



PariVision

Mise en place d'un pipeline MLOps
pour un modèle de prédiction de tir NBA

P. COHEN, F. HEUZE, S. JIANYING | DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS | 19/05/2025

SECTION 1 – PRESENTATION	4
INTRODUCTION	4
OBJECTIF	5
CONTRIBUTION A L'INDUSTRIE	5
PRINCIPAUX DEFIS IDENTIFIES	6
FLUX DE TRAVAIL	7
HEBERGEMENT DU PROJET	8
SECTION 2 – EXPLORATION DES DONNEES	9
SOURCES DE DONNEES	9
<i>VirtualBetsAPI</i>	9
<i>Utilisation de VirtualBetsAPI</i>	9
<i>Limite de VirtualBetsAPI</i>	10
ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES BRUTES	11
<i>Matrice de corrélation entre variables explicatives et cible</i>	13
<i>Taux de réussite par type de tir</i>	13
<i>Évolution du taux de réussite en fonction du temps écoulé</i>	14
<i>Relation entre position du tir et distance</i>	14
<i>Densité de la distance de tir selon le type de tir (encodé)</i>	15
PRE-TRAITEMENT DES DONNEES	16
<i>Variables finales</i>	16
<i>Tableau comparatif avant/après pré-traitement (Bronze -> Silver)</i>	17
NETTOYAGE DES DONNEES	18
INGENIERIE DES FONCTIONNALITES (FEATURES ENGINEERING)	18
<i>Fusion des variables temporelles en une caractéristique continue</i>	18
<i>Encodage numérique du tir</i>	19
<i>Transformation des variables de zone de tir lors du feature engineering</i>	19
<i>Synthèse</i>	19
STOCKAGE DES DONNEES	20
<i>Introduction</i>	20
<i>Installation sur Docker</i>	20
<i>Utilisation de MongoDB</i>	21
<i>Utilisation de PyMongo</i>	22
MODELISATION	22
SECTION 3 – MISE EN PRODUCTION	23
DEPLOIEMENT DE LA VM	23
<i>Connexion SSH</i>	23
<i>Initialisation</i>	23
<i>Configuration de la VM</i>	23
GITHUB	24
CLONER LE DEPOT	24
ACTUALISER LE DEPOT	24
MISE EN PLACE D'UN WORKFLOW GITHUB ACTIONS	25
MISE EN PLACE D'UN WORKFLOW DE TESTS UNITAIRES	26
<i>Livraison continue (CD)</i>	26
PYTHON	27
<i>Mise à jour et installation des dépendances</i>	27
<i>Création de l'environnement virtuel</i>	27

<i>Installation des librairies</i>	27
<i>Fichier d'environnement</i>	27
DOCKER	28
<i>Installation de Docker sur la VM</i>	28
<i>Configuration de Docker</i>	28
<i>Le fichier Docker-Compose</i>	28
HOMER	29
JENKINS	30
<i>Installation</i>	30
<i>Configuration</i>	30
<i>Plugins</i>	30
<i>Créer un agent PariVision</i>	31
<i>Pipeline</i>	32
MLFLOW	33
<i>Objectif</i>	33
<i>Initialisation</i>	33
<i>Utilisation</i>	33
<i>Configurer l'expérience PariVision</i>	34
<i>Mise en œuvre</i>	35
<i>Enregistrement des expériences</i>	35
<i>Bénéfices</i>	35
<i>Conclusion</i>	35
MLFLOW-CHAMPION	36
SECTION 4 – EXPLOITATION	37
PIPELINE ETL.....	37
PIPELINE ML.....	37
SUPERVISION.....	38
<i>Prometheus et Grafana</i>	38
<i>Slack</i>	38
<i>Evidently</i>	39
<i>PariVision-Exporter</i>	39
SECTION 5 – CONCLUSION	40
LES PRINCIPAUX POINTS FORTS DU PROJET	40
BILAN	40
PERSPECTIVES D'EVOLUTION.....	41
SYNTHESE	42

Section 1 – Présentation

Introduction

Le basketball, en particulier la NBA (National Basketball Association), figure parmi les sports les plus prisés au monde. Il attire des millions de spectateurs et génère un marché économique colossal, notamment dans le domaine des paris sportifs. Avec une saison régulière comprenant 82 matchs par équipe et des playoffs intenses, la NBA offre un volume conséquent de données exploitables pour l'analyse prédictive. Dans ce contexte, où chaque tir peut influencer l'issue d'un match et générer des enjeux stratégiques, économiques (paris sportifs, droits TV) ou émotionnels (engagement des fans), la capacité à prédire la réussite d'un tir spécifique devient un atout précieux.

Notre projet **PariVision** se concentre sur cette problématique en combinant machine learning et ingénierie MLOps pour concevoir un système prédictif robuste et automatisé, capable d'estimer les résultats des matchs NBA. La complexité réside dans la modélisation des multiples facteurs influençant un tir : position sur le terrain, pression défensive, ou même le contexte du match (dernières secondes, enjeux du score). Les approches statiques peinent à s'adapter à la variabilité des données sportives, nécessitant une infrastructure capable d'évoluer avec les saisons et les métriques émergentes.

La prédiction des tirs réussis au basketball est un enjeu central pour l'analyse de la performance des joueurs, l'optimisation des stratégies d'équipe et l'engagement des fans. Dans ce contexte, le projet « Prédiction des tirs réussis des joueurs NBA » vise à concevoir, entraîner et déployer un modèle de machine learning capable de prédire, à partir des caractéristiques du tir et de son contexte, la probabilité de réussite d'un tir tenté lors d'un match NBA.

Ce projet s'inscrit donc dans une démarche complète de science des données, de la préparation des données brutes jusqu'au déploiement et à la surveillance du modèle. Il offre un cadre réutilisable et évolutif pour l'analyse prédictive dans le domaine sportif et au-delà et permet d'illustrer comment le MLOps peut transformer des données brutes en entrées exploitable, en alignant précision algorithmique et exigences opérationnelles.

En résumé, ce projet répond à des besoins concrets de l'industrie du sport, s'appuie sur les technologies les plus récentes en data science et MLOps et anticipe les défis techniques, organisationnels et éthiques liées à l'analyse avancée de la performance sportive.

Objectif

En ciblant cette problématique, nous élaborons les objectifs suivants :

- **Prédiction contextuelle** : déterminer la probabilité de réussite d'un tir en temps réel, en s'appuyant sur des données synthétiques ou historiques.
- **Automatisation du flux de travail** : conteneuriser chaque étape et orchestrer les pipelines.
- **Adaptabilité continue** : implémenter un système de réentraînement conditionnel, où un nouveau modèle ne remplace l'ancien que si son exactitude dépasse celle de l'ancien modèle.
- **Garantir la traçabilité et la reproductibilité** : des intégrations CI/CD, un suivi des performances, la reproductibilité et la sélection optimale des modèles.
- **Surveillance en production** : assurer une supervision granulaire des requêtes API, de la base de données ainsi qu'une toute dérive des données ou baisse de performance en production pour ainsi maintenir la fiabilité du modèle dans le temps.

Les principaux résultats attendus sont :

- **Un modèle de machine learning** validé par des métriques robustes.
- **Un service de prédiction déployé** sous forme d'API REST.
- **Une application** d'aide à la décision.
- **Des rapports et panneaux de supervision** détectant la dérive des données ou de la performance, garantissant la fiabilité continue du modèle.
- **Une documentation complète** du pipeline, des choix de modélisation et des résultats, facilitant la réutilisation et l'évolution du projet.

Contribution à l'industrie

- **Amélioration de la performance sportive** : Les analyses issues du modèle permettent d'identifier les zones et situations à haut potentiel de réussite, d'ajuster les stratégies de tir et d'individualiser l'entraînement des joueurs.
- **Appui à la prise de décision en temps réel** : Les équipes NBA utilisent de plus en plus ces outils pour adapter les tactiques pendant les matchs, optimiser les rotations ou anticiper les faiblesses adverses.
- **Valorisation de la data dans l'écosystème sportif** : Le projet illustre comment la collecte, l'analyse et l'exploitation intelligente des données deviennent des leviers majeurs de compétitivité et d'innovation dans le sport professionnel.
- **Transférabilité** : Ce type de pipeline peut être adapté à d'autres sports ou contextes (recrutement, prévention des blessures, expérience fan, etc, ...).

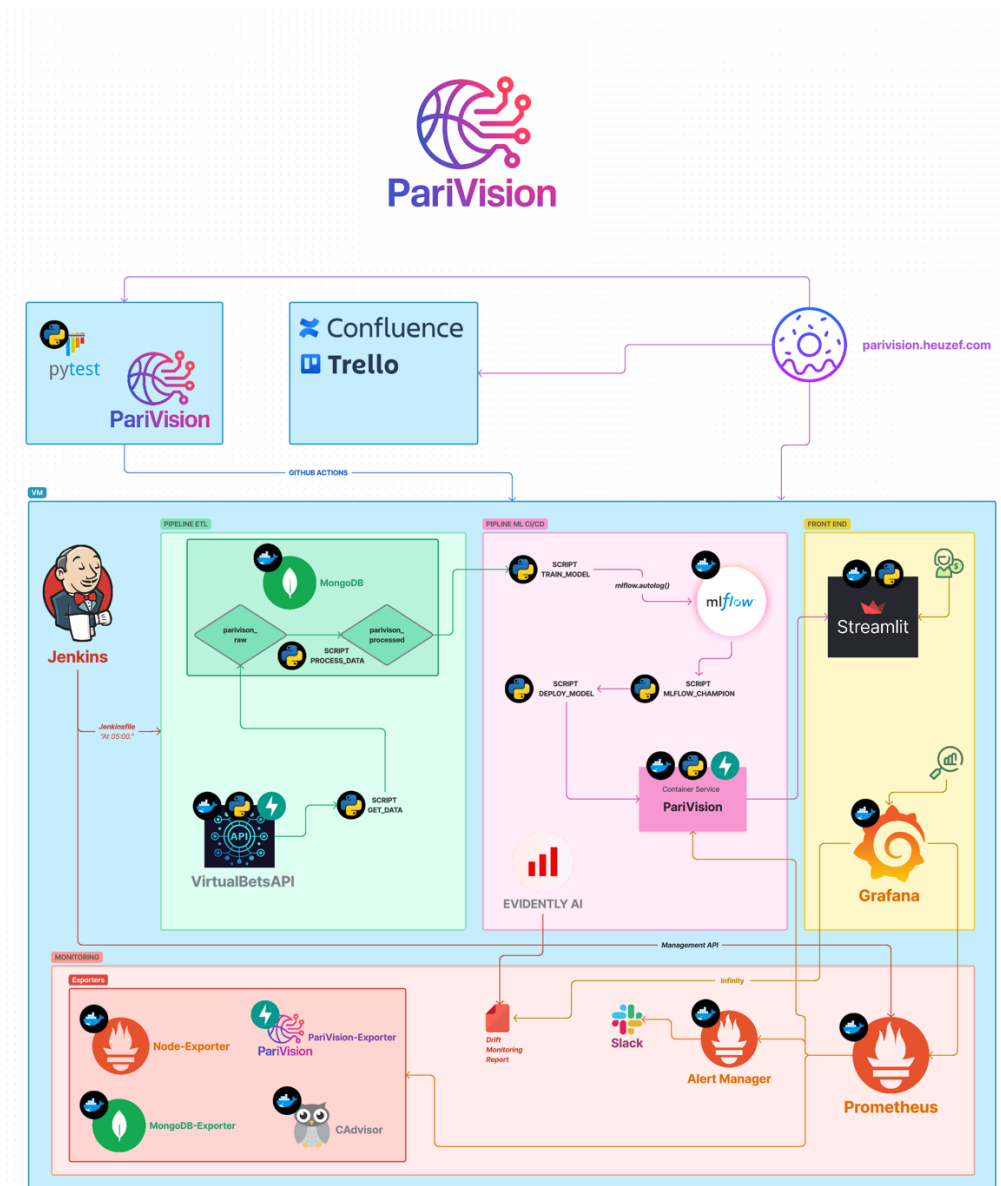
Principaux défis identifiés

- **Qualité et hétérogénéité des données** : Les données sportives sont souvent bruitées, incomplètes ou issues de sources multiples, ce qui nécessite un pré-traitement rigoureux.
- **Évolution des stratégies et du jeu** : Les modèles doivent s'adapter à des changements de règles, de tactiques ou de comportements des joueurs, rendant la supervision essentielle.
- **Dérive des données et des performances** : Sans surveillance, un modèle performant peut devenir obsolète si la distribution des données évolue (ex : nouveaux schémas de jeu, évolution du profil des joueurs).
- **Défis éthiques et réglementaires** : Respect de la vie privée des joueurs, sécurité des données, équité dans l'accès aux technologies avancées.
- **Intégration et adoption** : Faire accepter et intégrer ces outils dans les routines des équipes et du staff technique peut nécessiter un accompagnement au changement.

Flux de travail

Dans une logique MLOps moderne, le projet intègre une pipeline ML Ci/CD :

- **Le suivi d'expériences avec MLflow**, pour garantir la traçabilité, la reproductibilité et la sélection optimale des modèles.
- **Le déploiement du modèle avec FastAPI**, permettant de rendre la prédiction accessible via une API REST.
- **La surveillance continue avec Evidently**, pour détecter toute dérive des données et ainsi maintenir la fiabilité du modèle sur la durée.

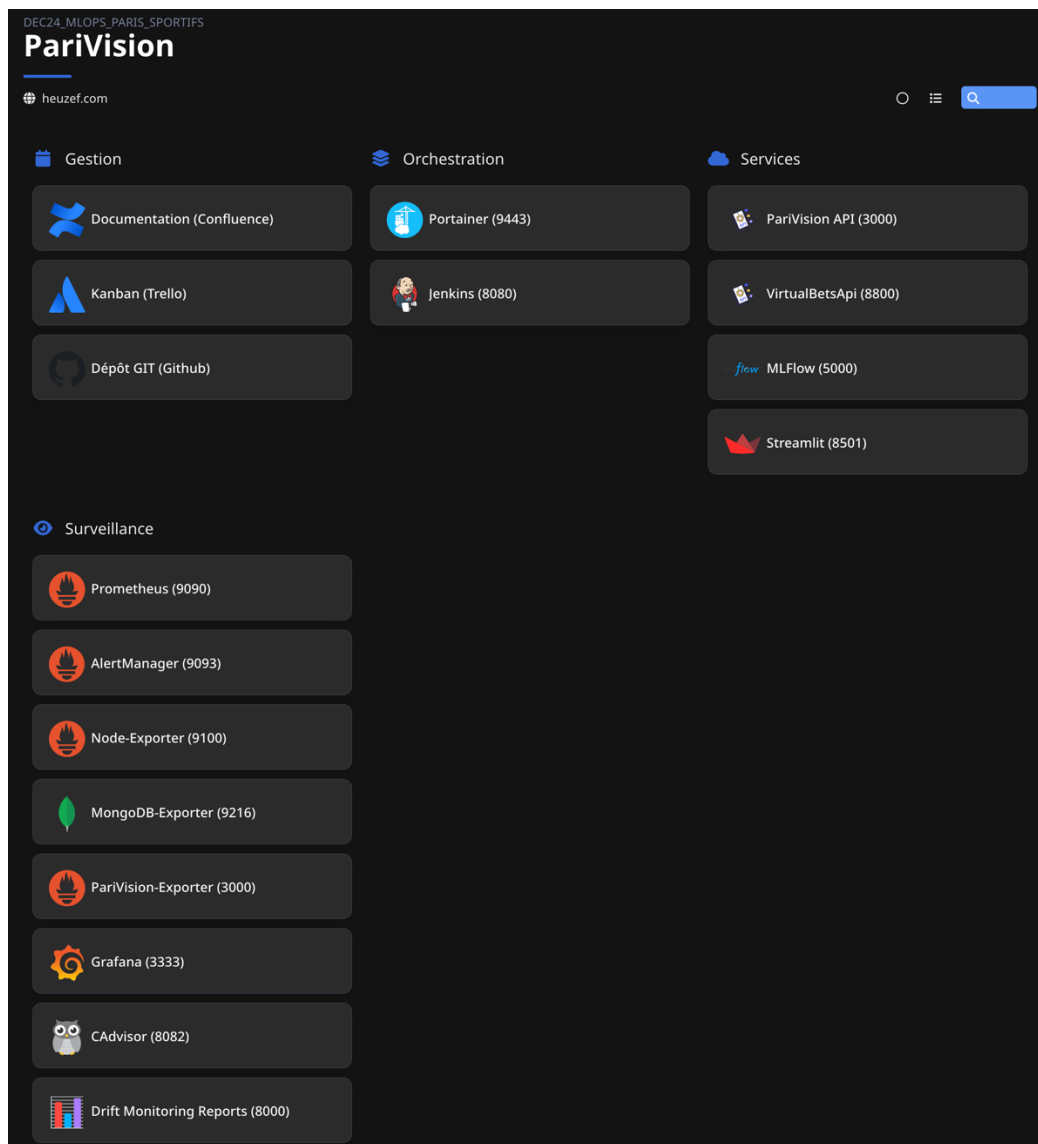


Hébergement du projet

Le projet est entièrement hébergé sur un serveur unique en mode monolithique. Bien que cette approche ne soit pas la plus optimale en termes de performance et de scalabilité, elle a été choisie en raison de contraintes budgétaires et de ressources disponibles.

Cette configuration permet de centraliser les opérations et de simplifier la gestion des infrastructures, tout en respectant les limitations financières et techniques.

- Accès à la page d'accueil du projet : [PariVision](#)
- Accès au dépôt Git du projet : https://github.com/DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/
- Miroir : https://github.com/heuzef/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS



Section 2 – Exploration des données

Ce projet s'inscrit dans une démarche complète de science des données, de la préparation des données brutes jusqu'au déploiement et à la surveillance du modèle, selon les meilleures pratiques de l'industrie. Il offre un cadre réutilisable et évolutif pour l'analyse prédictive dans le domaine sportif et au-delà.

Sources de données

VirtualBetsAPI

VBA est une API développée sur-mesure dans le cadre du projet PariVision, nous permettant d'appeler des données fictives aléatoirement. Cet outil exploite FastAPI et se base sur un fichier d'origine CSV, transformé en JSON.

Utilisation de VirtualBetsAPI

- **Appel : Demande de retour de 2 nodes**

`http://parivision.heuzef.com:8800/getdata/2`

- **Résultat**

```
[
  {
    "Game ID": "0029700427",
    "Game Event ID": "389",
    "Player ID": "100",
    "Player Name": "Tim Legler",
    "Team ID": "1610612764",
    "Team Name": "Washington Wizards",
    "Period": "4",
    "Minutes Remaining": "11",
    "Seconds Remaining": "22",
    "Action Type": "Jump Shot",
    "Shot Type": "2PT Field Goal",
    "Shot Zone Basic": "Mid-Range",
    "Shot Zone Area": "Right Side(R)",
    "Shot Zone Range": "8-16 ft.",
    "Shot Distance": "15",
    "X Location": "117",
    "Y Location": "109",
    "Shot Made Flag": "1",
    "Game Date": "19980102",
    "Home Team": "WAS",
    "Away Team": "IND",
    "Season Type": "Regular Season"
  }, {...}
]
```

Limite de VirtualBetsAPI

La limite est fixée à 50000 nodes contenus dans le fichier dat_NBA. L'URL <http://parivision.heuzef.com:8800/getdata/2> renvoie les deux premiers nodes du fichier. Pour renvoyer les 3 premiers nodes, il faut remplacer 2 par 3 dans l'URL

Si l'url est appelée deux fois, les deux noeuds suivants sont renvoyés. Un compteur est implémenté afin de ne pas fournir deux fois les mêmes nodes.

Pour réinitialiser le compteur à 0, il faut appeler l'URL suivante : <http://parivision.heuzef.com:8800/reset>

Analyse exploratoire des données brutes

Les données brutes comportent 22 variables, couvrant à la fois des informations contextuelles (identifiants de match, joueur, équipe, période, date, etc, ...), des caractéristiques du tir (type de tir, zone du terrain, distance, coordonnées, etc.) et la cible à prédire (Shot Made Flag, indiquant si le tir a été réussi ou non).

```
Data columns (total 22 columns):
#      Column                               Non-Null Count  Dtype
---  -
0      Game ID                               1000 non-null    int64
1      Game Event ID                           1000 non-null    int64
2      Player ID                               1000 non-null    int64
3      Player Name                             1000 non-null    object
4      Team ID                                  1000 non-null    int64
5      Team Name                               1000 non-null    object
6      Period                                  1000 non-null    int64
7      Minutes Remaining                       1000 non-null    int64
8      Seconds Remaining                       1000 non-null    int64
9      Action Type                             1000 non-null    object
10     Shot Type                               1000 non-null    object
11     Shot Zone Basic                         1000 non-null    object
12     Shot Zone Area                         1000 non-null    object
13     Shot Zone Range                        1000 non-null    object
14     Shot Distance                           1000 non-null    int64
15     X Location                             1000 non-null    int64
16     Y Location                             1000 non-null    int64
17     Shot Made Flag                         1000 non-null    int64
18     Game Date                             1000 non-null    int64
19     Home Team                             1000 non-null    object
20     Away Team                             1000 non-null    object
21     Season Type                           1000 non-null    object
```

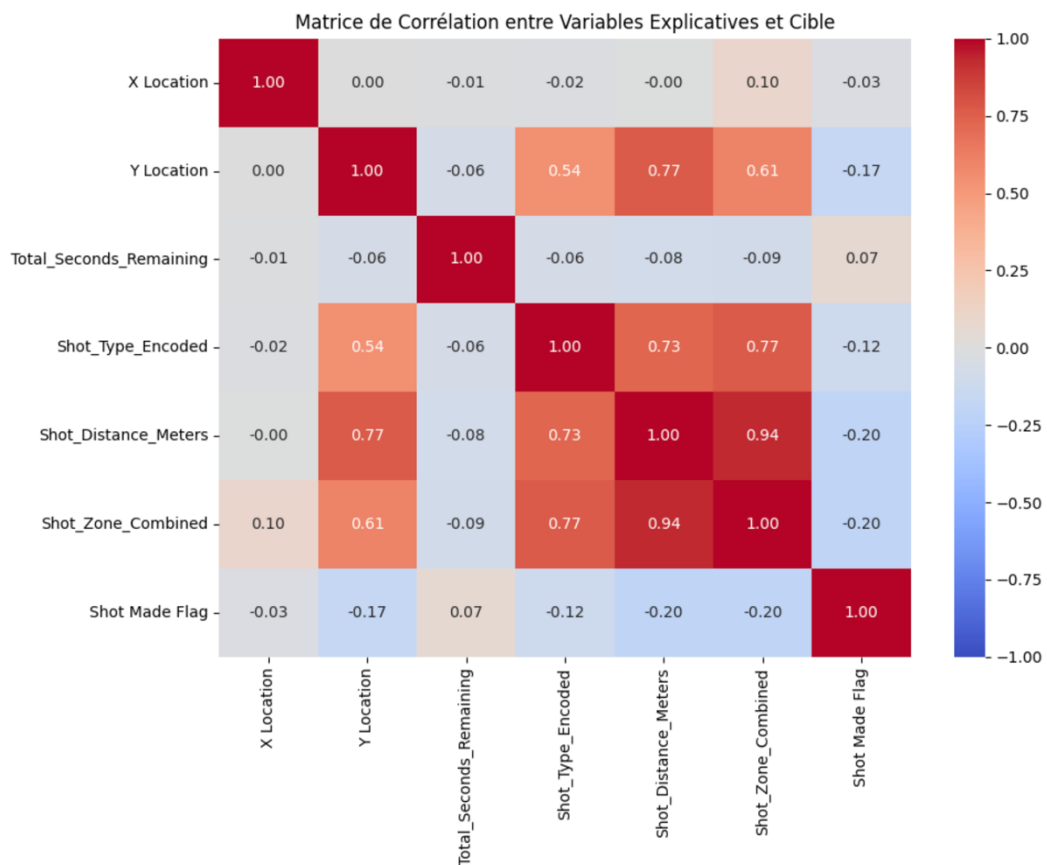


	Game ID	Game Event ID	Player ID	Team ID	Period	\
count	1.000000e+03	1000.000000	1.000000e+03	1.000000e+03	1000.000000	
mean	2.282636e+07	258.231000	1.664872e+05	1.610613e+09	2.533000	
std	4.957243e+06	159.915436	3.803926e+05	8.676662e+00	1.153361	
min	2.000001e+07	2.000000	1.500000e+01	1.610613e+09	1.000000	
25%	2.050117e+07	116.750000	1.516500e+03	1.610613e+09	1.000000	
50%	2.110061e+07	267.000000	2.548000e+03	1.610613e+09	3.000000	
75%	2.170074e+07	382.250000	2.015872e+05	1.610613e+09	4.000000	
max	4.990008e+07	743.000000	1.629673e+06	1.610613e+09	6.000000	

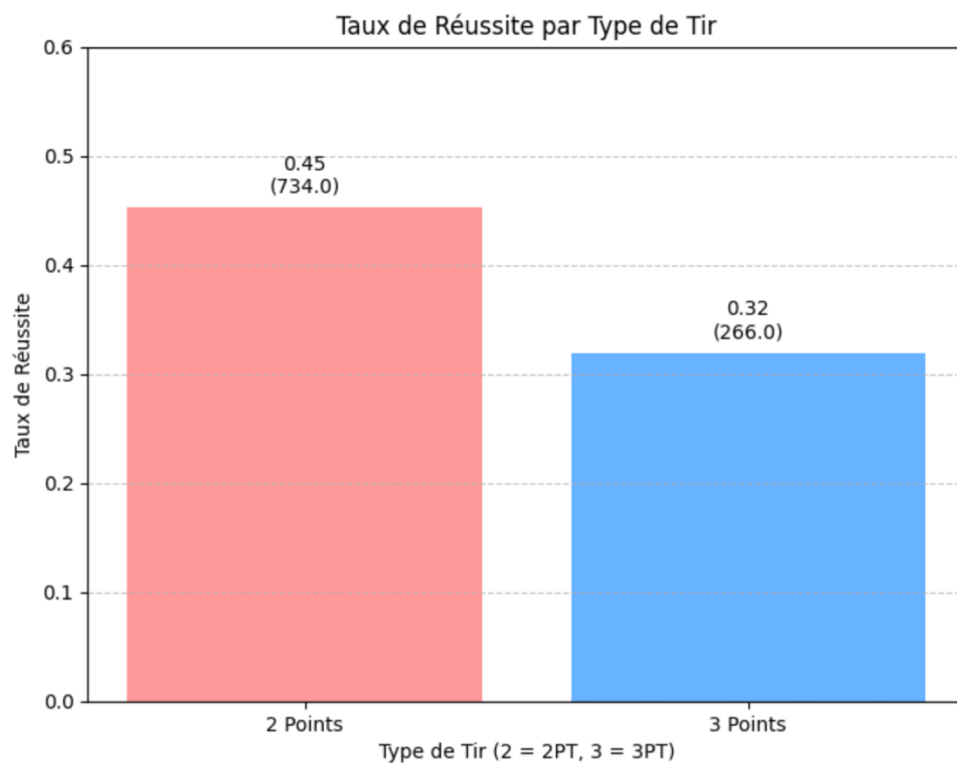
	Minutes Remaining	Seconds Remaining	Shot Distance	X Location	\
count	1000.000000	1000.000000	1000.000000	1000.000000	
mean	5.218000	28.378000	13.093000	2.278000	
std	3.414108	17.452326	9.733195	113.872216	
min	0.000000	0.000000	0.000000	-246.000000	
25%	2.000000	13.000000	2.000000	-64.250000	
50%	5.000000	28.000000	15.000000	0.000000	
75%	8.000000	43.000000	23.000000	73.000000	
max	11.000000	59.000000	58.000000	247.000000	

	Y Location	Shot Made Flag	Game Date
count	1000.000000	1000.000000	1.000000e+03
mean	84.534000	0.41700	2.008836e+07
std	88.392477	0.49331	6.400691e+04
min	-31.000000	0.00000	1.997111e+07
25%	6.000000	0.00000	2.003122e+07
50%	53.000000	0.00000	2.009021e+07
75%	163.000000	1.00000	2.014113e+07
max	544.000000	1.00000	2.020031e+07

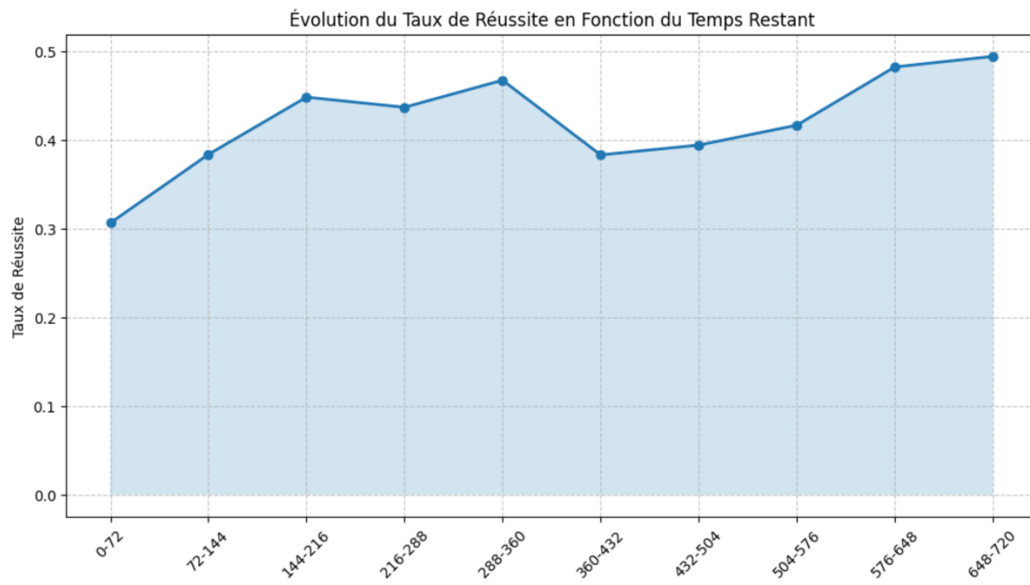
Matrice de corrélation entre variables explicatives et cible



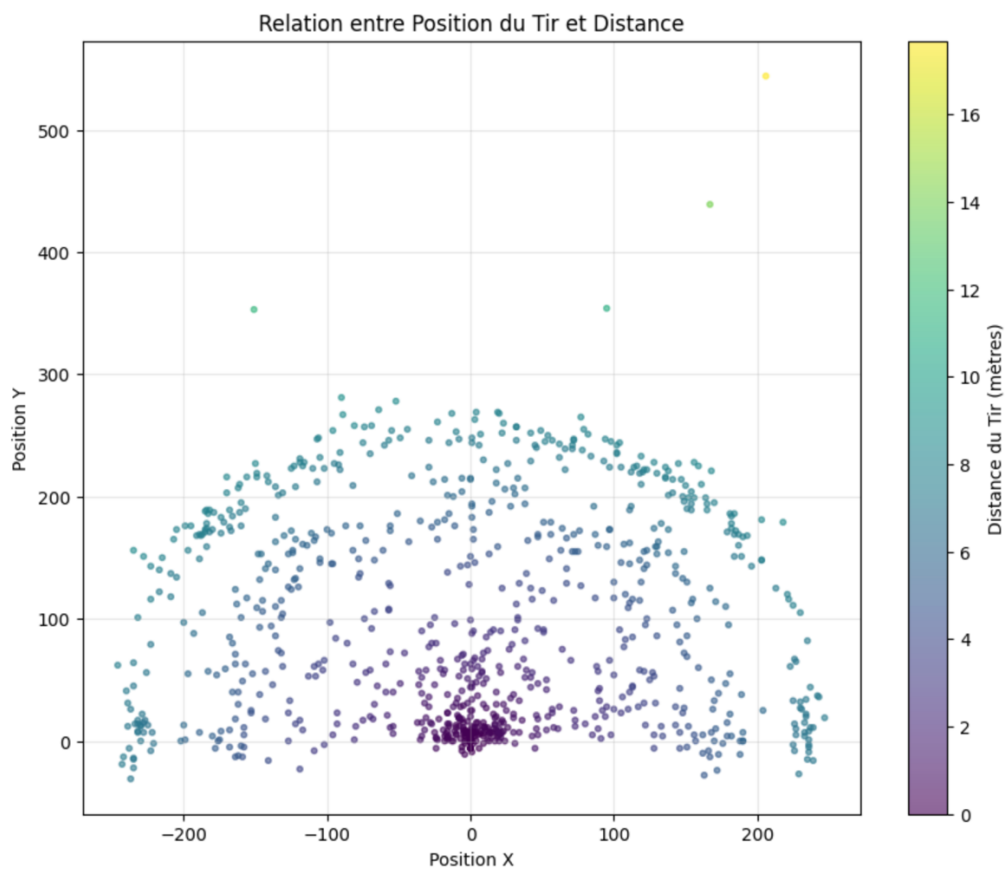
Taux de réussite par type de tir



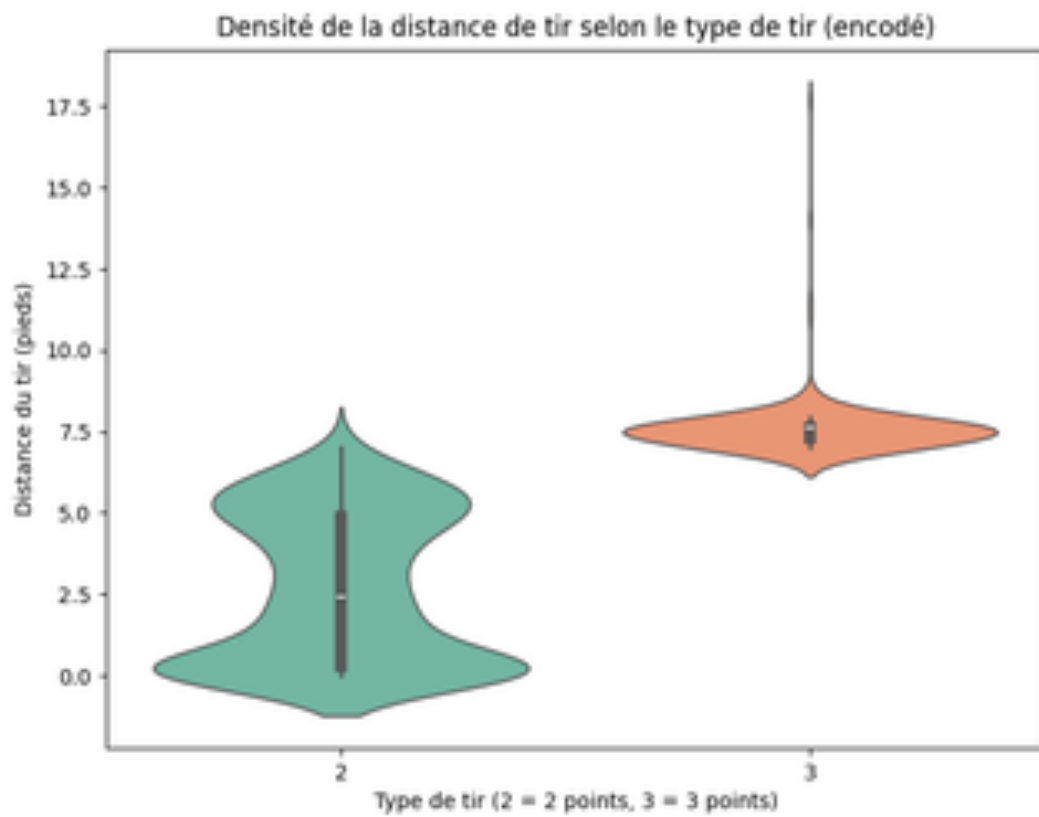
Évolution du taux de réussite en fonction du temps écoulé



Relation entre position du tir et distance



Densité de la distance de tir selon le type de tir (encodé)



Pré-traitement des données

Le pipeline de traitement des données mis en place comprend plusieurs étapes structurantes :

- **Pré-traitement et nettoyage** : suppression des colonnes non pertinentes, gestion des doublons, vérification et traitement des valeurs manquantes.
- **Ingénierie des fonctionnalités** : création de nouvelles variables plus informatives, telles que le temps restant dans la période, l'encodage numérique du type de tir, conversion des unités de mesure, etc ...
- **Préparation à la modélisation** : sélection et transformation des variables explicatives, encodage des variables catégorielles, séparation des jeux d'entraînement et de test.

Variables finales

Variable	Description	Type
Player ID	Identifiant du joueur	Variable nettoyée
X Location	Position X sur le terrain	Variable nettoyée
Y Location	Position Y sur le terrain	Variable nettoyée
Total_Seconds_Remaining	Temps total restant	Nouvelle variables
Shot_Type_Encoded	Type de tir (2 points ou 3 points)	Nouvelle variables
Shot_Distance_Meters	Distance en mètres	Nouvelle variables
Shot_Zone_Combined	Zone de tir (7 zones)	Nouvelle variables
Shot Made Flag	Indicateur de réussite du tir	Variable cible

Tableau comparatif avant/après pré-traitement (Bronze -> Silver)

Variable	Bronze	Silver
Nombre de colonnes	22	12
Colonnes présentes	Game ID, Game Event ID, Player ID, Player Name, Team ID, Team Name, Period, Minutes Remaining, Seconds Remaining, Action Type, Shot Type, Shot Zone Basic, Shot Zone Area, Shot Zone Range, Shot Distance, X Location, Y Location, Shot Made Flag, Game Date, Home Team, Away Team, Season Type	Player ID, Action Type, Shot Type, Shot Zone Basic, Shot Zone Area, Shot Zone Range, Shot Distance, X Location, Y Location, Shot Made Flag, Total_Seconds_Remaining, Shot_Type_Encoded
Colonnes supprimées	-	Game ID, Game Event ID, Player Name, Team ID, Team Name, Period, Game Date, Home Team, Away Team, Season Type
Colonnes créées	-	Total_Seconds_Remaining (Minutes Remaining × 60 + Seconds Remaining), Shot_Type_Encoded (2 ou 3 selon Shot Type)
Doublons	Non vérifié initialement	Vérifiés et supprimés (aucun doublon trouvé)
Valeurs manquantes	Non connues initialement	Vérifiées et remplacées par la médiane pour les numériques (aucune valeur manquante détectée)
Encodage	Variables catégorielles non encodées	Shot_Type_Encoded (2 = 2 points, 3 = 3 points, 0 = autre)
Colonnes temporelles	Minutes Remaining, Seconds Remaining	Fusionnées en Total_Seconds_Remaining
Colonnes de type de tir	Shot Type (texte)	Shot_Type_Encoded (numérique)
Cible	Shot Made Flag (0/1)	Shot Made Flag (0/1)
Format des variables	12 numériques, 10 catégorielles	Majoritairement numériques ou prêtes à l'encodage

Prêt pour l'apprentissage	Non	Oui
---------------------------	-----	-----

Ce tableau montre comment le pré-traitement améliore la structure et la qualité des données, facilitant ainsi la modélisation et la reproductibilité du projet.

BRONZE : Les données sont brutes, avec des colonnes redondantes, des variables catégorielles non encodées et des informations temporelles séparées.

SILVER : Le dataset est épuré, enrichi (feature engineering) et prêt pour l'apprentissage automatique, sans doublons ni valeurs manquantes.

Nettoyage des données

- Suppression des variables non pertinentes 'Game ID', 'Game Event ID', 'Player Name', 'Team ID', 'Team Name', 'Period', 'Season Type', 'Game Date', 'Home Team', 'Away Team'.
- Vérification des doublons : Aucun doublons
- Vérification des valeurs manquantes : Aucune valeurs manquantes

Ingénierie des fonctionnalités (features engineering)

Pour améliorer la qualité des données, plusieurs transformations ont été effectuées lors de la phase de Feature Engineering.

Fusion des variables temporelles en une caractéristique continue

Les variables Minutes Remaining et Seconds Remaining ont été fusionnées en **Total_Seconds_Remaining** = (Minutes Remaining * 60) + Seconds Remaining.

Cela permet de représenter plus simplement le temps restant pour chaque tir, facilitant l'analyse par les modèles de machine learning.

Les colonnes d'origine ont été supprimées pour éviter la redondance.

Encodage numérique du tir

La variable catégorielle Shot Type a été convertie en numérique : 2 pour les tirs à deux points, 3 pour les tirs à trois points, et 0 pour les cas rares.

Cette transformation facilite l'utilisation de cette information dans les modèles numériques via une fonction d'encodage dédiée.

Transformation des variables de zone de tir lors du feature engineering

Le jeu de données original décrit la localisation du tir avec des variables catégorielles distinctes :

- **Shot Zone Basic** : zone principale (ex : Mid-Range, Restricted Area)
- **Shot Zone Area** : zone latérale ou centrale (ex : Left Side, Center, Right Side)
- **Shot Zone Range** : distance (ex : Less Than 8 ft., 8-16 ft.)

Les variables de zone de tir, telles que 'Less Than 8 ft.', '8-16 ft.', '16-24 ft.', '24+ ft.' et 'Back Court Shot', sont informatives mais redondantes. Elles ont été combinées en une seule variable, nommée **Shot_Zone_Combined**, pour simplifier la modélisation.

Synthèse

En résumé, ces transformations ont permis d'obtenir un jeu de données plus compact, plus informatif et directement exploitable par les algorithmes de machine learning, tout en conservant l'essentiel de l'information sportive et contextuelle utile à la prédiction du succès des tirs NBA.

Stockage des données

Le stockage des données brutes et pré-traités s'effectue au format JSON, dans une base de données NoSQL.

Introduction

MongoDB est une base de données NoSQL orientée documents, qui se distingue par sa flexibilité, sa scalabilité, et sa capacité à gérer des données semi-structurées ou non structurées. Contrairement aux bases de données relationnelles traditionnelles (comme MySQL ou PostgreSQL), qui utilisent des tables pour stocker des données, MongoDB utilise des documents au format **JSON-like** (BSON en interne). Cette structure permet de modéliser les données de manière plus naturelle et intuitive pour les développeurs.

Installation sur Docker

Step 1 : Sur la machine host, vérifier que l'image de **mongoDB** n'est pas présente :

```
docker image
```

Step 2 : Récupérer la dernière image de **mongoDB** disponible :

```
docker pull mongo:latest
```

Step 3 : Vérifier que l'image est bien téléchargée :

```
docker image
```

Step 4 : Créer un répertoire "mongoDB_PariVision" qui nous servira de volume pour la persistance des données :

```
mkdir mongoDB_PariVision  
cd mongoDB_PariVision
```

Step 5 : Lancer Docker avec l'image **mongoDB** en ligne de commande :

```
docker run -d -p 27017:27017 -v ~/mongoDB_PariVision/./data/db --name  
parivision_mongodb_container mongo:latest
```

-d : dash mode, tourne en background

-p : association des ports de la machine host et du port sur lequel tourne **mongoDB** (27017)

-v : ajout du volume pour la persistance des données

```
--name : nom du container mongoDB
```

Step 6 : Vérifier que le container est bien en RUN :

```
docker ps
```

Step 7 : Accéder au container :

```
docker exec -it mongodb bash
```

Step 8 : Une fois à l'intérieur du container, on démarre **mongoDB** :

```
mongosh
```

Step 9 : Créer l'utilisateur

```
db.createUser({user: "parivision", pwd: "*****", roles: [ {  
role: "readWrite", db: "parivision" } ]})
```

Utilisation de MongoDB

a) Afficher les différentes bases de données

```
> show dbs  
admin    0.000GB  
config   0.000GB  
local    0.000GB  
>
```

b) Création de la base de données pour PariVision

```
> use parivision  
switched to db parivision  
>
```

c) Insertion d'un objet

```
> db.user.insert({"name": "Curry"})  
WriteResult({ nInserted: 1 })
```

d) Lister les objets

```
> db.user.find()  
{ "_id" : ObjectId("223d432G56h765jo987d234a3"), "name": "Curry" }
```

Utilisation de PyMongo

Documentation de PyMongo : <https://pymongo.readthedocs.io/en/stable/tutorial.html>

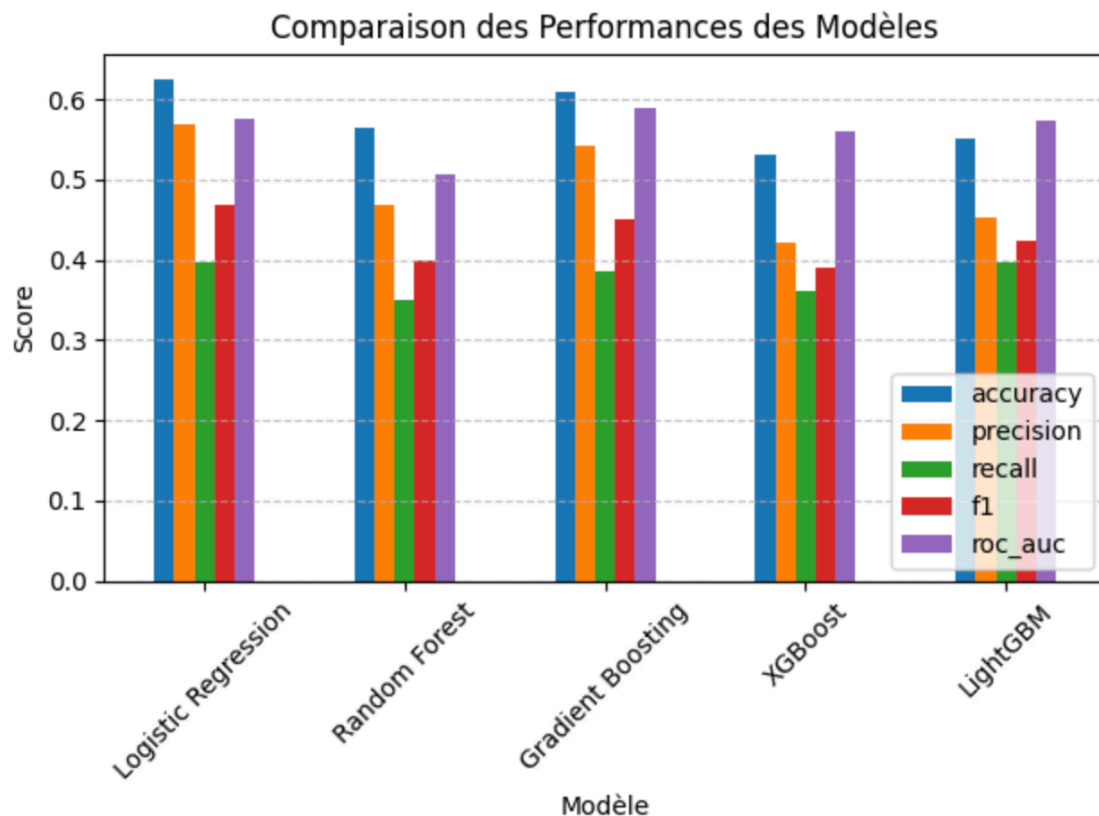
```
!pip3 install pymongo
from pymongo import MongoClient

client = MongoClient(
    host = parivision.heuzef.com,
    port = 27017,
    username = *****,
    password = *****
)

print(client.list_database_names())
```

Modélisation

La phase de modélisation s'appuie sur une sélection de modèles de classification robustes et complémentaires : régression logistique, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost et LightGBM. Chaque modèle est entraîné et évalué, avec un suivi rigoureux des paramètres et des métriques de performance grâce à MLflow.



Section 3 – Mise en production

Déploiement de la VM

La machine virtuelle utilisée pour la mise en production du projet dispose des ressources suivantes :

- RAM : 4G
- CPU : 4 (2 Sockets, 2 Cores)
- Stockage : SSD 128G
- OS : Ubuntu Server 24.04
- Nom de domaine : **parivision.heuzef.com**

Connexion SSH

La connexion s'effectue en SSH avec votre clé privée.

```
ssh -i .ssh/cle.priv parivision@parivision.heuzef.com
```

Initialisation

```
# Mise à jour du système
sudo apt update && sudo apt upgrade

# Désactiver l'authentification par mot de passe
sudo vim /etc/ssh/sshd_config # PasswordAuthentication no
sudo systemctl restart ssh

# Ajouter les clefs SSH pour l'authentification
vim /home/parivision/.ssh/authorized_keys
```

Une sauvegarde de bas niveau est effectuée à ce stade.

Configuration de la VM

```
# Configurer sur l'heure de Paris
sudo timedatectl set-timezone "Europe/Paris"

# Ajout de quelques outils
sudo apt install -y curl wget git tmux htop vim nano tree unzip
smartmontools bmon
```

Github

Le dépôt GIT du projet est hébergé ici : https://github.com/DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS

Cloner le dépôt

```
# Création d'une nouvelle clef SSH
ssh-keygen -t ed25519

# La clef doit être ajoutée sur le repo github :
# https://github.com/DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/settings/keys
cat .ssh/id_ed25519.pub

# Cloner le repo GIT :
cd
git clone git@github.com:DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS.git
tree DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/
```

Actualiser le dépôt

```
cd /home/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/ ; git pull
```

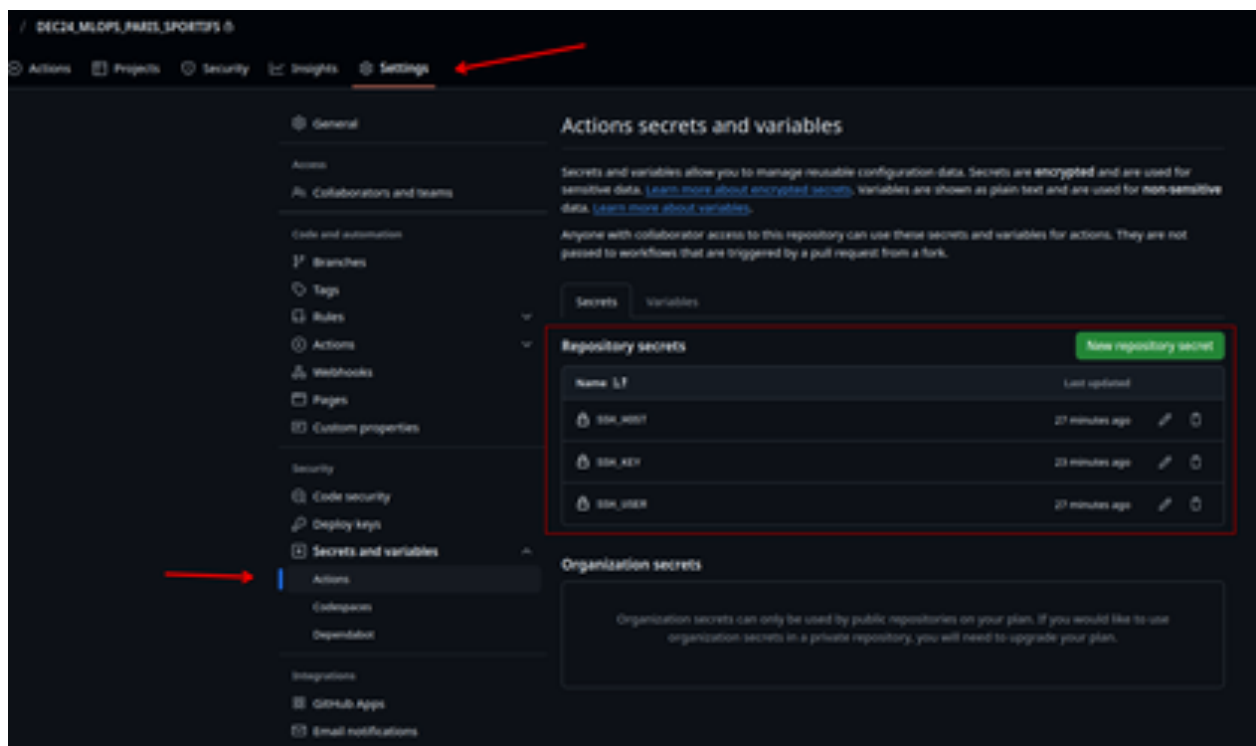

Mise en place d'un workflow Github Actions

Le workflow suivant est ajouté dans notre dépôt GIT dans [.github/workflows/workflows.yaml](https://github.com/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/blob/main/.github/workflows/workflows.yaml)

```
name: Workflow GitHub Action

# Run Workflow when push on main
on:
  push:
    branches:
      - master
jobs:
  execute:
    name: Update the production VM
    runs-on: ubuntu-latest
    steps:
      - name: Connecting on remote VM
        uses: appleboy/ssh-action@master
        with:
          host: ${ secrets.SSH_HOST }
          username: ${ secrets.SSH_USER }
          key: ${ secrets.SSH_KEY }
          script: |
            cd /home/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/
            git fetch
            git pull
```

Une clé SSH est créée pour l'occasion, dédiée à Github et autorisée sur notre VM de production et ajoutée sur Github.com.



Mise en place d'un workflow de tests unitaires

Le workflow suivant est ajouté dans notre dépôt GIT dans [.github/workflows/pytest.yaml](https://github.com/heuze/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/blob/master/.github/workflows/pytest.yaml)

```
name: Run units tests
# Run Units tests when push on master
on:
  push:
    branches:
      - master
jobs:
  execute:
    name: Run Pytest
    runs-on: ubuntu-latest
    steps:
      - uses: actions/checkout@v4
      - name: Set up Python
        uses: actions/setup-python@v5
        with:
          python-version: '3.x'
      - name: Install dependencies
        run: |
          python -m pip install --upgrade pip
          pip install -r requirements.txt
      - name: Test with pytest
        run: |
          pip install pytest pytest-cov
          pytest tests/*.py --doctest-modules --junitxml=junit/test-results.xml --cov=com --cov-report=xml --cov-report=html
```

Ce dernier va effectuer une série de test unitaires, avec le module Pytest, l'ensemble des scripts `tests/*.py` qui seront ajoutée au fur et à mesure du développement, offrant une évolution TDD possible.

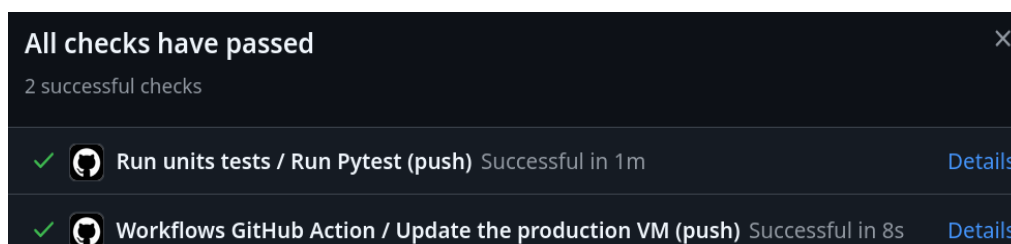
```
(.venv) heuze@PGMR:~/GIT/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS$ pytest tests/*.py
===== test session starts =====
platform linux -- Python 3.12.8, pytest-8.3.4, pluggy-1.5.0
rootdir: /home/heuze/GIT/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS
plugins: Faker-33.3.1, anyio-4.9.0
collected 8 items

tests/test_process_data.py ..... [ 75%]
tests/tests.py .. [100%]

===== 8 passed in 2.43s =====
```

Livraison continue (CD)

L'actualisation du dépôt est maintenant effectuée automatiquement à chaque push sur Github



Python

Mise à jour et installation des dépendances

```
sudo apt upgrade python3
sudo apt install python3-pip python3-venv
```

Création de l'environnement virtuel

```
cd /home/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS
python3 -m venv .venv
source .venv/bin/activate
```

Installation des librairies

```
pip install -r requirements.txt
```

Fichier d'environnement

Un fichier d'environnement présent sur la VM de production est ignoré à la racine du dépôt GIT, ce dernier contient les différents secrets nécessaire au projet.

```
/home/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/.env
```

Les scripts python du projet utilisent la librairie **dotenv** pour charger les secrets :

```
import os
from dotenv import load_dotenv
load_dotenv(".env")

secret = os.getenv('secret')
```

Une sauvegarde de bas niveau est effectuée à ce stade.

Docker

Docker sert de composante principale pour l'infrastructure du projet.

Installation de Docker sur la VM

Réf : <https://docs.docker.com/engine/install/ubuntu/>

```
# Add Docker's official GPG key:
sudo apt update
sudo apt install ca-certificates curl
sudo install -m 0755 -d /etc/apt/keyrings
sudo curl -fsSL https://download.docker.com/linux/ubuntu/gpg -o
/etc/apt/keyrings/docker.asc
sudo chmod a+r /etc/apt/keyrings/docker.asc

# Add the repository to Apt sources:
echo \
  "deb [arch=$(dpkg --print-architecture) signed-
by=/etc/apt/keyrings/docker.asc] https://download.docker.com/linux/ubuntu \
  $(. /etc/os-release && echo "$VERSION_CODENAME") stable" | \
  sudo tee /etc/apt/sources.list.d/docker.list > /dev/null
sudo apt update

# Install the latest version:
sudo apt install docker-ce docker-ce-cli containerd.io docker-buildx-plugin
docker-compose-plugin docker-compose
```

Configuration de Docker

Réf: <https://docs.docker.com/engine/install/linux-postinstall/>

```
# Post-install:
sudo usermod -aG docker parivision
newgrp docker
docker run hello-world

# Auto-start:
sudo systemctl enable docker.service
sudo systemctl enable containerd.service
```

Le fichier Docker-Compose

La configuration complète de Docker repose sur Docker-Compose.

Pour cela, le fichier **docker-compose.yml** qui définit la configuration de PariVision est intégré au processus de démarrage. : https://github.com/DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/blob/master/docker-compose.yml

Pour tester, exécuter manuellement le lancement de l'infrastructure Docker ainsi :

```
docker-compose up /home/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/docker-  
compose.yml
```

L'ensemble des services devraient être accessibles.

Le service PORTAINER permet d'administrer sur une interface web toute la configuration Docker, accessible sur le port 9443. Par exemple, pour lister tous les containers :

<https://parivision.heuzef.com:9443/#!/2/docker/containers>

Une sauvegarde de bas niveau est effectuée à ce stade.

Homer

Homer est un portail statique personnalisable servant de point d'entrée du projet pour lister et accéder rapidement aux différents services du projet.

Dépôt du projet :homer: <https://github.com/bastienwirtz/homer>

L'adresse d'accès est le domaine principale du projet : <https://parivision.heuzef.com>

La configuration du Dashboard de Homer s'effectue directement sur le dépôt GIT, dossier "**homer**" : https://github.com/DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/tree/master/homer

Le portail est configuré via un simple fichier YAML.

Jenkins

Installation

L'installation de Jenkins ne sera pas containerisée car le projet est sur une VM unique et le nœud maître doit avoir la possibilité de gérer les instances docker du projet. La méthode DooD n'est pas favorisée ici.

```
sudo wget -O /usr/share/keyrings/jenkins-keyring.asc  
https://pkg.jenkins.io/debian-stable/jenkins.io-2023.key  
echo "deb [signed-by=/usr/share/keyrings/jenkins-keyring.asc]"  
https://pkg.jenkins.io/debian-stable binary/ | sudo tee  
/etc/apt/sources.list.d/jenkins.list > /dev/null
```

```
sudo apt-get update  
sudo apt install -y fontconfig openjdk-17-jre jenkins
```

```
sudo usermod -aG docker jenkins  
sudo systemctl restart docker
```

```
sudo systemctl enable jenkins  
sudo systemctl stop jenkins  
sudo systemctl start jenkins  
sudo systemctl status jenkins
```

```
sudo cat /var/lib/jenkins/secrets/initialAdminPassword
```

Se rendre sur l'instance, port **8080**, pour déverrouiller l'installation avec le `initialAdminPassword`.

Configuration

- Démarrer l'installation des plugins communautaires recommandés.
- Créer le compte administrateur.

Plugins

Installer les plugins suivants :

- GitHub Integration
- Blue Ocean
- AnsiColor

Créer un agent PariVision

L'utilisateur Jenkins ne dispose pas des mêmes permissions que l'utilisateur parivision. Nous pouvons remédier à cela en créant un agent "parivision" qui se connectera sur l'hôte local avec l'utilisateur parivision.

The screenshot shows the Jenkins configuration page for a new node named 'parivision'. The breadcrumb trail at the top is 'Tableau de bord > Nœuds > parivision > Configure'. On the left sidebar, there are links for 'Déconnexion', 'Open Blue Ocean', and 'État du lanceur de compilations' (which is selected and shows '0/1'). The main configuration area contains several fields: 'Number of executors' is set to 1; 'Répertoire de travail du système distant' is set to '/home/parivision/'; 'Étiquettes' is set to 'parivision'; 'Utilisation' is set to 'Utiliser ce nœud autant que possible'; 'Méthode de lancement' is set to 'Launch agents via SSH'; 'Host' is set to 'localhost'; 'Credentials' is set to 'parivision/***** (parivision)' with an 'Ajouter' button below it; 'Host Key Verification Strategy' is set to 'Non verifying Verification Strategy'; and 'Disponibilité' is set to 'Maintenir l'agent activé le plus longtemps possible'. At the bottom of the configuration area, there are buttons for 'Avancé' and 'Edited'.

Finalement, le nœud maître principal doit être désactivé, en ajustant son nombre d'exécuteurs à zéro.

The screenshot shows the Jenkins configuration page for the 'contrôleur' node. The breadcrumb trail at the top is 'Tableau de bord > Nœuds > contrôleur > Configure'. On the left sidebar, there are links for 'Statut' and 'Configurer'. The main configuration area shows the 'Nombre d'exécuteurs' field, which is set to 0. This field is circled in red in the original image.

Finalement, les différents Jobs du projet peuvent être mis en place.

Pipeline

Concernant la Pipeline ML du projet PariVision, celle-ci sera synchronisé sur le JenkinsFile disponible dans le dépôt GIT : https://github.com/DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/blob/master/Jenkinsfile

La création de l'objet Pipeline s'effectue avec les paramètres suivants :

Pipeline

Define your Pipeline using Groovy directly or pull it from source control.

Definition

Pipeline script from SCM

SCM ?

Git

Repositories ?

Repository URL ?

/home/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/

Credentials ?

parivision/***** (parivision)

+ Ajouter

Avancé ▾

Add Repository

Branches to build ?

Branch Specifier (blank for 'any') ?

*/master

Add Branch

Navigateur de la base de code ?

(Auto)

Additional Behaviours

Ajouter ▾

Script Path ?

Jenkinsfile

Afin d'autoriser l'accès au repo à Jenkins, il faut désactiver la vérification de propriété depuis le compte jenkins :

```
su jenkins
git config --global --add safe.directory
/home/parivision/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/.git
```

Une sauvegarde de bas niveau est effectuée à ce stade.

MLFlow

Accès à l'instance déployé via Docker : <http://parivision.heuzef.com:5000>

Objectif

La mise en place de MLflow a pour but de tracer, comparer et reproduire toutes les expériences de modélisation menées dans le projet de prédiction des tirs réussis NBA. MLflow permet de centraliser les informations relatives aux modèles testés, d'optimiser le processus de sélection et d'assurer la transparence du pipeline data science.

Initialisation

Une fois les dépendances pour l'authentification MLFlow déployés, il faut s'authentifier dans le container pour modifier le mot de passe administrateur par défaut puis créer un nouvel utilisateur. Enfin, créer l'expérience avec les permissions appropriées :

```
docker exec -it mlflow bash
export MLFLOW_TRACKING_USERNAME=admin
export MLFLOW_TRACKING_PASSWORD=password
python3
>>> import mlflow
>>> from mlflow.server.auth.client import AuthServiceClient
>>> client = AuthServiceClient("http://localhost:5000")
>>> client.create_user(username="parivision", password="*****")
>>> client.update_user_admin(username="parivision", is_admin=True)
>>> client.get_user("parivision").is_admin
>>>
mlflow.MlflowClient(tracking_uri="http://localhost:5000").create_experiment(
    name="parivision")
>>> client.update_user_password("admin", "*****")
>>> exit()
Exit
```

Utilisation

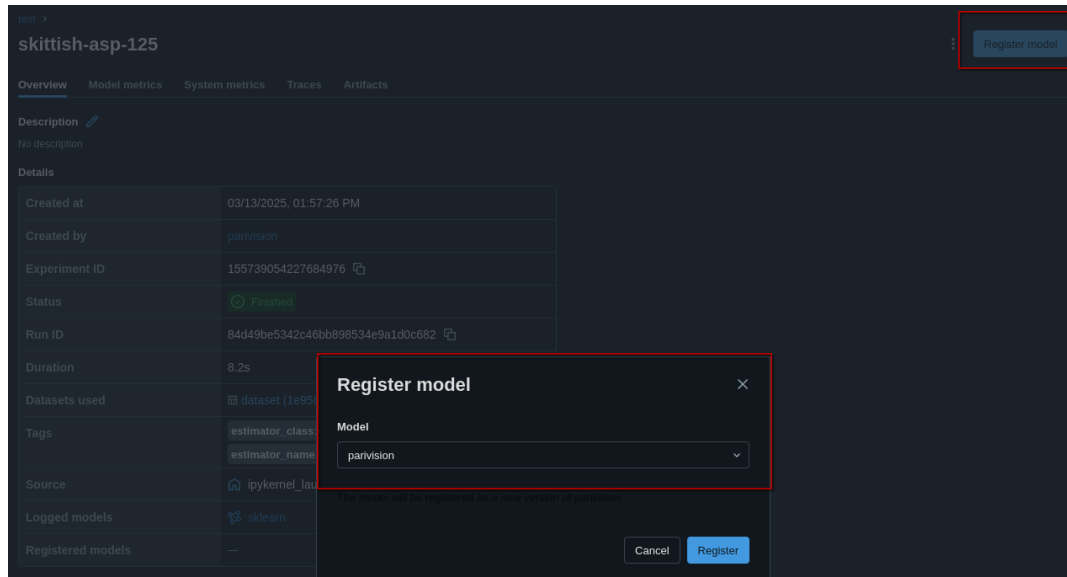
Se référer au Notebook tutoriel pour obtenir un exemple d'utilisation :

https://github.com/DataScientest-Studio/DEC24_MLOPS_PARIS_SPORTIFS/blob/master/notebooks/heuzef_mlflow.ipynb

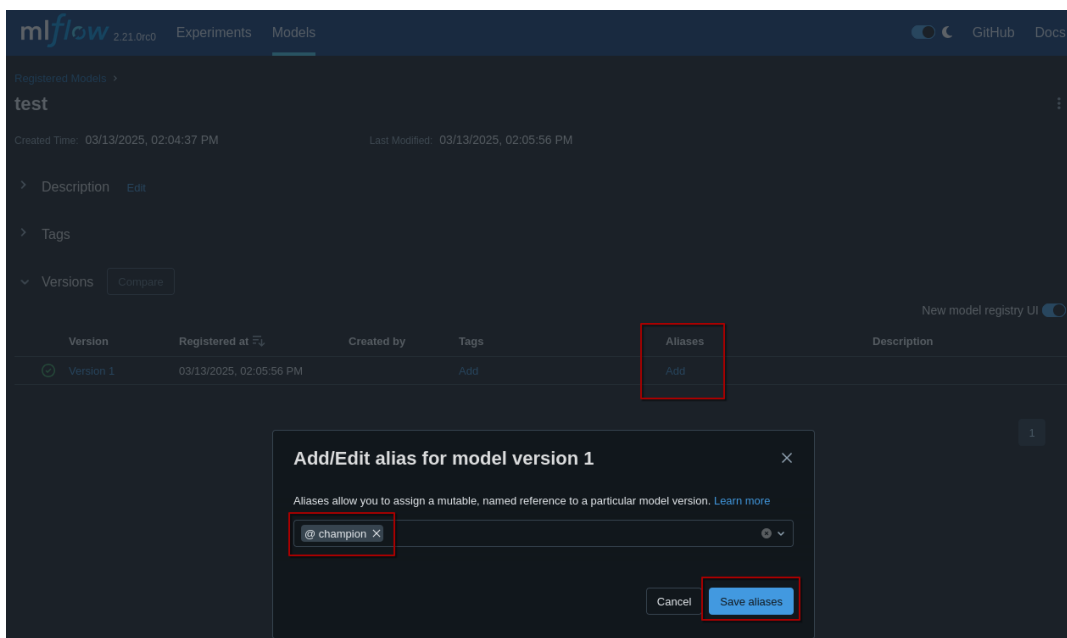
Configurer l'expérience PariVision

Afin de permettre le bon fonctionnement du Workflow, une expérience nommée **“parivision”** contenant au moins une run avec un alias **“champion”** est requis.

Une fois que la première run est remontée dans l'expérience **“parivision”**, il suffit de consulter cette dernière sur l'UI d'MLFlow, et d'effectuer ce premier enregistrement :



Finalement, lui attribuer l'alias **“champion”** :



Nous avons défini un premier modèle Champion, qui est maintenant prêt à être challengé par les nouvelles runs.

Mise en œuvre

Enregistrement des expériences

À chaque entraînement d'un modèle (Régression Logistique, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, LightGBM), un nouveau run MLflow est lancé. Pour chaque run, MLflow enregistre automatiquement :

- Les hyperparamètres du modèle (ex : nombre d'estimateurs, learning_rate, max_depth...)
- Les métriques de performance (accuracy, F1-score, ROC-AUC, etc.)
- Les artefacts produits (matrices de confusion, graphiques d'importance des variables, rapports HTML)
- Le modèle entraîné, sérialisé et versionné
- Comparaison et sélection :
L'interface web de MLflow permet de visualiser et comparer les runs sur la base des métriques enregistrées. Cette fonctionnalité facilite l'identification du meilleur modèle et l'analyse de l'impact des hyperparamètres.

Bénéfices

- Reproductibilité : Chaque expérience peut être rejouée à l'identique.
- Transparence : Toutes les étapes et résultats sont tracés et disponibles pour l'équipe.
- Collaboration : L'interface facilite le partage et la revue des expériences entre data scientists

Conclusion

MLflow s'est avéré un outil essentiel pour la gestion du cycle de vie des modèles dans ce projet. Il a permis de structurer le processus d'expérimentation, d'optimiser la sélection du modèle final, et de garantir la robustesse et la traçabilité du pipeline de modélisation.

MLFlow-Champion

Dans le cadre de PariVision, un script sur-mesure est développé afin de permettre une interaction avec MLFlow. Ce script Python est conçu pour interagir avec un serveur MLFlow dans le cadre d'une pipeline automatisée de gestion de modèles de machine learning.

Voici une synthèse de ses actions :

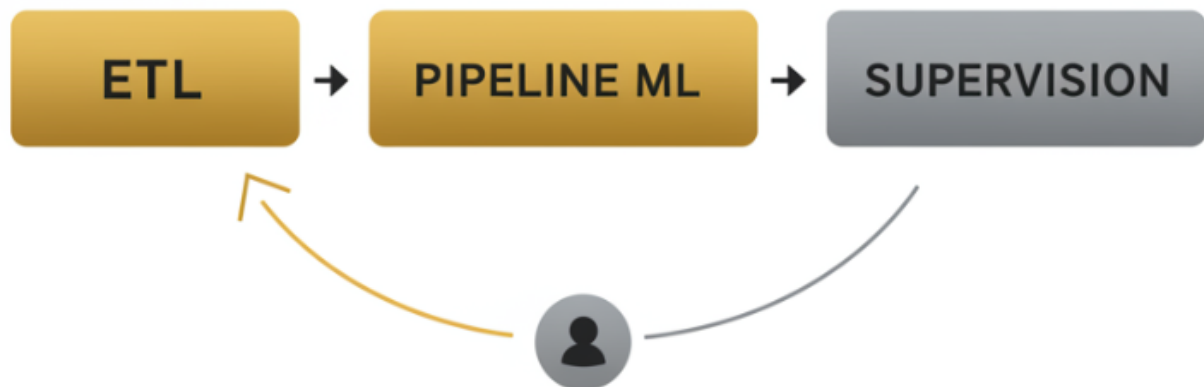
1. **Configuration du Client MLFlow** : Initialise un client MLFlow pour interagir avec le serveur.
2. **Récupération des Runs** : Récupère les runs (valides) terminées du modèle spécifique PariVision.
3. **Identification du Champion actuel** : Charge le modèle actuel marqué comme "Tenant au titre" pour obtenir son identifiant de run.
4. **Détermination du nouveau Champion** : Compare les performances des runs terminées pour identifier si un nouveau "champion" (meilleur modèle) est présent.
5. **Mise à Jour du Champion** : Si un nouveau champion est identifié, il enregistre (incrémente) une nouvelle version du modèle sur MLFlow et lui attribue l'alias "champion".

En résumé, ce script automatise le processus de comparaison des performances des modèles, identifie le meilleur modèle (champion), puis met à jour le serveur MLFlow en conséquence.

Cela permet de maintenir un modèle optimal en production de manière automatisée.

Section 4 – Exploitation

Ce chapitre explique comment la solution PariVision est exploité. Cela sert également de notice d'utilisation.



Pipeline ETL

La récupération et le traitement des données est ordonnées via Jenkins. Chaque requête permet de collecter un certain nombre documents pour alimenter un Lac de données afin d'avoir un contrôle granulaire sur la quantité de données ingéré par le modèle.

Finalement, est effectué la transformation et le stockage des données dans un entrepôt d'exploitation.

Pipeline ML

Toujours ordonnés via Jenkins, la Pipeline complète automatisé entraîne les actions suivantes :

1. Génère un rapport de surveillance de dérive des données
2. Entraîne un nouveau modèle sur les données fraîches et injecte toutes les métriques et artefacts sur un serveur de tracking MLFlow
3. Effectuer une comparaison entre tous les modèles entraînés afin de déterminer un modèle “champion”, en se focalisant sur les scores de performance
4. Déploie un service conteneurisé qui charge le modèle champion et le met à disposition pour effectuer des prédictions via un service API
5. Déploie un service conteneurisé mettant à disposition une application pour l'utilisateur final

Supervision

Prometheus et Grafana

La supervision du projet PariVision est effectuée via Prometheus et Grafana.

Le service d'Alert Manager de Prometheus est configuré pour déclencher les alertes sur un salon SLACK dédié au projet.

Les détails de ces implémentations sont détaillés dans l'architecture ci-dessous :

```
monitoring
├── alertmanager
│   └── alertmanager.yml -> Configuration de Alter Manager (Slack)
├── evidently
│   └── main.py -> Génère un rapport de surveillance sur la dérive des
données
├── grafana
│   └── provisioning -> La configuration de Grafana est entièrement
provisionné via GIT
│       ├── dashboards -> Les différents Dashbord (json) utile au projet
│       └── datasources -> Les sources de données (Prometheus)
└── prometheus
    ├── prometheus.yml -> Configuration de Prometheus (Maintenances
appliqués via Jenkins)
    └── rules -> Les règles de Prometheus
        ├── alerting.rules -> Règles d'alerte
        └── recording.rules -> Règles d'enregistrement des métriques
```

Slack

Une application sur Slack nous a été fourni par notre mentor, cette dernière est configuré avec AlertManager nous permet de recevoir les notifications d'alerte de Prometheus.

Configuration de l'application : <https://dst-dec.slack.com/marketplace/AoF7XDUAZ-webhooks-entrants>

Appel Webhooks :

```
curl -X POST --data-urlencode "payload={\"channel\":
\\\"#dec24cmlops_paris_sportif\\\", \"username\": \\\"PariVision\\\", \"text\":
\\\"TEST ALERT PROMETHEUS\\\", \"icon_emoji\": \\\":trophy:\\\"}"
```

<https://hooks.slack.com/services/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>



PariVision APPLI 23 h 19

[FIRING:1] HighLoad (node-exporter:9100 node-exporter parivision warning)

[RESOLVED] HighLoad (node-exporter:9100 node-exporter parivision warning)

Evidently

La surveillance de la qualité des données utilisée pour l'entraînement est effectuée via Evidently afin de surveiller la dérive des données d'entrées du modèle.

PariVision-Exporter

Un exporter Prometheus sur-mesure pour le modèle de Machine Learning a été développé, afin de surveiller les métriques du modèle utilisés, comme le temps de prédiction, le nombre de prédiction effectués, etc ...

Section 5 – Conclusion

Ce projet a démontré le potentiel du machine learning et des pratiques MLOps dans le domaine complexe mais passionnant de la prédiction sportive appliquée à la NBA. Il constitue une illustration complète et professionnelle de la démarche data science appliquée au sport de haut niveau. À partir d'un jeu de données riche, nous avons conçu un pipeline robuste, reproductible et industrialisable, en respectant les meilleures pratiques du domaine.

En combinant rigueur scientifique et innovation technologique, il a permis de développer un outil robuste capable d'analyser efficacement les données techniques et contextuelles pour fournir des prédictions précises sur les résultats des matchs NBA.

Les principaux points forts du projet

- Une infrastructure MLOps évolutive permettant l'automatisation complète du pipeline (collecte → entraînement → prédiction).
- Un code source organisé et clair entièrement orienté déclaratif et accompagné d'une documentation exhaustive.
- Un stockage des données NoSQL pour maximiser les performances.
- Une flexibilité concernant l'évolution des performances des modèles grâce à un serveur de suivi des expériences.
- Une application utilisateur intuitive offrant une visualisation claire des performances algorithmiques.
- Un système d'orchestration confortable et automatisé.
- Une supervision complète entièrement gérée de façon déclarative pour assurer une maintenance efficace.

Bilan

Ce projet fournit non seulement un outil puissant pour améliorer la précision des paris sportifs sur la NBA mais aussi une base solide pour explorer d'autres opportunités dans le domaine de l'analyse prédictive.

Grâce à son approche centrée sur les données et sa structure MLOps robuste, ce projet illustre comment la technologie peut transformer notre compréhension et notre exploitation stratégique du sport moderne.

L'intégration d'outils et de plateformes MLOps dans ce projet NBA a profondément transformé la gestion et la valorisation des données tout au long du cycle de vie du modèle.

- MLflow a permis de centraliser l'historique des entraînements, de comparer objectivement les modèles et d'assurer la sélection transparente des meilleures configurations.
- MongoDB, en tant que base NoSQL, a facilité la gestion de grands volumes de données hétérogènes et l'évolution du schéma sans rupture, ce qui est essentiel dans un contexte sportif où les données évoluent rapidement.
- Evidently, Pormetheus et Grafana ont apporté une surveillance continue et visuelle de la stabilité des données et des performances du modèle, permettant d'anticiper toute dérive et d'assurer la robustesse du système en production.
- Pour finir, les briques FastAPI et Streamlit permettent une exploitation claire et intuitive de la solution.

Au-delà de la simple automatisation, l'approche MLOps adoptée a permis de professionnaliser le déploiement, la supervision et la maintenance des modèles, tout en favorisant la collaboration. Cette démarche garantit non seulement la qualité et la fiabilité des prédictions, mais aussi la pérennité et la capacité d'adaptation du projet face aux évolutions futures du domaine sportif.

Perspectives d'évolution

Pour aller plus loin, plusieurs axes d'amélioration et d'extension sont envisageables :

- **Exploiter la source de donnée réelle BetsAPI** : Cette API maintenue par un tiers en temps réel représente une opportunité d'exploiter des nouvelles données quotidienne fraîche.
- **Enrichissement des données** : intégrer des informations contextuelles supplémentaires (position des défenseurs, séquences de jeu, fatigue du joueur, météo, etc.), ou exploiter les données issues du tracking vidéo pour affiner la prédiction.
- **Modèles avancés** : explorer des architectures de deep learning (réseaux de neurones, modèles séquentiels, computer vision) pour traiter des données plus complexes ou non structurées.
- **Analyse en temps réel** : adapter le projet pour le traitement en streaming, permettant des prédictions instantanées pendant les matchs.
- **Personnalisation** : développer des modèles spécifiques par joueur ou par équipe, ou intégrer des modules de recommandation pour l'entraînement individualisé.
- **Expérience utilisateur** : concevoir des dashboards interactifs pour les coachs, analystes et fans, facilitant l'exploration des résultats et la prise de décision.

- **Automatisation sur alerte** : mettre en place des workflows automatiques en cas d'alerte détectée, pour garantir la pertinence continue du service.
- **Orchestration avancée avec Kubernetes** : apporter robustesse, flexibilité et performance à la solution en offrant une gestion déclarative en livraison continue, un système de mise à l'échelle en haute-disponibilité et une gestion des versions (canary)

Cette architecture permettrait de répondre efficacement aux besoins de production, tout en offrant un cadre évolutif pour les futures extensions du projet.

Synthèse

Ce projet pose les bases d'une démarche data-driven ambitieuse au service de la performance sportive, tout en respectant les standards industriels de qualité, de robustesse et d'évolutivité.

Il constitue un modèle répliquable pour d'autres problématiques d'analyse prédictive dans le sport et au-delà et ouvre la voie à de nombreuses innovations à venir dans le domaine de l'intelligence artificielle appliquée.