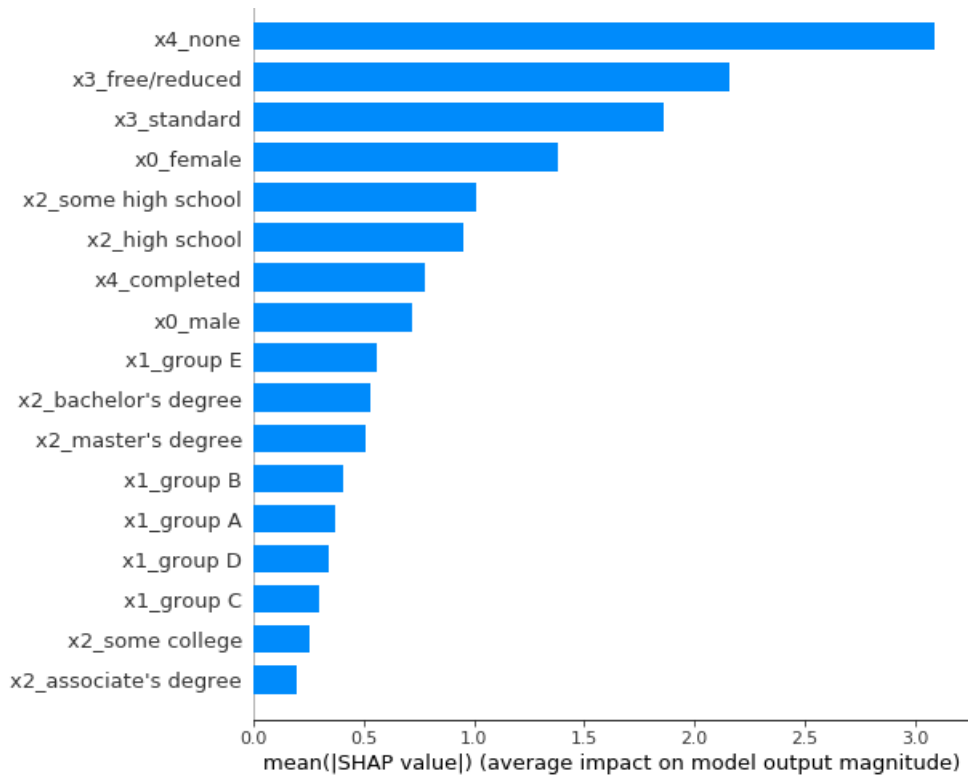


FIGURE 3.3 – Importance des variables d’entrées dans notre prédiction

un impact positif sur notre prédiction et les points bleu représentent un impact négatif. Nos données d’entrée étant constituées de valeurs binaires, ce graphique se lis de cette manière : si la valeur est positive et que la couleur est bleu alors la variable a un impact négatif sur notre valeur de sortie et inversement pour la couleur rouge. Par exemple la non-préparation au test et un régime alimentaire équilibré ont une influence négative sur notre moyenne. On peut aussi voir qu’être une femme a un impact positif alors qu’être un homme a un impact négatif. L’ethnie de type D sera aussi favorisée. Ces résultats laissent penser qu’utiliser ce modèle pour le recrutement universitaire aura un effet discriminatoire pour les hommes qui seront défavorisés, ce qui ressemble à l’IA d’Amazon évoquée précédemment. Il nous est aussi possible de fournir une interprétation local c’est-à-dire de voir pourquoi notre boîte noire a donnée un tel résultat pour une instance précise. La figure 3.5, généré avec la fonction *"dependence_plot"* de SHAP, nous montre un exemple d’interprétation local. On voit que pour cette instance notre modèle a estimé que l’étudiant aura 60.62 de moyenne. Comme pour l’exemple précédent, les variables ayant un impact positif sont affichées en rouge et celles ayant un

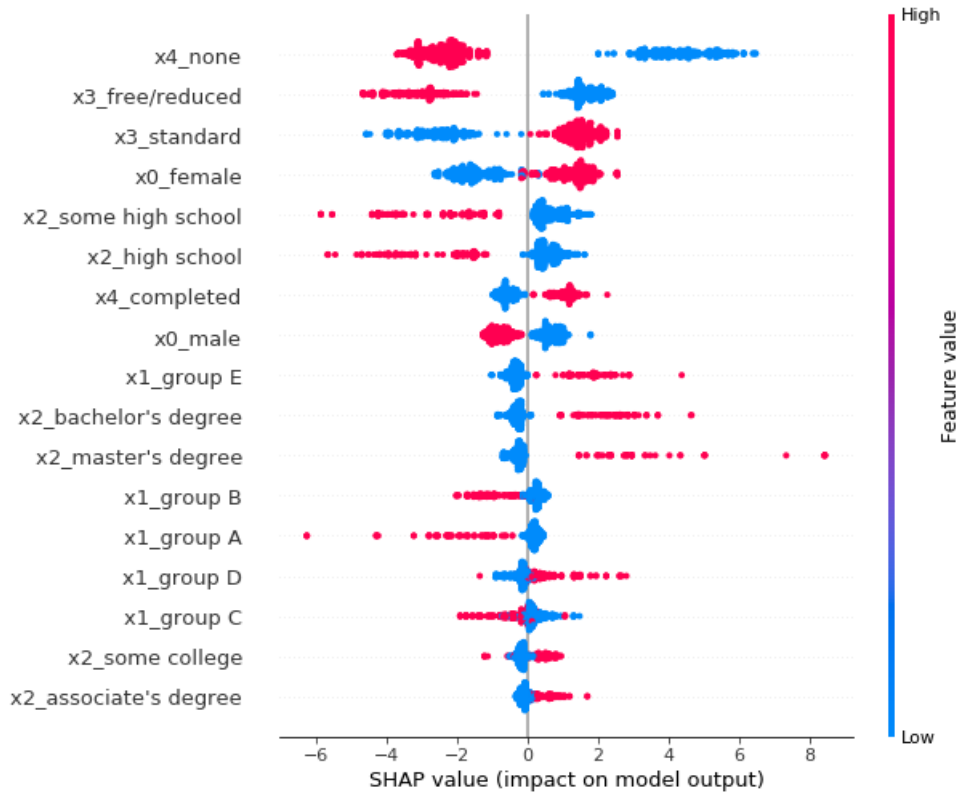


FIGURE 3.4 – Détail de l'explication de l'importance des variables

impact négatif sont affichées en bleu. On voit donc que pour cette instance l'entraînement à l'épreuve, le régime alimentaire et le sexe influence négativement notre moyenne alors que le niveau d'éducation des parents a une influence positive.



FIGURE 3.5 – Explication de la prédiction pour une instance précise

3.1.4 Bilan

Après l'inspection de notre modèle, nous avons pu voir qu'il jugeait les femmes plus performantes que les hommes et que son utilisation dans le

recrutement universitaire aurai eut un impact discriminant sur les étudiants postulant. L'utilisation d'une méthode d'interprétabilité sur notre boîte noire nous a donc permis de mettre en évidence un biais de discrimination présent dans notre jeu de donnée. Bien sûr, notre exemple étant trivial on aurai pu directement se rendre compte que les caractéristiques d'entrées n'étaient pas réellement pertinentes pour prédire la moyenne d'un étudiant.

Nous pouvons donc dire que qu'il est important de vérifier la pertinence des entrées de notre modèle, aussi utiliser un algorithme permettant que comprendre la logique interne de notre boîte noire est important afin d'éviter tous problèmes.

3.2 Améliorer la fiabilité

L'intelligence artificielle pose aussi des problèmes de fiabilités, notamment dans le domaine médical. Afin de savoir si rendre un modèle interprétable permettrait d'améliorer sa fiabilité et de vérifier s'il se base sur les bons éléments pour donner ses prédictions, nous allons appliquer l'algorithme LIME vu dans l'état de l'art à un modèle issu du monde médical.

3.2.1 Le jeu de données

Pour cette expérimentation, nous allons utiliser un jeu de données contenant des images de radiographies. Le but sera de créer un modèle permettant de détecter si le patient de la radiographie est atteint de pneumonie. Ce jeu de données disponible ici [Moo18] est visible sur la Figure 3.6 : Le jeu de



FIGURE 3.6 – Exemple d'images présentes dans le jeu de donnée de pneumonie

données contient donc des radiographies de cages thoraciques saines ou malade. Dans la partie suivante, nous allons donc créer un modèle prenant en

entrée une radiographie et nous donnant une prédiction sur l'état de santé du patient.

3.2.2 Création du modèle prédictif

Afin de prédire si la radiographie présente une pneumonie ou pas, nous allons créer un réseau de neurones à convolution (Convolutional Neural Networks). Cet algorithme, faisant partie de la famille des réseaux de neurones profond vu dans l'état de l'art parti 2.2.3, va ajouter des filtres et des couches à notre image d'entrée afin de pouvoir détecter plus de patterns sur notre image que le ferai un réseau de neurones classique. La figure 3.7 nous montre le fonctionnement d'une convolution, elle consiste en l'enchaînement de deux étapes : le "filtrage" et le "pooling" pour finir sur un réseau de neurones profond classique.

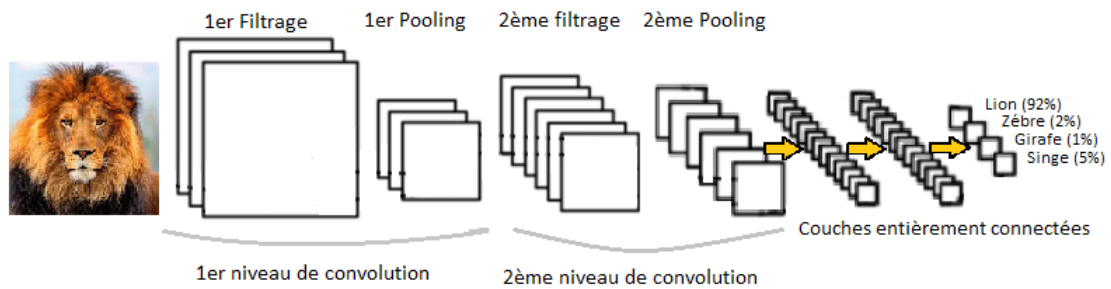


FIGURE 3.7 – Schéma expliquant la convolution. *Source : [Sim18]*

Le filtrage consiste à appliquer un filtre sur l'image afin de créer plusieurs images différentes à partir de l'image d'entrée, il permet de faire ressortir par exemple les contours, la couleur, la luminosité, etc... Ensuite, le pooling va prendre les images filtrées et vas les réduire en extrayant les valeurs importantes des pixels. Pour ce faire il va prendre, par exemple, un carré de trois pixel sur trois et le transformé en un seul pixel de la valeur du pixel le plus haut ou de la moyenne des pixels du carré. Afin d'y voir plus clair, la figure 3.8 nous schématise le fonctionnement du pooling. Ainsi, sur la figure, l'image qui faisait à l'origine neuf par neuf pixels en fait plus que sept par sept ce qui aura pour effet de diminuer les valeurs d'entrées et donc notre temps de calcul final.

Le code du modèle de cette application est disponible sur mon GitHub [Jai20a] et a été créé en Python à l'aide de TensorFlow 2.0.

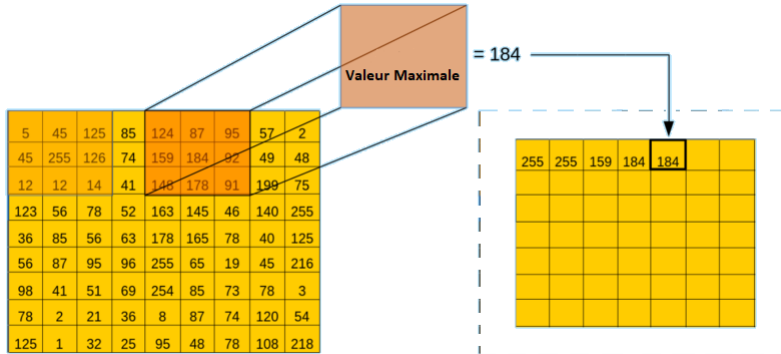


FIGURE 3.8 – Explication d’un pooling de taille trois par trois. *Source : [Sim18]*

TensorFlow[Ten15] est un outil d’apprentissage automatique initié par Google en 2011 devenu en 2015 open source et comptant de nombreux collaborateurs. TensorFlow met à notre disposition une API stable pour les langages Python et C++, et est devenu l’un des outils les plus utilisés en matière d’intelligence artificielle notamment pour la création d’architecture de réseau de neurones artificiels.

Tensorflow va donc nous permettre de créer notre réseau à convolution pour la détection de pneumonie dont l’architecture est présenté sur la figure 3.9.

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d (Conv2D)	(None, 203, 203, 32)	320
max_pooling2d (MaxPooling2D)	(None, 101, 101, 32)	0
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 99, 99, 64)	18496
max_pooling2d_1 (MaxPooling2D)	(None, 49, 49, 64)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 47, 47, 64)	36928
flatten (Flatten)	(None, 141376)	0
dense (Dense)	(None, 64)	9048128
dense_1 (Dense)	(None, 2)	130
Total params: 9,104,002		
Trainable params: 9,104,002		
Non-trainable params: 0		

FIGURE 3.9 – Architecture de notre modèle de prédiction de pneumonie.

Notre modèle prend en argument une image de dimension (205, 205, 1) les deux premières valeurs correspondent à la taille de l'image en pixel et la dernière valeur correspond aux canaux de couleur (1 pour notre cas car l'image est en noir et blanc). L'image va donc passer dans le premier filtrage (conv2d) qui va nous donner une sortie de dimension (203, 203, 32), nous constatons donc que trente-deux filtres ont été créés sur l'image. Puis ces trente-deux filtres passent par une phase de pooling pour au final avoir une dimension de (101, 101, 32), nous constatons donc que les images ont bien été réduites. On répète l'opération une deuxième fois puis on passe dans la couche "flatten" qui a pour effet de tout représenter sur une liste simple (141 376 correspondant donc à 47 x 47 x 64) afin d'être analysée par une couche de neurones. Cette liste est donc donnée à une couche de soixante-quatre neurones (dense) qui vont l'analyser et passer le résultat à une dernière couche contenant deux neurones (dense_1) où le résultat d'un neurone correspond à la probabilité que l'image d'entrée montre une pneumonie et l'autre neurone à la probabilité qu'elle n'en montre pas. Ainsi, la convolution nous a fait passer d'une image d'entrée de taille 42 025 (205 x 205, la taille de l'image) à une entrée de taille 141 376. Cela ajoute de la précision à notre modèle, mais a un temps de traitement et de calcul très conséquent.

3.2.3 Explication de notre prédiction

Notre modèle prêt, nous allons utiliser l'algorithme de LIME présenté dans notre état de l'art afin de vérifier la fiabilité de notre modèle. Dans cette partie, nous n'utiliserons pas la librairie LIME afin de pouvoir entrer plus dans le détail du fonctionnement de cet algorithme et de mieux le comprendre. Le code correspondant à l'implémentations de LIME est disponible sur mon GitHub [Jai20b] et suit, entre autre, le tutoriel de "Towards Data Science" [Art19]. L'explication sera locale et effectuée sur une seule image. Pour rappel, l'idée de LIME est de sonder la boîte noire autant de fois que nécessaire avec différentes versions de notre image d'entrée qui aura subi de multiples perturbations.

La première étape consiste donc à créer des perturbations pour notre image. Pour ce faire, nous allons utiliser la librairie Skimage afin de générer 75 perturbations de notre image. La figure 3.10 montre le squelette de perturbation de notre image, chaque zone sera cachée ou affichée comme le montre la figure 3.11.

La seconde étape consiste à utiliser notre modèle créé précédemment afin d'effectuer une prédiction pour l'ensemble des perturbations générées. La prédiction ne doit pas nous donner le résultat, mais sa probabilité. Pour notre

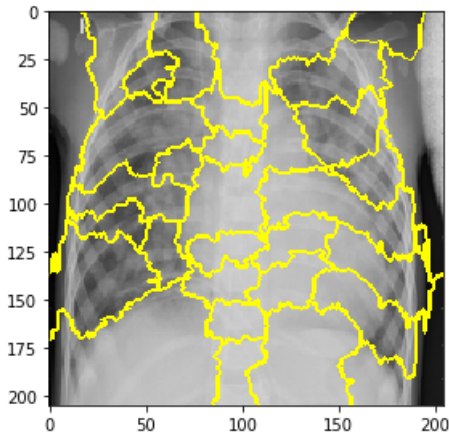


FIGURE 3.10 – Zones de perturbation

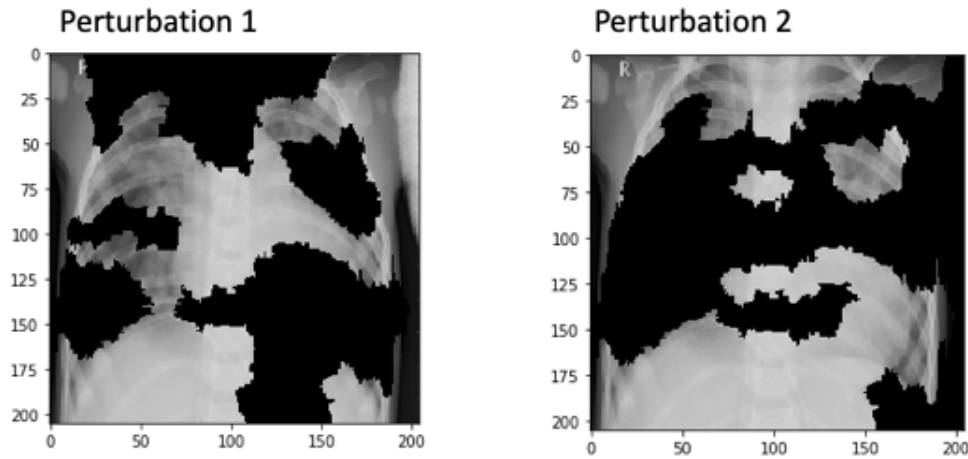


FIGURE 3.11 – Exemple de perturbations générées

exemple la prédiction ne renverra donc pas "pneumonie", mais un tableau de deux valeurs avec la probabilité que les poumons soient sains ou non "[0.23, 0.77]".

Une fois nos prédictions faites, nous allons évaluer la distance entre chaque prédiction et notre image de base. La distance correspond au nombre de zones du squelette de perturbation de la figure 3.10 cachées. L'image de base aillant toutes les zones de perturbation visible.

Pour finir, nous créons un modèle linéaire que nous entraînons avec les informations obtenues dans les étapes précédentes afin d'obtenir un coefficient pour chacune des zones de perturbations représentant l'importance de la zone pour notre prédiction. Il ne nous reste donc plus qu'à trier ces coef-

ficient afin d'afficher les quatre plus élevés par exemple. Pour notre exemple nous obtenons le résultat présenté en figure 3.12 sur l'image de gauche.

Afin d'y voir plus clair, nous pouvons superposer l'image obtenue avec l'image de base afin de voir la zone du poumon la plus touchée par la pneumonie selon notre réseau de neurones comme le montre la figure 3.12 sur l'image de droite.

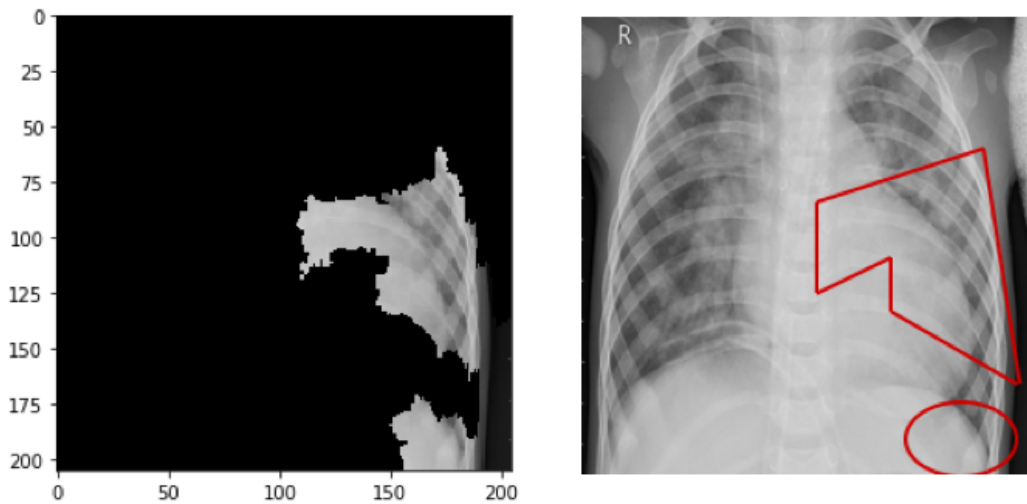


FIGURE 3.12 – À gauche : Zones de perturbations avec les coefficients les plus élevés À droite : Explication de la prédiction de pneumonie par LIME

3.2.4 Bilan

L'utilisation de l'outil d'interprétabilité nous a donc bien permis de déterminer quelles zones de notre image sont déterminantes pour notre prédiction. Dans notre exemple l'explication apporte un plus à la simple prédiction "pneumonie", car elle montre la zone la plus touchée par la maladie.

Accompagner chaque prédiction de son explication serait un grand plus et améliorerait grandement la fiabilité de nos modèles. Aussi, cela permettrait d'augmenter la confiance de la population à l'égard de ces technologies. Bien-sûr le but n'est pas de faire vérifier chaque prédiction par un médecin, cela serait contre-productif et l'IA permettant de faire gagner du temps aux médecins serait inutile. L'idée serait d'utiliser ces prédictions pendant les phases de développement et de test de notre IA afin de vérifier qu'elle évolue dans le bon sens et qu'elle détecte bien les pneumonies et pas autre chose.

3.3 Performance

Dans cette section, nous allons reprendre nos modèles précédent afin de proposer une évaluation des explicateurs. Afin de simplifier les choses, nous appellerons le modèle de la section 3.1 "modèle biais" et celui de la section 3.2 "modèle pneumonie" et donc respectivement "explicateur biais" et "explicateur pneumonie".

Nous allons comparer le temps d'exécution entre fournir une prédiction et fournir une prédiction avec son explication (explication local), dans le but d'évaluer le coût d'explication sur une prédiction. Nous ne ferons pas de test de temps d'exécution sur une explication global, car elle peut être fournie indépendamment de la prédiction, aussi nous ne prendrons pas en compte le temps de lecture nécessaire pour l'être humain.

Les tests qui suivent ont été effectuées avec un processeur 1,8 GHz Intel Core i5 double cœur et une mémoire de 8 Go 1600 MHz DDR3. Les résultats exprimés correspondent à la moyenne de cent essais sur des instances différentes. Dans nos tests, le modèle est déjà importé et prêt à fournir une prédiction. Pour ce qui est de l'explication, elle est recalculée à chaque fois. Par exemple, pour l'explicateur biais, la valeur de Shapley du modèle est recalculée à chaque demande d'explication.

Modèle biais :

- Temps prédiction : 1.810 millisecondes.
- Temps prédiction + explication : 89.661 millisecondes.
- Augmentation du temps : 4 852%.

Modèle pneumonie :

- Temps prédiction : 24.343 millisecondes.
- Temps prédiction + explication : 1 689.823 millisecondes.
- Augmentation du temps : 6 841%.

Même si les valeurs restent très basses, joindre l'explication à la prédiction augmente considérablement le temps de calcul. Cette augmentation non-négligeable est à prendre en compte pour certain domaine où la prise de décision doit être immédiate, comme pour les voitures autonomes par exemple.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous sommes partis d'un constat général qui est que l'intelligence artificielle est souvent critiquée notamment pour des raisons d'éthique et de fiabilité. Nous avons émis l'hypothèse que ces problèmes venaient du fait que l'on ne comprend pas la logique interne de ces modèles et nous nous sommes demandé si comprendre un peu mieux ces boîtes noires nous permettrait de les résoudre.

Nous avons donc commencé par analyser les différentes méthodes existantes dans la littérature et définir les différents types d'explications et leurs pré requis. Ces recherche nous on permit de trouver deux outils fréquemment utilisés qui sont LIME et SHAP. Nous avons donc utilisé ces deux approches afin de voir si elles pouvaient nous permettre de détecter la présence de biais discriminatoire dans notre modèle et si elles pouvaient permettre d'améliorer la fiabilité. Ces applications nous montrent le potentiel de l'explicabilité pour résoudre les problématiques liées à l'intelligence artificielle. Mais, comme nous le montre la section "Performance" du chapitre "Application" fournir une explication a un coût non négligeable qui mérite d'être pris en compte.

Ce mémoire a donc pour objectif de promouvoir l'explication des modèles d'aide à la prise de décision. Accompagner chaque prédiction de son explication ou fournir une explication global à notre modèle aura pour effet de nous prémunir de toutes discriminations et d'améliorer la fiabilité de nos modèles. Aussi, cela permettrait d'augmenter la confiance de la population à l'égard de ces technologies et de contribuer à une évolution de la technologie plus saine.

OUVERTURE

En plus de résoudre les questions d'éthique, de fiabilité et de performance vue dans ce mémoire, l'interprétabilité et l'explicabilité des modèles prédictifs nous permettront d'ouvrir de nouvelles portes. L'essor de l'intelligence artificielle et, en parallèle, son explication permet d'introduire un nouveau concept que j'ai appelé "L'intelligence artificielle comme compréhension du monde". L'idée est de détourner l'IA de sa fonction de prédiction de phénomènes pour lui donner une toute autre fonction qui sera la compréhension de phénomènes. Le principe est de prendre un phénomène que nous ne comprenons pas entièrement, de réussir à le prédire à l'aide d'un modèle, puis d'expliquer ce modèle avec les algorithmes d'interprétabilité afin de comprendre ce qui le pousse à donner ces prévisions et donc de mieux comprendre le phénomène de base.

Prenons un exemple trivial, imaginons que nous ne comprenons pas comment les éclairs se forment dans les nuages. Dans un premier temps, nous commencerons par récolter une multitude de données météorologiques et autre. Puis nous créons un modèle prenant ces données en entrée et capable de prédire la formation d'éclairs. La dernière étape consiste donc à expliquer notre modèle afin de comprendre quels facteurs entrent en jeu dans la formation des éclairs, ainsi que l'importance de ces facteurs (type de nuage, répartition des charges positives et négatives...).

Ce concept appliqué dans les domaines de l'infiniment petit ou de l'infiniment grand par exemple, pourra nous aider à mieux comprendre certains phénomènes encore aujourd'hui non-expliqués.

Annexes

.1 Revue des méthodes explicatives

Name	Ref.	Authors	Year	Problem	Explainer	Black Box	Data Type	General	Random	Examples	Code	Dataset
Trepan	[20]	Craven et al.	1996	Model Expl.	DT	NN	TAB	✓				✓
-	[50]	Krishnan et al.	1999	Model Expl.	DT	NN	TAB	✓		✓		✓
DecText	[9]	Boz	2002	Model Expl.	DT	NN	TAB	✓	✓			✓
GPDt	[39]	Johansson et al.	2009	Model Expl.	DT	NN	TAB	✓	✓	✓		✓
Tree Metrics	[14]	Chipman et al.	1998	Model Expl.	DT	TE	TAB					✓
CCM	[23]	Domingos et al.	1998	Model Expl.	DT	TE	TAB	✓	✓			✓
-	[29]	Gibbons et al.	2013	Model Expl.	DT	TE	TAB	✓	✓			
STA	[114]	Zhou et al.	2016	Model Expl.	DT	TE	TAB		✓			
CDT	[87]	Schettin et al.	2007	Model Expl.	DT	TE	TAB			✓		
-	[32]	Hara et al.	2016	Model Expl.	DT	TE	TAB		✓	✓		✓
TSP	[94]	Tan et al.	2016	Model Expl.	DT	TE	TAB					✓
Conj Rules	[19]	Craven et al.	1994	Model Expl.	DR	NN	TAB		✓			
G-REX	[37]	Johansson et al.	2003	Model Expl.	DR	NN	TAB	✓	✓	✓		
REFNE	[115]	Zhou et al.	2003	Model Expl.	DR	NN	TAB	✓	✓	✓		✓
RxREN	[6]	Augasta et al.	2012	Model Expl.	DR	NN	TAB		✓	✓		✓
SVM+P	[70]	Nunez et al.	2002	Model Expl.	DR	SVM	TAB			✓		✓
-	[28]	Fung et al.	2005	Model Expl.	DR	SVM	TAB			✓		✓
inTrees	[22]	Deng	2014	Model Expl.	DR	TE	TAB			✓		✓
-	[61]	Lou et al.	2013	Model Expl.	FI	AGN	TAB	✓		✓	✓	✓
GoldenEye	[33]	Henelius et al.	2014	Model Expl.	FI	AGN	TAB	✓	✓	✓	✓	✓
PALM	[51]	Krishnan et al.	2017	Model Expl.	DT	AGN	ANY	✓		✓		✓
-	[97]	Tolomei et al.	2017	Model Expl.	FI	TE	TAB			✓		
-	[108]	Xu et al.	2015	Outcome Expl.	SM	DNN	IMG			✓	✓	✓
-	[25]	Fong et al.	2017	Outcome Expl.	SM	DNN	IMG			✓		✓
CAM	[113]	Zhou et al.	2016	Outcome Expl.	SM	DNN	IMG			✓	✓	✓
Grad-CAM	[89]	Selvaraju et al.	2016	Outcome Expl.	SM	DNN	IMG			✓	✓	✓
-	[56]	Lei et al.	2016	Outcome Expl.	SM	DNN	TXT			✓		✓
LIME	[83]	Ribeiro et al.	2016	Outcome Expl.	FI	AGN	ANY	✓	✓	✓	✓	✓
MES	[98]	Turner et al.	2016	Outcome Expl.	DR	AGN	ANY	✓		✓		✓
NID	[71]	Olden et al.	2002	Inspection	SA	NN	TAB			✓		
GDP	[7]	Baehrens	2010	Inspection	SA	AGN	TAB	✓		✓		✓
IG	[92]	Sundararajan	2017	Inspection	SA	DNN	ANY			✓		✓
VEC	[16]	Cortez et al.	2011	Inspection	SA	AGN	TAB	✓		✓		✓
VIN	[35]	Hooker	2004	Inspection	PDP	AGN	TAB	✓		✓		✓
ICE	[30]	Goldstein et al.	2015	Inspection	PDP	AGN	TAB	✓		✓	✓	✓
Prospector	[48]	Krause et al.	2016	Inspection	PDP	AGN	TAB	✓		✓		✓
Auditing	[2]	Adler et al.	2016	Inspection	PDP	AGN	TAB	✓		✓	✓	✓
OPIA	[1]	Adebayo et al.	2016	Inspection	PDP	AGN	TAB	✓		✓		
-	[110]	Yosinski et al.	2015	Inspection	NA	DNN	IMG			✓		✓
TreeView	[96]	Thiagarajan et al.	2016	Inspection	DT	DNN	TAB			✓		✓
IP	[90]	Shwartz et al.	2017	Inspection	NA	DNN	TAB			✓		
-	[81]	Radford	2017	Inspection	NA	DNN	TXT			✓		
CPAR	[109]	Yin et al.	2003	Transp. Design	DR	-	TAB					✓
FRL	[102]	Wang et al.	2015	Transp. Design	DR	-	TAB			✓	✓	✓
BRL	[57]	Letham et al.	2015	Transp. Design	DR	-	TAB			✓		
TLBR	[91]	Su et al.	2015	Transp. Design	DR	-	TAB			✓		✓
IDS	[53]	Lakkaraju et al.	2016	Transp. Design	DR	-	TAB			✓		
Rule Set	[104]	Wang et al.	2016	Transp. Design	DR	-	TAB			✓	✓	✓
1Rule	[64]	Malioutov et al.	2017	Transp. Design	DR	-	TAB			✓		✓
PS	[8]	Bien et al.	2011	Transp. Design	PS	-	ANY			✓		✓
BCM	[44]	Kim et al.	2014	Transp. Design	PS	-	ANY			✓		✓
-	[63]	Mahendran et al.	2015	Transp. Design	PS	-	IMG			✓	✓	✓
-	[47]	Kononenko et al.	2010	Transp. Design	FI	-	TAB			✓		✓
OT-SpAMs	[103]	Wang et al.	2015	Transp. Design	DT	-	TAB			✓	✓	✓

FIGURE 13 – Tableau résumant l'ensemble des méthodes expliquant les boîtes noires présent dans la littérature. Description en annexe 2. Tiré de [RGu18]

.2 Description des méthodes explicatives

Feature	Description
<i>Problem</i>	Model Explanation, Outcome Explanation, Black Box Inspection, Transparent Design
<i>Explinator</i>	DT - Decision Tree, DR - Decision Rules, FI - Features Importance, SM - Saliency Masks, SA - Sensitivity Analysis, PDP - Partial Dependence Plot, NA - Neurons Activation, PS - Prototype Selection
<i>Black Box</i>	NN - Neural Network, TE - Tree Ensemble, SVM - Support Vector Machines, DNN - Deep Neural Network, AGN - AGNostic black box
<i>Data Type</i>	TAB - TABular, IMG - IMaGe, TXT - TeXT, ANY - ANY type of data
<i>General</i>	Indicates if an explanatory approach can be generalized for every black box, i.e., it does not consider peculiarities of the black box to produce the explanation
<i>Random</i>	Indicates if any kind of random perturbation or permutation of the original dataset is required for the explanation
<i>Examples</i>	Indicates if example of explanations are shown in the paper
<i>Code</i>	Indicates if the source code is available
<i>Dataset</i>	Indicates if the datasets used in the experiments are available

FIGURE 14 – Description du tableau présent en annexe 1. Tiré de [RGu18]

BIBLIOGRAPHIE

- [Bor18] Frederik Zuiderveen BORGESIOUS. « Discrimination, intelligence artificielle et décisions algorithmiques ». In : (2018).
- [Bry16] Seth Flaxman BRYCE GOODMAN. « European Union regulations on algorithmic decision-making and a "right to explanation" ». In : (2016).
- [Mol19] Christoph MOLNAR. *Interpretable Machine Learning*. 2019.
- [MTR16] C.Guestrin MT.RIBEIRO S.Singh. « “Why Should I Trust You?” Explaining the Predictions of Any Classifier ». In : (2016).
- [ONe16] Cathy O’NEIL. *Weapons of Math Destruction*. 2016.
- [Pio17] Yarin Gal PIOTR DABKOWSKI. « Real Time Image Saliency for Black Box Classifiers ». In : (2017).
- [RGU18] S.Ruggieri R.GUIDOTTI A.Monreale. « A Survey Of Methods For Explaining Black Box Models ». In : (2018).
- [Sco17] Su-In Lee SCOTT M. LUNDBERG. « Consistent feature attribution for tree ensembles ». In : (2017).
- [Sco19] Su-In Lee SCOTT M. LUNDBERG Gabriel G. Erion. « Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles ». In : (2019).
- [Sol16] Andrew D. Selbst SOLON BAROCAS. « Big Data’s Disparate Impact ». In : (2016).
- [Vil18] Cédric VILLANI. *Donner un sens à l’intelligence artificielle*. 2018.
- [WSa17] KR.Müller W.SAMEK T.Wiegand. « Explainable Artificial Intelligence : Understanding, Visualizing and Interpreting Deep Learning Models ». In : (2017).

WEBOGRAPHIE

- [Art19] Cristian ARTEAGA. *Interpretable Machine Learning for Image Classification with LIME*. 2019. URL : <https://towardsdatascience.com/interpretable-machine-learning-for-image-classification-with-lime-ea947e82ca13> (visité le 16/05/2020).
- [Cou10] David COURNAPEAU. *Scikit-learn : Machine Learning in Python*. 2010. URL : <https://github.com/scikit-learn/scikit-learn> (visité le 18/05/2020).
- [Das18] Jeffrey DASTIN. *Amazon scraps secret AI recruiting tool that showed bias against women*. 2018. URL : <https://www.reuters.com/article/us-amazon-com-jobs-automation-insight/amazon-scraps-secret-ai-recruiting-tool-that-showed-bias-against-women-idUSKCN1MK08G> (visité le 16/05/2020).
- [Dat19] "Dr. DATAMAN". *Explain Your Model with the SHAP Values*. 2019. URL : <https://towardsdatascience.com/explain-your-model-with-the-shap-values-bc36aac4de3d> (visité le 16/05/2020).
- [Gal18] Richard GALL. *Machine Learning Explainability vs Interpretability : Two concepts that could help restore trust in AI*. 2018. URL : <https://www.kdnuggets.com/2018/12/machine-learning-explainability-interpretability-ai.html> (visité le 27/01/2020).
- [Goo18] Data for GOOD. *Serment d'Hippocrate pour Data Scientist*. 2018. URL : <https://hippocrate.tech/> (visité le 23/03/2020).
- [Jai20a] Damien JAIME. *Classification of pneumonia case in chest x-ray using Tensorflow*. 2020. URL : https://github.com/DaJaime/CNN_pneumonia_detection (visité le 16/05/2020).
- [Jai20b] Damien JAIME. *LIME explain - classification of pneumonia case in chest x-ray*. 2020. URL : https://github.com/DaJaime/LIME_pneumonia_explain (visité le 16/05/2020).

- [Jai20c] Damien JAIME. *Use of SHAP to highlight discriminatory bias*. 2020. URL : https://github.com/DaJaime/SHAP_highlight_bias (visité le 16/05/2020).
- [Kau18] Saurabh KAUSHIK. *Holy Grail of AI for Enterprise - Explainable AI*. 2018. URL : <https://www.kdnuggets.com/2018/10/enterprise-explainable-ai.html> (visité le 27/01/2020).
- [Kim12] Royce KIMMONS. *Exam scores for students at a public school*. 2012. URL : http://roycekimmons.com/tools/generated_data/exams (visité le 20/04/2020).
- [Lun18] Scott LUNDBERG. *SHAP : A game theoretic approach to explain the output of any machine learning model*. 2018. URL : <https://github.com/slundberg/shap> (visité le 16/05/2020).
- [Moo18] Paul MOONEY. *Chest X-Ray Images (Pneumonia)*. 2018. URL : <https://www.kaggle.com/paultimothymooney/chest-xray-pneumonia> (visité le 20/04/2020).
- [Opi17] OPINIONWAY. *OpinionWay pour VMware - Les Français et l'usage de l'Intelligence Artificielle*. 2017. URL : <https://www.opinion-way.com/fr/> (visité le 27/01/2020).
- [Rib16] Marco Tulio RIBEIRO. *Lime : Explaining the predictions of any machine learning classifier*. 2016. URL : <https://github.com/marcotcr/lime> (visité le 16/05/2020).
- [Sim18] Florent SIMON. *Deep Learning, le réseau à convolution*. 2018. URL : <https://www.supinfo.com/articles/single/8037-deep-learning-reseau-convolution> (visité le 21/05/2020).
- [Ten15] "TENSORFLOW". *An Open Source Machine Learning Framework for Everyone*. 2015. URL : <https://github.com/tensorflow/tensorflow> (visité le 18/05/2020).

TABLE DES FIGURES

1.1	Lien entre la performance et l'interprétabilité d'un algorithme de machine learning. <i>Source</i> [Goo18]	3
2.1	Un problème global complexe pouvant être expliqué à échelle local. <i>Source</i> : [MTR16]	11
2.2	Exemple d'un arbre de décision	15
2.3	Importance des fonctionnalités : explication de la prédiction "coq"	15
2.4	Masque saillant : explication de la prédiction chien et chat	16
2.5	Exemple de diagramme de dépendance partielle.	17
2.6	Position de la sur-couche explicative dans le processus de prédiction. <i>Source</i> : [Kau18]	20
2.7	Exemple de zones de perturbations sur une image	21
2.8	Source : LIME Paper [MTR16]	22
2.9	Exemple de l'explication du coût d'un logement avec SHAP. <i>Source</i> : [Mol19]	23
3.1	Jeu de donnée des performances des étudiants	26
3.2	Jeu de donnée final	26
3.3	Importance des variables d'entrées dans notre prédiction	29
3.4	Détail de l'explication de l'importance des variables	30
3.5	Explication de la prédiction pour une instance précise	30
3.6	Exemple d'images présentes dans le jeu de donnée de pneumonie	31
3.7	Schéma expliquant la convolution. <i>Source</i> : [Sim18]	32
3.8	Explication d'un pooling de taille trois par trois. <i>Source</i> : [Sim18]	33
3.9	Architecture de notre modèle de prédiction de pneumonie.	33
3.10	Zones de perturbation	35
3.11	Exemple de perturbations générées	35
3.12	À gauche : Zones de perturbations avec les coefficients les plus élevés À droite : Explication de la prédiction de pneumonie par LIME	36

TABLE DES FIGURES

13	Tableau résumant l'ensemble des méthodes expliquant les boîtes noires présent dans la littérature. Description en annexe 2. Tiré de [RGU18]	41
14	Description du tableau présent en annexe 1. Tiré de [RGU18] .	42

Université Paris-Nanterre
200 Avenue de la République
92000 Nanterre