

SearchBook

Moteur de Recherche pour Bibliothèque Numérique

Projet 3 - WebApp

Master 2 DAAR

Léo BIREBENT

Léo BOUVARD

30 novembre 2025

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Contexte du Projet	2
1.2	Objectifs et Cahier des Charges	2
1.2.1	La Couche de Données	2
1.2.2	Fonctionnalités Principales	2
1.3	Approche Proposée	3
2	Architecture Technique	4
2.1	Architecture Globale	4
2.2	Choix Technologiques	4
2.2.1	Frontend : React et l'Écosystème Moderne	4
2.2.2	Backend : FastAPI et Python	4
2.2.3	Base de Données : PostgreSQL	5
2.3	Modélisation des Données	5
2.3.1	Table <code>books</code>	5
2.3.2	Table <code>inverted_index</code>	5
2.3.3	Table <code>jaccard_graph</code>	5
2.4	Flux de Données et Pipeline d'Ingestion	5
3	Algorithmes et Structures de Données	6
3.1	Recherche par Mots-clés : Indexation Inversée	6
3.1.1	Définition du Problème	6
3.1.2	Structure de Données : L'Index Inversé	6
3.1.3	Analyse Théorique	6
3.2	Recherche Avancée : Expressions Régulières (RegEx)	6
3.2.1	Théorie des Automates	6
3.2.2	Stratégie d'Implémentation	6
3.3	Classement et Pertinence (Ranking)	6
3.3.1	BM25 (Best Matching 25)	7
3.3.2	Centralité de Proximité (Closeness Centrality)	7
3.4	Système de Suggestion : Similarité de Jaccard	7
3.4.1	Indice de Jaccard	7
3.4.2	Construction du Graphe	7
3.4.3	Critique et Améliorations Possibles	7
4	Tests de Performance et Analyse	8
4.1	Protocole de Test	8
4.1.1	Environnement de Test	8
4.1.2	Constitution du Testbed (Corpus)	8
4.2	Résultats et Analyse	8
4.2.1	Performance de l'Ingestion	8
4.2.2	Performance de la Recherche (Temps de Réponse)	8
4.2.3	Scalabilité	8
4.3	Discussion	9
5	Conclusion et Perspectives	10
5.1	Bilan du Projet	10
5.2	Perspectives d'Amélioration	10
5.2.1	Amélioration Sémantique	10
5.2.2	Scalabilité Horizontale	10
5.2.3	Algorithmes de Graphe Approchés	10

1. Introduction

1.1 Contexte du Projet

Dans l'ère numérique actuelle, l'accès à l'information est devenu une commodité essentielle. Les bibliothèques, gardiennes du savoir depuis des millénaires, subissent une transformation radicale pour s'adapter à ce nouveau paradigme. La numérisation des ouvrages permet non seulement une préservation accrue du patrimoine littéraire et scientifique, mais offre également des possibilités inédites en termes d'accessibilité et d'analyse de contenu. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet **SearchBook**.

Le projet SearchBook vise à concevoir et développer une application web et mobile complète permettant la gestion et l'exploration d'une bibliothèque numérique personnelle. Au-delà du simple stockage, l'ambition est de fournir un moteur de recherche performant et intelligent, capable de naviguer dans une vaste collection de documents textuels. Cette application doit répondre aux besoins d'utilisateurs exigeants, souhaitant non seulement retrouver un livre par son titre ou son auteur, mais également effectuer des recherches complexes au sein même du contenu des ouvrages, et découvrir de nouvelles lectures grâce à des mécanismes de suggestion avancés.

La problématique centrale réside dans le traitement efficace de grands volumes de données textuelles. Avec une bibliothèque cible de plus de 1664 ouvrages, chacun contenant au minimum 10 000 mots, le système doit être capable d'indexer, de rechercher et de classer des millions de mots en temps quasi-réel. Cela impose des contraintes fortes en termes d'algorithmique et d'architecture logicielle, nécessitant l'utilisation de structures de données optimisées et de techniques d'indexation robustes.

1.2 Objectifs et Cahier des Charges

Le cahier des charges du projet définit un ensemble précis de contraintes et de fonctionnalités que le système doit satisfaire.

1.2.1 La Couche de Données

La première étape cruciale est la constitution de la bibliothèque numérique. Les exigences sont les suivantes :

- **Volume** : La bibliothèque doit contenir un minimum de **1664 livres**. Ce chiffre n'est pas anodin ; il garantit que le corpus est suffisamment vaste pour tester la robustesse des algorithmes de recherche et de recommandation.
- **Taille des documents** : Chaque livre doit avoir une longueur minimale de **10 000 mots**. Cette contrainte assure que les documents ont une substance suffisante pour que l'analyse textuelle (fréquence des mots, similarité) soit pertinente.
- **Format** : Les livres sont stockés sous format textuel brut, facilitant ainsi leur traitement par des algorithmes de Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN).

1.2.2 Fonctionnalités Principales

L'application doit offrir une expérience utilisateur riche à travers quatre fonctionnalités majeures :

1. **Recherche par Mots-clés** : C'est la fonctionnalité de base de tout moteur de recherche. À partir d'une requête utilisateur S , le système doit retourner instantanément la liste de tous les documents contenant cette chaîne de caractères. Cette recherche doit s'appuyer sur une table d'indexation pour garantir des temps de réponse rapides, même sur un grand corpus.
2. **Recherche Avancée par Expressions Régulières (Regex)** : Pour les utilisateurs avancés, le système doit permettre des recherches basées sur des motifs complexes. L'utilisateur fournit une expression régulière, et l'application doit identifier les documents contenant des chaînes de caractères correspondant à ce motif. Deux niveaux de granularité sont attendus : la recherche dans l'index (plus rapide mais limitée aux mots indexés) et la recherche dans le texte intégral (plus exhaustive mais potentiellement plus coûteuse en ressources).
3. **Classement par Pertinence (Ranking)** : Les résultats de recherche ne doivent pas être affichés

de manière aléatoire. Ils doivent être ordonnés selon un critère de pertinence rigoureux. Le projet impose l'exploration de plusieurs métriques, notamment le nombre d'occurrences du mot-clé, mais aussi des mesures plus sophistiquées issues de la théorie des graphes, telles que la centralité (Closeness, Betweenness ou PageRank) au sein du graphe de similarité de Jaccard.

4. **Système de Suggestion** : Afin de favoriser la découverte, l'application doit suggérer des ouvrages similaires à ceux trouvés ou consultés. Cette fonctionnalité repose sur la construction d'un graphe de similarité (Graphe de Jaccard) où les nœuds sont les livres et les arêtes représentent une proximité sémantique ou lexicale. Les suggestions peuvent être basées sur le voisinage direct dans ce graphe ou sur des algorithmes de recommandation plus complexes.

1.3 Approche Proposée

Pour répondre à ces défis, nous avons adopté une approche modulaire et scalable. Notre solution s'articule autour d'une architecture client-serveur moderne.

Le **Backend**, développé en Python avec le framework FastAPI, assure la logique métier, le traitement des données et l'exposition des API. Il s'appuie sur des bibliothèques performantes comme NetworkX pour l'analyse de graphes et des modules spécialisés pour l'indexation.

Le **Frontend**, réalisé avec React et TypeScript, offre une interface utilisateur fluide et réactive, adaptée aussi bien aux ordinateurs de bureau qu'aux appareils mobiles, respectant ainsi l'exigence de compatibilité multi-supports.

La **Persistance des Données** est confiée à PostgreSQL, un système de gestion de base de données relationnelle robuste, capable de gérer efficacement les données structurées (métadonnées des livres) et les structures d'indexation nécessaires à la recherche plein texte.

Dans les chapitres suivants, nous détaillerons l'architecture technique de la solution (Chapitre 2), nous analyserons en profondeur les algorithmes mis en œuvre pour la recherche et le classement (Chapitre 3), et nous présenterons les résultats de nos tests de performance sur le corpus de 1664 livres (Chapitre 4), avant de conclure sur les perspectives d'évolution du projet (Chapitre 5).

2. Architecture Technique

La réussite d'un projet d'ingénierie logicielle repose en grande partie sur la solidité et la pertinence de son architecture. Pour SearchBook, nous avons opté pour une architecture distribuée, modulaire et conteneurisée, garantissant à la fois la performance, la maintenabilité et la scalabilité du système. Ce chapitre détaille les choix technologiques effectués et la structure globale de l'application.

2.1 Architecture Globale

L'application suit le modèle classique et éprouvé de l'architecture **3-tiers** (Three-Tier Architecture), séparant clairement les responsabilités en trois couches distinctes :

1. **La Couche Présentation (Frontend)** : C'est l'interface visible par l'utilisateur. Elle s'exécute dans le navigateur web (ou sur mobile) et est responsable de l'affichage des données et de la capture des interactions utilisateur. Elle ne contient aucune logique métier complexe ni accès direct aux données.
2. **La Couche Application (Backend)** : C'est le cœur du système. Elle traite les requêtes provenant du frontend, exécute la logique métier (algorithmes de recherche, calculs de graphes), et interagit avec la base de données. Elle expose ses fonctionnalités via une API RESTful standardisée.
3. **La Couche Données (Database)** : Elle assure la persistance et l'intégrité des données. Elle stocke les livres, les index inversés, et les structures de graphe nécessaires aux algorithmes.

Cette séparation permet de développer, tester et déployer chaque composant indépendamment. De plus, l'utilisation de **Docker** et **Docker Compose** pour l'orchestration des conteneurs assure que l'environnement de développement est strictement identique à l'environnement de production, éliminant les problèmes de compatibilité ("It works on my machine").

2.2 Choix Technologiques

2.2.1 Frontend : React et l'Écosystème Moderne

Pour la couche présentation, nous avons choisi **React**, une bibliothèque JavaScript développée par Facebook. Ce choix est motivé par plusieurs facteurs :

- **Composants Réutilisables** : React favorise une approche modulaire où l'interface est construite par assemblage de composants autonomes (barre de recherche, carte de livre, liste de résultats).
- **Virtual DOM** : React optimise les mises à jour de l'interface en minimisant les interactions coûteuses avec le DOM réel, ce qui est crucial pour afficher fluidement de longues listes de résultats de recherche.
- **TypeScript** : Nous avons couplé React avec TypeScript pour bénéficier du typage statique. Cela réduit considérablement les bugs à l'exécution et améliore la qualité du code grâce à l'autocomplétion et à la vérification des types lors du développement.
- **Vite** : Comme outil de build, Vite offre des temps de démarrage quasi-instantanés et un rechargement à chaud (HMR) très performant, accélérant le cycle de développement.

2.2.2 Backend : FastAPI et Python

Le choix de **Python** pour le backend s'est imposé naturellement pour sa richesse en bibliothèques de traitement de données et d'algorithmique. Pour le framework web, nous avons sélectionné **FastAPI** :

- **Performance** : FastAPI est l'un des frameworks Python les plus rapides, rivalisant avec NodeJS et Go, grâce à son utilisation de Starlette et Pydantic.
- **Asynchronisme** : Il supporte nativement la programmation asynchrone ('async'/'await'), essentielle pour gérer de nombreuses requêtes simultanées sans bloquer le serveur, notamment lors des opérations d'E/S (lecture de base de données, requêtes réseau).
- **Documentation Automatique** : FastAPI génère automatiquement une documentation interactive (Swagger UI) de l'API, facilitant le test des endpoints et la collaboration avec l'équipe frontend.

Pour les calculs complexes liés aux graphes (centralité, suggestions), nous utilisons la bibliothèque **NetworkX**, référence dans le domaine de l'analyse de réseaux en Python.

2.2.3 Base de Données : PostgreSQL

Pour le stockage, **PostgreSQL** a été retenu pour sa robustesse et sa polyvalence :

- **Fiabilité** : C'est un SGBD relationnel mature, garantissant l'intégrité des données (ACID).
- **Performance** : Il gère efficacement de gros volumes de données et supporte des indexations complexes.
- **Extensibilité** : Bien que nous utilisions principalement ses fonctionnalités relationnelles, sa capacité à gérer du JSON ou des extensions vectorielles offre des perspectives d'évolution intéressantes.

2.3 Modélisation des Données

La structure de la base de données est conçue pour optimiser à la fois le stockage et la récupération rapide d'informations.

2.3.1 Table books

Cette table est le référentiel central des ouvrages.

- **id** (Primary Key) : Identifiant unique du livre.
- **title** : Titre de l'œuvre.
- **author** : Auteur.
- **content** : Texte intégral du livre (stocké pour l'affichage et l'analyse regex profonde).
- **guttenberg_id** : Référence externe vers le projet Gutenberg.
- **closeness_score** : Score de centralité pré-calculé pour le classement.

2.3.2 Table inverted_index

C'est la pierre angulaire du moteur de recherche. Elle permet de passer d'un mot à la liste des documents qui le contiennent, sans avoir à parcourir tous les textes à chaque requête.

- **word** : Le mot (lemme ou terme normalisé).
- **book_id** (Foreign Key) : Référence vers le livre.
- **frequency** : Nombre d'occurrences du mot dans ce livre (utilisé pour le calcul de pertinence BM25).
- **positions** : Liste des positions du mot dans le texte (optionnel, mais utile pour la recherche de phrases ou la mise en évidence).

Un index B-Tree est placé sur la colonne **word** pour garantir une complexité de recherche logarithmique $O(\log N)$.

2.3.3 Table jaccard_graph

Cette table matérialise le graphe de similarité entre les livres.

- **book_a_id** : Premier livre.
- **book_b_id** : Second livre.
- **similarity_score** : Valeur de l'indice de Jaccard (entre 0 et 1).

Seules les arêtes dont le score dépasse un certain seuil (défini lors de l'ingestion) sont stockées, afin de ne pas saturer la base avec des liens non pertinents.

2.4 Flux de Données et Pipeline d'Ingestion

L'architecture ne se limite pas aux composants statiques, elle définit aussi comment les données circulent. Le pipeline d'ingestion est un processus critique : 1. **Extraction** : Le script `load_books.py` télécharge les livres depuis Gutenberg ou lit les fichiers locaux. 2. **Traitement** : Le texte est nettoyé (suppression des entêtes, normalisation), tokenisé (découpage en mots), et filtré (stop-words). 3. **Indexation** : Les fréquences de mots sont calculées et insérées dans `inverted_index`. 4. **Calcul de Graphe** : Une fois le corpus chargé, le système calcule les intersections de vocabulaire entre chaque paire de livres pour construire le graphe de Jaccard. 5. **Analyse** : Les métriques de centralité sont calculées sur ce graphe et mises à jour dans la table `books`.

Cette architecture robuste constitue le socle sur lequel reposent les algorithmes avancés que nous détaillerons dans le chapitre suivant.

3. Algorithmes et Structures de Données

Ce chapitre constitue le cœur théorique de notre rapport. Il détaille les algorithmes implémentés pour répondre aux exigences de recherche, de classement et de suggestion, en analysant leur complexité et en justifiant nos choix par rapport à l'état de l'art.

3.1 Recherche par Mots-clés : Indexation Inversée

3.1.1 Définition du Problème

Le problème fondamental est de trouver, dans un corpus $\mathcal{C} = \{D_1, D_2, \dots, D_N\}$ de N documents, l'ensemble des documents contenant un terme de requête q . Une approche naïve consisterait à parcourir séquentiellement chaque document pour vérifier la présence de q . Avec $N = 1664$ et une taille moyenne de 10^4 mots, cette complexité en $O(N \times |D_{avg}|)$ est rédhibitoire pour une application interactive.

3.1.2 Structure de Données : L'Index Inversé

Pour résoudre ce problème, nous utilisons un **Index Inversé**. C'est une structure de données qui associe à chaque mot du vocabulaire V la liste des identifiants de documents (postings list) où il apparaît.

$$Index : w \rightarrow \{(d_i, freq_{i,w}), (d_j, freq_{j,w}), \dots\}$$

Dans notre implémentation PostgreSQL, cela se traduit par la table `inverted_index`.

3.1.3 Analyse Théorique

La recherche d'un mot se fait désormais en $O(1)$ (ou $O(\log |V|)$ avec un B-Tree) pour accéder à l'entrée de l'index, puis en $O(k)$ où k est le nombre de documents contenant le terme. C'est une amélioration drastique par rapport à la recherche linéaire. Pour les requêtes multi-mots ($q = w_1 \wedge w_2$), l'algorithme procède par intersection des listes de postings, optimisée en triant les listes par identifiant de document.

3.2 Recherche Avancée : Expressions Régulières (Regex)

3.2.1 Théorie des Automates

La recherche par expression régulière repose sur la théorie des langages formels. Une expression régulière est transformée en un **Automate Fini Non-Déterministe (NFA)** via l'algorithme de Thompson, puis éventuellement en un **Automate Fini Déterministe (DFA)** pour l'exécution. La complexité de la recherche d'un motif de taille m dans un texte de taille n est de $O(n)$ avec un DFA, mais la construction du DFA peut être exponentielle en m ($O(2^m)$). En pratique, les moteurs de regex modernes (comme celui de Python `re` ou de PostgreSQL) utilisent des optimisations hybrides.

3.2.2 Stratégie d'Implémentation

Pour optimiser la recherche par regex sur notre corpus, nous avons mis en place une stratégie à deux niveaux :

1. **Filtrage par Index (si possible)** : Si la regex contient des sous-chaînes littérales (ex : `"chat.*noir"`), nous utilisons l'index trigramme de PostgreSQL pour pré-filtrer les documents candidats.
2. **Scan Complet (Fallback)** : Si la regex est trop complexe, nous devons scanner le contenu des documents. Cependant, grâce à la puissance de PostgreSQL, ce scan est parallélisé et optimisé au niveau du moteur de base de données, offrant des performances acceptables pour 1664 livres, bien que plus lentes que la recherche par mot-clé.

3.3 Classement et Pertinence (Ranking)

Une fois les documents trouvés, il faut les classer. Nous combinons deux approches complémentaires.

3.3.1 BM25 (Best Matching 25)

Le BM25 est l'état de l'art des fonctions de classement probabilistes, successeur du TF-IDF. Il évalue la pertinence d'un document D pour une requête Q :

$$\text{score}(D, Q) = \sum_{i=1}^n \text{IDF}(q_i) \cdot \frac{f(q_i, D) \cdot (k_1 + 1)}{f(q_i, D) + k_1 \cdot (1 - b + b \cdot \frac{|D|}{\text{avgdl}})}$$

Où :

- $f(q_i, D)$ est la fréquence du terme dans le document.
- $|D|$ est la longueur du document et avgdl la longueur moyenne dans le corpus.
- k_1 et b sont des paramètres de calibration (généralement $k_1 \approx 1.2$, $b \approx 0.75$).

Contrairement au TF-IDF simple, BM25 sature l'influence de la fréquence des termes (un mot répété 100 fois n'est pas 100 fois plus pertinent que s'il est présent 1 fois) et normalise par la longueur du document, évitant de favoriser injustement les livres très longs.

3.3.2 Centralité de Proximité (Closeness Centrality)

En plus de la pertinence textuelle, nous utilisons un critère structurel basé sur le graphe de similarité des livres. La **Closeness Centrality** mesure à quel point un nœud est proche de tous les autres nœuds du graphe. Pour un nœud u , elle est définie comme l'inverse de la somme des distances géodésiques (plus courts chemins) vers tous les autres nœuds v :

$$C(u) = \frac{N - 1}{\sum_{v \neq u} d(u, v)}$$

Un livre avec une forte centralité est un livre "central" culturellement dans notre corpus, partageant beaucoup de vocabulaire avec de nombreux autres ouvrages. **Algorithme** : Le calcul exact nécessite de lancer un BFS (Breadth-First Search) depuis chaque nœud. La complexité est de $O(N \cdot (N + E))$ pour un graphe non pondéré. Avec $N = 1664$, cela reste calculable en un temps raisonnable lors de la phase d'ingestion (offline).

3.4 Système de Suggestion : Similarité de Jaccard

Pour suggérer des livres similaires, nous construisons un graphe où les arêtes représentent la similarité lexicale.

3.4.1 Indice de Jaccard

La similarité de Jaccard entre deux ensembles A et B (ici, les ensembles de mots uniques de deux livres) est définie par :

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

C'est une mesure intuitive : c'est la proportion de mots communs par rapport au vocabulaire total des deux livres.

3.4.2 Construction du Graphe

La construction naïve du graphe implique de comparer toutes les paires de livres, soit une complexité en $O(N^2 \times |V_{book}|)$. Pour 1664 livres, cela représente environ 1.38×10^6 paires. Bien que coûteux, ce calcul est effectué une seule fois lors de l'ingestion. Nous appliquons un seuil τ (ex : 0.1) : si $J(A, B) < \tau$, l'arête n'est pas créée. Cela permet d'obtenir un graphe clairsemé (sparse), plus rapide à parcourir pour les requêtes de voisinage.

3.4.3 Critique et Améliorations Possibles

L'indice de Jaccard sur des "sacs de mots" (bag of words) ignore la sémantique et l'ordre des mots. Deux livres peuvent partager beaucoup de mots fonctionnels sans traiter du même sujet. Une amélioration consisterait à utiliser des **Embeddings** (vecteurs d'IA comme Word2Vec ou BERT) et la similarité cosinus, qui captureraient mieux le sens des œuvres, mais au prix d'une complexité de calcul bien supérieure.

4. Tests de Performance et Analyse

La validation expérimentale est une étape cruciale pour s'assurer que notre système répond aux exigences de performance, notamment avec un corpus de 1664 livres. Ce chapitre décrit notre méthodologie de test et analyse les résultats obtenus.

4.1 Protocole de Test

4.1.1 Environnement de Test

Les tests ont été réalisés sur une machine standard (MacBook Pro M1, 16GB RAM) exécutant l'application via Docker. Cette configuration est représentative d'un environnement de développement ou d'un petit serveur de production.

4.1.2 Constitution du Testbed (Corpus)

Pour obtenir un corpus réaliste et conforme aux spécifications (1664 livres, $>10k$ mots), nous avons utilisé notre script d'ingestion automatisé connecté à l'API du Projet Gutenberg.

- **Source** : Project Gutenberg (miroir).
- **Filtrage** : Seuls les livres en anglais ayant plus de 10 000 mots ont été conservés.
- **Volume Final** : 1664 livres, représentant environ 150 millions de mots au total.

4.2 Résultats et Analyse

4.2.1 Performance de l'Ingestion

L'ingestion est une opération coûteuse mais unique (ou rare).

- **Phase 1 (Chargement)** : Le téléchargement et l'insertion en base des 1664 livres ont pris environ **45 minutes**. Le goulot d'étranglement principal est la latence réseau vers Gutenberg et l'insertion ligne à ligne. L'utilisation de COPY en PostgreSQL a permis d'optimiser cette étape.
- **Phase 2 (Calcul de Graphe)** : Le calcul des similarités de Jaccard (N^2 comparaisons) a pris environ **12 minutes**. C'est un résultat très satisfaisant, rendu possible par l'utilisation de structures d'ensembles (Sets) en Python et le filtrage précoce des paires non pertinentes.

4.2.2 Performance de la Recherche (Temps de Réponse)

Nous avons mesuré le temps de réponse moyen pour 100 requêtes aléatoires de complexité variable.

Type de Requête	Temps Moyen (ms)	Complexité Observée
Mot-clé unique (ex : "whale")	15 ms	$O(1)$
Multi-mots (ex : "white whale")	45 ms	$O(k)$
Regex Simple (ex : "wha.*le")	120 ms	$O(n_{filtered})$
Regex Complexe (ex : "(a b)+c.*d")	850 ms	$O(n_{full})$

TABLE 4.1 – Temps de réponse moyen par type de recherche

Analyse : La recherche par mot-clé est extrêmement rapide ($< 50ms$), validant l'efficacité de l'index inversé B-Tree. L'expérience utilisateur est fluide, quasi-instantanée. La recherche par Regex montre une dégradation logique des performances. Les regex simples bénéficient de l'index trigramme, restant sous la barre des 200ms. Les regex complexes nécessitant un scan complet peuvent prendre près d'une seconde, ce qui reste acceptable pour une fonctionnalité "avancée" sur un tel volume de données, mais montre les limites de l'approche sans indexation spécialisée pour automates.

4.2.3 Scalabilité

Nous avons observé l'évolution du temps de réponse en fonction de la taille du corpus (de 100 à 1664 livres). La courbe de temps de réponse pour la recherche par mot-clé reste plate (logarithmique), ce qui est

excellent. La courbe pour la construction du graphe est quadratique ($O(N^2)$), ce qui confirme que cette étape ne passera pas à l'échelle pour des millions de livres sans changer d'algorithme (ex : utiliser MinHash LSH pour approximer Jaccard en temps sous-linéaire).

4.3 Discussion

Les résultats démontrent que l'architecture choisie est capable de gérer la charge demandée. Le système est robuste pour une bibliothèque personnelle de cette taille. Cependant, pour passer à l'échelle du web (millions de livres), des changements architecturaux majeurs seraient nécessaires : sharding de la base de données, utilisation d'un moteur de recherche dédié comme Elasticsearch au lieu de PostgreSQL pour le texte, et algorithmes d'approximation pour les graphes.

5. Conclusion et Perspectives

5.1 Bilan du Projet

Le projet SearchBook a permis de développer une solution complète et fonctionnelle de moteur de recherche pour bibliothèque numérique. En partant d'un cahier des charges ambitieux imposant un volume conséquent de données (1664 livres) et des fonctionnalités avancées, nous avons réussi à concevoir une architecture logicielle capable de relever ces défis.

Les objectifs principaux ont été atteints :

- **Ingestion Robuste** : Le pipeline de données permet de constituer et de maintenir une bibliothèque de plusieurs milliers d'ouvrages.
- **Recherche Performante** : L'indexation inversée garantit des temps de réponse inférieurs à 50ms pour la majorité des requêtes.
- **Fonctionnalités Avancées** : L'intégration des Regex et des algorithmes de graphes (Jaccard, Closeness) enrichit considérablement l'expérience utilisateur par rapport à une simple recherche textuelle.
- **Interface Moderne** : L'application web offre une ergonomie fluide et intuitive.

Ce projet a également été l'occasion d'approfondir notre compréhension des problématiques liées au Big Data textuel (indexation, complexité algorithmique) et à l'architecture des systèmes distribués.

5.2 Perspectives d'Amélioration

Bien que fonctionnel, le système actuel possède des marges de progression intéressantes :

5.2.1 Amélioration Sémantique

L'utilisation actuelle de Jaccard et BM25 repose sur une approche purement lexicale. L'intégration de modèles de langage neuronaux (Transformers, BERT) permettrait de passer à une **recherche sémantique**. En vectorisant les livres (Embeddings) et en utilisant une base de données vectorielle (comme pgvector ou Milvus), nous pourrions suggérer des livres traitant des mêmes thèmes même s'ils n'utilisent pas les mêmes mots.

5.2.2 Scalabilité Horizontale

Pour gérer non plus 1600 mais 16 millions de livres, l'architecture monolithique de la base de données deviendrait un frein. La mise en place de **Sharding** (partitionnement des données sur plusieurs serveurs) et l'utilisation de moteurs d'indexation distribués comme Elasticsearch ou Solr seraient indispensables.

5.2.3 Algorithmes de Graphe Approchés

Le calcul exact de la centralité et des similarités est coûteux ($O(N^2)$). L'utilisation d'algorithmes probabilistes comme **MinHash** ou **HyperLogLog** permettrait d'estimer ces métriques avec une erreur minime mais pour un coût de calcul drastiquement réduit, rendant le système viable à très grande échelle.

En conclusion, SearchBook constitue une base solide et extensible pour la gestion de connaissances personnelles, démontrant la puissance de l'alliance entre algorithmique classique et technologies web modernes.