

# Projet L3

## Fouille de données

## Ingénierie des langues

GOEHRY Martial  
16711476

21 juillet 2024

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Fouille de données</b>	<b>5</b>
1.1	Récolte des données . . . . .	5
1.2	Pré-traitement . . . . .	5
1.2.1	Importation . . . . .	6
1.2.2	Extraction du corps des mails . . . . .	6
1.2.3	Nettoyage . . . . .	7
1.3	Mise en base . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Ingénierie des langues</b>	<b>19</b>
2.1	Recherche des caractéristiques . . . . .	19
2.1.1	Informations statistiques . . . . .	19
2.2	Traitement du langage . . . . .	19
2.2.1	Lemmatisation . . . . .	19
2.2.2	Vectorisation . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Modélisation</b>	<b>20</b>
3.1	Entraînements . . . . .	20
3.2	Validation . . . . .	20
<b>A</b>	<b>Développement visualisation distribution de Zipf</b>	<b>22</b>
<b>B</b>	<b>Modèles</b>	<b>28</b>
B.1	Naïves Bayes . . . . .	28
<b>C</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>34</b>
<b>D</b>	<b>Sitotec</b>	<b>35</b>
D.1	Corpus . . . . .	35
D.2	Modules . . . . .	35
D.3	Modèles . . . . .	35
<b>E</b>	<b>Code Source</b>	<b>35</b>
E.1	GitHub . . . . .	35

# Introduction

Ce projet a pour but de développer un modèle permettant de catégoriser des emails en spam ou ham. La définition d'un spam dans le dictionnaire *Larousse* est :

Courrier électronique non sollicité envoyé en grand nombre à des boîtes aux lettres électroniques ou à des forums, dans un but publicitaire ou commercial.

Il est possible d'ajouter à cette catégorie tous les mails indésirables comme les tentatives d'hameçonnage permettant de soutirer des informations personnelles à une cible.

L'objectif est de travailler uniquement sur les données textuelles issues du corps du mail. Nous avons donc comme point de départ les éléments suivants :

- langue : anglais
- corpus : monolingue écrit
- type : e-mail

**Déroulé** Le développement de ce projet s'articule autour de 3 phases majeures

- Phase 1 : Récupération des données (Fouille de données)
- Phase 2 : Analyse des caractéristiques (Traitement de langage)
- Phase 3 : Construction d'un modèle d'analyse (IA)

**Phase 1** La phase 1 concerne la récolte des informations et les traitements minimums nécessaires pour la mise en base. Les objectifs de traitement de cette phase sont :

- Extraire les corps des mails et éliminer les méta-données superflues
- Éliminer les mails non anglais
- Éliminer les mails en doublons
- Éliminer les parties de textes non pertinentes (liens, réponses, certaines ponctuations)

Cette phase se termine avec la mise en base des documents dans une collection Mongo.

**Phase 2** La phase 2 vise à extraire des caractéristiques des textes. Les techniques de traitement du langage devront permettre d'effectuer une vectorisation des documents.

**Phase 3** La phase 3 regroupe toutes les opérations d'exploitation des données et vise à développer et à créer un modèle de classement des mails et d'en évaluer les performances.

Afin de conserver une certaine cohérence dans le déroulé entre les phases chaque étape est automatisée avec Python. Seule la récolte initiale des mails a été réalisée à la main.

La Figure 1 donne une vue synthétique des étapes du projet.

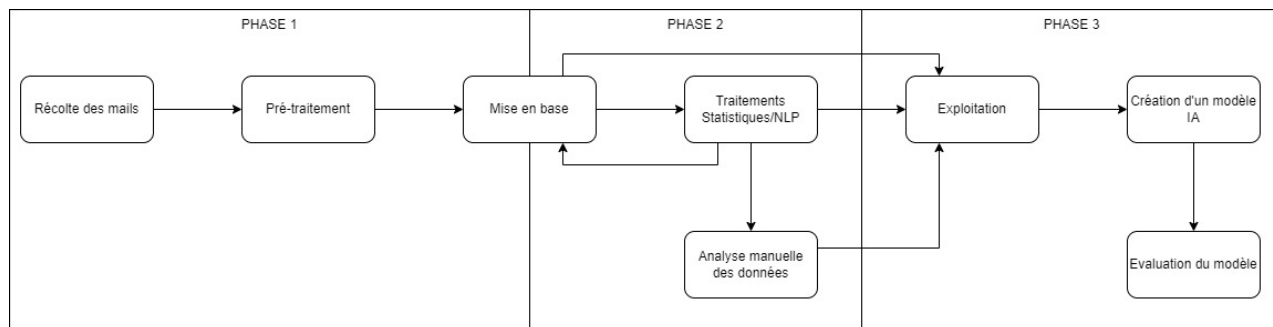


FIGURE 1 – Schéma des grandes étapes

## Mise en place de l'infrastructure opérationnelle

L'architecture opérationnelle s'appuie sur des conteneurs docker. Plusieurs types de base de données sont mises en œuvre profiter des avantages de chacune. Les conteneurs peuvent être gérés à l'aide du fichier *Makefile* via les commandes suivantes :

- *make docker\_start* : pour créer ou démarrer l'infrastructure
- *make docker\_stop* : pour arrêter les conteneurs
- *make docker\_prune* : pour nettoyer l'infrastructure

La figure 2 montre l'organisation de cette architecture ainsi que les documents nécessaires pour son montage.

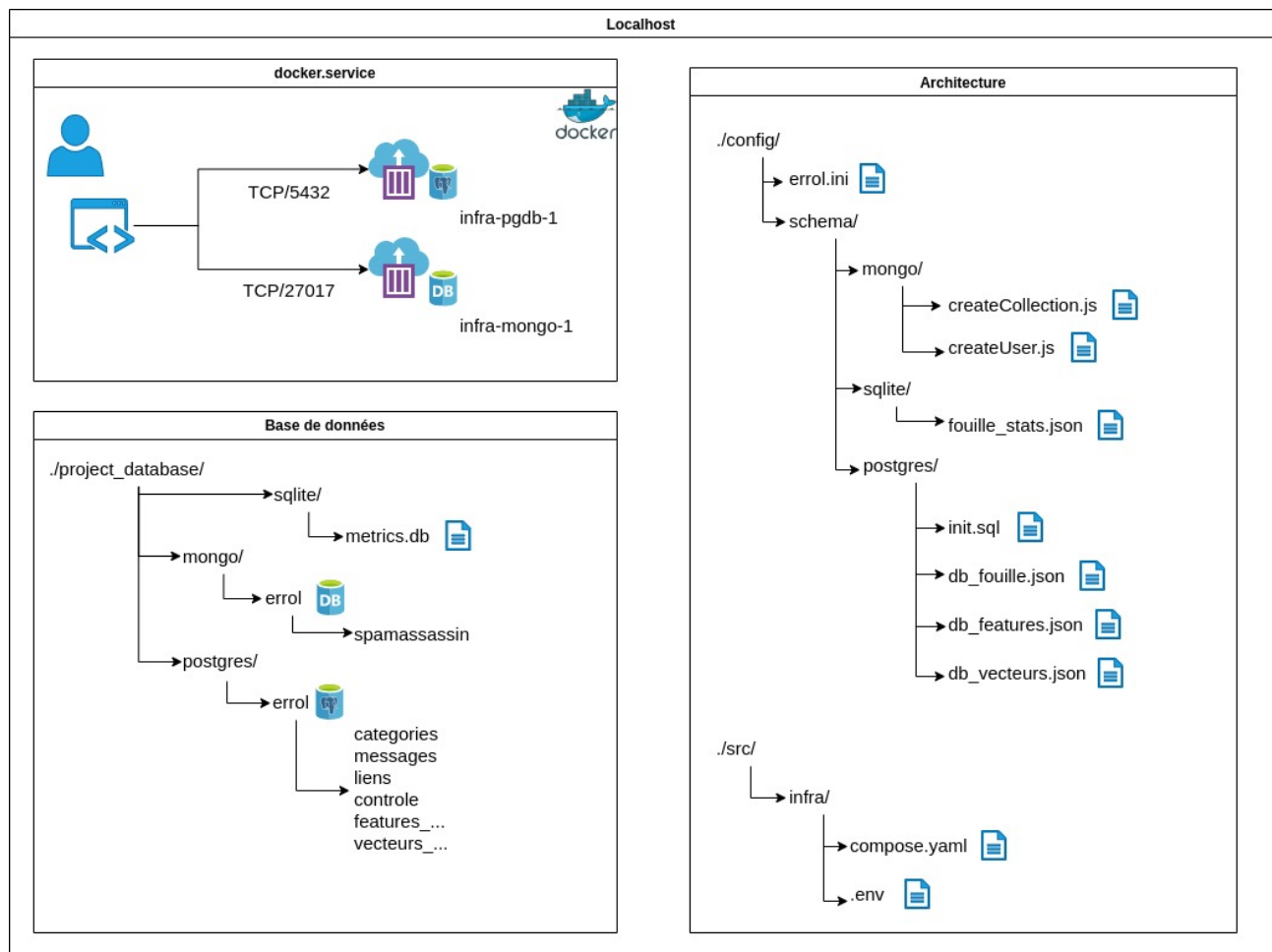


FIGURE 2 – Schéma de l'architecture Docker

Les différentes tables et collections sont créées dynamiquement au cours des étapes du projet.

### Choix technologiques

#### Socle des services

**Conteneurs** La conteneurisation des services permet d'effectuer facilement une séparation entre les processus. Les ressources empruntées à la machine hôte sont réduites au strict besoin de l'application. Une fois le moteur installé les différentes applications ou services peuvent être déployé rapidement. Chaque application embarque dans son conteneur toutes ses dépendances. Par définition les conteneurs sont volatils, des configurations complémentaires doivent être mises en place pour permettre la persistance des informations des bases de données. Solution retenue.

Le moteur *Docker* a été retenu, car il est simple d'utilisation, bien documenté et disponible sur plusieurs systèmes d'exploitation. Il est possible d'utiliser la capacité *compose* de Docker pour déployer, démarrer ou arrêter plusieurs instances de manière coordonnée.

**systemd** Une solution susceptible de fonctionner aurait été d'installer directement sur ma machine les différents services requis. Cela étant, un long processus d'installation puis de désinstallation aurait été nécessaire, avec le risque d'omettre des composants. De plus l'ajout de service directement sur la machine hôte comporte toujours des risques d'isolation des processus. Solution non retenue.

**Machine virtuelle** L'installation des couches applicatives aurait pu être réalisé sur des machines virtuelles pour garantir une bonne isolation. Cela aurait également permis de simuler une infrastructure lourde avec plusieurs serveurs. Cependant, mon PC n'est pas en mesure de supporter l'exécution de plusieurs machines virtuelles en parallèle. Solution non retenue.

**Base NoSQL** Les bases de données NoSQL orientés documents sont plus performantes pour le stockage et l'accès à des ressources textuelles. Deux moteurs ont été testés :

**MongoDB** Moteur de base données flexible et raisonnable en utilisation de ressource. Le langage des requêtes est simple à prendre en main. L'utilisation avec Python est facilitée par le *Python developer path* disponible sur le site de l'éditeur. Solution retenue.

**ElasticSearch** Moteur puissant de base de données qui intègre un moteur Lucène pour la recherche de document par mot clé. L'interface graphique associée (Kibana) est agréable et facile à prendre en main. Néanmoins, ce moteur est très gourmand en ressource. Une fois l'index (schéma) créé, il est très compliqué de le modifier. Solution rejetée.

**Base SQL** Les bases de données SQL sont plus performante quand il s'agit de traiter des informations transactionnelles. Elles offrent également plus de garantie de sécurité des données que les bases de données NoSQL. Elles permettent aussi de faire plus facilement et rapidement des requêtes complexes avec jointure et agrégation. Pour ces raisons, ce type de moteur sera utilisé pour stocker les informations numériques générées à partir des textes.

**SQLite** Moteur de base de données SQL intégré avec Python. Les informations sont stockées dans un fichier défini. Cette base de données ne nécessite pas d'installer un service supplémentaire. Cette solution est généralement utilisée en phase de test. L'utilisation de cette solution pour stocker les données numériques des documents aurait été susceptible de générer des fichiers trop lourds et trop difficile à lier entre eux. Cependant, cette solution a été utilisée pour stocker les données générées lors de la phase de récolte (nombre de mails, nombre de mots uniques...). Solution retenue

**Postgres SQL** Moteur de base de données SQL solide et robuste. Elle permet également une gestion des utilisateurs ayant accès aux informations. L'intégration avec python est simple. Les données sont accessibles et peut être liées facilement. La taille des fichiers est gérée directement par le moteur. Solution retenue.

# 1 Fouille de données

Cette partie vise à expliquer les actions réalisées en vue de récupérer et stocker les données utilisées dans ce projet. Au cours de cette phase plusieurs traitements permettront de réduire la quantité d'information pour se concentrer sur les corps des mails. Les données MIME non textuelles sont écartés ainsi que les messages corrompus ou avec des encodages non convertibles en utf-8.

## 1.1 Récolte des données

**Recherche de dataset** Ma volonté initiale était de travailler sur des mails en français. Cependant, je n'ai pas trouvé de dataset dans cette langue. Je me suis donc retourné vers les dataset de mails en anglais.

J'ai pu alors récupérer deux dataset :

- Enron company mails (voir D.1)
- Dataset SpamAssassin (voir D.1)

Les mails de SpamAssassin ont l'avantage d'être pré-triés, contrairement aux mails de la compagnie Enron. Ainsi le développement du moteur se fera uniquement avec les mails du SpamAssassin afin de pouvoir vérifier les résultats de l'analyse.

**Téléchargement des données** Le téléchargement du dataset Enron est possible à partir du moment où l'on possède un compte sur la plateforme Kaggle. Le dataset SpamAssassin est ouvert, il suffit de télécharger les archives de chaque catégorie.

La récolte des données a été réalisée à la main sans automatisation. Les mails sont alors stockés dans plusieurs répertoires *HAM* et *SPAM* selon leur catégorie.

Format :

- *Enron* - 1 fichier CSV avec tous les mails
- *SpamAssassin* - 1 fichier texte par mail

**Evolution possible** La quantité de ressource disponible est assez limitée et principalement en anglais. Une idée aurait pu être de mettre en place un site internet où les utilisateurs peuvent fournir leurs mails avec la catégorie qu'ils estiment être la bonne.

Cette solution comporte des points d'attentions. La confiance en l'utilisateur ne peut pas être absolue. Le rapport entre les ham et spam sera très probablement disproportionné en faveur des spams. Au vu des traitements effectués, cette solution nécessitera une gestion des données personnelles en accord avec les RGPD.

## 1.2 Pré-traitement

La Figure 3 montre l'enchaînement des étapes de traitement du mail puis du corps de texte jusqu'à la mise en base. Le chargement des mails en mémoire utilise le module python email (natif). Une grande partie des transformations sont effectuées en utilisant des expressions régulières. Trois points de contrôle permettent de décider si un mail sera effectivement utilisé ou non.

1. Échec de l'importation (fichier manquant lors de la tentative de lecture)
2. Échec de récupération du corps (charset non accepté, corps vide, type du mail non textuel)

### 3. Échec lors de la détermination de la langue (incapacité d'identifier les ngrams nécessaire à l'analyse)

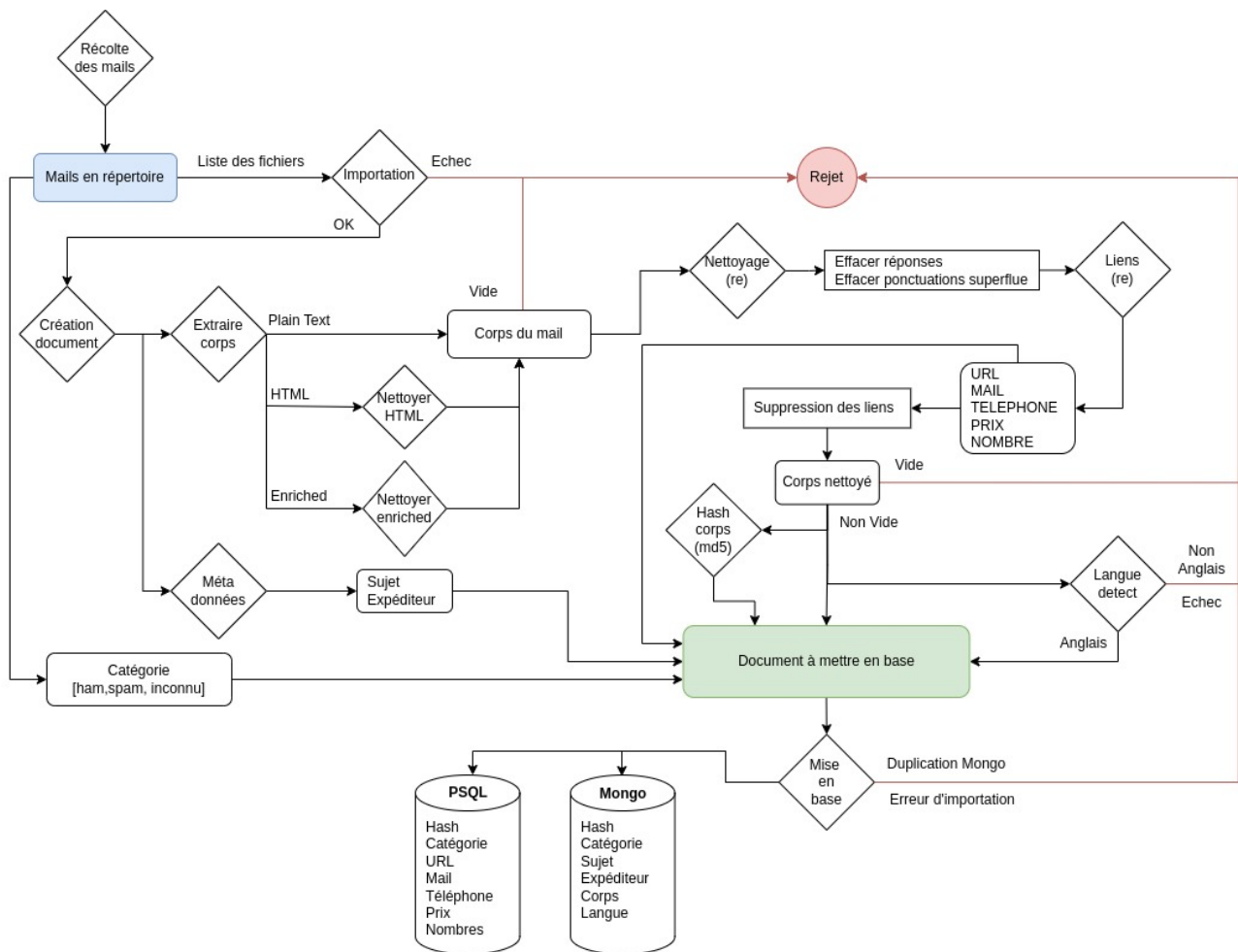


FIGURE 3 – Schéma des étapes de la phase 1

#### 1.2.1 Importation

La fonction `email.message_from_binary_file` permet de transformer un fichier mail en objet python manipulable :

Fonction d'importation des fichiers

```
1 def load_mail(file):
2     with open(file, 'rb') as f_bin:
3         return email.message_from_binary_file(f_bin)
4
```

#### 1.2.2 Extraction du corps des mails

Une fois le fichier importé au format `EmailMessage`, il est possible d'en extraire le corps. Le corps du mail peut être composé de plusieurs parties qui ne sont pas forcément du texte. Les parties non textuelles ne sont pas conservées.

Extraction du corps du mail

```
1 def extract_body(msg):
2     refused_charset = ['unknown-8bit', 'default', 'default_charset',
```

```

3             'gb2312_charset', 'chinesebig5', 'big5']
4     body = ""
5
6     if msg.is_multipart():
7         for part in msg.walk():
8             if not part.is_multipart():
9                 body += extract_body(part)
10            return body
11
12    if msg.get_content_maintype() != 'text':
13        return ""
14
15    if msg.get_content_charset() in refused_charset:
16        return ""
17
18    if msg.get_content_subtype() == 'plain':
19        payload = msg.get_payload(decode=True)
20        body += payload.decode(errors='ignore')
21
22    if msg.get_content_subtype() == 'html':
23        payload = msg.get_payload(decode=True)
24        body += nettoyage.clear_html(payload.decode(errors='ignore'))
25
26    if msg.get_content_subtype() == 'enriched':
27        payload = msg.get_payload(decode=True)
28        body += nettoyage.clear_enriched(payload.decode(errors='ignore'))
29
30    return body
31

```

---

### 1.2.3 Nettoyage

Le nettoyage du texte utilise principalement les expressions régulières pour retirer un maximum d'éléments indésirables dans le texte. J'utilise également 2 modules externes afin de traiter le code HTML et faire la détection des mails qui ne sont pas écrits en anglais.

**Par regex** J'utilise le module python *re* pour réaliser les traitements suivants :

**Suppression des réponses** Lorsque l'on répond à un mail, le texte du message précédent est conservé dans le corps du mail. Pour permettre la distinction avec les mails précédant le caractère > est ajouté en début de ligne. Je retire toutes les lignes correspondant à des réponses afin de limiter les doublons dans les textes.

---

#### Nettoyage des réponses

---

```

1 def clear_reply(texte):
2     pattern = re.compile('^>.*$', flags=re.MULTILINE)
3     return re.sub(pattern, '', texte)
4

```

---





**Suppression des nombres** Comme pour les liens, les nombres sont comptabilisés et retirés. Je fais la distinction entre les nombres seuls et les nombres accompagnés de sigle monétaires.

MONNAIE = '\$£€'

#### Nettoyage des nombres

```
1 pattern_prix1 = re.compile(f'[{MONNAIE}]( )?\d+([. ,]\d+)? ', flags=re.  
    MULTILINE)  
2 pattern_prix2 = re.compile(f' \d+([. ,]\d+)?( )?[MONNAIE]', flags=re.  
    MULTILINE)  
3 pattern_nb = re.compile('\d+')  
4  
5 def change_nombres(texte, liens):  
6     temp, liens['PRIX'] = re.subn(pattern_prix1, '', texte)  
7     temp, nb = re.subn(pattern_prix2, '', temp)  
8     liens['PRIX'] += nb  
9  
10    temp, liens['NOMBRE'] = re.subn(pattern_nb, '', temp)  
11  
12    return temp  
13
```

**Par module** Lors du processus de nettoyage, j'utilise deux modules externes plus performants que ce que j'aurais pu faire simplement avec des expressions régulières. L'un me permet de nettoyer le code HTML, l'autre de détecter la langue du message.

**Suppression du code HTML** Certaines parties du corps du mail sont de type HTML. J'utilise le module *BeautifulSoup* pour parser le code et récupérer le texte affiché.

#### Nettoyage des nombres

```
1 from bs4 import BeautifulSoup  
2  
3 def clear_html(texte):  
4     brut = BeautifulSoup(texte, "lxml").text  
5     return brut  
6
```

Au cours du traitement avec ce module, j'ai eu une mise en garde.

MarkupResemblesLocatorWarning - The input looks more like a filename than markup.  
You may want to open this file and pass the filehandle into BeautifulSoup

Après analyse, il semblerait que ce message soit levé dans le cas où le module ne parvient pas à détecter et à récupérer le code html. Dans le mail concerné (*spamassassin/spam/00307.7ed50c6d80c6e37c8cc1b132f4a19e4d*) la partie marquée comme HTML est également encodée en base64.

```
-----=_NextPart_7HZmySBWvSemNjin8Kg9YAA  
Content-Type: text/html;  
    charset="big5"
```

PGH0bWwgeG1sbnM6dj0idXJuOnNjaGVtYXMtbWljcm9zb2Z0LWNvbTp2bWwiDQp4bWxuczpvPSJ1  
cm46c2NoZWlhcyytaWNYb3NvZnQtY29tOm9mZmljZTpvZmZpY2UiDQp4bWxuczp3PSJ1cm46c2No  
ZWlhcyytaWNYb3NvZnQtY29tOm9mZmljZTpw3b3JkIG0KeG1sbnM9Imh0dHA6Ly93d3cudzMub3Jn  
L1RSLS1JFQy1odG1sNDAlPiG0KDQo8aGVhZD4NCjxtZXRhIGh0dHA6Ly93d3cudzMub3JnL1RSLS1JFQy-  
IGNvb3RlbnQ9InRleHQvaHRtbDsGY2hhcnNldD1CaWc1Ij4NCjxtZXRhIG5hbWU9UHJvZ0lkIGNv

...

Je conserve dans les données à mettre en base le langage détecté avec l'idée de pouvoir traiter plusieurs langues dans le futur.

## Création d'un document

10

**Exemple de traitement** La section suivante montre des exemples de traitement de la phase 1.

#### Traitement initial

---

```
1 message = '''
2 Message dedicated to be a sample to show how the process is clearing the
   text.
3
4 Begin reply :
5 > He once said
6 >>> that it would be great
7 End of reply.
8
9 Substitutions :
10 spamassassin-talk@example.sourceforge.net
11 https://www.inphonic.com/r.asp?r=sourceforge1&refcode1=vs3390
12 hello.foo.bar
13 between $ 25 and 25,21 $
14
15 A number is : 2588,8 588
16 Phone type a : (359)1234-1000
17 Phone type b : +34 936 00 23 23
18 Punctuation : ——## ..
19 ~~~~~~
20 '''
21 text, liens = clear_texte_init(message)
22 print(liens)
23 print(text)
24
```

---

Résultat traitement initial :

```
{'URL': 2, 'MAIL': 1, 'TEL': 2, 'NOMBRE': 3, 'PRIX': 2}
```

Message dedicated to be a sample to show how the process is clearing the text.

Begin reply

End of reply.

Substitutions

between and

A number is ,

Phone type a

Phone type b

Punctuation ..

## Traitement HTML

---

```
1 message_html = '''
2 <!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD HTML 4.01 Transitional//EN">
3 <html>
4 <head>
5   <title>Foobar</title>
6 </head>
7 <body>
8   I actually thought of this kind of active chat at AOL
9   bringing up ads based on what was being discussed and
10  other features
11   <pre wrap="">On 10/2/02 12:00 PM, "Mr. FoRK"
12   <a class="moz-txt-link-/rfc2396E" href="mailto:fork_
13   list@hotmail.com">&lt;fork_list@hotmail.com&gt;</a>
14   wrote: Hello There, General Kenobi !?
15 <br>
16 </body>
17 </html>
18 '''
19 print(clear_html(message_html))
20
```

---

Résultat traitement HTML :

Foobar

I actually thought of this kind of active chat at AOL  
bringing up ads based on what was being discussed and  
other features

On 10/2/02 12:00 PM, "Mr. FoRK"

<fork\_list@hotmail.com>

wrote: Hello There, General Kenobi !?

## Traitement enriched text

---

```
1 message_enriched = '''
2 <smaller>I'd like to swap with someone also using Simple DNS to take
3 advantage of the trusted zone file transfer option.</smaller>
4 '''
5 print(clear_enriched(message_enriched))
6
```

---

Résultat traitement enriched text :

I'd like to swap with someone also using Simple DNS to take  
advantage of the trusted zone file transfer option.

### 1.3 Mise en base

La mise en base et le dernier traitement de cette phase. Les traitements précédents ont créé une liste de dictionnaires python contenant les valeurs à sauvegarder (document). Chaque document répond au schéma défini dans le tableau 1

Clé	Mongo	PSQL	Description
hash	<code>_id</code>	<code>messages(hash)</code>	signature md5 du corp
categorie	<code>categorie</code>	<code>categories(nom)</code>	ham, spam, inconnu
sujet	<code>sujet</code>		sujet du mail
expediteur	<code>expediteur</code>		source du mail
message	<code>message</code>		corps du mail
langue	<code>langue</code>		en
liens['URL']		<code>liens(url)</code>	nombre d'url
liens['MAIL']		<code>liens(mail)</code>	nombre d'adresses mail
liens['TEL']		<code>liens(tel)</code>	nombre de numéros de téléphone
liens['PRIX']		<code>liens(prix)</code>	nombre de références à des prix
liens['NOMBRE']		<code>liens(nombre)</code>	nombre d'apparitions de nombres

TABLE 1 – Mapping des clés python avec les bases de données

La valeur du hash va permettre d'exclure les doublons qui ont déjà été insérés dans les bases MongoDB et PSQL. Cette valeur va également permettre de faire la liaison entre les données des différentes bases.

Le schéma 4 illustre l'état des relations entre les bases de données PSQL et Mongo.

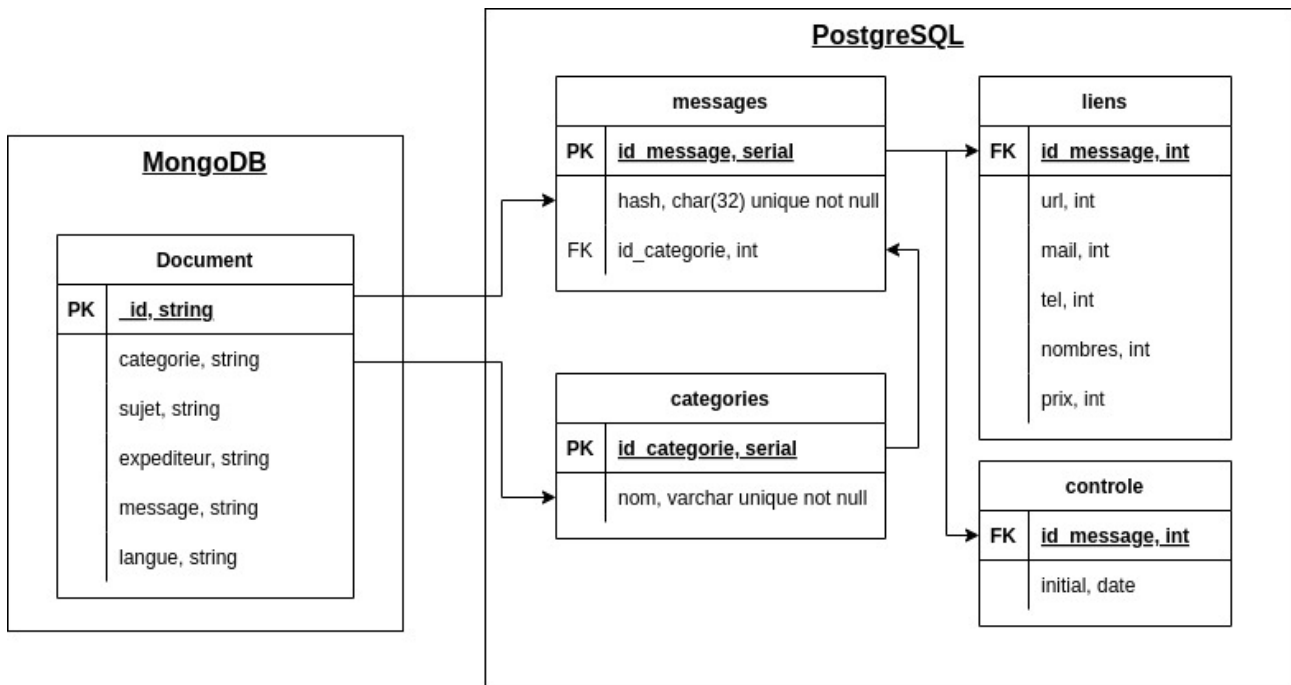


FIGURE 4 – Relation entre les bases de données

**Wrapper en python** La communication entre le programme et les bases de données se fait au moyen des modules suivants :

- MongoDB - pymongo (bibliothèque officielle maintenue par mongoDB)

- PSQL - psycopg2 (bibliothèque open-source), utilisée pour les requêtes simples
- PSQL - sqlalchemy (bibliothèque open-source), utilisée pour les requêtes complexes
- SQLite - sqlite3 (bibliothèque standard de python)

Des modules internes au programme ont été développés pour simplifier l'utilisation des modules d'interaction avec les bases de données. Les packages `cmd_mongo.py`, `cmd_psql.py`, `cmd_sqlite.py` regroupent les fonctions qui sont utilisées pour les interactions entre le programme et les bases respectives.

**Problèmes éventuels** Lors de l'insertion les cas suivants sont susceptibles d'arriver si les deux bases n'ont pas été correctement nettoyées.

Situation	Raison	Solution
Mail présent dans Mongo et absent dans PSQL	Échec d'insertion dans la base PSQL	Supprimer l'entrée dans la base Mongo et relancer le traitement pour ce mail
Mail présent dans PSQL et absent dans Mongo	Suppression du mail dans la base Mongo	Supprimer le mail et toutes ses références dans la base PSQL et relancer le traitement de ce mail

TABLE 2 – Problèmes possibles avec la mise en base

**Stockage des données statistiques du traitement - SQLite** Les données présentes dans cette base permettent de suivre l'évolution de certaines métriques lors des différentes étapes du nettoyage. Lors de chaque étape de la phase 1 (Récolte, Création des documents, Mise en base), je calcule pour les HAM, SPAM et (HAM+SPAM) les éléments suivants :

- mails - nombre de mails
- mots - nombre de mots dans tout le corpus
- mots\_uniques - nombre de mots uniques dans tout le corpus

Ces données me permettent d'estimer la quantité de données nettoyées durant cette phase.

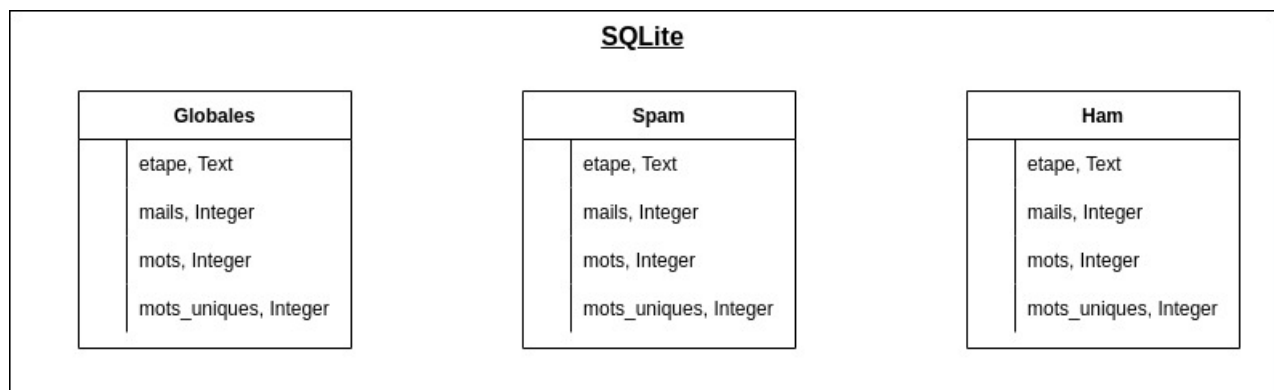


FIGURE 5 – Schéma de la base de données pour lors du traitement

## Analyse

L'exécution du programme donne les informations présentées dans le tableau 3.

La figure 6 montre un aperçu des données statistiques récoltées durant cette première phase. Les 3 premiers graphiques montrent l'évolution du nombre de documents, de mots et de mots

TABLE 3 – Données statistiques de la fouille

categorie etape	mails			mots			mots_uniques		
	globales	spam	ham	globales	spam	ham	globales	spam	ham
récolte	5798	1897	3901	2385120	916756	1468364	262614	129090	133524
création	5658	1784	3874	1222793	589119	633674	99772	40615	59157
mise_en_base	5333	1528	3805	1163550	533441	630109	99772	40615	59157

uniques en fonction des étapes intermédiaires.

Cette visualisation permet de faire les observations suivantes :

- La diminution des documents spam est plus importante que celle des ham
- Le nombre de mots uniques ne diminue plus après la création de document
- La diminution du nombre de mots est plus importante dans les ham que dans les spam
- Le nombre de mots uniques est plus important dans les ham que dans les spam

Après la phase de récolte, on remarque qu'il y a un nombre plus important de document en double dans la catégorie *spam*. Il y a également une réduction importante du nombre de mots ainsi que du nombre de mots uniques dans les *ham*. Cette réduction peut s'expliquer par le nettoyage du corps des mails :

- Retrait des réponses
- Retrait de certaines ponctuations
- Suppression des balises HTML et enriched text
- Retrait des liens, et nombres

Enfin, on peut voir que les *ham* utilisent plus de mots uniques que les *spam*. Il est donc possible que le vocabulaire des *spam* soit plus restreint.

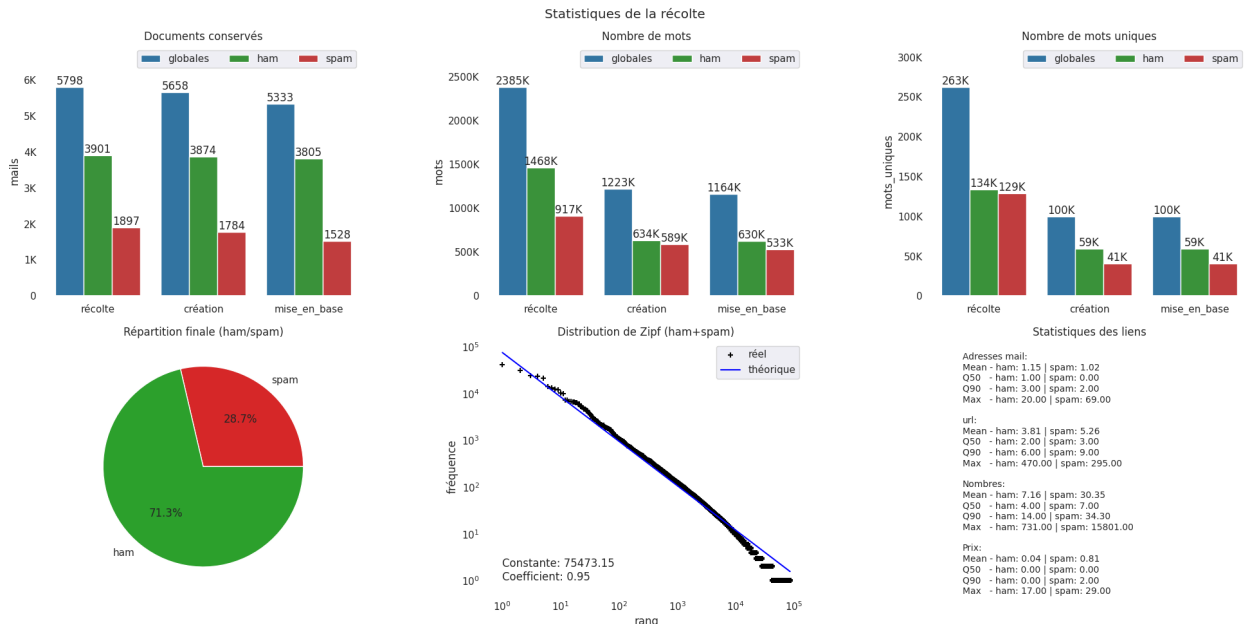


FIGURE 6 – Tableau de bord de la fouille

À l'issue de ces traitements, la proportion dans notre dataset ham/spam est d'environ 70/30. On voit aussi que la distribution du Zipf est globalement respectée. Il est ainsi fortement probable que notre dataset respecte les caractéristiques linguistiques naturelles.

L'extraction des liens et des informations numériques donne les statistiques du tableau 4. Les données statistiques sur les liens ne permettent pas mettre en avant une différence franche dans l'utilisation de ces éléments dans les catégories observées. Seul la présence de nombres ou d'URL seraient éventuellement susceptible d'apporter une aide à la catégorisation.

TABLE 4 – Statistiques sur les liens et informations numériques

	categorie	ham	spam
url	mean	3.81	5.26
	q50	2.0	3.0
	q90	6.0	9.0
	max	470.0	295.0
mail	mean	1.15	1.02
	q50	1.0	0.0
	q90	3.0	2.0
	max	20.0	69.0
tel	mean	0.21	0.06
	q50	0.0	0.0
	q90	1.0	0.0
	max	25.0	67.0
nombre	mean	7.16	30.35
	q50	4.0	7.0
	q90	14.0	34.3
	max	731.0	15801.0
prix	mean	0.04	0.81
	q50	0.0	0.0
	q90	0.0	2.0
	max	17.0	29.0

## Choix techniques

**Langage de programmation** Python a été choisi pour développer ce programme pour les raisons énoncées ci-dessous :

- Large choix de modules, dont plusieurs spécialisés dans le traitement de données
- Langage simple et flexible
- Facilement portable et executable avec la fourniture des environnements virtuel

**Métriques** L'utilisation du nombre de documents, de mots et de mots uniques pour mesurer la performance de cette phase a été commandée par le cours. Il n'y a pas eu de difficultés majeures sur cette partie. Ces données ne sont pas conservées au fur et à mesure des diverses importations. Je n'ai pas jugé pertinent de les employer lors des traitements futurs.

La recherche des apparitions d'adresse mail, de liens url, de numéros de téléphone, de prix et de nombres est une idée personnelle. Je voulais voir si ces éléments étaient susceptible d'être discriminant pour la classification. Les résultats ne sont pas aussi marqués que je ne l'aurais cru. Je pense qu'il aurait été possible d'améliorer la justesse de ces données en travaillant sur plus de cas possible. Ou en analysant plus en profondeur les substitutions effectuées notamment sur les nombres.

Cela étant la substitution et effacement de ces éléments dans le corps de texte peut répondre à une nécessité d'anonymisation. De plus la suppression des liens URL évite de conserver et de



rendre accessible des liens potentiellement frauduleux.

Le développement du code pour la distribution de ZIPF a été réalisée suite à une discussion avec le professeur. Initialement, je souhaitais également tester cette distribution sur chaque message individuellement. Mais la quantité de mots par message n'est peut-être pas suffisant pour obtenir des résultats probants. J'ai dû me renseigner beaucoup pour arriver à comprendre l'équation sous-jacente et comment je pouvais la coder de manière efficace et visuelle. Vous pouvez voir le résultat de ce travail dans l'annexe A.

## Exemple de commandes pour exécuter la fouille

```
$ make venv
$ make docker_start
cd ./src/infra/; docker compose up -d; cd -
[+] Running 3/3
    Network infra_default    Created
    Container infra-mongo-1  Started
    Container infra-pgdb-1   Started

$ source .venv/bin/activate
(.venv)$ ./errol.py fouille -g \
    -a ./project_data/spamassassin/easy_ham \
    ./project_data/spamassassin/easy_ham_2 \
    -p ./project_data/spamassassin/spam \
    ./project_data/spamassassin/spam_2
```

Il est possible d'accéder aux bases de données avec les commandes suivantes :

```
$ sqlite3 project_database/sqlite/metrics.db
$ psql -h localhost -p 5432 errol psql_errol
$ mongosh -u mongo_errol -p <MOT DE PASSE> errol
```

## **2 Ingénierie des langues**

### **2.1 Recherche des caractéristiques**

Les opérations de cette phase ont pour but d'extraire les caractéristiques des textes collectés à la phase précédente. Nous allons rechercher des informations numériques sur la forme des messages comme le nombre de mots, de ponctuations, ...

Enfin, nous appliquerons des techniques de traitement du langage naturel pour travailler sur le fond des corps de mail.

#### **2.1.1 Informations statistiques**

### **2.2 Traitement du langage**

#### **2.2.1 Lemmatisation**

#### **2.2.2 Vectorisation**

## **3 Modélisation**

### **3.1 Entraînements**

### **3.2 Validation**

## Conclusion

## A Développement visualisation distribution de Zipf

**Présentation** La loi de distribution de Zipf est une loi empirique (basée sur l'observation) qui veut que le mot le plus fréquent est, à peu de chose près, 2 fois plus fréquent que le 2<sup>ème</sup>, 3 fois plus fréquent que le 3<sup>ème</sup> etc.

La formulation finale de la 1<sup>ère</sup> loi de Zipf est la suivante :

$$|mot| = constante \times rang(mot)^{k \approx 1}$$

avec  $|mot|$  la fréquence d'apparition d'un mot, *constante* une valeur propre à chaque texte,  $rang(mot)$  la place du mot dans le tri décroissant par fréquence d'apparition et  $k$  un coefficient proche de 1.

**Développement** Afin de pouvoir utiliser les résultats de cette distribution dans ce projet, j'ai développé un ensemble de fonctions sur un corpus "*reconnu*". Mon choix s'est porté sur le corpus *Brown* (voir D.1) présent dans la librairie *nltk*. Ce corpus contient environ 500 documents contenant 1 millions de mot en anglais.

Le processus d'analyse se fait sur 2 versions de ce corpus.

— la première version contient tous les mots sans modifications

— la seconde version contient tous les mots sans les *stopwords*

Les *stopwords* sont des mots qui n'ont pas ou peu de signification dans un texte. Ces mots sont retirés dans la 2<sup>e</sup> version pour voir l'effet d'une réduction sur la distribution de Zipf.

Les paragraphes ci-dessous détaillent les étapes du développement :

**Étape 1 - Ordonner les mots** La première étape est de compter les occurrences de tous les mots des 2 corpus et de les ranger en fonction de leur nombre d'occurrence.

### Triage des mots

```
1 def frequence_mot(bag, freq=None):
2     """
3     Calcule la frequence de chaque mot dans un sac de mot
4     :param bag: <list> — liste de tous les mots d'un texte
5     :param freq: <dict> — dictionnaire avec {<str> mot: <int> frequence}
6     :return: <dict> — dictionnaire avec la frequence par mot {mot:
7     frequence}
8     """
9     if freq is None:
10         freq = {}
11     for mot in bag:
12         freq[mot] = freq.get(mot, 0) + 1
13     return freq
14
15 def classement_zipf(dico):
16     """
17     Trie un dictionnaire de mots : occurrence et leur assigne un rang en
18     fonction du nombre d'occurrence
19     :param dico: <dict> dictionnaire de mot: occurrences
20     :return: <list> {"rang": <int>, "mot": <str>, "frequence": <int>}
```

```

19     """
20     ranked = []
21     for rang, couple in enumerate(sorted(dico.items(), key=lambda item:
22     item[1], reverse=True), start=1):
23         ranked.append({"rang": rang,
24                         "mot": couple[0],
25                         "frequence": couple[1]})
26     return ranked

```

On obtient les représentations suivantes :

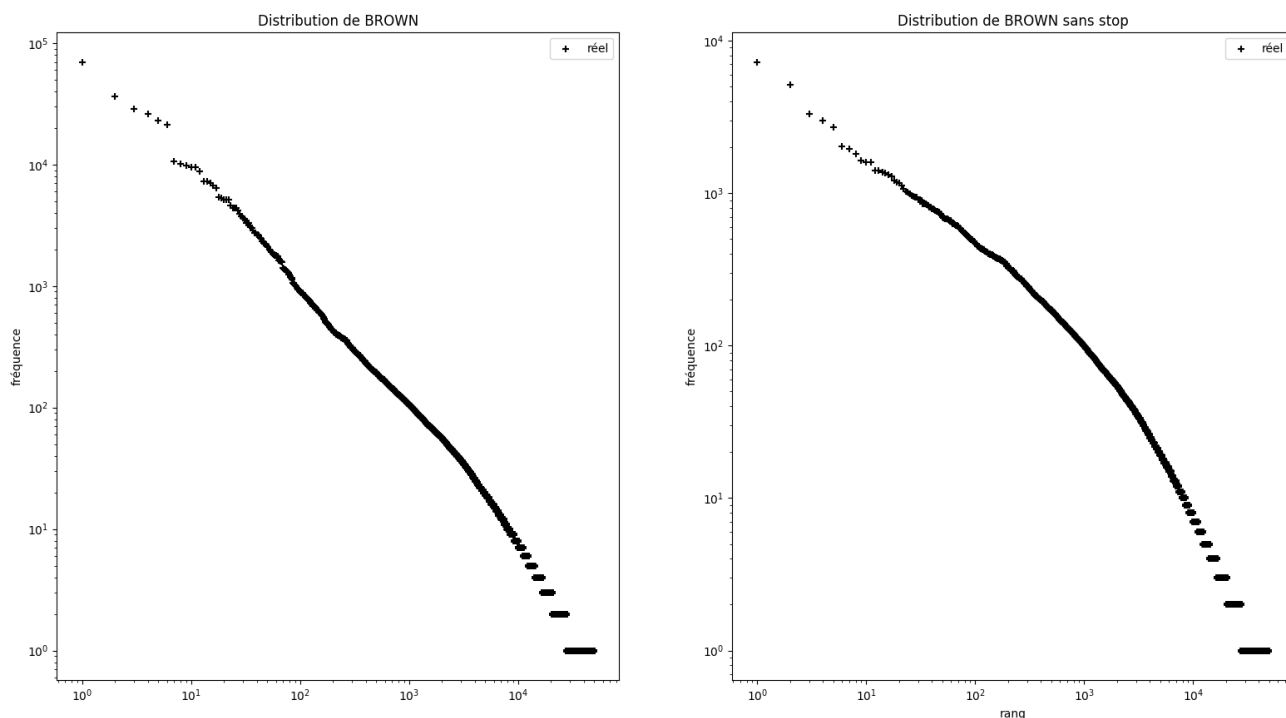


FIGURE 7 – Distribution de Zipf pour les deux corpus

- Nombre de mots dans brown : mots : 49398 occurrences : 1012528
- Nombre de mots dans brown stop : mots : 49383 occurrences : 578837

La distribution de la version complète du corpus semble à première vue plus fidèle à la représentation classique de la distribution de Zipf.

**Etape 2 - calcul de la constante** Le premier paramètre qu'il faut déterminer est la *constante*. Pour ce faire j'effectue le calcul suivant pour tous les mots :

$$constante = |mot| \times rang(mot)$$

On obtient une liste de toutes les constantes théoriques pour chaque mot selon son rang. De cette liste, nous allons extraire la moyenne et la médiane.

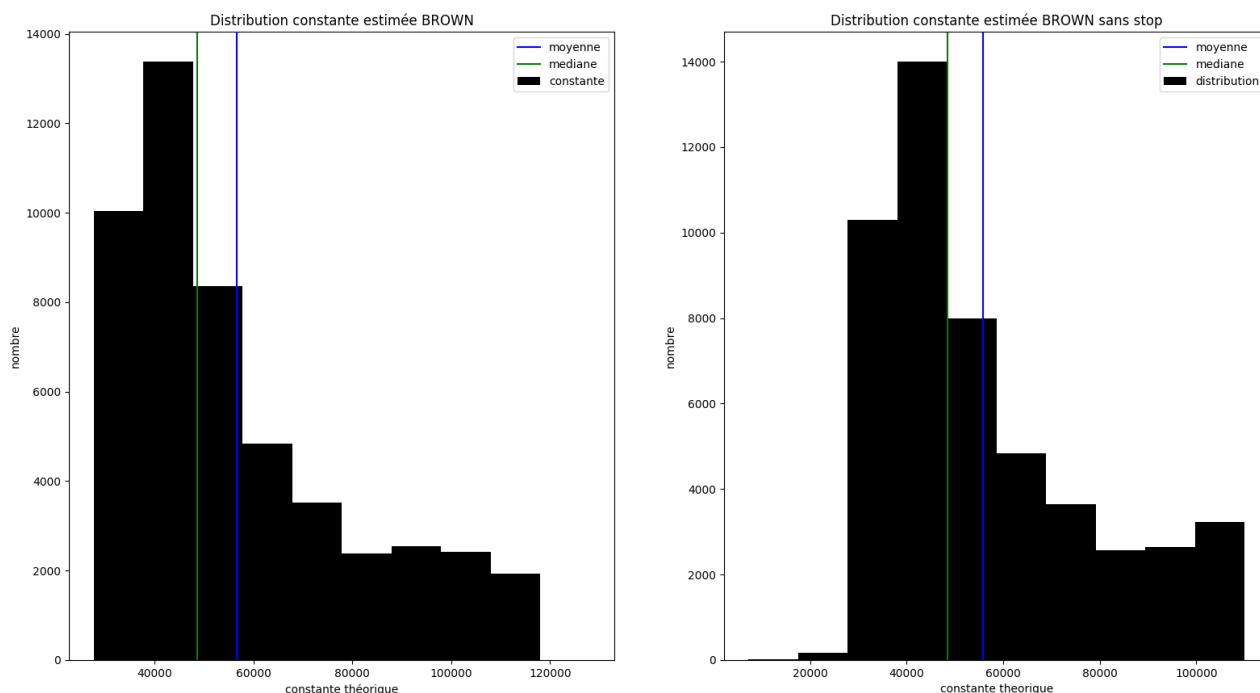


FIGURE 8 – Distribution des constantes théoriques pour les deux corpus

On voit qu'il y a une majorité de mots donnant une constante brute comprise entre 20.000 et 60.000. Dans les deux corpus La différence entre les moyennes et médianes des deux corpus n'est pas flagrante :

- Brown moyenne : 56525.81, médiane : 48601.50
- Brown (- stopwords) moyenne : 55809.97, médiane : 48494.00

**Etape 3 - recherche du coefficient** Le coefficient  $k$  permet d'ajuster le résultat, et pourra éventuellement donner une indication de complexité. La recherche de  $k$  se fera sur les deux corpus avec utilisant les moyennes et médianes.

Pour ce faire nous allons :

1. Faire la liste de tous les coefficients possibles dans l'intervalle  $[0.86, 1.3]$  avec un pas de  $0.01$ <sup>1</sup>.
2. Calculer toutes la fréquences théoriques de tous les rangs avec tous les coefficients possibles en utilisant les constantes moyenne et médiane de chaque corpus.
3. Calculer la moyenne des coûts absolus entre les fréquences théoriques par coefficient avec la fréquence réelle observée pour chaque corpus.

Le couple coefficient/constante avec le coup minimal sera retenu pour l'utilisation dans la phase de *feature engineering*.

#### Fonctions utilisées dans la recherche du coefficient

```

1 def zipf_freq_theorique(constante, rang, coef):
2     """
3     Calcul la frequence theorique d'un mot selon son rang, la constante du
    texte et un coeficiant d'ajustement

```

1. les bornes et le pas sont totalement arbitraire afin d'obtenir un graphique présentable



```

4      :param constante: <int> constante determinee par la distribution de
      Zipf
5      :param rang: <int> rang du mot selon sa frequence
6      :param coef: <float> variable d'ajustement
7      :return: <float> frequence theorique zipfienne
8      """
9      return constante / (rang ** coef)
10
11 def cout(l1, l2, methode):
12     """
13     Calcul le cout de l'ecart entre les elements de l1 et le l2, place par
14     place
15     :param l1: <list> liste d'entier
16     :param l2: <liste> liste d'entier
17     :param methode: <str> methode de calcul du cout
18     :return: <float> cout selon methode
19     """
20     if len(l1) != len(l2):
21         print("Erreur, fonction cout: l1 & l2 de taille differente", file=
22 sys.stderr)
23         return None
24
25     if len(l1) == 0:
26         print("Erreur, fonction cout: liste vide", file=sys.stderr)
27
28     if methode.lower() not in ['absolue', 'carre', 'racine']:
29         print("Erreur, fonction cout - methode '{}' inconnue".format(
30 methode), file=sys.stderr)
31         return None
32
33     if methode.lower() == 'absolue':
34         return np.mean([abs(x-y) for x, y in zip(l1, l2)])
35
36     if methode.lower() == 'carre':
37         return np.mean([(x-y)**2 for x, y in zip(l1, l2)])
38
39     if methode.lower() == 'racine':
40         return np.sqrt(np.mean([(x-y)**2 for x, y in zip(l1, l2)]))
41
42     return None

```

---

#### Calcul des fréquences par coefficient

---

```

1     ls_coef = list(np.arange(0.86, 1.3, 0.01))
2     zbmo_th = {coef: [stats.zipf_freq_theorique(zb_const_moyen, r, coef)
3 for r in zb_rang] for coef in ls_coef}
4     zbme_th = {coef: [stats.zipf_freq_theorique(zb_const_median, r, coef)
5 for r in zb_rang] for coef in ls_coef}
6     zbmoth_cmoy = [stats.cout(zb_freq, zbmo_th[coef], 'absolue') for coef
7 in ls_coef]
8     zbmeth_cmoy = [stats.cout(zb_freq, zbme_th[coef], 'absolue') for coef
9 in ls_coef]
10
11     zbsmo_th = {coef: [stats.zipf_freq_theorique(zbs_const_moyen, r, coef)

```

```

    for r in zbs_rang] for coef in ls_coef}
8   zbsme_th = {coef: [stats.zipf_freq_theorique(zbs_const_median, r, coef
) for r in zbs_rang] for coef in ls_coef}
9   zbsmoth_cmoy = [stats.cout(zbs_freq, zbsmo_th[coef], 'absolue') for
coef in ls_coef]
10  zbsmeth_cmoy = [stats.cout(zbs_freq, zbsme_th[coef], 'absolue') for
coef in ls_coef]

```

La recherche du coefficient nous retourne les éléments suivants :

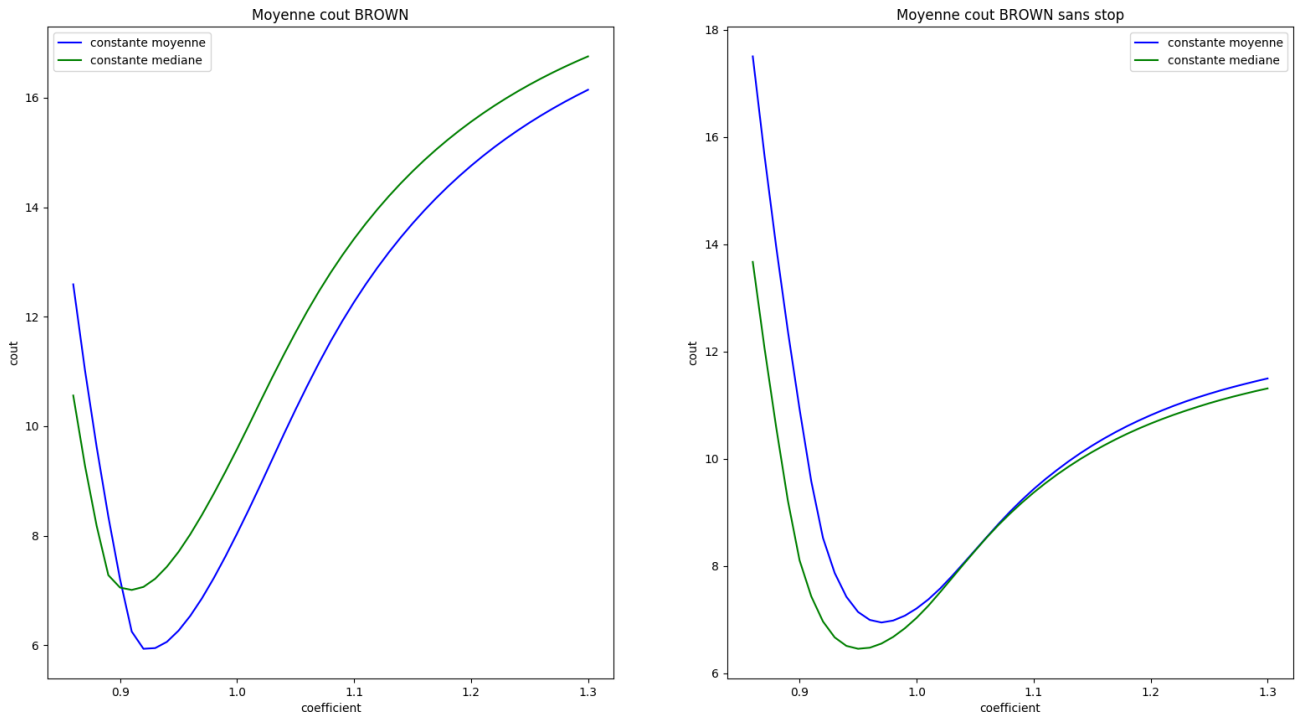


FIGURE 9 – Coût absolu moyen par coefficient

- Coût min brown moyenne : 5.93, median : 7.01
- Coût min brown (- stopwords) moyenne : 6.95, median : 6.46
- Coefficient min brown moyenne : 0.92, median : 0.91
- Coefficient min brown (- stopwords) moyenne : 0.97, median : 0.95

**Résultats** Le tableaux ci dessous rappelle les données récupérées au long de la recherche :

	BROWN avec stopwords	BROWN sans stopwords
nombre de mots uniques	49398	49383
nombre de mots total	1012528	578837
Constante moyenne	56525.81	55809.97
Constante médiane	48601.50	48494.00
Coefficient avec moyenne	0.92	0.97
Cout du coefficient moyenne	5.93	6.95
Coefficient avec médiane	0.91	0.95
Cout du coefficient médiane	7.01	6.46

D'après les données il est possible de dire que l'on obtient de meilleurs résultats si on conserve tous les mots du corpus. Dans ce cas l'utilisation de la moyenne des constantes génère un taux d'erreur plus faible que la médiane.

Ci-dessous la représentation des fréquences théoriques avec le coefficient optimal pour chaque corpus et chaque méthode. On voit que la courbe de la constante moyenne sur le corpus brute est celle qui suit le mieux les données réelles.

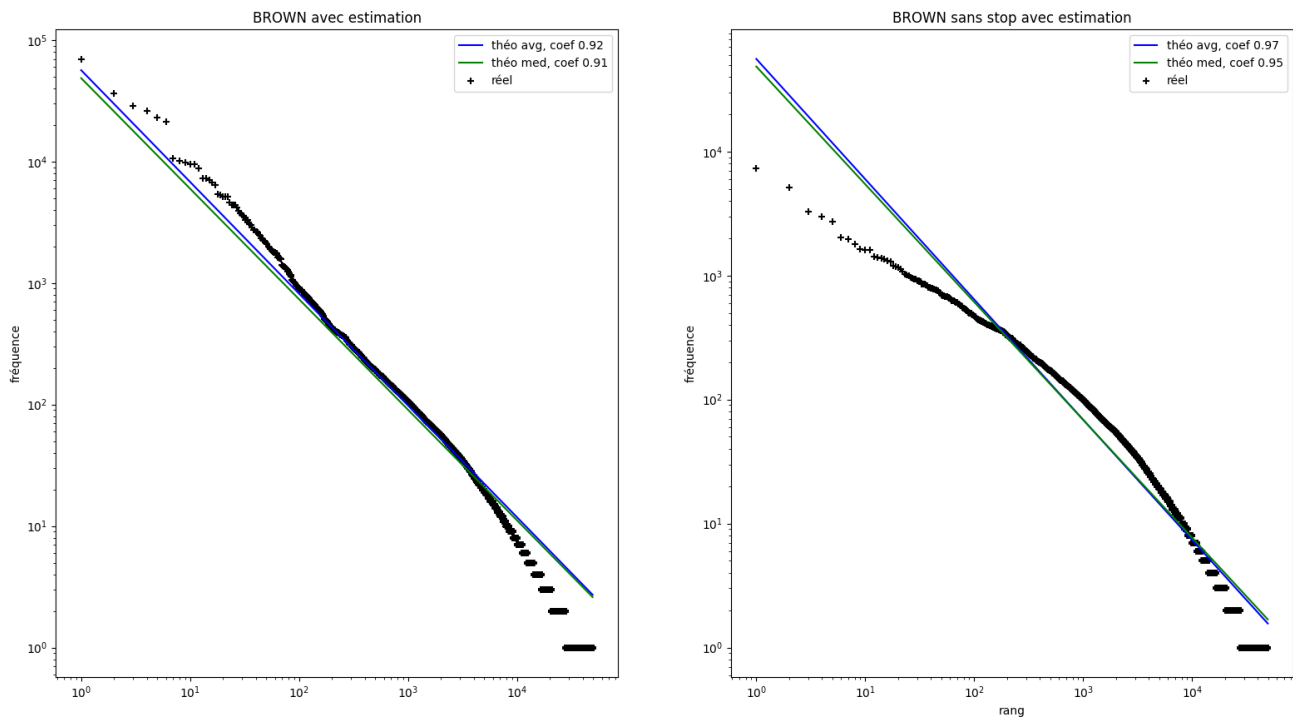


FIGURE 10 – Distribution de Zipf avec les estimations

En conclusion, j'utiliserais la moyenne des constantes sur un document complet afin de déterminer le coefficient dans ma recherche de spam.

## B Modèles

### B.1 Naïves Bayes

Ce type de modèle est utilisé par le module *langdetect* qui me sert pour la détection des langues.

**Introduction** Les modèles Naïves Bayes se basent sur le théorème de probabilité de Bayes. Il permet de déterminer la probabilité conditionnelle d'apparition d'un événement A sachant qu'un événement B s'est produit. Le terme naïf fait référence au fait que l'on présuppose que les événements A et B ne sont pas corrélés.

Ces techniques sont utilisées pour des modèles de classification en apprentissage supervisé.

La formule mathématique de ce théorème est la suivante :

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

On recherche ici  $P(A|B)$ , c'est à dire la probabilité d'apparition d'un événement A sachant que l'évènement B s'est produit.

Pour ce faire nous avons besoin des données suivantes :

- $P(B|A)$  est la probabilité que l'évènement B s'est produit sachant que l'évènement A s'est produit
- $P(A)$  est la probabilité d'apparition de l'évènement A
- $P(B)$  est la probabilité d'apparition de l'évènement B

**Exemples d'utilisation** Les exemples ci dessous vont permettre d'illustrer l'utilisation de cette technique. D'abord manuellement sur un petit jeu de données puis à l'aide d'un code pré-existant sur un autre jeu de données plus important.

**Manuel** Dans cet exemple nous allons déterminer la probabilité qu'a un joueur d'aller sur le terrain selon les conditions météorologiques. Cette probabilité sera calculée en fonction des données récupérées lors des matchs précédents.<sup>2</sup>

On recherchera ainsi la probabilité de présence sur le terrain d'un joueur selon la météo  $P(A|B)$ . Pour ce faire nous auront besoin de :

- $P(A)$  Probabilité de jouer quelque soit le temps
- $P(B)$  Probabilité de l'évènement météorologique
- $P(B|A)$  Probabilité de l'évènement sachant que le joueur a été sur le terrain

TABLE 5 – Données de présence sur le terrain

météo	soleil	soleil	couvert	pluie	pluie	pluie	couvert
présent	non	non	oui	oui	oui	non	oui
météo	soleil	soleil	pluie	soleil	couvert	couvert	pluie
présent	non	oui	oui	oui	oui	oui	non

---

2. Les données présentées sont inventées

TABLE 6 – Synthèse et probabilité simple  $P(A)$  et  $P(B)$ 

météo	oui	non	$P(B)$
couvert	4	0	$4/14$
soleil	2	3	$5/14$
pluie	3	2	$5/14$
$P(A)$	$9/14$	$5/14$	

On peut déterminer les probabilités de chaque météo en fonction de la présence du joueur sur le terrain  $P(B|A)$ . Pour ce faire on divise le nombre d'évènements de présence du joueur lors d'un évènement météo par le nombre total d'évènements de présence du joueur

TABLE 7 – Probabilité météo selon présence du joueur

météo	$P(B oui)$	$P(B non)$
couvert	$4/9$	$0/5$
soleil	$2/9$	$3/5$
pluie	$3/9$	$2/5$

On va maintenant calculer la probabilité qu'à un joueur d'être sur le terrain si le temps est couvert.

On commence par la probabilité du oui :

$$\begin{aligned}
 P(A|B) &= \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \\
 P(A|B) &= \frac{\frac{4}{9} \cdot \frac{9}{14}}{\frac{4}{14}} \\
 P(A|B) &= \frac{\frac{4}{14}}{\frac{4}{14}} \\
 P(A|B) &= \frac{4}{14} \cdot \frac{14}{4} \\
 P(A|B) &= 1
 \end{aligned}$$

On enchaîne sur la probabilité de ne pas jouer si le temps est couvert

$$\begin{aligned}
 P(A|B) &= \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \\
 P(A|B) &= \frac{\frac{0}{5} \cdot \frac{5}{14}}{\frac{4}{14}} \\
 P(A|B) &= 0 \cdot \frac{14}{4} \\
 P(A|B) &= 0
 \end{aligned}$$

On peut dire que si le temps est couvert le joueur très probablement sur le terrain On peut également déterminer la probabilité de jouer pour chaque évènement météo

TABLE 8 – Probabilité présence du joueur selon la météo

météo	oui	non	plus probable
couvert	1	0	oui
soleil	$2/5$	$3/5$	non
pluie	$3/5$	$2/5$	oui

*Cas polynomial* : Il est possible de déterminer la probabilité d'un évènement par rapport à plus autres. Dans ce cas, il faudra multiplier entre elles les probabilités de ces évènements selon l'apparition de l'évènement voulu.

Calcul pour un évènement (A) selon 2 autres évènements (B et C)

$$P(A|BC) = \frac{P(B|A)P(C|A)P(A)}{P(B)P(C)}$$

**En code** Dans cet exemple nous allons utiliser un code existant dans la librairie python `scikit-learn`[1]. Ce moteur Naïves Bayes va nous permettre cette fois-ci de catégoriser des variétés d'iris selon la longueur et la largeur des pétales et des sépales. Les données proviennent cette fois-ci d'un dataset également disponible dans `scikit-learn`.

Nous allons utilisé le modèle *GaussianNB* de `scikit-learn` qui est adapté lorsque les données utilisées suivent une distribution normale. Ce qui semble être le cas pour les longueurs et largeur des sépale.

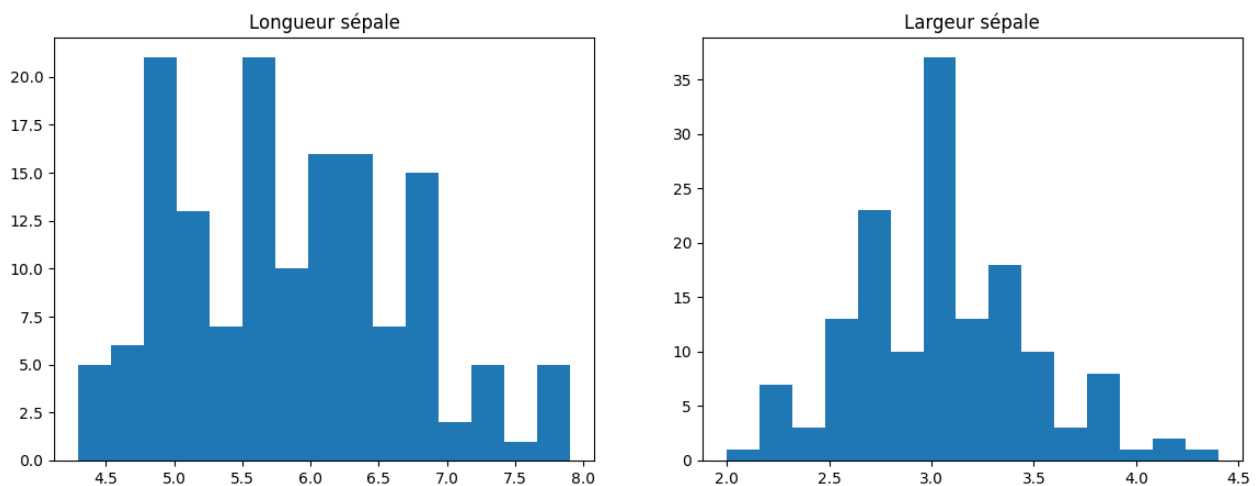


FIGURE 11 – Distribution des longueurs et largeurs des sépales

#### Progamme complet

```
1 from sklearn.datasets import load_iris
2 from sklearn.model_selection import train_test_split
3 from sklearn.naive_bayes import GaussianNB
4 from sklearn.metrics import accuracy_score, confusion_matrix,
   ConfusionMatrixDisplay, f1_score, \
5     recall_score
6
7 import matplotlib.pyplot as plt
8
9 X, y = load_iris(return_X_y=True)
10
11 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.33,
12     random_state=0)
13 model = GaussianNB()
14 model.fit(X_train, y_train)
15
16 y_pred = model.predict(X_test)
```

```

16 precision = accuracy_score(y_pred, y_test)
17 recall = recall_score(y_test, y_pred, average="weighted")
18 f1 = f1_score(y_pred, y_test, average="weighted")
19
20 print("Precision:", precision)
21 print("Rappel:", recall)
22 print("Score F1:", f1)
23
24 plt.figure('Donnees du modele', figsize=(14, 5))
25 plt.subplot(1, 3, 1, title='Donnees du train set')
26 plt.scatter(X_train[:, 0], X_train[:, 1], c=y_train)
27 plt.xlabel('Sepale long.')
28 plt.ylabel('Sepale larg.')
29 plt.subplot(1, 3, 2, title='Donnees du test set')
30 plt.scatter(X_test[:, 0], X_test[:, 1], c=y_test)
31 plt.xlabel('Sepale long.')
32 plt.subplot(1, 3, 3, title='Donnees test apres evaluation')
33 plt.scatter(X_test[:, 0], X_test[:, 1], c=y_pred)
34 plt.xlabel('Sepale long.')
35 plt.show()
36
37 cm = confusion_matrix(y_test, y_pred, labels=[0, 1, 2])
38 disp = ConfusionMatrixDisplay(confusion_matrix=cm, display_labels=[0, 1,
39                               2])
40 disp.ax_.set_title('Matrice de confusion')
41 disp.plot()
42 plt.show()
43
44 plt.figure('Distribution des donnees Iris', figsize=(14, 5))
45 plt.subplot(1, 2, 1, title='Longueur sepale')
46 plt.hist(X[:, 0], bins=15)
47 plt.subplot(1, 2, 2, title='Largeur sepale')
48 plt.hist(X[:, 1], bins=15)
49 plt.show()

```

---

Les données du dataset ont été séparés en 2 jeux, un pour l'entraînement du modèle et un pour le test. On obtient alors la représentation suivantes après entraînement et test du modèle

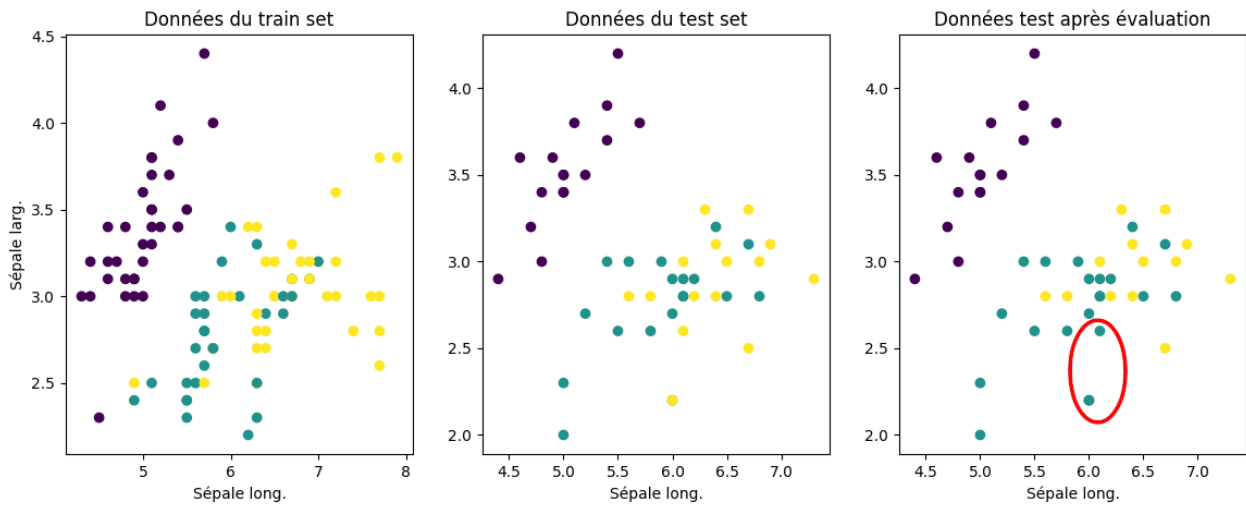


FIGURE 12 – Représentation des données

Dans les données de test nous avons 2 catégorisations qui n'ont pas été réalisées correctement. On obtient les scores suivants :

- Précision : 0.96<sup>3</sup>
- Rappel : 0.96<sup>4</sup>
- Score F1 : 0.9604285714285714<sup>5</sup>

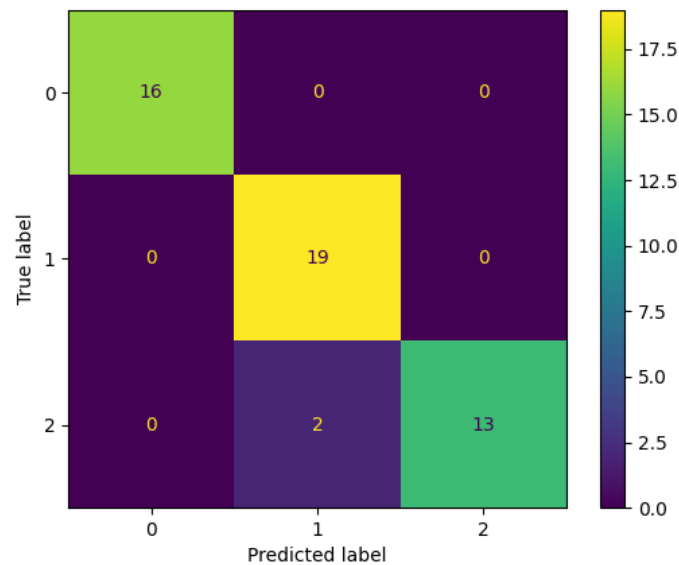


FIGURE 13 – Matrice de confusion

A l'aide de ce modèle nous devrions avoir une 96% de chance de déterminer la bonne variété d'iris en se basant sur la longueur et la largeur des sépales.

**Avantages et inconvénients** Le modèle Naïve Bayes est un modèle simple et rapide qui ne nécessite pas de grande capacités de calcul. De ce fait il permet de traiter une grande quantité

3. La précision est la proportion des éléments correctement identifiés sur l'ensemble des éléments prédit

4. Le rappel est la proportion des éléments correctement identifiés sur l'ensemble des éléments de la catégorie

5. Le Score F1 est la moyenne harmonique calculée de la manière suivante  $2 * (precision * rappel) / (precision + rappel)$



de données.

Cependant, les données qui lui sont fournies ne doivent pas être corrélées ce qui est rarement le cas dans les problèmes du monde réel. Ce type de modèle est limité à des problèmes de classification supervisée. Si on se fie à l'équation (1) la probabilité d'apparition de l'évènement  $B : P(B)$  ne peut pas être nulle.

## C Bibliographie

### Références

- [1] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay. Scikit-learn : Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12 :2825–2830, 2011.

## D Sitotec

### D.1 Corpus

- Enron company mails, fichier CSV contenant l'ensemble des mails d'une entreprise ayant fermée ses portes (33.834.245 mails) [en ligne], <https://www.kaggle.com/wcukierski/enron-email-dataset> (consulté le 27/01/2022)
- Mails project SpamAssassin, projet opensource de détection de spam (6065 fichiers email déjà trier en ham et spam) [en ligne], <https://spamassassin.apache.org/old/publiccorpus/> (consulté le 27/01/2022)
- Brown corpus, ensemble de texte en anglais publié en 1961 qui contient plus d'un million de mots <https://www.nltk.org/book/ch02.html> (consulté le 20/08/2022)

### D.2 Modules

- Page Github du projet *langdetect* capable de différencier 49 langages avec une précision de 99%, [en ligne] <https://github.com/Mimino666/langdetect> (consulté le 04/12/2022)
- Language Detection Library, présentation du module (anglais) [en ligne] <https://www.slideshare.net/shuyo/language-detection-library-for-java> (consulté le 04/12/2022)
- Suite de cours et de ressources en ligne pour comprendre MongoDB et réussi a faire la connexion avec un programme Python; [en ligne] <https://learn.mongodb.com/learning-paths/mongodb-python-developer-path> (consulté le 09/2023)
- Documentation de la librairie standard python sqlite [en ligne] <https://docs.python.org/3/library/sqlite3.html> (consulté le 09/2023)
- Documentation de la librairie pycopg2 [en ligne] <https://pypi.org/project/pycopg2/> (consulté le 09/2023)
- Documentation de la librairie sqlalchemy [en ligne] <https://docs.sqlalchemy.org/en/20/index.html> (consulté le 09/2023)

### D.3 Modèles

**Naïves Bayes** Le modèle Naïves Bayes est employé dans le module *langdetect* (D.2)

- Les algorithmes de Naïves Bayes, Explication sommaire du principe de ces type d'algorithme, [en ligne] <https://brightcape.co/les-algorithmes-de-naives-bayes/> (consulté le 26/03/2023)
- Naive Bayes Classification Tutorial using Scikit-learn, exemple d'utilisation de ce type de modèle avec python (anglais) [en ligne] <https://www.datacamp.com/tutorial/naive-bayes-scik> (consulté le 26/03/2023)
- Scikit learn Naive Bayes, description des types d'algorithme disponibles dans le module Scikitlearn en python (anglais) [en ligne] [https://scikit-learn.org/stable/modules/naive\\_bayes.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/naive_bayes.html) (consulté le 26/03/2023)

## E Code Source

### E.1 GitHub

L'ensemble du code est disponible dans mon repository GitHub. <https://github.com/peredur0/errol>