

# Marouane\_Lafdi

December 17, 2025

Réalisé par Marouane Lafdi

Rapport Scientifique du Module Bases de Données et Data Science

## 0.1 Introduction

### 0.1.1 1. Contexte du projet:

Dans un contexte bancaire de plus en plus concurrentiel, la fidélisation des clients est devenue un enjeu stratégique majeur. Les institutions financières disposent aujourd’hui de grandes quantités de données décrivant le profil de leurs clients (âge, solde, ancienneté, nombre de produits, score de crédit, etc.). L’exploitation de ces données à l’aide des techniques de data science et de machine learning permet d’anticiper le comportement des clients, notamment leur probabilité de quitter la banque (churn).

Ce notebook s’inscrit dans ce cadre et exploite un jeu de données réel de clients bancaires afin d’analyser leurs caractéristiques et de construire des modèles prédictifs.

### 0.1.2 2. Objectif:

L’objectif principal de ce notebook est de :

- Analyser et comprendre les données clients à travers une analyse exploratoire (EDA),
- Prétraiter les données (nettoyage, encodage des variables catégorielles, normalisation),
- Gérer le déséquilibre des classes à l’aide de techniques de rééchantillonnage,
- Construire et évaluer des modèles de classification capables de prédire si un client va quitter la banque ou non,
- **Comparer** les performances des modèles à l’aide de métriques adaptées (accuracy, précision, rappel, F1-score, matrice de confusion).

### 0.1.3 3. Problématique du projet:

La problématique centrale abordée dans ce notebook est la suivante :

Comment prédire efficacement le churn des clients bancaires à partir de leurs données démographiques, financières et comportementales, tout en tenant compte du déséquilibre des classes et en garantissant de bonnes performances de prédiction ?

Cette problématique soulève plusieurs défis :

- la qualité et la préparation des données,

- le choix des variables pertinentes,
- la gestion du déséquilibre entre clients quittant la banque et ceux restant fidèles,
- la sélection du modèle de classification le plus performant et le plus robuste.

## 0.2 Importation et Installation des Packages Python

[1]: pip install matplotlib

```
Requirement already satisfied: matplotlib in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (3.10.0)
Requirement already satisfied: contourpy>=1.0.1 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from matplotlib) (1.3.3)
Requirement already satisfied: cycler>=0.10 in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (from matplotlib) (0.12.1)
Requirement already satisfied: fonttools>=4.22.0 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from matplotlib) (4.61.0)
Requirement already satisfied: kiwisolver>=1.3.1 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from matplotlib) (1.4.9)
Requirement already satisfied: numpy>=1.23 in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (from matplotlib) (2.0.2)
Requirement already satisfied: packaging>=20.0 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from matplotlib) (25.0)
Requirement already satisfied: pillow>=8 in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (from matplotlib) (11.3.0)
Requirement already satisfied: pyparsing>=2.3.1 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from matplotlib) (3.2.5)
Requirement already satisfied: python-dateutil>=2.7 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from matplotlib) (2.9.0.post0)
Requirement already satisfied: six>=1.5 in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (from python-dateutil>=2.7->matplotlib) (1.17.0)
```

[2]: pip install pandas numpy

```
Requirement already satisfied: pandas in /usr/local/lib/python3.12/dist-packages
(2.2.2)
Requirement already satisfied: numpy in /usr/local/lib/python3.12/dist-packages
(2.0.2)
Requirement already satisfied: python-dateutil>=2.8.2 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from pandas) (2.9.0.post0)
Requirement already satisfied: pytz>=2020.1 in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (from pandas) (2025.2)
Requirement already satisfied: tzdata>=2022.7 in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (from pandas) (2025.2)
Requirement already satisfied: six>=1.5 in /usr/local/lib/python3.12/dist-
packages (from python-dateutil>=2.8.2->pandas) (1.17.0)
```

```
[3]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from collections import Counter
```

### 0.3 Chargement des Données

Pour réaliser notre réalisé, nous devrons importer une base de données (data set), qui est disponible sur Kaggle: <https://www.kaggle.com/datasets/shubh0799/churn-modelling?resource=download>. Nous avons choisi une data set qui décrit le taux de désabonnement qui est une mesure importante que les entreprises doivent suivre lorsqu'elles tentent de développer leurs activités. Cette métrique représente le nombre de clients qui ont cessé d'utiliser votre produit ou service pendant une période donnée

```
[4]: df=pd.read_csv("Churn_Modelling.csv")
```

```
[5]: pd.set_option("display.max.columns", None)
```

```
[6]: df
```

	RowNumber	CustomerId	Surname	CreditScore	Geography	Gender	Age	\
0	1	15634602	Hargrave	619	France	Female	42	
1	2	15647311	Hill	608	Spain	Female	41	
2	3	15619304	Onio	502	France	Female	42	
3	4	15701354	Boni	699	France	Female	39	
4	5	15737888	Mitchell	850	Spain	Female	43	
...	...	...	...	...	...	...	...	\
9995	9996	15606229	Obijiaku	771	France	Male	39	
9996	9997	15569892	Johnstone	516	France	Male	35	
9997	9998	15584532	Liu	709	France	Female	36	
9998	9999	15682355	Sabbatini	772	Germany	Male	42	
9999	10000	15628319	Walker	792	France	Female	28	
	Tenure	Balance	NumOfProducts	HasCrCard	IsActiveMember			\
0	2	0.00	1	1	1			
1	1	83807.86	1	0	1			
2	8	159660.80	3	1	0			
3	1	0.00	2	0	0			
4	2	125510.82	1	1	1			
...	...	...	...	...	...			
9995	5	0.00	2	1	0			
9996	10	57369.61	1	1	1			
9997	7	0.00	1	0	1			
9998	3	75075.31	2	1	0			
9999	4	130142.79	1	1	0			

```

      EstimatedSalary Exited
0          101348.88     1
1          112542.58     0
2          113931.57     1
3          93826.63      0
4          79084.10      0
...
9995       96270.64      0
9996       101699.77      0
9997       42085.58      1
9998       92888.52      1
9999       38190.78      0

```

[10000 rows x 14 columns]

## 1 Data Preprocessing

```
[7]: print("Voici tous les attributs de notre base de données : \n{}".format(df.keys()))
```

Voici tous les attributs de notre base de données :

```
Index(['RowNumber', 'CustomerId', 'Surname', 'CreditScore', 'Geography',
       'Gender', 'Age', 'Tenure', 'Balance', 'NumOfProducts', 'HasCrCard',
       'IsActiveMember', 'EstimatedSalary', 'Exited'],
      dtype='object')
```

### 1.0.1 Suppression des colonnes qui n'ont aucun sens

```
[8]: df=df.drop(columns="CustomerId",axis=1)
df=df.drop(columns="Surname",axis=1)
df=df.drop(columns="RowNumber",axis=1)
```

### 1.0.2 Déterminer les caractéristiques des variables numériques

```
[9]: df.describe()
```

```
[9]:    CreditScore           Age        Tenure      Balance  NumOfProducts \
count  10000.000000  10000.000000  10000.000000  10000.000000  10000.000000
mean   650.528800   38.921800   5.012800   76485.889288   1.530200
std    96.653299   10.487806   2.892174   62397.405202   0.581654
min   350.000000   18.000000   0.000000   0.000000   1.000000
25%   584.000000   32.000000   3.000000   0.000000   1.000000
50%   652.000000   37.000000   5.000000   97198.540000   1.000000
75%   718.000000   44.000000   7.000000  127644.240000   2.000000
max   850.000000   92.000000  10.000000  250898.090000   4.000000
```

```

HasCrCard IsActiveMember EstimatedSalary      Exited
count    10000.00000   10000.00000   10000.00000  10000.00000
mean      0.70550     0.515100    100090.239881  0.203700
std       0.45584     0.499797    57510.492818  0.402769
min       0.00000     0.000000    11.580000   0.000000
25%      0.00000     0.000000    51002.110000  0.000000
50%      1.00000     1.000000    100193.915000 0.000000
75%      1.00000     1.000000    149388.247500 0.000000
max       1.00000     1.000000    199992.480000 1.000000

```

### 1.0.3 Déterminer les caractéristiques des variables categoriques

[10]: df.describe(include="object")

[10]:

	Geography	Gender
count	10000	10000
unique	3	2
top	France	Male
freq	5014	5457

[11]: df.info()

```

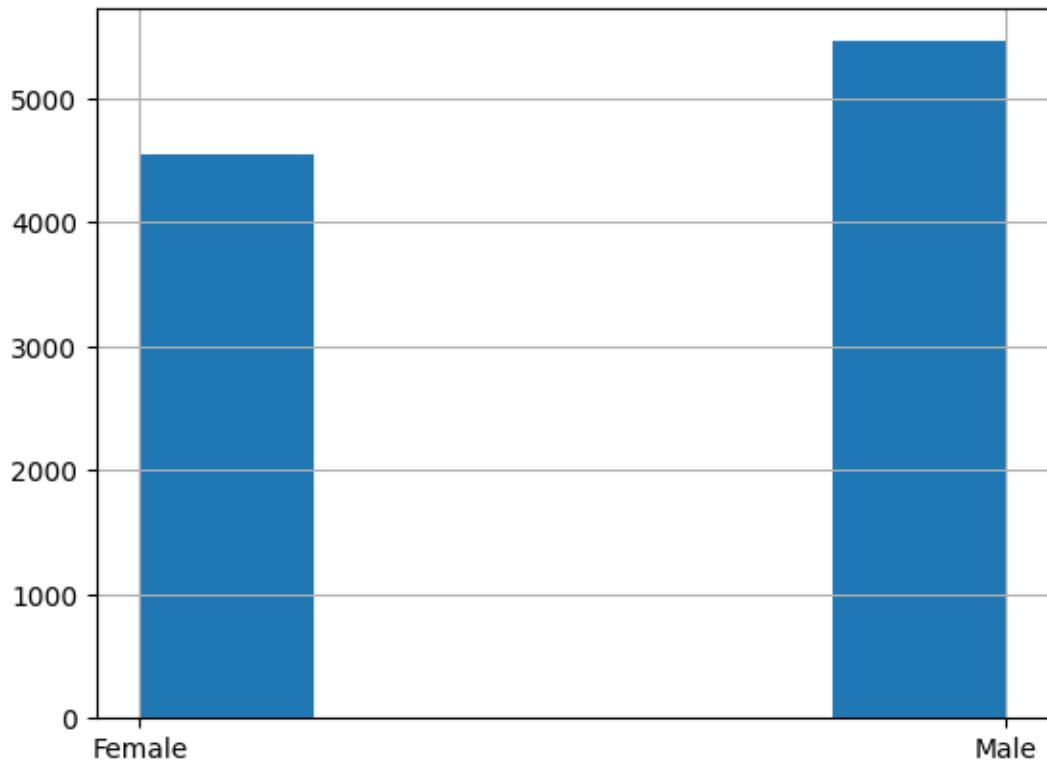
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
RangeIndex: 10000 entries, 0 to 9999
Data columns (total 11 columns):
 #   Column           Non-Null Count  Dtype  
--- 
 0   CreditScore      10000 non-null   int64  
 1   Geography        10000 non-null   object  
 2   Gender            10000 non-null   object  
 3   Age               10000 non-null   int64  
 4   Tenure            10000 non-null   int64  
 5   Balance           10000 non-null   float64 
 6   NumOfProducts     10000 non-null   int64  
 7   HasCrCard         10000 non-null   int64  
 8   IsActiveMember    10000 non-null   int64  
 9   EstimatedSalary   10000 non-null   float64 
 10  Exited            10000 non-null   int64  
dtypes: float64(2), int64(7), object(2)
memory usage: 859.5+ KB

```

## 1.1 Analyse Exploratoire des Données - EDA

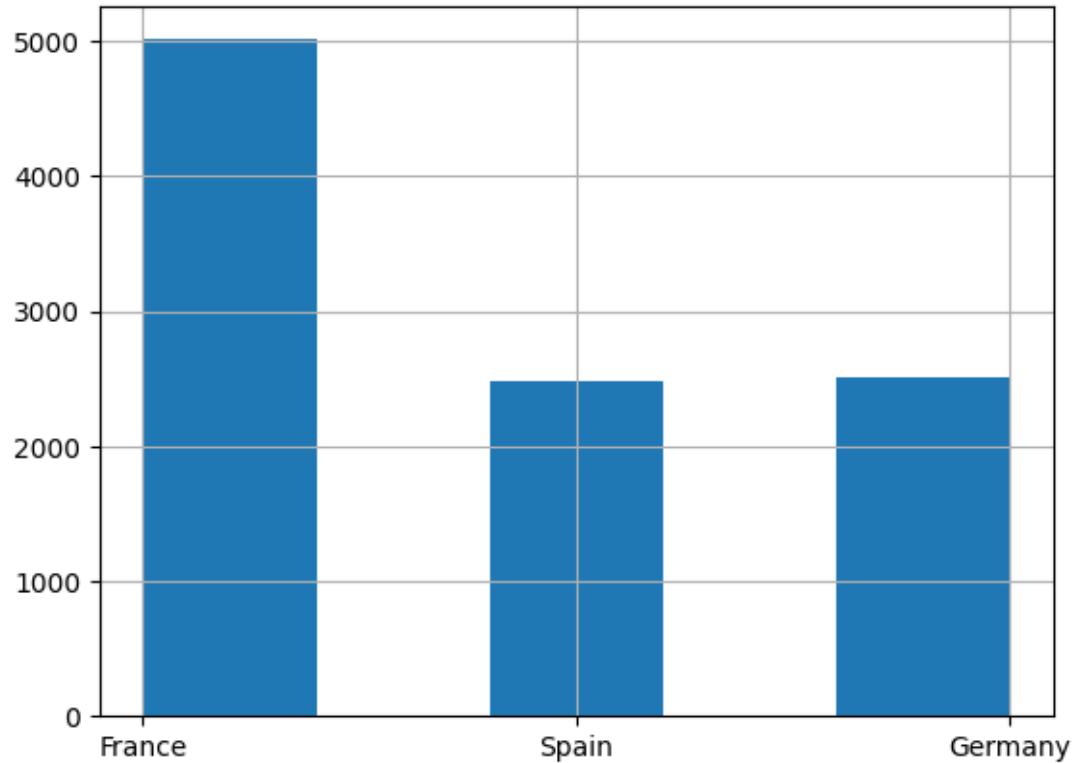
[12]: df[["Gender"]].hist(density=False,bins=5)

[12]: <Axes: >



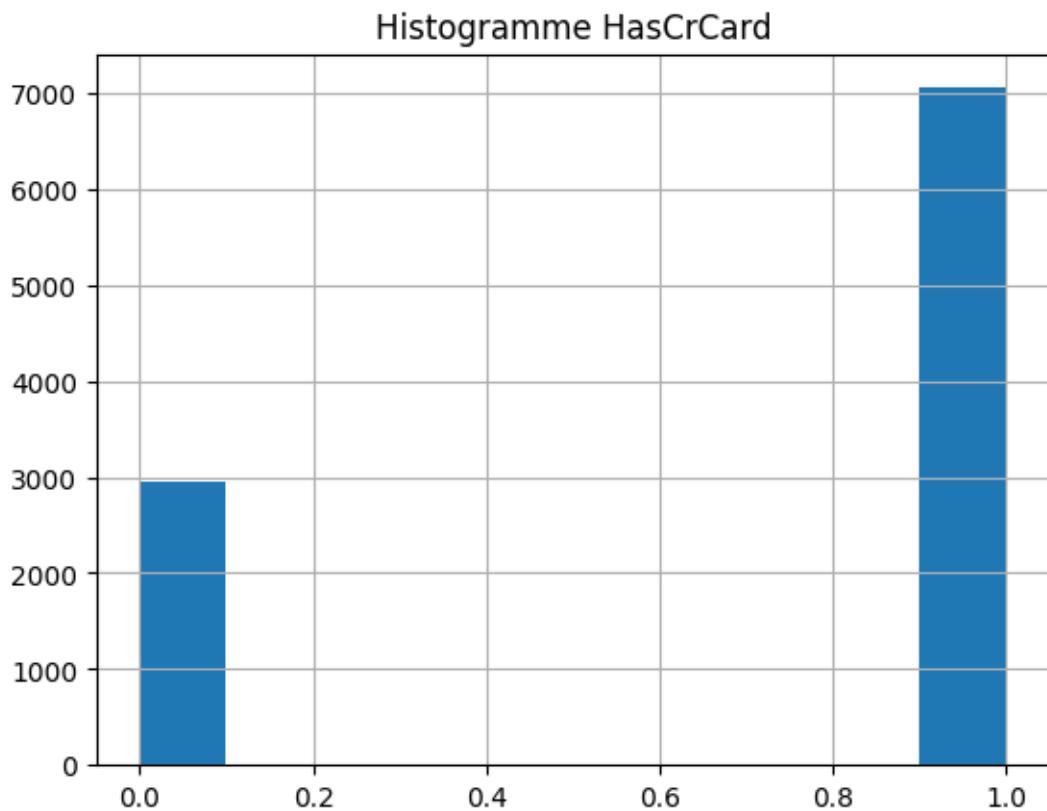
```
[13]: df["Geography"].hist(bins=5)
```

```
[13]: <Axes: >
```



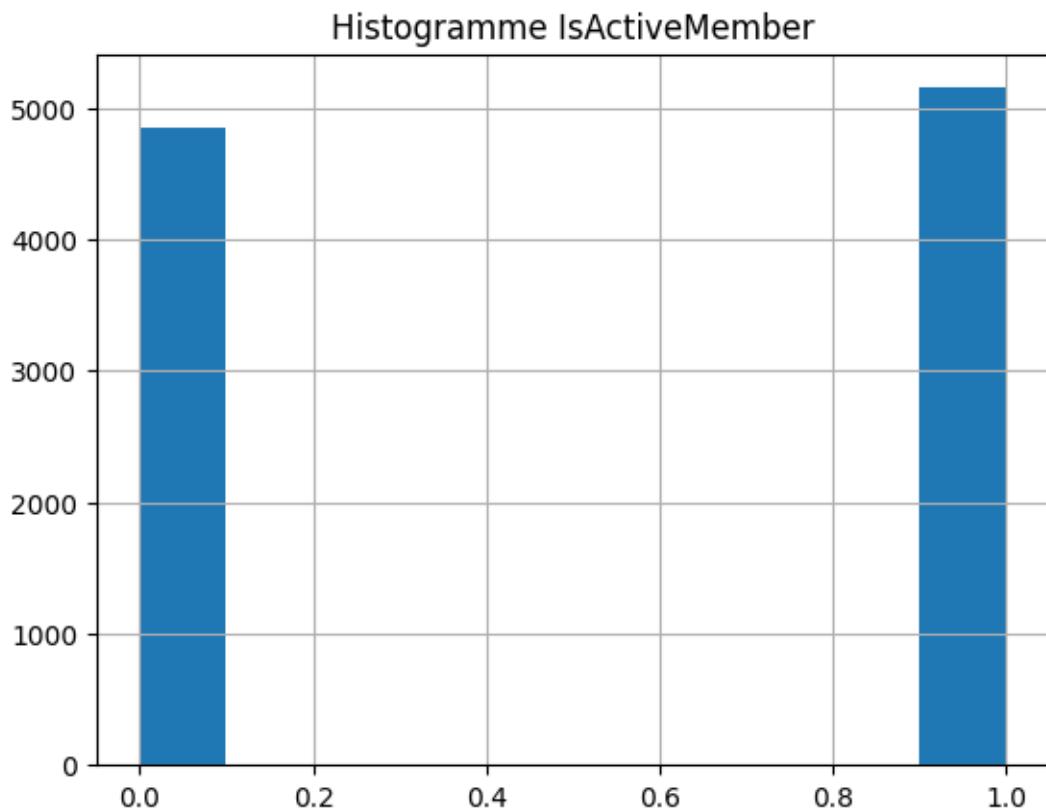
```
[14]: df["HasCrCard"].hist()  
plt.title("Histogramme HasCrCard")
```

```
[14]: Text(0.5, 1.0, 'Histogramme HasCrCard')
```



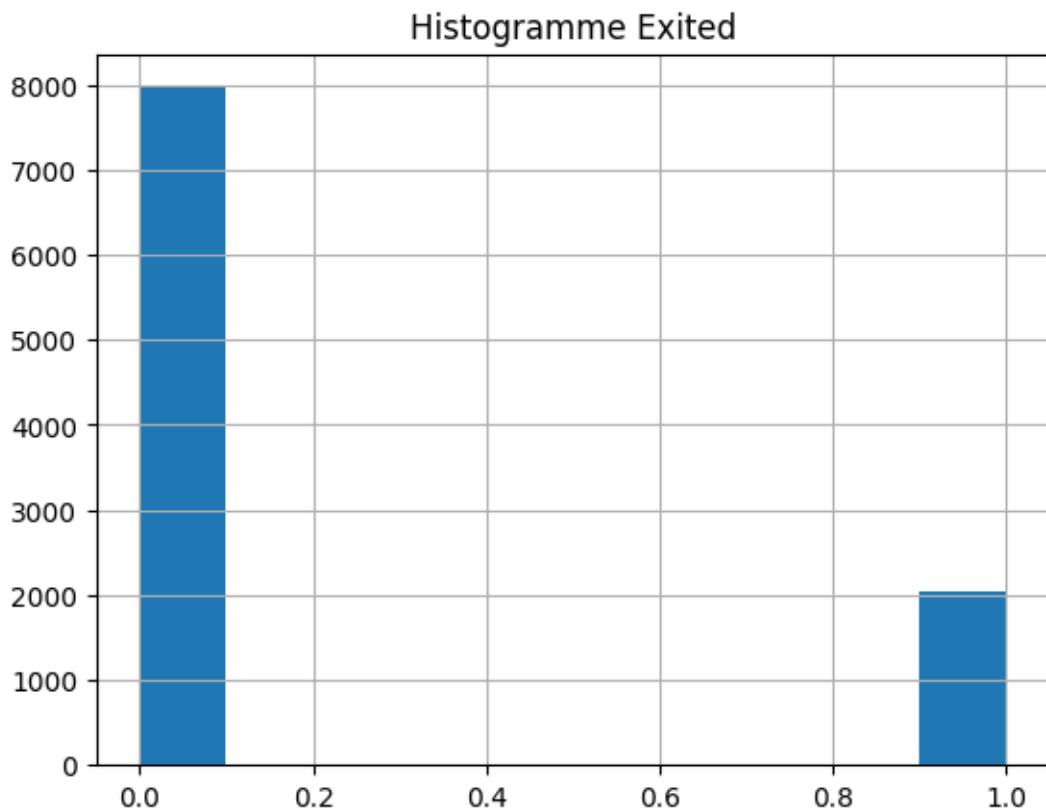
```
[15]: df["IsActiveMember"].hist()  
plt.title("Histogramme IsActiveMember")
```

```
[15]: Text(0.5, 1.0, 'Histogramme IsActiveMember')
```

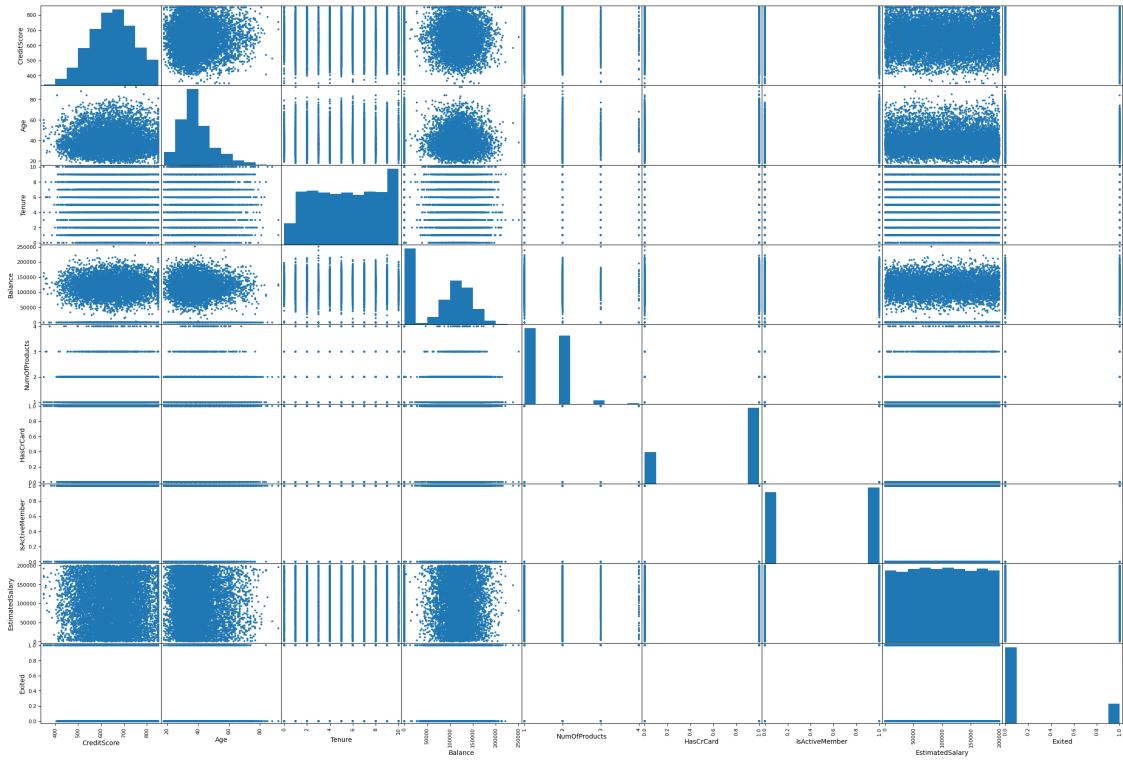


```
[16]: df["Exited"].hist()  
plt.title("Histogramme Exited")
```

```
[16]: Text(0.5, 1.0, 'Histogramme Exited')
```

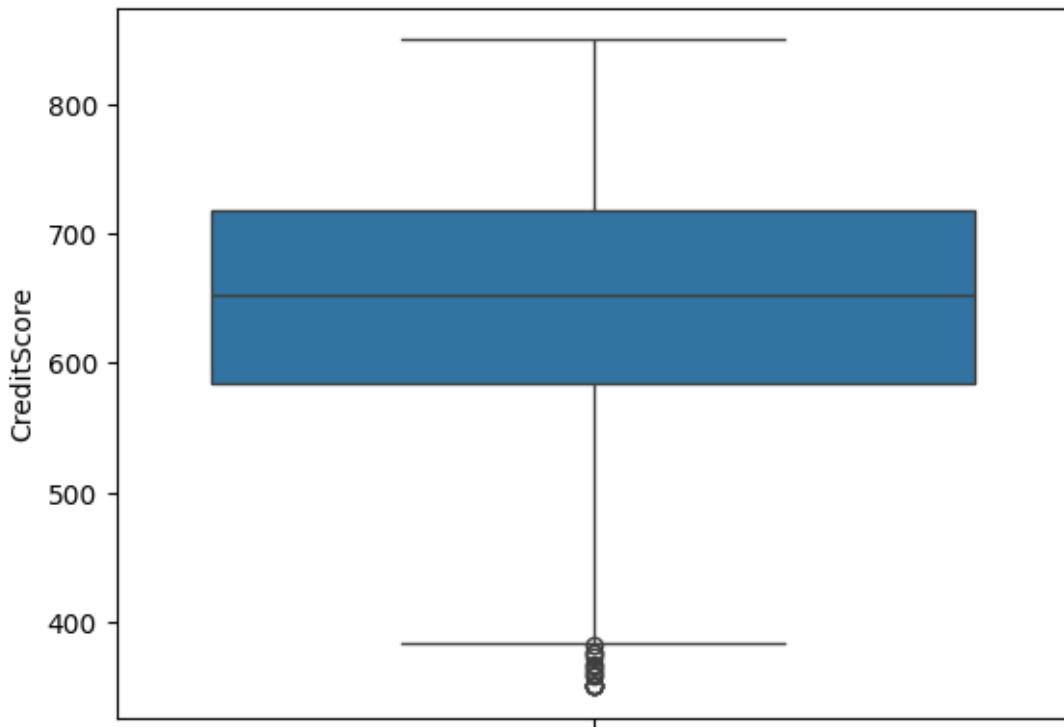


```
[17]: pd.plotting.scatter_matrix(df, alpha = 1, figsize = (30, 20))
plt.show()
```



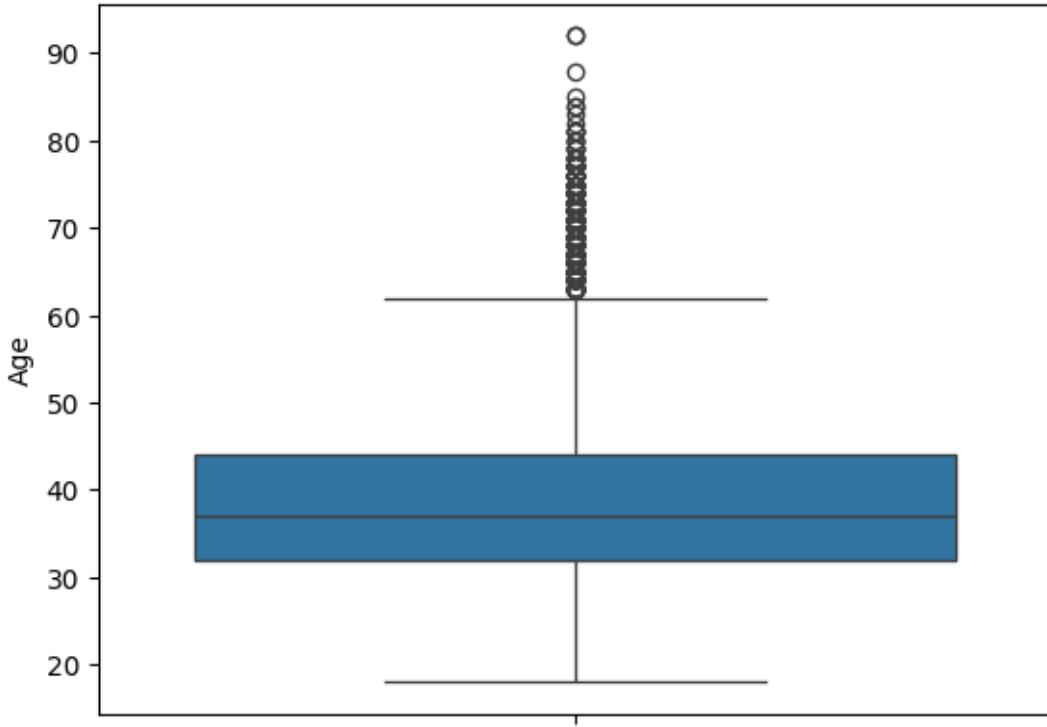
```
[18]: sns.boxplot(df['CreditScore'])
```

```
[18]: <Axes: ylabel='CreditScore'>
```



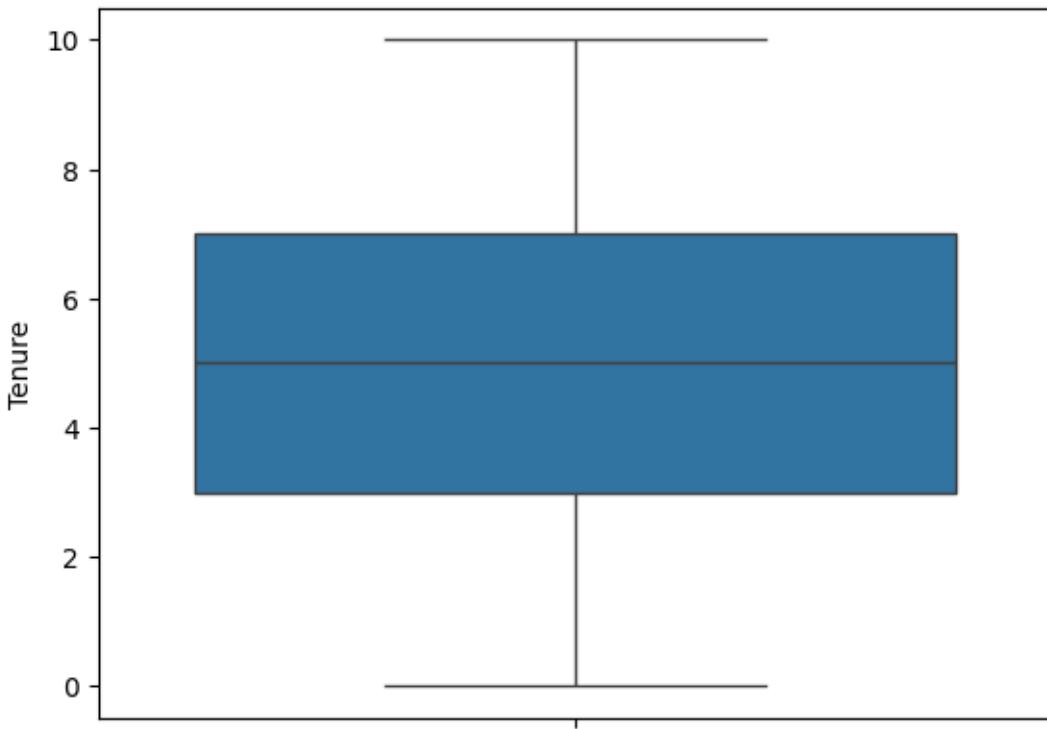
```
[19]: sns.boxplot(df['Age'])
```

```
[19]: <Axes: ylabel='Age'>
```



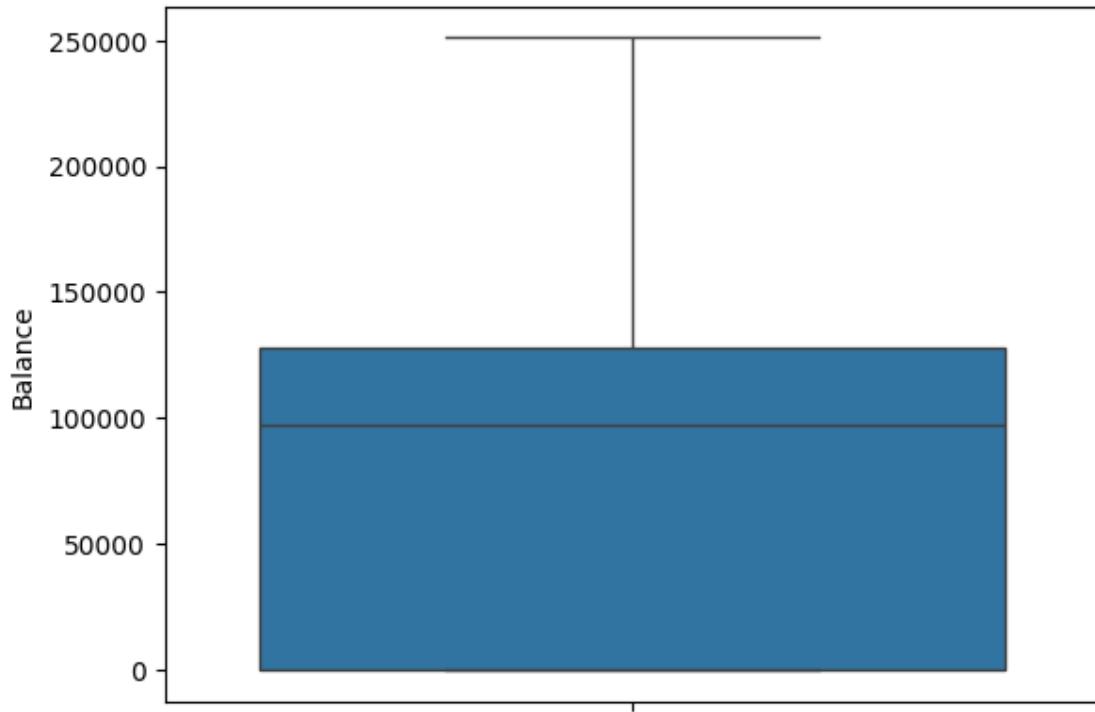
```
[20]: sns.boxplot(df['Tenure'])
```

```
[20]: <Axes: ylabel='Tenure'>
```



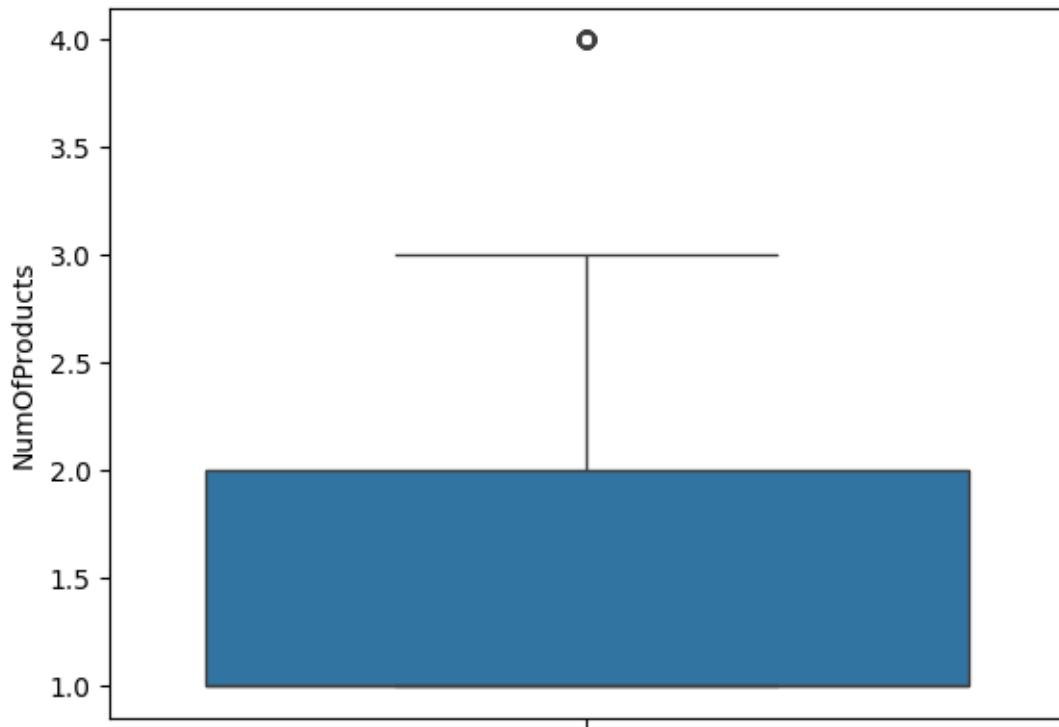
```
[21]: sns.boxplot(df['Balance'])
```

```
[21]: <Axes: ylabel='Balance'>
```



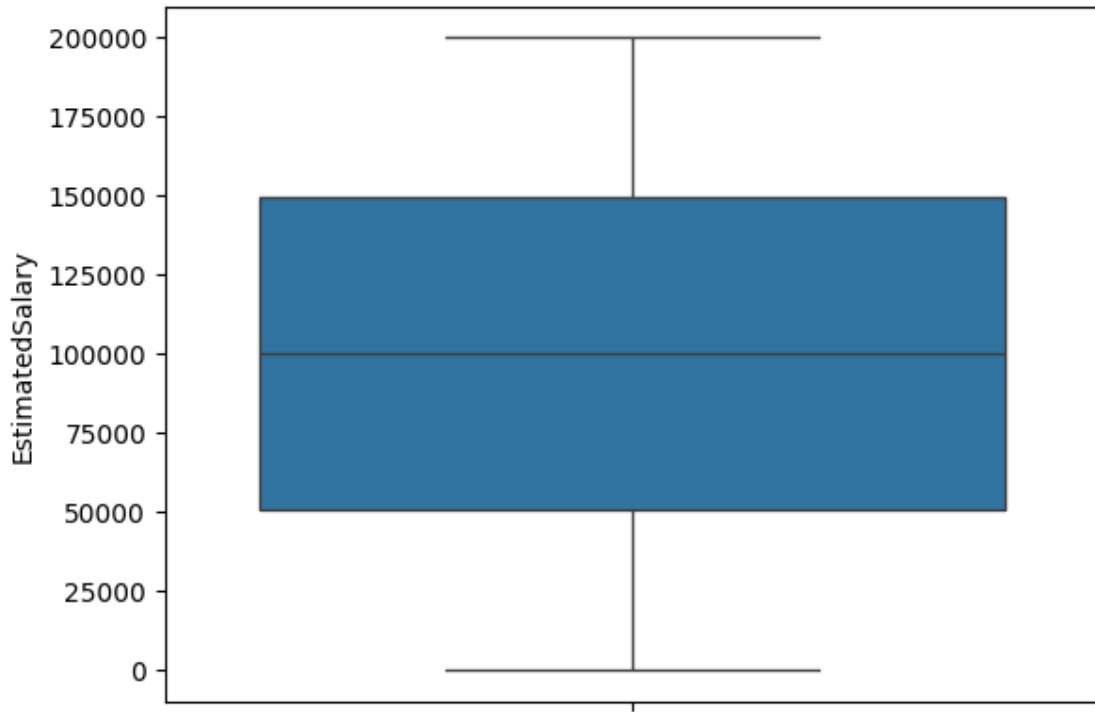
```
[22]: sns.boxplot(df['NumOfProducts'])
```

```
[22]: <Axes: ylabel='NumOfProducts'>
```



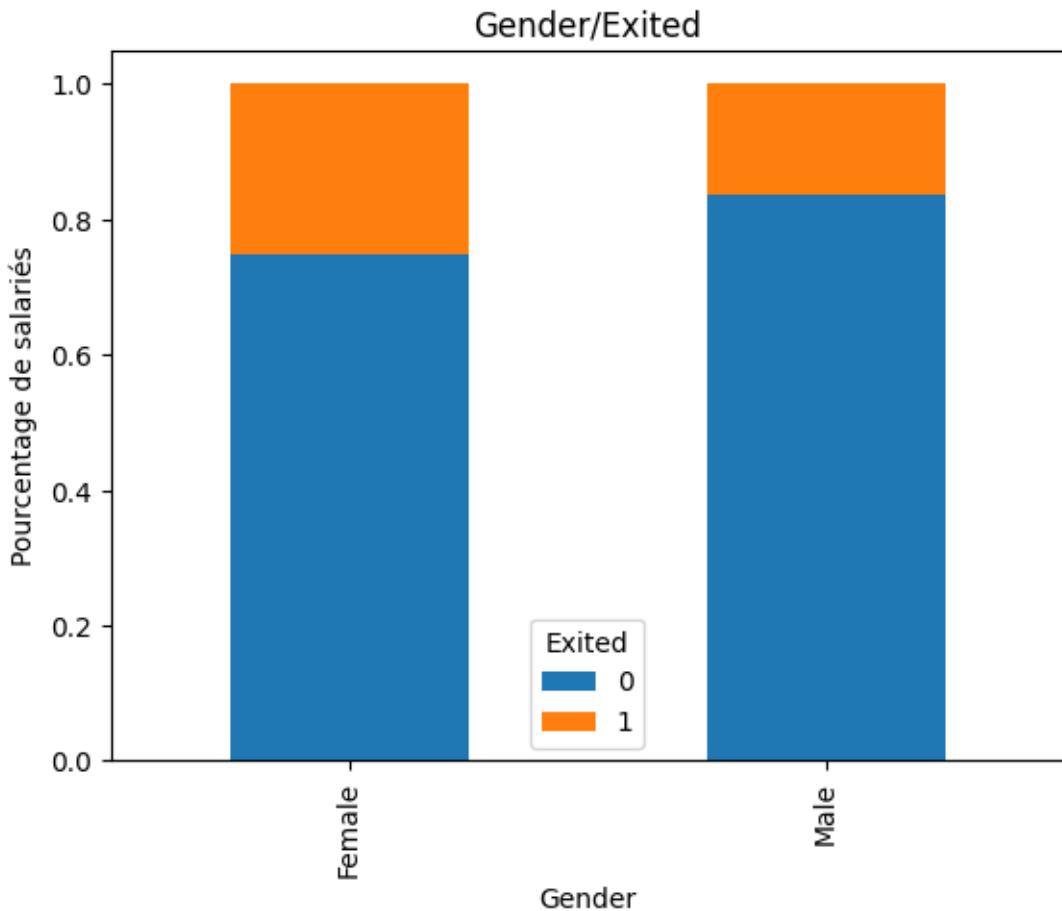
```
[23]: sns.boxplot(df['EstimatedSalary'])
```

```
[23]: <Axes: ylabel='EstimatedSalary'>
```



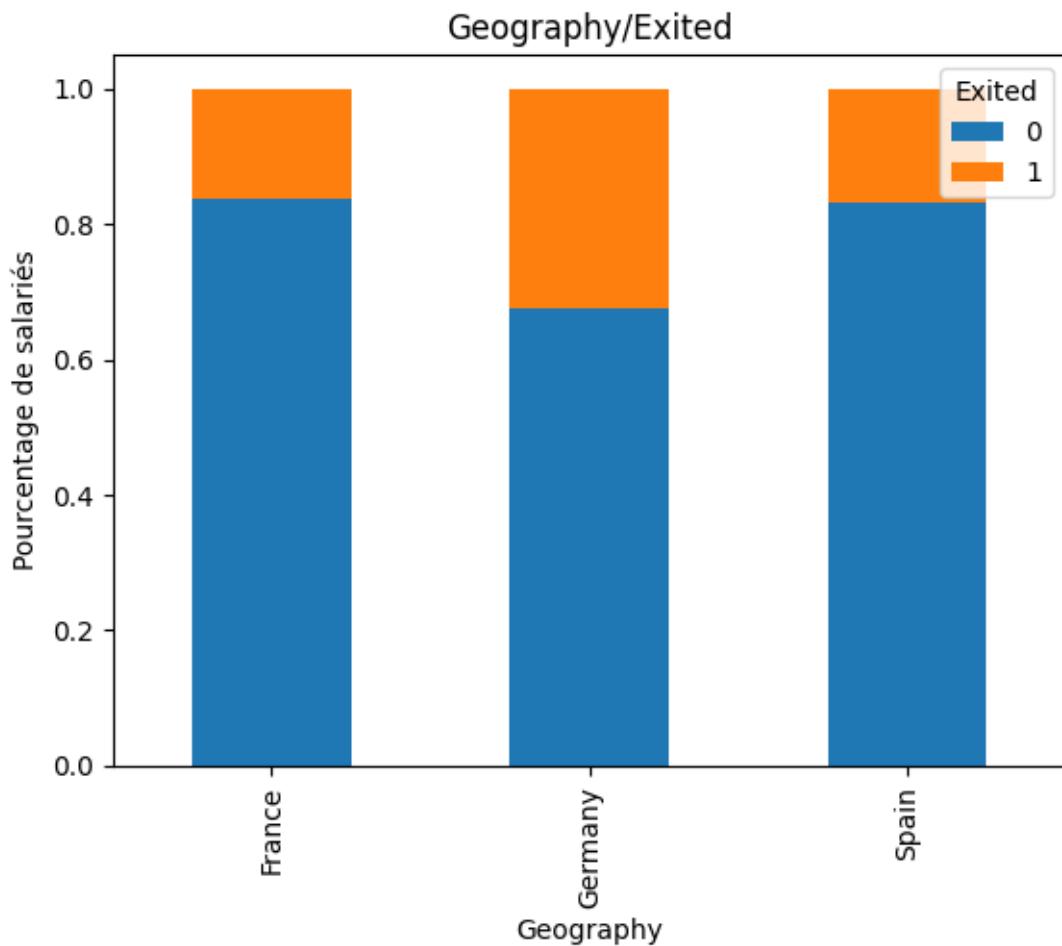
```
[24]: table=pd.crosstab(df.Gender,df.Exited)
table.div(table.sum(1).astype(float),axis=0).plot(kind='bar',stacked=True)
plt.title("Gender/Exited")
plt.xlabel("Gender")
plt.ylabel("Pourcentage de salariés")
```

```
[24]: Text(0, 0.5, 'Pourcentage de salariés')
```



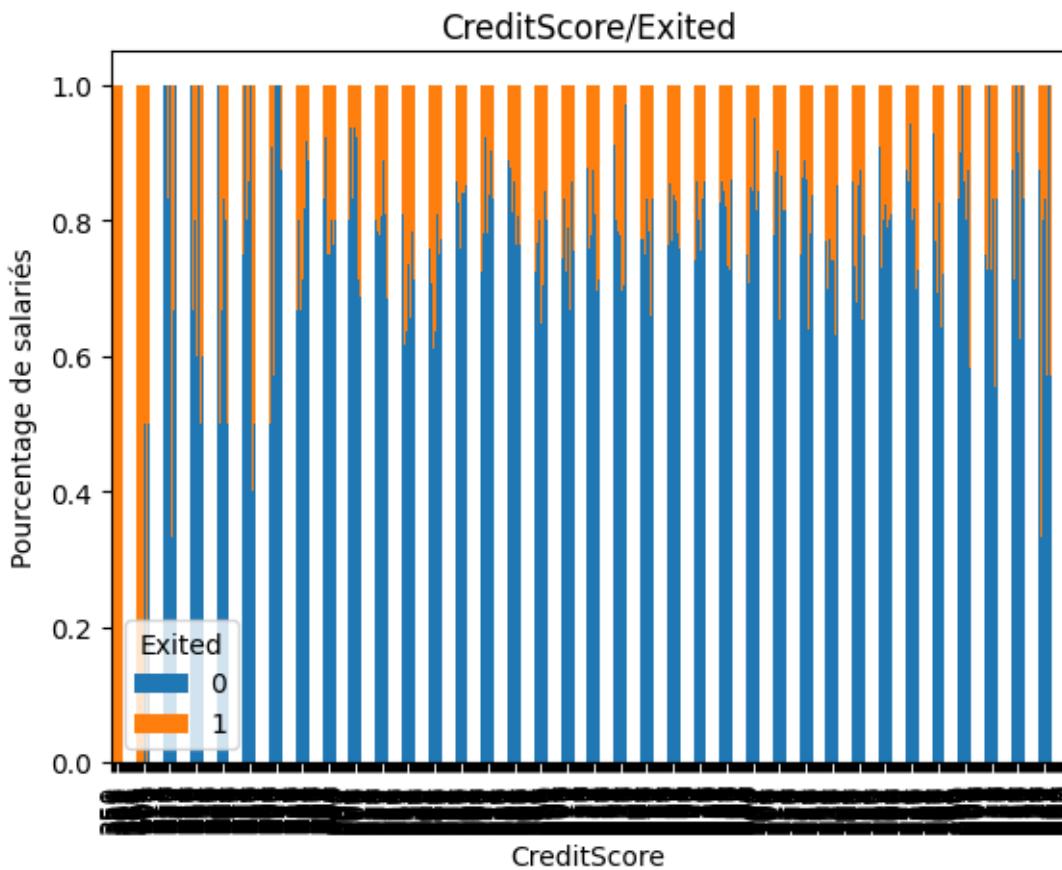
```
[25]: tablee=pd.crosstab(df.Geography,df.Exited)
tablee.div(tablee.sum(1).astype(float),axis=0).plot(kind='bar',stacked=True)
plt.title("Geography/Exited")
plt.xlabel("Geography")
plt.ylabel("Pourcentage de salariés")
```

```
[25]: Text(0, 0.5, 'Pourcentage de salariés')
```



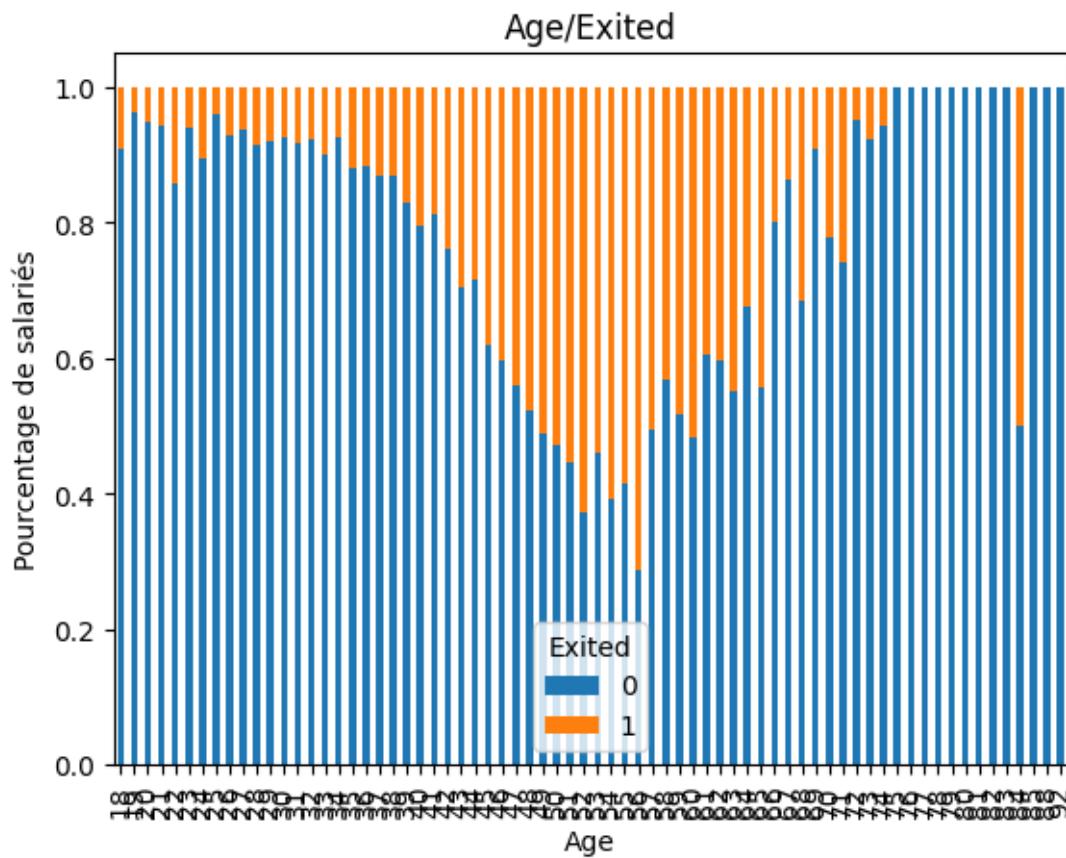
```
[26]: table1=pd.crosstab(df.CreditScore,df.Exited)
table1.div(table1.sum(1).astype(float),axis=0).plot(kind='bar',stacked=True)
plt.title("CreditScore/Exited")
plt.xlabel("CreditScore")
plt.ylabel("Pourcentage de salariés")
```

```
[26]: Text(0, 0.5, 'Pourcentage de salariés')
```



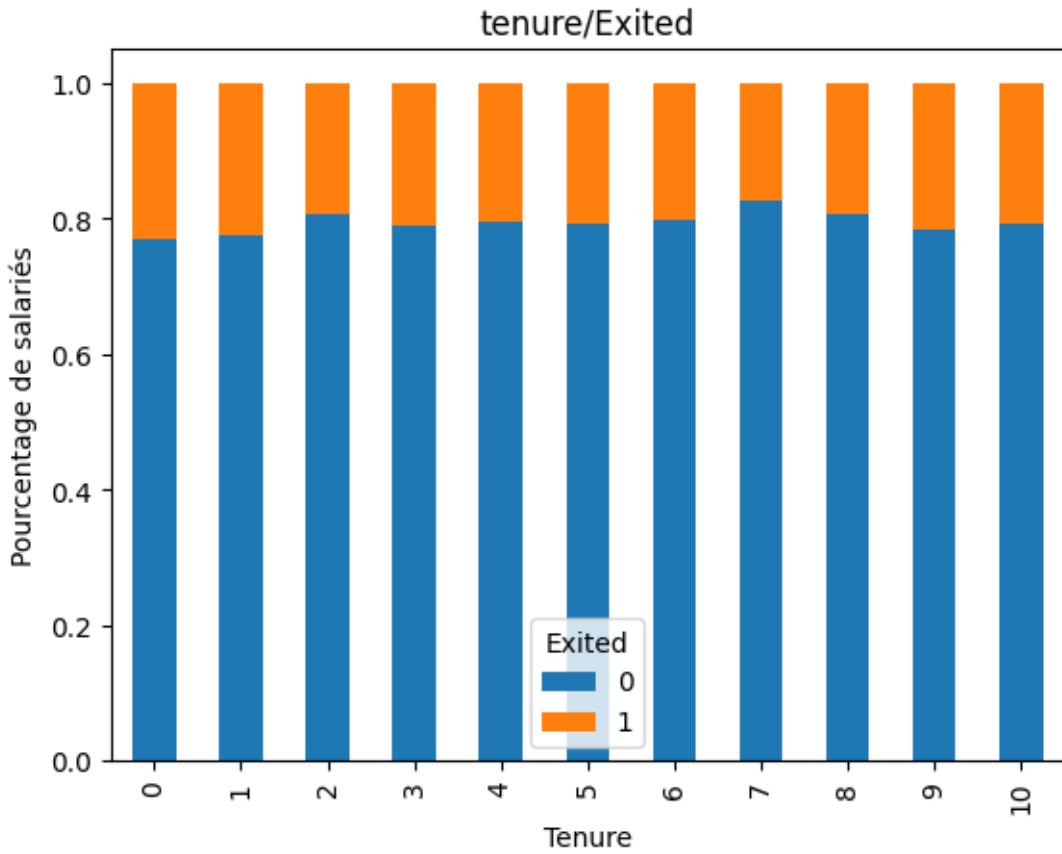
```
[27]: table2=pd.crosstab(df.Age,df.Exited)
table2.div(table2.sum(1).astype(float),axis=0).plot(kind='bar',stacked=True)
plt.title("Age/Exited")
plt.xlabel("Age")
plt.ylabel("Pourcentage de salariés")
```

```
[27]: Text(0, 0.5, 'Pourcentage de salariés')
```



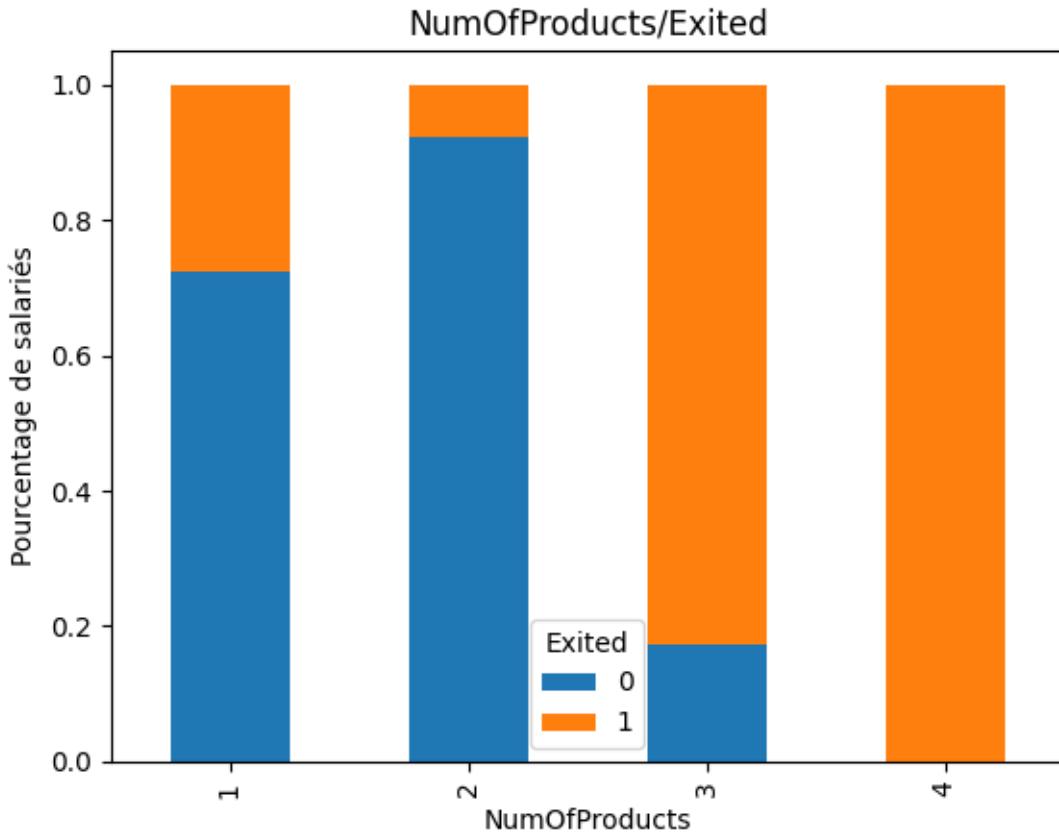
```
[28]: table3=pd.crosstab(df.Tenure,df.Exited)
table3.div(table3.sum(1).astype(float),axis=0).plot(kind='bar',stacked=True)
plt.title("tenure/Exited")
plt.xlabel("Tenure")
plt.ylabel("Pourcentage de salariés")
```

```
[28]: Text(0, 0.5, 'Pourcentage de salariés')
```



```
[29]: table4=pd.crosstab(df.NumOfProducts,df.Exited)
table4.div(table4.sum(1).astype(float),axis=0).plot(kind='bar',stacked=True)
plt.title("NumOfProducts/Exited")
plt.xlabel("NumOfProducts")
plt.ylabel("Pourcentage de salariés")
```

```
[29]: Text(0, 0.5, 'Pourcentage de salariés')
```



## 1.2 Pré-traitement des Données

### 1.2.1 Détection des données dupliquées

```
[30]: duplicate = df[df.duplicated()]
duplicate #there is no data duplicated
```

```
[30]: Empty DataFrame
Columns: [CreditScore, Geography, Gender, Age, Tenure, Balance, NumOfProducts,
HasCrCard, IsActiveMember, EstimatedSalary, Exited]
Index: []
```

## 1.3 Gestion des valeurs aberrantes

Les valeurs aberrantes (outliers) représentent des observations dont les valeurs s'écartent significativement du comportement général des données. Dans le cadre de notre projet de prédition du churn bancaire, la présence de telles valeurs peut fausser l'analyse exploratoire, perturber la phase d'apprentissage des modèles de machine learning et dégrader leurs performances.

1. Identification des valeurs aberrantes

L'identification des valeurs aberrantes a été réalisée principalement sur les variables numériques telles que l'âge, le solde du compte (Balance), le score de crédit (CreditScore) et le salaire estimé (EstimatedSalary). Des méthodes statistiques et graphiques ont été utilisées, notamment :

l'analyse des boxplots pour visualiser les valeurs extrêmes,

la méthode de l'écart interquartile (IQR) afin de détecter les observations situées en dehors des bornes acceptables.

## 2. Traitement des valeurs aberrantes

Après identification, plusieurs stratégies ont été envisagées. Étant donné le contexte bancaire, certaines valeurs élevées (par exemple un solde ou un salaire important) peuvent être légitimes et représenter des profils clients spécifiques à forte valeur. Ainsi, au lieu de supprimer systématiquement ces observations, nous avons privilégié :

la conservation des valeurs pertinentes lorsqu'elles sont cohérentes avec le métier,

l'atténuation de l'impact des valeurs extrêmes via la normalisation des données,

l'exclusion uniquement des valeurs manifestement erronées ou incohérentes.

## 3. Impact sur la modélisation

Cette approche permet de préserver l'information contenue dans les données tout en limitant l'influence négative des valeurs aberrantes sur les algorithmes de classification. La gestion adaptée des outliers contribue ainsi à améliorer la stabilité, la robustesse et la capacité de généralisation des modèles prédictifs développés dans ce projet.

```
[31]: def detect_outliers(df, features):
    outlier_indices = []

    for c in features:
        Q1 = np.percentile(df[c], 25)
        Q3 = np.percentile(df[c], 75)
        IQR = Q3 - Q1
        outlier_step = 1.5 * IQR

        outlier_list_col = df[
            (df[c] < Q1 - outlier_step) | (df[c] > Q3 + outlier_step)
        ].index

        outlier_indices.extend(outlier_list_col)

    outlier_indices = Counter(outlier_indices)

    # indices appearing more than once (for multiple features)
    multiple_outliers = [i for i, v in outlier_indices.items() if v > 0]

    return multiple_outliers
```

```
[32]: outlier_idx = detect_outliers(df, ['CreditScore'])
outliers = df.loc[outlier_idx]
outliers
```

	CreditScore	Geography	Gender	Age	Tenure	Balance	NumOfProducts	\
7	376	Germany	Female	29	4	115046.74		4
942	376	France	Female	46	6	0.00		1
1193	363	Spain	Female	28	6	146098.43		3
1405	359	France	Female	44	6	128747.69		1
1631	350	Spain	Male	54	1	152677.48		1
1838	350	Germany	Male	39	0	109733.20		2
1962	358	Spain	Female	52	8	143542.36		3
2473	351	Germany	Female	57	4	163146.46		1
2579	365	Germany	Male	30	0	127760.07		1
8154	367	Spain	Male	42	6	93608.28		1
8723	350	France	Male	51	10	0.00		1
8762	350	France	Female	60	3	0.00		1
9210	382	Spain	Male	36	0	0.00		1
9356	373	France	Male	42	7	0.00		1
9624	350	France	Female	40	0	111098.85		1
	HasCrCard	IsActiveMember		EstimatedSalary		Exited		
7	1		0	119346.88		1		
942	1		0	157333.69		1		
1193	1		0	100615.14		1		
1405	1		0	146955.71		1		
1631	1		1	191973.49		1		
1838	0		0	123602.11		1		
1962	1		0	141959.11		1		
2473	1		0	169621.69		1		
2579	1		0	81537.85		1		
8154	1		0	168816.73		1		
8723	1		1	125823.79		1		
8762	0		0	113796.15		1		
9210	1		1	179540.73		1		
9356	1		0	77786.37		1		
9624	1		1	172321.21		1		

```
[33]: #pourcentage des valeurs manquantes :
percentage=(len(outliers)/len(df))*100
percentage
```

[33]: 0.15

Dans le cadre de notre projet de prédition du churn bancaire, la suppression des valeurs aberrantes a été un choix méthodologique motivé par des considérations à la fois statistiques et opérationnelles.

Premièrement, certaines valeurs extrêmes identifiées dans les variables numériques (telles que l'âge,

le solde du compte ou le salaire estimé) représentaient des observations très éloignées de la distribution globale des données. Ces valeurs avaient une influence disproportionnée sur les modèles de machine learning, en particulier ceux sensibles aux distances et aux variations extrêmes (comme la régression logistique ou les algorithmes basés sur des mesures de similarité). Leur présence entraînait un biais dans l'apprentissage et réduisait la capacité de généralisation des modèles.

Deuxièmement, l'analyse exploratoire a montré que ces outliers concernaient un nombre très limité d'observations, souvent atypiques et peu représentatives du comportement moyen des clients. Leur suppression n'affecte donc pas significativement l'information globale du jeu de données, mais permet au contraire d'obtenir des distributions plus stables et plus homogènes.

```
[34]: outliers_list = detect_outliers(df, ['CreditScore'])
df = df.drop(outliers_list, axis=0)
```

```
[35]: outliers_age=df.loc[detect_outliers(df,['Age'])]
outliers_age
```

```
[35]:      CreditScore Geography Gender Age Tenure    Balance NumOfProducts \
58          511     Spain Female  66      4       0.00           1
85          652     Spain Female  75     10       0.00           2
104         670     Spain Female  65      1       0.00           1
158         646    France Female  73      6  97259.25           1
181         510    France   Male  65      2       0.00           2
...
9753        656  Germany   Male  68      7  153545.11           1
9765        445    France   Male  64      2  136770.67           1
9832        595  Germany Female  64      2  105736.32           1
9894        521    France Female  77      6       0.00           2
9936        609    France   Male  77      1       0.00           1

      HasCrCard IsActiveMember EstimatedSalary Exited
58            1             0      1643.11      1
85            1             1      114675.75      0
104           1             1      177655.68      1
158           0             1      104719.66      0
181           1             1      48071.61      0
...
9753           1             1      186574.68      0
9765           0             1      43678.06      0
9832           1             1      89935.73      1
9894           1             1      49054.10      0
9936           0             1      18708.76      0

[359 rows x 11 columns]
```

```
[36]: outliers_age = detect_outliers(df, ['Age'])
percentage_age = (len(outliers_age) / len(df)) * 100
print(f"Pourcentage d'outliers (Age) : {percentage_age:.2f}%")
```

```
df = df.drop(outliers_age, axis=0)
df
```

Pourcentage d'outliers (Age) : 3.60%

```
[36]:      CreditScore Geography Gender Age Tenure Balance NumOfProducts \
0           619     France Female  42      2    0.00          1
1           608     Spain Female  41      1   83807.86          1
2           502     France Female  42      8  159660.80          3
3           699     France Female  39      1    0.00          2
4           850     Spain Female  43      2  125510.82          1
...
9995        771     France Male   39      5    0.00          2
9996        516     France Male   35     10   57369.61          1
9997        709     France Female  36      7    0.00          1
9998        772   Germany Male   42      3   75075.31          2
9999        792     France Female  28      4  130142.79          1

HasCrCard IsActiveMember EstimatedSalary Exited
0           1             1       101348.88      1
1           0             1       112542.58      0
2           1             0       113931.57      1
3           0             0       93826.63      0
4           1             1       79084.10      0
...
9995        1             0       96270.64      0
9996        1             1       101699.77      0
9997        0             1       42085.58      1
9998        1             0       92888.52      1
9999        1             0       38190.78      0
```

[9626 rows x 11 columns]

```
[37]: outliers2=detect_outliers(df,['NumOfProducts'])
percentage_numProd=(len(outliers2)/len(df))*100
print(f"Pourcentage d'outliers (Age) : {percentage_numProd:.2f}%)")
```

Pourcentage d'outliers (Age) : 0.60%

## 1.4 Data Transformation

### 1.4.1 Label Encoding

Dans la phase de transformation des données, nous avons adopté la technique du Label Encoding pour le traitement de certaines variables catégorielles. Ce choix est motivé par des considérations liées à la nature des variables, à la simplicité de mise en œuvre et à la compatibilité avec les modèles utilisés dans notre projet.

Premièrement, les variables catégorielles présentes dans le jeu de données, telles que le genre (Gen-

der) ou la zone géographique (Geography), comportent un nombre limité de modalités. Le Label Encoding permet de convertir efficacement ces catégories en valeurs numériques tout en conservant l'information essentielle, sans augmenter inutilement la dimension du jeu de données.

Deuxièmement, cette méthode est moins coûteuse en termes de complexité que le One-Hot Encoding, qui aurait entraîné une augmentation du nombre de variables et un risque accru de surapprentissage, notamment avec un volume de données modéré.

Troisièmement, dans le cadre de notre projet, les modèles de classification utilisés sont capables de gérer des variables encodées sous forme numérique discrète sans interpréter systématiquement l'ordre implicite comme une relation strictement linéaire, ce qui rend le Label Encoding pertinent.

Enfin, le Label Encoding facilite la standardisation du pipeline de prétraitement et améliore la rapidité d'entraînement des modèles, tout en garantissant une transformation cohérente et reproduitible des données.

```
[38]: from sklearn.preprocessing import OrdinalEncoder
```

```
[39]: enc = OrdinalEncoder()
x=df[["Geography", "Gender"]].to_numpy()
df[["Geography", "Gender"]]=enc.fit_transform(x)
```

```
[40]: df
```

```
[40]:      CreditScore  Geography  Gender  Age  Tenure  Balance  NumOfProducts \
0            619        0.0     0.0   42       2      0.00                  1
1            608        2.0     0.0   41       1    83807.86                  1
2            502        0.0     0.0   42       8   159660.80                  3
3            699        0.0     0.0   39       1      0.00                  2
4            850        2.0     0.0   43       2   125510.82                  1
...
9995         771        0.0     1.0   39       5      0.00                  2
9996         516        0.0     1.0   35      10   57369.61                  1
9997         709        0.0     0.0   36       7      0.00                  1
9998         772        1.0     1.0   42       3   75075.31                  2
9999         792        0.0     0.0   28       4  130142.79                  1

      HasCrCard  IsActiveMember  EstimatedSalary Exited
0            1              1        101348.88     1
1            0              1        112542.58     0
2            1              0        113931.57     1
3            0              0        93826.63     0
4            1              1        79084.10     0
...
9995         1              0        96270.64     0
9996         1              1        101699.77     0
9997         0              1        42085.58     1
9998         1              0        92888.52     1
9999         1              0        38190.78     0
```

[9626 rows x 11 columns]

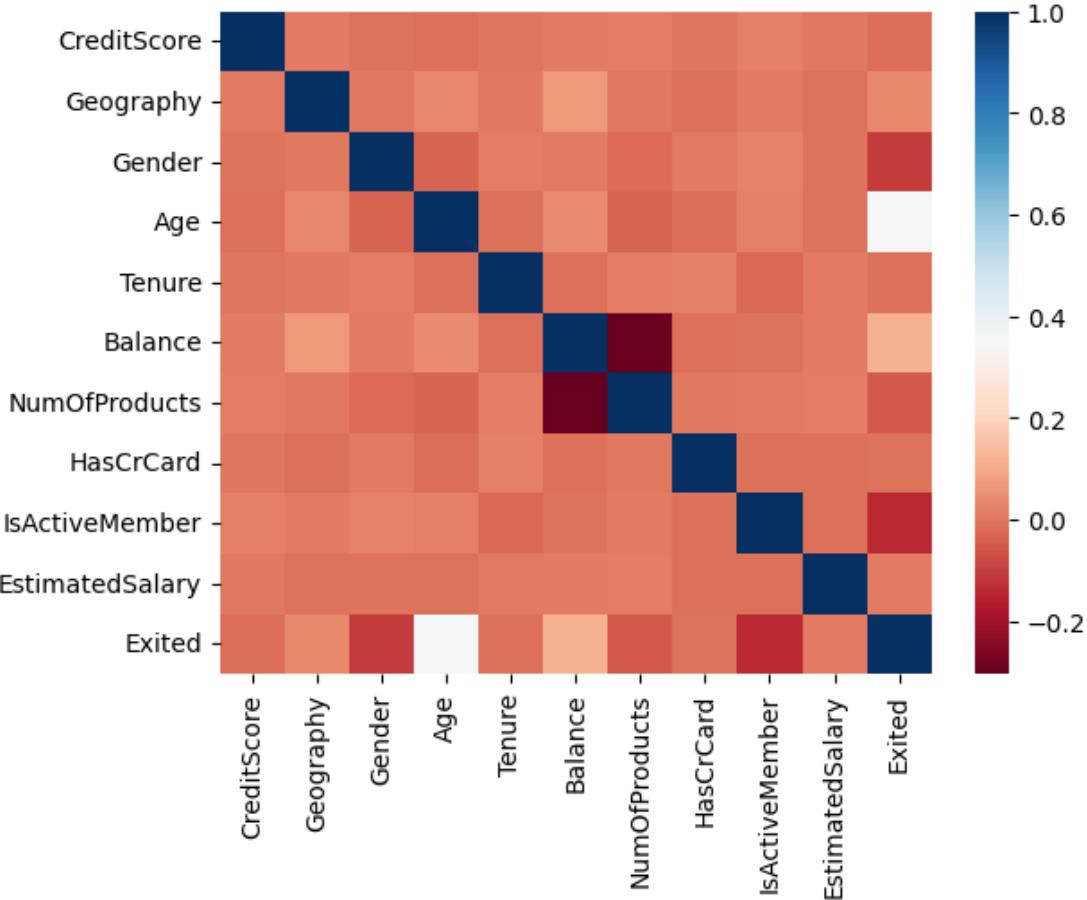
## 1.5 Etude de correlation

```
[41]: matrice_correlation=df.corr()  
display(matrice_correlation)
```

	CreditScore	Geography	Gender	Age	Tenure	\
CreditScore	1.000000	0.010272	-0.004011	-0.013055	-0.000798	
Geography	0.010272	1.000000	0.003185	0.028630	0.003053	
Gender	-0.004011	0.003185	1.000000	-0.030700	0.014560	
Age	-0.013055	0.028630	-0.030700	1.000000	-0.010576	
Tenure	-0.000798	0.003053	0.014560	-0.010576	1.000000	
Balance	0.007229	0.067058	0.010465	0.041412	-0.012925	
NumOfProducts	0.011554	0.005462	-0.021116	-0.032473	0.015049	
HasCrCard	-0.000914	-0.011279	0.006538	-0.016363	0.019781	
IsActiveMember	0.020416	0.008327	0.021880	0.017838	-0.027236	
EstimatedSalary	0.002609	-0.004704	-0.007245	-0.005601	0.010031	
Exited	-0.016413	0.034216	-0.106762	0.358494	-0.012872	
	Balance	NumOfProducts	HasCrCard	IsActiveMember		\
CreditScore	0.007229	0.011554	-0.000914	0.020416		
Geography	0.067058	0.005462	-0.011279	0.008327		
Gender	0.010465	-0.021116	0.006538	0.021880		
Age	0.041412	-0.032473	-0.016363	0.017838		
Tenure	-0.012925	0.015049	0.019781	-0.027236		
Balance	1.000000	-0.304347	-0.013795	-0.006958		
NumOfProducts	-0.304347	1.000000	0.002714	0.011250		
HasCrCard	-0.013795	0.002714	1.000000	-0.012287		
IsActiveMember	-0.006958	0.011250	-0.012287	1.000000		
EstimatedSalary	0.010241	0.013560	-0.010259	-0.010309		
Exited	0.116913	-0.050669	-0.008491	-0.143424		
	EstimatedSalary	Exited				
CreditScore	0.002609	-0.016413				
Geography	-0.004704	0.034216				
Gender	-0.007245	-0.106762				
Age	-0.005601	0.358494				
Tenure	0.010031	-0.012872				
Balance	0.010241	0.116913				
NumOfProducts	0.013560	-0.050669				
HasCrCard	-0.010259	-0.008491				
IsActiveMember	-0.010309	-0.143424				
EstimatedSalary	1.000000	0.009123				
Exited	0.009123	1.000000				

```
[42]: sns.heatmap(matrice_correlation,xticklabels=matrice_correlation.
    ↪columns,yticklabels=matrice_correlation.columns,cmap="RdBu")
```

[42]: <Axes: >



L'étude de corrélation a été réalisée afin d'identifier les relations entre les variables explicatives et la variable cible (churn). Elle a permis de mettre en évidence que l'âge, le nombre de produits détenus, le statut d'activité du client (IsActiveMember) et le solde du compte (Balance) sont les variables les plus corrélées avec le churn. L'analyse s'est appuyée sur le coefficient de corrélation de Pearson et une matrice de corrélation. Cette étape a facilité la sélection des variables pertinentes et l'amélioration des performances des modèles.

### 1.5.1 Normalisation des Données

La normalisation des données a été appliquée afin de mettre les variables numériques sur une **échelle comparable**. Le **MinMax Scaler** a été choisi car il transforme les valeurs dans l'intervalle ([0,1]) tout en conservant la **distribution relative** des données. Ce choix est particulièrement adapté aux modèles sensibles à l'échelle des variables et facilite leur convergence. La normalisation par MinMax Scaler contribue ainsi à améliorer la stabilité et les performances des modèles.

```
[43]: from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
mmscaler = MinMaxScaler()
cols=['CreditScore','Age','Tenure','NumOfProducts','Balance','EstimatedSalary']
df[cols] = mmscaler.fit_transform(df[cols])
```

```
[44]: df
```

	CreditScore	Geography	Gender	Age	Tenure	Balance	\
0	0.505353	0.0	0.0	0.545455	0.2	0.000000	
1	0.481799	2.0	0.0	0.522727	0.1	0.334031	
2	0.254818	0.0	0.0	0.545455	0.8	0.636357	
3	0.676660	0.0	0.0	0.477273	0.1	0.000000	
4	1.000000	2.0	0.0	0.568182	0.2	0.500246	
...	...	...	...	...	...	...	
9995	0.830835	0.0	1.0	0.477273	0.5	0.000000	
9996	0.284797	0.0	1.0	0.386364	1.0	0.228657	
9997	0.698073	0.0	0.0	0.409091	0.7	0.000000	
9998	0.832976	1.0	1.0	0.545455	0.3	0.299226	
9999	0.875803	0.0	0.0	0.227273	0.4	0.518708	
	NumOfProducts	HasCrCard	IsActiveMember	EstimatedSalary	Exited		
0	0.000000	1		0.506735	1		
1	0.000000	0		0.562709	0		
2	0.666667	1		0.569654	1		
3	0.333333	0		0.469120	0		
4	0.000000	1		0.395400	0		
...	...	...	...	...	...	...	
9995	0.333333	1		0.481341	0		
9996	0.000000	1		0.508490	0		
9997	0.000000	0		0.210390	1		
9998	0.333333	1		0.464429	1		
9999	0.000000	1		0.190914	0		

[9626 rows x 11 columns]

```
[45]: from sklearn.preprocessing import StandardScaler
sc = StandardScaler()
cols=['CreditScore','Age','Tenure','NumOfProducts','Balance','EstimatedSalary']
df[cols] = sc.fit_transform(df[cols])
```

```
[46]: df
```

	CreditScore	Geography	Gender	Age	Tenure	Balance	\
0	-0.330309	0.0	0.0	0.479282	-1.044601	-1.226774	
1	-0.444790	2.0	0.0	0.365625	-1.390859	0.116386	
2	-1.547974	0.0	0.0	0.479282	1.032946	1.332056	
3	0.502283	0.0	0.0	0.138311	-1.390859	-1.226774	

```

4           2.073800      2.0       0.0   0.592939 -1.044601   0.784746
...
9995      1.251615      0.0       1.0   0.138311 -0.005827 -1.226774
9996     -1.402271      0.0       1.0  -0.316318  1.725462 -0.307331
9997      0.606357      0.0       0.0  -0.202661  0.686688 -1.226774
9998      1.262023      1.0       1.0   0.479282 -0.698343 -0.023567
9999      1.470171      0.0       0.0 -1.111918 -0.352085  0.858981

      NumOfProducts  HasCrCard  IsActiveMember  EstimatedSalary  Exited
0          -0.914163        1             1         0.021480      1
1          -0.914163        0             1         0.216090      0
2          2.529285        1             0         0.240239      1
3          0.807561        0             0         -0.109299      0
4          -0.914163        1             1         -0.365608      0
...
9995      0.807561        1             0         -0.066808      0
9996     -0.914163        1             1         0.027581      0
9997     -0.914163        0             1         -1.008853      1
9998      0.807561        1             0         -0.125609      1
9999     -0.914163        1             0         -1.076567      0

```

[9626 rows x 11 columns]

### 1.5.2 Définir les variables explicatifs et la variable cible

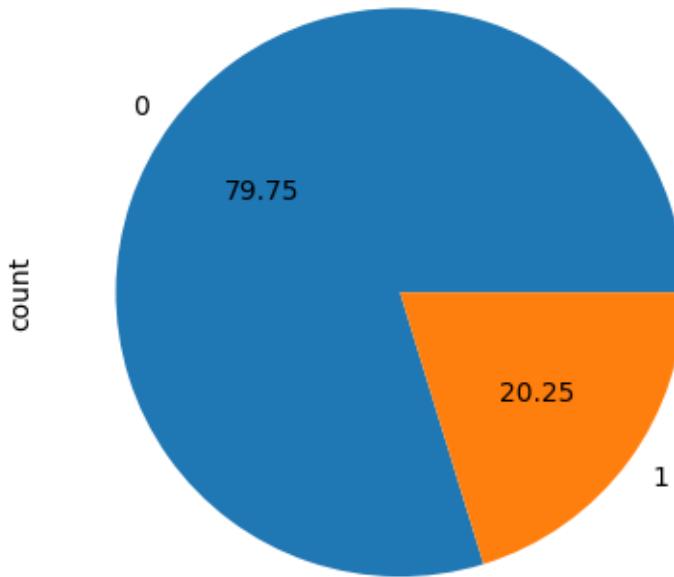
[47]: X=df.drop("Exited",axis=1)  
Y=df["Exited"]

[48]: Y.value\_counts() #Imbalanced data

[48]: Exited  
0 7677  
1 1949  
Name: count, dtype: int64

[49]: Y.value\_counts().plot.pie(autopct='%.2f')

[49]: <Axes: ylabel='count'>



## 1.6 Data Balancing

```
[50]: pip install -U imbalanced-learn
```

```
Requirement already satisfied: imbalanced-learn in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (0.14.0)
Requirement already satisfied: numpy<3,>=1.25.2 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from imbalanced-learn) (2.0.2)
Requirement already satisfied: scipy<2,>=1.11.4 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from imbalanced-learn) (1.16.3)
Requirement already satisfied: scikit-learn<2,>=1.4.2 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from imbalanced-learn) (1.6.1)
Requirement already satisfied: joblib<2,>=1.2.0 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from imbalanced-learn) (1.5.2)
Requirement already satisfied: threadpoolctl<4,>=2.0.0 in
/usr/local/lib/python3.12/dist-packages (from imbalanced-learn) (3.6.0)
```

### 1.6.1 Random Undersampling

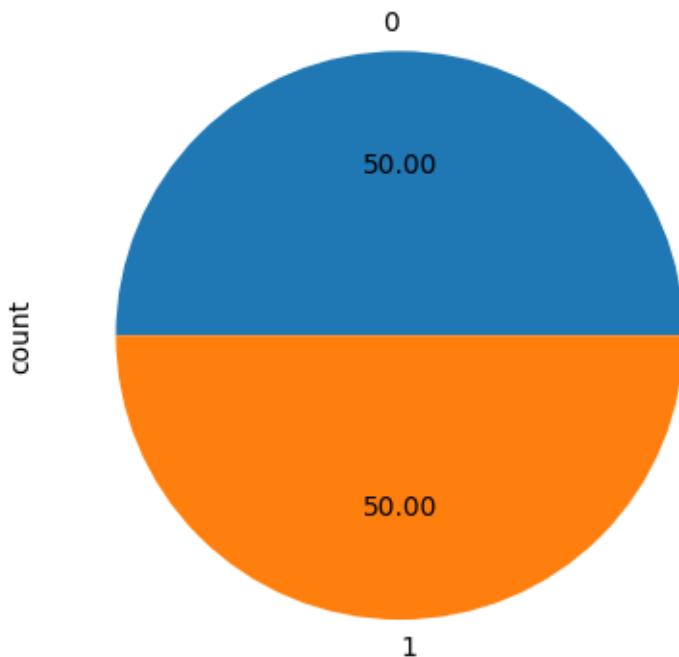
L'équilibrage des données a été adopté afin de corriger le **déséquilibre entre les classes** de la variable cible (*churn*), où les clients non churners étaient largement majoritaires. La méthode de **Random UnderSampling** a été choisie pour réduire la classe majoritaire et obtenir une distribution plus équilibrée. Ce choix permet d'éviter le biais des modèles vers la classe dominante

et d'améliorer la détection des clients churners. Ainsi, le data balancing contribue à des prédictions plus justes et plus représentatives.

```
[51]: from imblearn.under_sampling import RandomUnderSampler
```

```
[52]: rus = RandomUnderSampler(random_state=42)
X_res, y_res = rus.fit_resample(X, Y)
y_res.value_counts().plot.pie(autopct='%.2f')
```

```
[52]: <Axes: ylabel='count'>
```



## 2 Modélisation et Machine Learning

```
[53]: from sklearn.neighbors import KNeighborsClassifier
from sklearn.metrics import accuracy_score, confusion_matrix,
precision_score, recall_score, f1_score, make_scorer
from sklearn.model_selection import train_test_split
```

### 2.1 Modèle KNN (K-Nearest Neighbors)

Dans le cadre de notre projet, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme K-Nearest Neighbors (KNN) en raison de sa simplicité, de son efficacité et de son adéquation avec la nature de nos données.

Tout d'abord, KNN est un algorithme non paramétrique, ce qui signifie qu'il ne fait aucune hypothèse préalable sur la distribution des données. Cela le rend particulièrement adapté lorsque la structure des données n'est pas connue à l'avance, comme c'est le cas dans notre projet.

Ensuite, KNN est basé sur le principe de similarité : une observation est classée en fonction des k voisins les plus proches selon une mesure de distance (généralement la distance euclidienne). Cette approche intuitive permet d'obtenir des résultats facilement interprétables et compréhensibles.

Par ailleurs, l'algorithme KNN est simple à implémenter et ne nécessite pas une phase d'apprentissage complexe. Cela facilite son utilisation, son ajustement (choix de k) et son intégration dans notre solution.

Enfin, KNN offre de bonnes performances lorsque les données sont bien normalisées et que la taille du jeu de données est raisonnable. Il constitue ainsi un bon compromis entre performance, simplicité et interprétabilité, ce qui justifie pleinement son choix pour notre projet.

```
[54]: # 1 Split du dataset
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, Y, test_size=0.2, random_state=42
)

# 2 Modèle KNN
knn = KNeighborsClassifier(n_neighbors=5)

# 3 Entraînement
knn.fit(X_train, y_train)

# 4 Prédictions
y_pred = knn.predict(X_test)

# 5 Évaluation
print("Accuracy :", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("Precision :", precision_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("Recall :", recall_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("F1-score :", f1_score(y_test, y_pred, average='macro'))
```

```
Accuracy : 0.842159916926272
Precision : 0.783338727853918
Recall : 0.693985924400671
F1-score : 0.7220779220779221
```

### 2.1.1 Cross Validation avec 10 folds

L'ajout de la cross-validation permet d'évaluer le modèle de manière plus fiable en réduisant le risque de surapprentissage. Elle assure que les performances obtenues sont stables et généralisables sur différents sous-ensembles de données.

```
[55]: from sklearn.model_selection import cross_val_score

model_cross = KNeighborsClassifier(n_neighbors=5)
```

```

accuracy = cross_val_score(model_cross, X, Y, cv=10, scoring=make_scorer(accuracy_score))
precision=cross_val_score(model_cross, X, Y, cv=10,scoring='precision_macro')
recall=cross_val_score(model_cross, X, Y, cv=10,scoring='recall_macro')
f1=cross_val_score(model_cross, X, Y, cv=10,scoring='f1_macro')
print("accuracy : ",accuracy.mean())
print("precision : ",precision.mean())
print("recall : ",recall.mean())
print("f1_score : ",f1.mean())

```

```

accuracy : 0.8379382257886931
precision : 0.7580578630237651
recall : 0.6886104161906298
f1_score : 0.7118527585205042

```

## 2.1.2 GridSearch

Ensuite, le GridSearch est utilisé pour tester automatiquement plusieurs combinaisons d'hyperparamètres. Cela permet de sélectionner les paramètres optimaux afin d'améliorer les performances globales du modèle.

```
[56]: from sklearn.model_selection import train_test_split, GridSearchCV
from sklearn.pipeline import Pipeline

# 1 Split
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, Y, test_size=0.2, random_state=42, stratify=Y
)

# 2 Pipeline (scaling + KNN)
pipeline = Pipeline([
    ('scaler', StandardScaler()),
    ('knn', KNeighborsClassifier())
])

# 3 Grille des hyperparamètres
param_grid = {
    'knn__n_neighbors': [3, 5, 7, 9, 11],
    'knn__weights': ['uniform', 'distance'],
    'knn__metric': ['euclidean', 'manhattan']
}

# 4 GridSearch
grid = GridSearchCV(
    estimator=pipeline,
    param_grid=param_grid,
    cv=5,
    scoring='f1_macro',
)
```

```

    n_jobs=-1
)

# 5 Entraînement
grid.fit(X_train, y_train)

# 6 Meilleur modèle
best_model = grid.best_estimator_

# 7 Prédictions
y_pred = best_model.predict(X_test)

# 8 Évaluation
print("Best params :", grid.best_params_)
print("Accuracy :", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("Precision :", precision_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("Recall :", recall_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("F1-score :", f1_score(y_test, y_pred, average='macro'))

```

```

Best params : {'knn__metric': 'euclidean', 'knn__n_neighbors': 5,
'knn__weights': 'distance'}
Accuracy : 0.8463136033229491
Precision : 0.7795018070667846
Recall : 0.6941656650641026
F1-score : 0.721976540722115

```

## 2.2 Decision Tree (Arbre de Décision)

Nous avons choisi le modèle Decision Tree en raison de sa grande interprétabilité et de sa capacité à modéliser des relations non linéaires entre les variables. Il permet de visualiser clairement les règles de décision, ce qui facilite la compréhension et l'analyse des résultats. De plus, il nécessite peu de préparation des données et peut gérer à la fois des variables numériques et catégorielles.

```
[57]: from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier

# Split du dataset
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, Y, test_size=0.2, random_state=42, stratify=Y
)

# Modèle Decision Tree
dt = DecisionTreeClassifier(
    criterion='gini',          # ou 'entropy'
    max_depth=5,               # limite la complexité
    random_state=42
)

# Entraînement

```

```

dt.fit(X_train, y_train)

# Prédictions
y_pred = dt.predict(X_test)

# Évaluation
print("Accuracy :", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("Precision :", precision_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("Recall :", recall_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("F1-score :", f1_score(y_test, y_pred, average='macro'))

```

Accuracy : 0.8618899273104881  
 Precision : 0.8475748598291017  
 Recall : 0.6895833333333333  
 F1-score : 0.7292731027514675

## 2.2.1 Cross Validation avec 10 Folds

[58] :

```

# Modèle
dt = DecisionTreeClassifier(
    criterion='gini',    # ou 'entropy'
    max_depth=5,
    random_state=42
)

# Accuracy
accuracy = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='accuracy'
)

# Precision
precision = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='precision_macro'
)

# Recall
recall = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='recall_macro'
)

# F1-score
f1 = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='f1_macro'
)

# Résultats moyens
print("Accuracy :", accuracy.mean())

```

```

print("Precision :", precision.mean())
print("Recall :", recall.mean())
print("F1-score :", f1.mean())

```

Accuracy : 0.854456253521674  
 Precision : 0.8255194160881283  
 Recall : 0.6792445013191821  
 F1-score : 0.7150436276523009

## 2.2.2 GridSearch

```

[59]: # 1 Split train / test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, Y, test_size=0.2, random_state=42, stratify=Y
)

# 2 Modèle Decision Tree
dt = DecisionTreeClassifier(random_state=42)

# 3 Grille des hyperparamètres
param_grid = {
    'criterion': ['gini', 'entropy'],
    'max_depth': [None, 3, 5, 7, 10],
    'min_samples_split': [2, 5, 10],
    'min_samples_leaf': [1, 2, 4]
}

# 4 GridSearch avec Cross Validation
grid = GridSearchCV(
    estimator=dt,
    param_grid=param_grid,
    cv=5,
    scoring='f1_macro',    # ou 'accuracy'
    n_jobs=-1
)

# 5 Entraînement
grid.fit(X_train, y_train)

# 6 Meilleur modèle
best_dt = grid.best_estimator_

# 7 Prédictions
y_pred = best_dt.predict(X_test)

# 8 Résultats
print("Best parameters :", grid.best_params_)

```

```

print("Accuracy :", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("Precision :", precision_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("Recall :", recall_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("F1-score :", f1_score(y_test, y_pred, average='macro'))

```

```

Best parameters : {'criterion': 'entropy', 'max_depth': 3, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2}
Accuracy : 0.8442367601246106
Precision : 0.7621434049079754
Recall : 0.7282552083333333
F1-score : 0.7426711606430282

```

## 2.3 Logistic regression (Régression Logistique)

La régression logistique a été retenue pour sa simplicité, sa robustesse et ses bonnes performances en classification binaire. Elle fournit des résultats facilement interprétables grâce aux probabilités et aux coefficients associés aux variables. En outre, elle est efficace sur des données linéairement séparables et constitue un bon modèle de référence pour comparer les performances des autres algorithmes.

```
[60]: from sklearn.linear_model import LogisticRegression
# Split
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, Y, test_size=0.2, random_state=42, stratify=Y
)

# Pipeline (scaling obligatoire)
pipeline = Pipeline([
    ('scaler', StandardScaler()),
    ('logreg', LogisticRegression(max_iter=1000))
])

# Entraînement
pipeline.fit(X_train, y_train)

# Prédictions
y_pred = pipeline.predict(X_test)

# Évaluation
print("Accuracy :", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("Precision :", precision_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("Recall :", recall_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("F1-score :", f1_score(y_test, y_pred, average='macro'))
```

```

Accuracy : 0.8219106957424714
Precision : 0.7392762003549622
Recall : 0.6186047676282052
F1-score : 0.6411219766328207

```

### 2.3.1 Cross Validation avec Régression logistique

```
[61]: model = Pipeline([
    ('scaler', StandardScaler()),
    ('logreg', LogisticRegression(max_iter=1000))
])

scores = cross_val_score(model, X, Y, cv=10, scoring='f1_macro')
# Accuracy
accuracy = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='accuracy'
)

# Precision
precision = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='precision_macro'
)

# Recall
recall = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='recall_macro'
)

# F1-score
f1 = cross_val_score(
    dt, X, Y, cv=10, scoring='f1_macro'
)

# Résultats moyens
print("Accuracy :", accuracy.mean())
print("Precision :", precision.mean())
print("Recall :", recall.mean())
print("F1-score :", f1.mean())
```

```
Accuracy : 0.7916082149727011
Precision : 0.6796281227440459
Recall : 0.6848290654878314
F1-score : 0.6818759681938629
```

### 2.3.2 GridSearch

```
[62]: # 1 Split train / test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, Y, test_size=0.2, random_state=42, stratify=Y
)

# 2 Pipeline (scaling obligatoire)
pipeline = Pipeline([
```

```

        ('scaler', StandardScaler()),
        ('logreg', LogisticRegression(max_iter=1000))
    ])

# 3 Grille des hyperparamètres
param_grid = {
    'logreg__C': [0.01, 0.1, 1, 10, 100],
    'logreg__penalty': ['l2'],
    'logreg__solver': ['lbfgs', 'liblinear']
}

# 4 GridSearch avec Cross Validation
grid = GridSearchCV(
    estimator=pipeline,
    param_grid=param_grid,
    cv=5,
    scoring='f1_macro',    # ou 'accuracy'
    n_jobs=-1
)

# 5 Entraînement
grid.fit(X_train, y_train)

# 6 Meilleur modèle
best_model = grid.best_estimator_

# 7 Prédictions
y_pred = best_model.predict(X_test)

# 8 Résultats
print("Best parameters : ", grid.best_params_)
print("Accuracy : ", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("Precision : ", precision_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("Recall : ", recall_score(y_test, y_pred, average='macro'))
print("F1-score : ", f1_score(y_test, y_pred, average='macro'))

```

```

Best parameters : {'logreg__C': 1, 'logreg__penalty': 'l2', 'logreg__solver': 'liblinear'}
Accuracy : 0.8213914849428868
Precision : 0.7379631886884446
Recall : 0.6173227163461539
F1-score : 0.6395401218246274

```

### 3 Résultats et Benchmarking des Modèles ML

```
[64]: from google.colab import files  
from IPython.display import Image
```

```
[65]: uploaded = files.upload()
```

```
<IPython.core.display.HTML object>
```

```
Saving Screenshot 2025-12-17 at 02.58.54.png to Screenshot 2025-12-17 at  
02.58.54.png
```

```
[66]: Image('Screenshot 2025-12-17 at 02.58.54.png')
```

[66]:

		Accuracy	Precision	Recall	F1 Score
K-Nearest Neighbors	KNN Simple avec n_neighbors=5	84%	78%	69%	72%
	Cross Validation avec 10 Folds	83%	75%	68%	71%
	GridSearch	85%	78%	69%	72%
Decision Tree	DT Simple	86%	84%	69%	73%
	Cross Validation avec 10 Folds	85%	83%	68%	72%
	GridSearch	84%	76%	73%	74%
Logistic Regression	Logistic Regression Simple	82%	74%	62%	64%
	Cross Validation avec 10 Folds	79%	68%	68%	68%
	GridSearch	82%	74%	62%	64%

Dans cette étude, nous avons évalué les performances de trois algorithmes de Machine Learning, à savoir K-Nearest Neighbors (KNN), Decision Tree et Logistic Regression, en utilisant plusieurs métriques : Accuracy, Precision, Recall et F1-score. Pour chaque modèle, trois configurations ont été testées : une version simple, une version avec cross-validation à 10 folds, et une version optimisée via GridSearch.

Les résultats montrent que le Decision Tree obtient globalement les meilleures performances. En particulier, la version optimisée par GridSearch atteint le meilleur F1-score (74%), avec un bon équilibre entre la précision (76%) et le rappel (73%). Ce score est supérieur à ceux obtenus par KNN, dont le F1-score maximal atteint 72%, et par la régression logistique, qui reste limitée à un F1-score de 68% au mieux.

Le modèle KNN présente des performances stables, avec une légère amélioration après l'optimisation par GridSearch (accuracy de 85%), mais son rappel reste relativement limité, ce qui peut poser problème dans des contextes où la détection des classes positives est cruciale. Quant à la régression logistique, bien qu'elle soit simple et robuste, elle affiche les performances les plus faibles, notamment en termes de rappel et de F1-score, indiquant une capacité limitée à capturer des relations

complexes dans les données.

Sur la base de ce benchmarking, le Decision Tree optimisé par GridSearch est retenu comme le modèle le plus performant dans le cadre de notre projet, car il offre le meilleur compromis entre précision, rappel et F1-score.

## 4 Discussion et Limites des Modèles

Malgré les performances satisfaisantes obtenues par les modèles de Machine Learning étudiés, plusieurs limites doivent être soulignées. Tout d'abord, ces modèles reposent principalement sur des caractéristiques manuelles et peinent à capturer des relations complexes ou de haut niveau présentes dans les données. Par exemple, la régression logistique suppose une séparation linéaire, tandis que KNN et Decision Tree peuvent être sensibles au bruit et au surapprentissage.

De plus, l'amélioration apportée par la cross-validation et le GridSearch reste relativement limitée, ce qui suggère que les performances sont désormais contraintes par la capacité intrinsèque des modèles plutôt que par le choix des hyperparamètres. Cela indique un plafond de performance pour les approches classiques de Machine Learning dans notre contexte.

Dans cette optique, il serait pertinent de passer à des modèles de Deep Learning, qui offrent une capacité supérieure à apprendre automatiquement des représentations complexes à partir des données. Contrairement aux modèles de Machine Learning traditionnels, les réseaux de neurones profonds peuvent exploiter des structures non linéaires complexes et améliorer significativement les performances, en particulier lorsque le volume de données augmente.

Ainsi, bien que les modèles de Machine Learning aient permis d'établir une base solide et interprétable, l'adoption de techniques de Deep Learning apparaît comme une perspective prometteuse pour dépasser les limites actuelles et obtenir de meilleurs résultats dans les travaux futurs.

## 5 Conclusion

Ce projet a permis de comparer et d'évaluer plusieurs modèles de Machine Learning à travers un benchmarking rigoureux basé sur des métriques pertinentes. Les résultats ont montré que le Decision Tree optimisé par GridSearch offre les meilleures performances globales. Toutefois, les limites observées soulignent la nécessité d'explorer des approches plus avancées. Ainsi, le Deep Learning constitue une perspective prometteuse pour améliorer davantage les performances et répondre aux exigences futures du projet.