**REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO**

**« R.D.C »**

**ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET UNIVERSITAIRE**

**«E.S.U»**

**UNIVERSITE DE L’ASSOMPTION AU CONGO**

**« U.A.C »**

**E-mail: contact@uaconline.edu.cd**

Site: www.uaconline.edu.cd

**B.P. :104 BUTEMBO/NORD-KIVU**

**FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES**

**DEPARTEMENT DE GENIE INFORMATIQUE**

**SYSTÈME DE RECOMMANDATION COLLABORATIF POUR OPTIMISER LES VENTES ET LA PROMOTION DES PRODUITS À BUTEMBO**

**Par**

**KAVIRA MBULINYOLO Marguerite**

*Mémoire présenté et défendu en vue de l’obtention du diplôme de licence en Sciences Appliquées*

**Option :** Génie Informatique

**Directeur:**Dr. NSENGE MPIAHéritier, PhD

**ANNEE ACADEMIQUE: 2024-2025**

# EPIGRAPHE

*« Dans un monde saturé d’options, la capacité à recommander le bon produit au bon utilisateur au bon moment devient un avantage concurrentiel décisif. »*

*Xavier Amatriain*

# DEDICACE

A mes très chers parents **KASEREKA KITAHERUKA ARNOLD** et **KATUNGU VIGHANZIRE ANTOINETTE**

A toute ma famille et à toutes les personnes qui me sont chères.

# REMERCIEMENTS

Le présent travail est l’œuvre des multiples efforts, encouragements et contributions des certaines personnes. Ainsi, nous ne serons pas sans dire quelques mots des gratitudes à tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Nos premiers remerciements s’adressent à Dieu, le tout puissant, lui qui, tout au long de notre parcours académique nous a donné une force incomparable, nous a comblé par toute sa grâce qui nous ont accompagnées jusqu’où nous sommes.

Nos remerciements s’adressent également à toute la communauté académique de l’Université de l’Assomption au Congo pour nous avoir formés scientifiquement et spirituellement.

Nos sentiments de gratitude s’adressent, d’une manière particulière, au Professeur Heritier Nsenge Mpia, ce travail, qui, malgré ses différentes occupations, a accepté la responsabilité de nous diriger et et faire en sorte que ce travail soit digne d’un travail scientifique.

Nos sincères gratitudes s’adressent à nos très chers parents papa KASEREKA KITAHERUKA Arnold et maman KATUNGU VIGHANZIRE Antoinette, qui, malgré nos caprices, n’ont cessé de nous soutenir et nous encourager durant notre parcours académique. Nous remercions tous nos frères et sœurs qui nous ont tenus la main durant la réalisation de ce travail plus particulièrement SIVAMWENDA Augustin, NZANZU SIVAMWENDA Floribert, KATEMBO KATAHERUKA Jean Baptiste, Kahindo Mbulinyolo Desanges, Kakule Sivamwenda Joachim, Ushindi Kaghoma Muhindo, Eric Sivamwenda.

Nous ne manquerons pas de dire merci à tous les amis, camarades et connaissances qui nous ont soutenus d’une façon ou d’une autre durant notre parcours académique : Exaucé Maruba, Mumbere Kavalami Muyisa, Kasereka Lusenge Grace. A vous tous qui nous avez soutenu de près ou de loin et qui n’avez pas été cités ci-haut, ne vous sentez pas oublier, nous vous portons en cœur et nous vous disons merci pour votre sincère soutient.

**KAVIRA MBULINYOLO Marguerite**

# SIGLE ET ABREVIATIONS

# RESUME DU TRAVAIL

Ce projet présente la conception et le développement d’un système de recommandation collaboratif intégré dans une application web destinée aux petites et moyennes entreprises, visant à améliorer à la fois l’expérience client et la gestion opérationnelle des stocks. L’application repose sur une base de données relationnelle qui centralise les informations relatives aux clients, produits et transactions, avec enregistrement systématique des notes attribuées par les clients aux produits achetés, directement au moment de la transaction. Cette collecte intégrée des données permet d’entraîner un modèle de filtrage collaboratif (basé sur l’algorithme SVD) capable de générer des recommandations personnalisées, adaptées aux préférences spécifiques de chaque client. Parallèlement, un module d’optimisation des stocks analyse les niveaux d’inventaire en temps réel, déclenche des alertes pour les produits nécessitant un réapprovisionnement, et assure un équilibre dynamique entre l’offre et la demande. Le système combine ainsi intelligence prédictive et gestion commerciale, offrant une solution complète de bout en bout, allant de l’enregistrement simple des transactions à la fourniture d’informations décisionnelles à travers une interface utilisateur ergonomique et responsive. Cette approche pragmatique s’inscrit dans un contexte local caractérisé par une faible densité de données, en proposant notamment un script de génération de données pour compenser le problème du démarrage à froid. En résumé, ce projet illustre un couplage efficace entre la personnalisation de l’offre et la gestion opérationnelle, renforçant la fidélisation client tout en modernisant les pratiques commerciales des PME.

# ABSTRACT

This project presents the design and development of a collaborative recommendation system integrated into a web application for small and medium-sized businesses, aiming to improve both customer experience and operational inventory management. The application is based on a relational database that centralizes information about customers, products, and transactions, with systematic recording of customer ratings of purchased products directly at the time of the transaction. This integrated data collection allows training a collaborative filtering model (based on the SVD algorithm) capable of generating personalized recommendations, adapted to the specific preferences of each customer. At the same time, an inventory optimization module analyzes inventory levels in real time, triggers alerts for products requiring replenishment, and ensures a dynamic balance between supply and demand. The system thus combines predictive intelligence and business management, offering a complete end-to-end solution, ranging from simple transaction recording to the provision of decision-making information through an ergonomic and responsive user interface. This pragmatic approach fits into a local context characterized by low data density, notably by proposing a data generation script to compensate for the cold start problem. In summary, this project illustrates an effective coupling between the personalization of the offer and operational management, strengthening customer loyalty while modernizing the commercial practices of SMEs.

# Premier Chapitre : INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Contexte de l'étude

Dans le monde actuel, marqué par une compétition commerciale croissante et une surabondance de choix pour les consommateurs, les systèmes de recommandation se sont imposés comme des outils incontournables pour améliorer l’expérience utilisateur et optimiser les ventes (Alfaifi, 2024). Ces systèmes, qui reposent sur des algorithmes avancés, permettent de personnaliser les interactions entre les utilisateurs et les plateformes, en leur proposant des produits ou services qui correspondent à leurs préférences ou besoins présumés (Mpia et al., 2023). Les modèles collaboratifs, en particulier, exploitent les données partagées entre utilisateurs pour identifier des tendances et fournir des recommandations précises.

Dans la ville commerciale de Butembo, située dans l’est de la République démocratique du Congo (RDC), le commerce constitue une activité économique majeure. Cette ville se caractérise par un grand nombre de petites et moyennes entreprises (PME) qui offrent une large gamme de produits (Menomavuya, 2018). Cependant, la gestion efficace des stocks et la satisfaction des besoins des clients restent des défis importants. Les clients se retrouvent souvent confrontés à des problèmes de surabondance de choix, tandis que les commerçants peinent à anticiper les préférences des consommateurs (Ngangoue, 2016). Dans un tel contexte, l’introduction d’un système de recommandation basé sur le filtrage collaboratif pourrait transformer les pratiques commerciales locales en améliorant à la fois la satisfaction des clients et la gestion des stocks.

La particularité de la ville de Butembo, en tant que hub commercial, offre une opportunité unique pour la mise en œuvre d’un tel système. Il s’agit non seulement de résoudre des problèmes locaux, mais aussi de créer un modèle pouvant être répliqué dans des contextes similaires à travers l’Afrique et ailleurs. Les systèmes de recommandation ont été largement adoptés dans des environnements numériques à forte densité de données, mais leur potentiel dans des écosystèmes commerciaux locaux reste sous-exploré (Zhang et Chen, 2020).

## Problématique

Malgré la popularité et l’efficacité prouvées des systèmes de recommandation dans les économies avancées, leur mise en œuvre dans des contextes locaux comme celui de Butembo pose plusieurs défis. Premièrement, les PME locales génèrent souvent des volumes de données relativement faibles, ce qui limite l’efficacité des approches traditionnelles de filtrage collaboratif, qui s'appuient sur des bases de données riches pour produire des recommandations fiables (Sarwar et al., 2021). Deuxièmement, la gestion des stocks et des produits reste essentiellement manuelle pour la plupart des commerçants de la ville, résultant en des pertes économiques dues à des surstocks ou à des ruptures de stock.

Un autre problème clé est l’absence de personnalisation dans les interactions entre les commerçants et les clients. Actuellement, la majorité des achats sont réalisés sans qu’il y ait une analyse préalable des préférences des clients. Cela limite la fidélisation de la clientèle et la capacité des entreprises à cibler efficacement leurs offres. En conséquence, les commerçants de Butembo ont peu de moyens pour améliorer leur compétitivité face à des marchés extérieurs de plus en plus numérisés.

La question principale que cette étude cherche à résoudre est la suivante : comment concevoir et développer un système de recommandation collaboratif adapté aux spécificités du marché local de Butembo afin d’améliorer la gestion des stocks et la satisfaction des clients ? Pour répondre à cette question, il sera nécessaire d’intégrer des approches collaboratives et des techniques d’analyse de données dans un système qui soit à la fois efficace et simple à utiliser par les commerçants locaux.

## Objectifs de l’étude

### 1.3.1. Objectif général

L’objectif global de cette étude a été de développer un système de recommandation collaboratif pour optimiser les ventes et la promotion des produits à Butembo.

### 1.3.2. Objectifs spécifiques

De façon spécifique, cette étude a eu pour objectifs de :

1. Analyser les besoins des commerçants et des clients
2. Développer un algorithme de recommandation collaboratif
3. Intégrer des modules de gestion des stocks
4. Evaluer le système
5. Déployer le modèle dans un environnement Web

## Questions de recherche

Se basant sur les objectifs ci-haut, ces questions de recherche ont guidé cette recherche :

1. Quels sont les besoins spécifiques des commerçants et des clients de Butembo pour améliorer la gestion des stocks et la satisfaction client ?
2. Quel algorithme de recommandation collaboratif est le plus adapté pour fournir des suggestions personnalisées dans le contexte de Butembo ?
3. Comment concevoir un module de gestion des stocks qui s'intègre efficacement au système de recommandation collaboratif ?
4. Quels indicateurs peuvent être utilisés pour évaluer l’efficacité et l’impact du système sur la satisfaction des clients et les performances commerciales ?
5. Comment garantir un déploiement efficace et accessible du système de recommandation dans un environnement Web pour les utilisateurs locaux ?

## Choix et intérêt du sujet

Le choix de ce sujet s’appuie sur le besoin de résoudre des problèmes réels auxquels font face les commerçants et les clients dans la ville commerciale de Butembo. Les commerçants rencontrent souvent des difficultés dans la gestion des stocks, ce qui entraîne des ruptures ou des surplus inutiles, tandis que les clients éprouvent des difficultés à trouver des produits qui correspondent réellement à leurs attentes. Ce projet vise à combler ces insuffisances en développant une solution technologique innovante : un système de recommandation collaboratif, associé à des outils de gestion des stocks.

D’un point de vue scientifique, ce projet s’intéresse à l’adaptation des technologies de recommandation à un environnement où les données disponibles sont limitées, un aspect peu exploré dans la recherche actuelle. Bien que Butembo soit un pôle commercial important, les outils numériques y sont encore peu utilisés pour améliorer les relations entre commerçants et clients. La mise en place d’un algorithme de recommandation collaboratif capable de s’adapter à ces contraintes spécifiques pourrait apporter une contribution significative à la recherche, tout en tenant compte des particularités des économies locales. Sur le plan pratique, cette initiative aidera les commerçants à mieux prévoir les attentes des clients et à rationaliser la gestion des stocks, réduisant ainsi les pertes et améliorant leur rentabilité. De leur côté, les clients bénéficieront d’une expérience d’achat plus fluide et personnalisée. Le déploiement du système sur une plateforme Web garantira également une large accessibilité et encouragera son adoption.

Ainsi, ce projet se distingue par un double intérêt : il explore des problématiques théoriques liées aux limites des algorithmes collaboratifs dans des environnements spécifiques et propose une solution concrète pour améliorer les pratiques commerciales locales. Il s’agit d’une démarche qui allie recherche académique et impact pratique tangible.

## Délimitation du sujet

Ce projet se concentre sur la conception et le développement d’un système de recommandation collaboratif adapté au contexte de la ville commerciale de Butembo. Le but principal est d’améliorer la gestion des stocks des commerçants locaux tout en offrant aux clients des recommandations personnalisées pour les aider à trouver les produits répondant à leurs besoins.

Les principales limites du sujet sont définies comme suit : (i) Zone géographique : L’étude et le développement du système se concentrent uniquement sur la ville de Butembo, en tenant compte des spécificités économiques, culturelles et technologiques locales. (ii) Type de système : Le projet se limite à un système de recommandation collaboratif, exploitant les interactions et évaluations des utilisateurs pour générer des suggestions. Les approches basées sur le contenu ou hybrides ne seront pas prises en compte dans cette phase. (iii) Modules intégrés : Le système inclut des fonctionnalités spécifiques, à savoir la gestion des stocks, la recommandation des produits et le déploiement dans un environnement Web. Les aspects tels que la gestion des ressources humaines ou la logistique des livraisons ne font pas partie du périmètre de cette étude. (iv) Technologies utilisées : Le développement de l’algorithme repose principalement sur l’utilisation de la librairie Surprise et sur d’autres outils compatibles pour le déploiement Web tel que Flask. Les comparaisons avec d'autres bibliothèques ou frameworks ne constituent pas l’objet de ce travail. (v) Évaluation : L’évaluation du système se limite à des indicateurs comme la précision des recommandations, la satisfaction des utilisateurs et l’efficacité de la gestion des stocks. Les impacts à long terme sur l’économie locale ou l’évolution des comportements des consommateurs ne seront pas abordés en profondeur.

En résumé, ce projet se concentre sur un système de recommandation collaboratif conçu pour répondre aux besoins immédiats des commerçants et clients de Butembo, en restant dans un cadre technologique précis et un périmètre géographique restreint.

## Justification de l’étude

Le choix de mener cette étude repose sur plusieurs raisons à la fois pratiques, scientifiques et socio-économiques, qui démontrent sa pertinence et son utilité. (i) Problèmes pratiques à résoudre. Dans la ville commerciale de Butembo, les commerçants rencontrent d’importants défis liés à la gestion des stocks, souvent caractérisée par des ruptures ou des surplus. Parallèlement, les clients peinent à trouver des produits adaptés à leurs préférences, ce qui limite leur satisfaction et fidélité. Ce projet propose une solution qui combine un système de recommandation collaboratif et des outils de gestion des stocks, offrant ainsi des avantages tangibles aux commerçants comme aux consommateurs. (ii) Pertinence scientifique  
Les systèmes de recommandation, largement étudiés dans des environnements riches en données, restent peu explorés dans des contextes à faible densité de données, comme celui de Butembo. Ce projet ambitionne d'adapter ces technologies à un tel cadre en tenant compte des spécificités locales. L’utilisation de la librairie *Surprise* pour développer un algorithme collaboratif a permis d’élargir le champ des recherches en s’intéressant à des environnements sous-représentés dans la littérature académique. (iii) Impact socio-économique  
Butembo est un important centre économique où le commerce joue un rôle clé dans la vie quotidienne. Un système de recommandation bien conçu pourra contribuer à améliorer la rentabilité des commerçants, en optimisant leurs processus de gestion des stocks, tout en offrant aux clients une expérience d’achat plus fluide et personnalisée. En outre, l’utilisation de la technologie comme levier pour résoudre des problèmes locaux constitue un pas important vers la modernisation du secteur commercial dans la région. (iv) Avantage technologique et innovation. Le développement et le déploiement d’un tel système dans un environnement Web constituent une approche innovante pour introduire la transformation numérique dans le commerce local. Cette étude ouvre également des perspectives pour l’adoption de solutions similaires dans d’autres contextes régionaux ou internationaux partageant des défis similaires.

## Subdivision du travail

Ce travail est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre introduit le cadre général de l’étude, en présentant le contexte, la problématique, les objectifs, les questions de recherche, ainsi que l’intérêt et la justification du sujet. Le deuxième chapitre est consacré à la revue de littérature, où sont explorés les concepts clés, les approches existantes en matière de systèmes de recommandation, et les outils technologiques pertinents. Le troisième chapitre détaille la méthodologie adoptée, en décrivant les techniques, outils, et données utilisés pour concevoir et développer le système. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus, avec une analyse approfondie des performances du système de recommandation et des modules de gestion des stocks, ainsi qu’une évaluation basée sur des indicateurs définis. Enfin, le cinquième chapitre synthétise les conclusions de l’étude, discute les implications pratiques et scientifiques des résultats, et propose des perspectives pour de futures recherches ou améliorations.

# Deuxième Chapitre : REVUE DE LA LITTÉRATURE

## 2.1. Introduction

La revue de littérature est une étape essentielle dans toute recherche scientifique, car elle permet de situer le travail dans le contexte des connaissances existantes. Ce chapitre vise à explorer les concepts clés, les approches théoriques et les outils technologiques liés aux systèmes de recommandation, en particulier ceux basés sur le filtrage collaboratif. L'objectif est de fournir une base solide pour la conception et le développement du système de recommandation collaboratif proposé dans cette étude.

En outre, ce chapitre examine les défis et les limites des systèmes de recommandation, ainsi que les technologies disponibles pour leur mise en œuvre. Enfin, une revue des études empiriques permettra de comprendre comment ces systèmes ont été appliqués dans des contextes similaires, notamment dans le commerce local et international.

## 2.2. Revue de littérature théorique

### 2.2.1. Systèmes de recommandation : Définition et classification

Les systèmes de recommandation sont des algorithmes intelligents qui analysent les données comportementales (historique d’achats, notations, consultations) pour prédire et proposer des items pertinents à chaque utilisateur. Selon Zhang & Chen (2020), leur application couvre le commerce électronique (recommandations des produits sur Amazon), les réseaux sociaux (suggestions d’amis sur Facebook) et le streaming (sélections personnalisées sur Netflix). Ils peuvent être classés en trois grandes catégories : les systèmes basés sur le contenu, les systèmes collaboratifs, et les systèmes hybrides (Mpia et al., 2023).

1. ***Systèmes basés sur le contenu***

Ces systèmes exploitent les métadonnées des produits (catégorie, prix, marque) pour établir des similarités. Par exemple, si un utilisateur a acheté un smartphone Samsung, le système recommandera d’autres appareils électroniques partageant des caractéristiques techniques similaires (Lops et al., 2021). Cette approche est particulièrement utile lorsque les données sur les interactions entre utilisateurs sont limitées (Zhang & Chen 2020). Cependant, ces systèmes peuvent souffrir d’un manque de diversité dans les recommandations, car ils tendent à proposer des produits très similaires à ceux déjà consommés par l’utilisateur (Alfaifi, 2024).

1. ***Systèmes collaboratifs***

Ces systèmes exploitent les interactions entre utilisateurs pour générer des recommandations. Ils peuvent être basés sur les similarités entre utilisateurs (user-user) ou entre produits (item-item). Par exemple, si deux utilisateurs ont noté plusieurs produits de manière similaire, le système peut recommander à l'un des utilisateurs un produit que l'autre a apprécié (Sarwar et al., 2021). Cette approche est particulièrement efficace dans les environnements où les utilisateurs interagissent fréquemment avec les produits, comme les plateformes de commerce électronique.

1. **Systèmes hybrides**

Ces systèmes combinent les approches basées sur le contenu et collaboratives pour améliorer la précision des recommandations. Par exemple, un système hybride peut utiliser les caractéristiques des produits pour initialiser les recommandations, puis ajuster ces recommandations en fonction des interactions entre utilisateurs (Burke et al., 2021). Les systèmes hybrides sont particulièrement utiles pour surmonter les limitations des systèmes basés sur le contenu ou collaboratifs pris individuellement (Zhang & Chen, 2020).

### 2.2.2. Recommandation collaborative : principes et fonctionnement

La recommandation collaborative repose sur l'idée que les utilisateurs ayant des préférences similaires dans le passé auront tendance à avoir des préférences similaires à l'avenir (Sarwar et al., 2021). Cette approche utilise des matrices de notation (ratings) pour identifier des patterns de comportement parmi les utilisateurs. Par exemple, si deux utilisateurs ont noté plusieurs produits de manière similaire, le système peut recommander à l'un des utilisateurs un produit que l'autre a apprécié. Il existe deux principales méthodes de filtrage collaboratif : (i) Filtrage collaboratif basé sur l’utilisateur(user-user) : cette méthode identifie les utilisateurs similaires et recommande des produits appréciés par ces utilisateurs similaires. Par exemple, si un utilisateur *A* a noté plusieurs produits de manière similaire à un utilisateur *B*, le système peut recommander à l'utilisateur *A* des produits que l'utilisateur B a appréciés (Sarwar et al., 2021). (ii) Filtrage collaboratif basé sur le produit(item-item) : cette méthode identifie des produits similaires et recommande des produits qui sont souvent appréciés par les mêmes utilisateurs. Par exemple, si un produit A est souvent acheté avec un produit B, le système peut recommander le produit B à un utilisateur qui a acheté le produit A (Saraei et al., 2023).

### 2.2.3. Gestion des stocks

La gestion des stocks est un aspect crucial pour les entreprises, car elle permet de minimiser les coûts liés aux surplus ou aux ruptures de stock (Chopra & Meindl, 2020). Une gestion efficace des stocks repose sur la prévision de la demande, l'optimisation des niveaux de stock, et la réduction des délais de livraison. Les systèmes de recommandation peuvent jouer un rôle clé dans la gestion des stocks en prédisant les préférences des clients et en ajustant les niveaux de stock en conséquence. Par exemple, un système de recommandation peut identifier les produits les plus susceptibles d'être achetés, permettant ainsi aux commerçants de maintenir des niveaux de stock optimaux (Zhang & Chen, 2020).

### 2.2.4. Techniques et approches des systèmes de recommandation

Les systèmes de recommandation utilisent diverses techniques pour fournir des suggestions personnalisées aux utilisateurs. Ces approches peuvent être classées en trois catégories principales : les méthodes basées sur le contenu, les méthodes collaboratives et les méthodes hybrides. Chacune de ces approches présente des avantages et des limites, et leur choix dépend du contexte d’application, de la nature des données disponibles et des objectifs spécifiques du système. Dans cette section, nous explorerons en détail ces techniques, en mettant l’accent sur leurs principes fondamentaux, leurs applications pratiques et leurs défis.

* + - 1. **Approches basées sur le contenu**

Les approches basées sur le contenu génèrent des recommandations en analysant les caractéristiques intrinsèques des produits ou des services. Par exemple, si un utilisateur a acheté plusieurs livres d'un même auteur, le système pourra recommander d'autres ouvrages du même auteur ou traitant de sujets similaires (Lops et al., 2021). Cette méthode repose sur l'idée que les préférences passées d'un utilisateur sont un indicateur fiable de ses préférences futures.

**Concernant leur fonctionnement,** ce sont des systèmes qui extraient des métadonnées décrivant les produits (par exemple, catégorie, prix, marque, mots-clés). Ils construisent un profil utilisateur en analysant les interactions passées (achats, consultations, évaluations). Les recommandations sont générées en comparant le profil utilisateur avec les caractéristiques des produits disponibles. Cette approche est particulièrement efficace dans les contextes où les données utilisateur sont limitées, car elle ne dépend pas des interactions entre utilisateurs (Zhang & Chen, 2020).

L’indépendance des interactions utilisateur, contrairement aux méthodes collaboratives, cette approche ne nécessite pas de données volumineuses sur les interactions entre utilisateurs et l’évitement du problème de "cold start" pour les nouveaux produits : tant que les métadonnées des produits sont disponibles, le système peut générer des recommandations (Alfaifi, 2024) constituent leurs avantages. Tandis que le risque de surspécialisation : les recommandations peuvent manquer de diversité, se limitant à des produits très similaires à ceux déjà connus de l'utilisateur (Alfaifi, 2024) et la nécessité des métadonnées riches et bien structurées : la qualité des recommandations dépend fortement de la disponibilité et de la structuration des métadonnées des produits (Lops et al., 2021) sont deux grandes limites pour cette approche.

Cette approche est couramment utilisée dans les plateformes de streaming (recommandation de films ou de musique partageant des genres similaires) ou les librairies en ligne (recommandation de livres par auteur ou thème). Par exemple, Netflix utilise des algorithmes basés sur le contenu pour suggérer des films similaires à ceux que l’utilisateur a déjà regardés (Gomez-Uribe & Hunt, 2020). La figure ci-dessous schématise le fonctionnement d’un système de recommandation basé sur le contenu. Le système analyse les caractéristiques des produits et les compare avec le profil utilisateur pour générer des suggestions personnalisées.

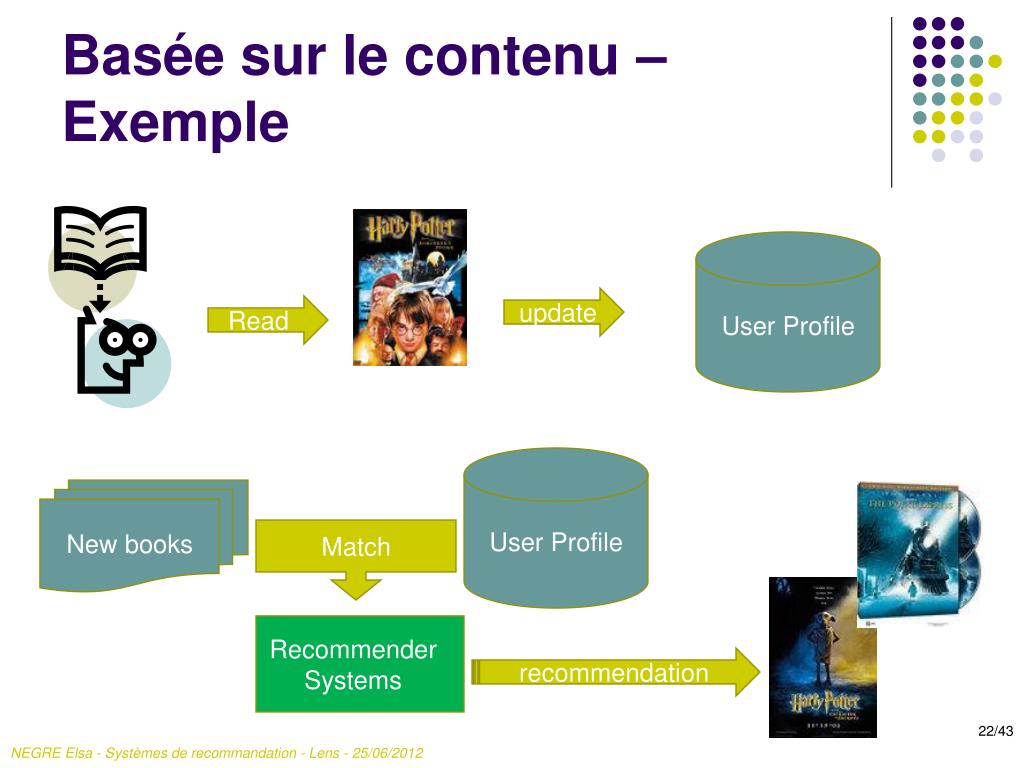


Figure 1: Fonctionnement d’un système de recommandation basé sur le contenu (Lops et al., 2021)

Cette approche, bien que limitée par sa tendance à la surspécialisation, reste une solution robuste pour les environnements où les données collaboratives sont rares. Elle constitue une base essentielle pour les systèmes hybrides, qui combinent ses avantages avec ceux des méthodes collaboratives pour améliorer la diversité et la pertinence des recommandations (Burke et al., 2021).

* + - 1. **Approches collaboratives : utilisateur/utilisateur et produit/produit**

Les approches collaboratives, comme mentionné précédemment, se basent sur les interactions entre utilisateurs pour générer des recommandations. Ces approches sont particulièrement efficaces dans les environnements où les utilisateurs interagissent fréquemment avec les produits, comme les plateformes de commerce électronique (Sarwar et al., 2021).

* + - 1. **Approches hybrides : synthèse des avantages et mécanismes**

Les approches hybrides représentent une solution optimale dans le domaine des systèmes de recommandation en combinant les forces des méthodes basées sur le contenu et collaboratives, tout en atténuant leurs limites respectives. Cette fusion permet de surmonter les limitations inhérentes à chaque méthode prise isolément, offrant ainsi des recommandations plus précises, diversifiées et adaptives. Selon Burke et al. (2021), ces systèmes améliorent significativement la précision, la robustesse des recommandations, notamment dans des contextes où les données sont peu denses ou hétérogènes.

Un système hybride intègre simultanément l’analyse des caractéristiques intrinsèques des produits (approche basée sur le contenu) et les schémas d’interaction entre utilisateurs (approche collaborative). Un système hybride intègre généralement deux stratégies principales : (i) la combinaison parallèle : les résultats des deux approches sont calculés séparément puis fusionnés. Pour dire que les recommandations issues des approches collaboratives et basée sur le contenu sont générées indépendamment. (ii) L’intégration séquentielle : cette méthode sert à initialiser les recommandations (ex. contenu pour résoudre le cold start), puis l’autre affine les résultats (ex. filtrage collaboratif pour personnalisation).

### 2.2.5. Défis et limites des systèmes de recomandation

Dans ce point, nous allons parcourir certains defis que d’autres auteurs avant nous ont rencontré et voir les moyens d’y apporter solution si possible pour etre différent des autres travaux existantes avant nous. C’est pourquoi, nous allons dans notre travail, analyser les problèmes récents et voir les moyens d’y apporter une durable solution et prevenir les futurs chercheurs sur les solutions possibles en cas d’un traitement du même sujet ou problème.

* + - 1. **Faible densité de données (sparse data)**

L'un des principaux défis des systèmes de recommandation est la faible densité des données, c'est-à-dire le manque d'interactions entre les utilisateurs et les produits. Dans de nombreux cas, les utilisateurs ne notent ou n'évaluent qu'un petit nombre de produits, ce qui rend difficile l'identification de patterns de comportement (**Koren et al., 2023**).

* + - 1. **Froid utilisateur ou produit (cold start)**

Leproblème de cold start(démarrage à froid) est l’un des défis majeurs rencontrés par les systèmes de recommandation, notamment ceux basés sur le filtrage collaboratif. Ce problème survient lorsqu’un nouvel utilisateur ou un nouveau produit est introduit dans le système sans historique d’interactions. Le manque de données empêche alors le système de générer des recommandations personnalisées et pertinentes (Schein et al., 2022 ; Adomavicius & Tuzhilin, 2022).

Dans les systèmes de recommandation utilisant la **factorisation matricielle**, la prédiction de la note  attribuée par un utilisateur u à un item  s’exprime généralement ainsi :

où , sont les biais de l’utilisateur et de l’item, sont les vecteurs de facteurs latents de l’utilisateur et de l’item. Lorsque  ou  sont nouveaux, leurs paramètres ( ou sont inconnus, ce qui rend la prédiction impossible ou peu fiable (Koren, Bell & Volinsky, 2023).

Il existe plusieurs types de cold start : (i) Cold start utilisateur : un nouvel utilisateur n’a pas encore interagi avec le système, ce qui empêche de cerner ses préférences. (ii) Cold start produit : un nouvel item n’a reçu aucune interaction, il est donc difficile. (iii) Cold start système : lors du lancement d’une nouvelle plateforme, aucune donnée n’est disponible. Toutefois, pour surmonter le problème du démarrage à froid, plusieurs approches sont utilisées dont les méthodes hybrides : elles combinent filtrage collaboratif et filtrage basé sur le contenu pour exploiter les attributs des utilisateurs ou des items (Burke et al., 2021). L’utilisation des métadonnées : les informations démographiques, contextuelles ou les descriptions d’items permettent de générer des recommandations initiales (Adomavicius & Tuzhilin, 2022) et l’apprentissage actif :le système sollicite explicitement les préférences de l’utilisateur lors de l’inscription (Schein et al., 2022). En fait, le problème du démarrage à froid limite la capacité de personnalisation des systèmes de recommandation, mais il peut être atténué par l’utilisation de méthodes hybrides et l’exploitation de données contextuelles ou explicites (Schein et al., 2022 ; Burke et al., 2021).

* + - 1. ***Problèmes de scalabilité et d’adaptabilité***

Les systèmes de recommandation modernes sont confrontés à deux défis majeurs : (i) la scalabilité (capacité à gérer de grands volumes de données et d’utilisateurs) et (ii) l’adaptabilité(capacité à s’ajuster rapidement aux changements dans les données et les préférences). Ces problématiques sont cruciales pour garantir la performance, la pertinence et la réactivité des recommandations dans des environnements réels, souvent dynamiques et massifs (Alfaifi, 2024 ; Adomavicius & Tuzhilin, 2022).

La scalabilité désigne la capacité d’un système de recommandation à maintenir des performances acceptables lorsque le nombre d’utilisateurs, d’items ou d’interactions croît de façon exponentielle. Par exemple, des plateformes comme Netflix ou Amazon doivent traiter des millions d’utilisateurs et de produits, générant des milliards de données d’interactions (Gomez-Uribe & Hunt, 2020). Elle possède quelques défis dontla complexité algorithmique :

Les algorithmes de filtrage collaboratif, notamment la factorisation matricielle, impliquent la manipulation de matrices d’interactions très larges et très creuses (sparse). La complexité de calcul augmente rapidement avec la taille du système (Koren, Bell & Volinsky, 2023) ; le coûtmémoire et temps reel :stocker et traiter de grandes matrices ou graphes peut devenir prohibitif en termes de mémoire et de temps de réponse et les mises à jour en temps réel :l’ajout constant de nouvelles interactions nécessite des mises à jour rapides des modèles, ce qui est difficile à grande échelle (Sarwar et al., 2021).

L’adaptabilité, par contre, est la capacité d’un système à intégrer rapidement les nouvelles données (interactions, utilisateurs, produits) et à ajuster ses recommandations en conséquence (Alfaifi, 2024). Ses défis sont le dynamisme des préférences :les goûts des utilisateurs évoluent dans le temps, rendant les modèles statiques rapidement obsolètes ; l’arrivée des nouvelles données :les systèmes doivent pouvoir apprendre en continu (apprentissage incrémental) pour intégrer efficacement les nouvelles interactions (Mpia et al., 2023) et la gestion du concept drift :les distributions de données peuvent changer (concept drift), nécessitant une réactualisation fréquente des modèles.

Les défis de scalabilité et d’adaptabilité sont au cœur de la recherche et du développement des systèmes de recommandation modernes. Leur résolution repose sur des avancées algorithmiques, des architectures distribuées et des techniques d’apprentissage en ligne, afin de garantir la pertinence et la fraîcheur des recommandations dans des environnements massifs et dynamiques (Adomavicius & Tuzhilin, 2022 ; Koren, Bell & Volinsky, 2023 ; Alfaifi, 2024).

### 2.2.6. Technologies et outils pour les systèmes de recommandation

1. ***Présentation de la librairie Surprise***

La librairie Surprise(Simple Python RecommendatIon System Engine)est un outil open-source développé en Python, spécifiquement conçu pour la construction, l’expérimentation et l’évaluation de systèmes de recommandation, en particulier ceux basés sur le filtrage collaboratif (Hug, 2020). Surprise joue un rôle central dans la recherche et le développement de systèmes de recommandation en fournissant un cadre unifié pour la manipulation des jeux de données d’évaluations utilisateurs ; l’implémentation et la comparaison rapide des divers algorithmes de recommandation et des outils d’évaluation rigoureux pour mesurer la performance des modèles selon plusieurs métriques (comme RMSE, MAE, etc.). Elle est particulièrement adaptée à l’expérimentation académique et au prototypage industriel, car elle permet de tester facilement différentes approches et de valider leur efficacité sur des jeux de données standards ou personnalisés.

Elle offre des avantages tel que (i) la richesse algorithmique. Surprise propose un vaste ensemble d’algorithmes de filtrage collaboratif, notamment la factorisation de matrices (SVD, SVD++), les méthodes de voisinage (KNNBasic, KNNWithMeans, KNNBaseline), ainsi que des algorithmes de base (BaselineOnly, NormalPredictor).(ii) La simplicité d’utilisation : grâce à une API inspirée de scikit-learn, la prise en main est rapide, même pour les utilisateurs débutants en machine learning.(iii) La flexibilité des données: elle permet de charger facilement des jeux de données standards (comme MovieLens) ou des jeux de données personnalisés, facilitant ainsi l’adaptation à divers contextes d’application.(iv) L’extensibilité : les utilisateurs peuvent implémenter leurs propres algorithmes ou protocoles d’évaluation et les intégrer aisément dans le framework existant.(v) La documentation claire et communauté active : la documentation détaillée et la communauté de développeurs contribuent à la robustesse et à l’évolution continue de la librairie (Hug, 2020).

Toutefois, il est important de noter que Surprise se concentre principalement sur les systèmes de recommandation utilisant des évaluations explicites (notes attribuées par les utilisateurs), et ne prend pas en charge les données implicites (clics, achats, etc.) ni le filtrage basé sur le contenu (Hug, 2020). En bref, la librairie Surprise constitue un outil puissant et flexible pour la conception, l’expérimentation et l’évaluation de systèmes de recommandation collaboratifs. Elle se distingue par sa simplicité d’utilisation, la richesse de ses fonctionnalités et sa capacité à accélérer le développement de prototypes fiables dans le domaine de la recommandation.

1. ***Comparaison avec d’autres outils courants***

Le domaine des systèmes de recommandation s’appuie sur divers outils et bibliothèques, chacun ayant des spécificités, des avantages et des limites qui les rendent plus ou moins adaptés selon les besoins du projet. Parmi les plus utilisés figurant Surprise, TensorFlow et Scikit-Learn. Surprise est une bibliothèque Python spécialisée dans la construction de systèmes de recommandation, notamment ceux basés sur le filtrage collaboratif. Elle se distingue par sa simplicité d’utilisation, la richesse de ses algorithmes intégrés (SVD, KNN, NMF, etc.) et ses outils d’évaluation performants. Elle est idéale pour la recherche, le prototypage rapide et l’expérimentation sur des jeux de données structurés contenant des évaluations explicites (Hug, 2020).

Surprise offre des avantages tel que (i) la spécialisation dans le filtrage collaboratif, (ii) la prise en main rapide et documentation claire. (iii) Les outils intégrés pour la validation croisée et la recherche d’hyperparamètres.Toutefois, elle estpeu adaptée aux données implicites (clics, achats) et ne prend pas en charge les modèles complexes de deep learning ni le filtrage basé sur le contenu (Hug, 2020).TensorFlow, par contre, est une plateforme de machine learning open-source développée par Google, principalement axée sur le deep learning. Elle permet de construire des modèles complexes, y compris des réseaux de neurones profonds, des architectures hybrides et des systèmes de recommandation avancés (Alfaifi, 2024).Comme avantages, il est extrêmement flexible et puissant pour le développement de modèles personnalisés. Il supporte le traitement de grandes quantités de données, y compris les données implicites et multimodales (texte, image, etc.).Ilpermet d’implémenter des architectures de pointe (deep learning, réseaux de neurones convolutifs, modèles séquentiels, etc.).En plus, il possède un large communauté et écosystème riche (TensorFlow Recommenders, TensorFlow Lite, etc.). Malheureusement, la courbe d’apprentissage plus élevée, nécessite des connaissances avancées en machine learning et en programmation et est moins adapté pour des expérimentations rapides sur de petits jeux de données structurés.

Scikit-Learn, de son côté, est une bibliothèque généraliste d’apprentissage automatique en Python, largement utilisée pour l’implémentation d’algorithmes classiques de machine learning (régression, classification, clustering, etc.) (Pedregosa et al., 2023). Bien qu’elle ne soit pas spécialisée dans les systèmes de recommandation, elle offre des outils pour le prétraitement, l’évaluation et la modélisation qui peuvent être utiles dans ce contexte. Il a pour avantages le large éventail d’algorithmes de machine learning classiques et un API simple et cohérente, idéale pour le prototypage rapide. Il offre des outils puissants pour la validation croisée, la sélection de modèles et le prétraitement des données. Toutefois, il ne propose pas nativement d’algorithmes de recommandation spécialisés (pas de SVD, KNN adaptés aux matrices utilisateur-objet, etc.) et est moins adaptée pour le traitement de données massives ou non structurées(Burke et al., 2021).

Le tableau ci-dessous recapitule la synthèse de comparaison de ces différents outils :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Critère** | **Surprise** | **TensorFlow** | **Scikit-Learn** |
| Spécialisation | Recommandation collaborative | Deep learning, modèles avancés | Machine learning généraliste |
| Facilité d’utilisation | Très simple | Complexe (avancé) | Simple |
| Algorithmes intégrés | SVD, KNN, NMF, etc. | Réseaux de neurones, hybrides, etc. | Régression, classification, etc. |
| Données supportées | Évaluations explicites | Explicites et implicites, multimoda | Principalement tabulaires |
| Evolutivité | Moyenne | Très élevée | Moyenne |
| Cas d’usage typique | Prototypage, recherche | Production à grande échelle, IA | Analyse exploratoire, prototypage |

Tableau 1: Synthèse de comparaison des outils

Alors le choix de l’outil dépend fortement des objectifs du projet. Surpriseest recommandé pour des expérimentations rapides et des études académiques sur des jeux de données structurés. TensorFlow est préférable pour les systèmes de recommandation complexes, à grande échelle, ou nécessitant des modèles de deep learning. Scikit-Learnconvient pour des tâches de machine learning généralistes ou pour intégrer des étapes de prétraitement et d’évaluation dans un pipeline plus large (Hug, 2020 ; Pedregosa et al., 2023 ; Alfaifi, 2024).

1. ***Principe de Fonctionnement***

La Bibliotheque Suprise est conçue pour faciliter la mise en œuvre de systèmes de recommandation, principalement basés sur le filtrage collaboratif. Son principe de fonctionnement repose sur la prédiction des préférences d’un utilisateur pour un item donné, en se basant sur les interactions passées entre utilisateurs et items (Hug, 2020).

**A. Structure des données et généralisation**

Dans Surprise, les données sont organisées sous forme de triplets : utilisateur, item, et note attribuée. L’item peut représenter n’importe quel objet à recommander (livre, produit, service, etc.), ce qui rend la bibliothèque adaptable à de nombreux domaines d’application (Koren, Bell & Volinsky, 2023). Cette structure permet de construire une matrice utilisateur-item, où chaque entrée correspond à une note ou une interaction. Les systèmes de recommandation collaboratifs, de façon générale, utilisent la matrice utilisateur-item, où chaque cellule de la matrice contient la note ou l’interaction enregistrée (Koren et al., 2023).

**B. Préparation et chargement des données**

Surprise permet de charger des jeux de données personnalisés ou standards. Les données sont ensuite divisées en ensembles d’entraînement et de test, ce qui permet d’évaluer la capacité du modèle à généraliser ses prédictions à de nouveaux utilisateurs ou items (Hug, 2020). Elle offre une grande flexibilité pour le chargement et la manipulation de jeux de données structurés autour du couple utilisateur-item (Hug, 2020).

**C. Entrainement et prédiction**

Après la préparation des données, un algorithme de recommandation (tel que SVD ou KNN) est entraîné sur l’ensemble d’entraînement à l’aide de la commande *algo.fit* (trainset). La prédiction des notes pour l’ensemble de test se fait ensuite avec *algo.test* (testset), ce qui permet d’obtenir les scores prédits pour chaque couple utilisateur-item du test. L’entraînement du modèle sur l’ensemble d’apprentissage, suivi de la prédiction sur l’ensemble de test, constitue la base de l’expérimentation dans Surprise (Hug, 2020).

**D. Prédiction individuelle**

Pour obtenir la prédiction de la note qu’un utilisateur spécifique attribuerait à un item particulier, la méthode *algo.predict* *(uid, iid)* est utilisée, où *uid* est l’identifiant de l’utilisateur et *iid*celui de l’item. Cette fonctionnalité permet d’obtenir des recommandations personnalisées et ciblées (Hug, 2020). Pour plusieurs algorithmes, les focntionnalités integrées pour une utulisation sont en exemple : *predictions = algo.fit(trainset)*. *test(testset)*  :un code qui permet d’imprimer le score de notation predict pour l’ensemble de test. Dans un autre cas, l’aglorithme : *predicitons = algo.prediction(uid, iid)* : dans cette approche, le créateur vise la prédiction de score de notation de l’*iid* et de l’*uid*. La fonction *predict ()* permet de prédire la note pour un couple utilisateur-item donné, ce qui est essentiel pour générer des recommandations individualisées (Hug, 2020).

**E. Utilisation des résultats**

Les résultats des prédictions peuvent être utilisés pour proposer à l’utilisateur les items les plus susceptibles de l’intéresser et pour évaluer la performance du système à l’aide de métriques telles que root mean squared error (RMSE) ou mean absolute error (MAE), qui mesurent la précision des prédictions par rapport aux notes réelles (Hug, 2020 ; Koren et al., 2023). L’évaluation des systèmes de recommandation repose sur des métriques d’erreur qui quantifient l’écart entre les notes prédites et les notes effectives (Koren et al., 2023).

1. ***Framework Flask pour le déploiement Web***

Flask est un framework Python léger, modulaire et très populaire pour le développement d’applications web. Il est particulièrement apprécié pour sa simplicité, sa flexibilité et sa capacité à s’intégrer facilement avec d’autres outils et bibliothèques Python, ce qui en fait un choix privilégié pour le déploiement de systèmes de recommandation (Grinberg, 2022).

Flask adopte une architecture minimaliste, dite « micro-framework », ce qui signifie qu’il fournit uniquement les composants essentiels pour construire une application web (gestion des requêtes HTTP, routage, templates HTML, etc.), tout en laissant la liberté au développeur d’ajouter des extensions selon les besoins spécifiques du projet (Grinberg, 2022). Cette modularité permet de garder le code simple et facile à maintenir, tout en offrant la possibilité d’intégrer des fonctionnalités avancées comme l’authentification, la gestion des sessions, ou la connexion à des bases de données (Grinberg, 2022). « Flask est conçu pour être extensible et flexible, permettant aux développeurs de choisir les composants dont ils ont besoin sans imposer une structure lourde » (Grinberg, 2022).

Flask facilite le déploiement de modèles d’apprentissage automatique, notamment ceux développés avec des bibliothèques telles que scikit-learn, TensorFlow ou Surprise. Il permet d’exposer les modèles via des API web (REST), ce qui rend possible l’interaction entre le système de recommandation et l’interface utilisateur ou d’autres applications externes (Grinberg, 2022). Par exemple, une application Flask peut recevoir les données d’un utilisateur via une requête HTTP, utiliser un modèle de recommandation pour générer des suggestions personnalisées, puis retourner les résultats en temps réel à l’utilisateur (Alfaifi, 2024). L’intégration de modèles de machine learning dans des applications web est simplifiée grâce à la capacité de Flask à gérer les requêtes et à fournir des réponses dynamiques (Grinberg, 2022).

Flask prend en charge la connexion à divers systèmes de gestion de bases de données (relationnelles ou NoSQL) à l’aide d’extensions comme Flask-SQLAlchemy ou Flask-PyMongo. Cela permet de stocker, récupérer et mettre à jour facilement les données des utilisateurs, les historiques d’interaction et les résultats de recommandation, éléments essentiels pour un système de recommandation efficace (Grinberg, 2022).

Grâce à ses nombreuses extensions, Flask permet une gestion efficace des bases de données, essentielle pour les applications de recommandation personnalisée (Grinberg, 2022).

La légèreté de Flask le rend adapté aussi bien au prototypage rapide qu’au déploiement en production. Il peut être déployé sur divers serveurs web (comme Gunicorn ou uWSGI) et s’intègre facilement dans des environnements cloud ou conteneurisés (Docker). Cette flexibilité permet de faire évoluer l’application selon la croissance du nombre d’utilisateurs ou la complexité des recommandations à fournir (Grinberg, 2022). La simplicité de déploiement de Flask en fait un outil privilégié pour passer rapidement du prototype à la production (Grinberg, 2022).

Enfin, Flask constitue un environnement idéal pour le déploiement de systèmes de recommandation grâce à sa simplicité, sa flexibilité et sa capacité à s’intégrer avec les modèles de machine learning et les bases de données. Il permet de transformer un modèle de recommandation développé en Python en une application web interactive, accessible à grande échelle (Grinberg, 2022 ; Alfaifi, 2024).

## 2.3. Revue de littérature empirique

### 2.3.1. Études sur les systèmes de recommandation collaboratifs

Les systèmes de recommandation collaboratifs jouent aujourd’hui un rôle central dans la personnalisation des services numériques, en permettant de mieux satisfaire les besoins et préférences des utilisateurs dans divers secteurs tels que l’e-commerce, la santé, l’éducation, le tourisme ou encore l’industrie (Adomavicius & Tuzhilin, 2022). Leur popularité s’explique par leur capacité à exploiter l’intelligence collective issue des interactions passées entre utilisateurs et items, afin de proposer des suggestions pertinentes et adaptées (Sarwar et al., 2021).

Au fil des années, de nombreux chercheurs ont exploré et amélioré ces systèmes. Par exemple, Tork et al. (2022) se sont intéressés à la problématique de la surspécialisation, un phénomène fréquent dans les systèmes de recommandation basés sur le contenu, où les suggestions deviennent trop similaires et manquent de diversité. Pour remédier à cela, les auteurs ont proposé une approche hybride intégrant des algorithmes génétiques dans le processus de recommandation. Leur méthode vise à diversifier les suggestions et à introduire des éléments inattendus et innovants pour les utilisateurs, tout en maintenant la pertinence des recommandations.

Dans leur étude publiée dans la revue *Elecronics*, Tork et ses collègues détaillent la mise en œuvre d’un Recommender System based on a Genetic Algorithm (abrégé RRSGA), qui combine les avantages du filtrage collaboratif et de l’optimisation génétique. L’algorithme génétique, en explorant différentes combinaisons d’items, permet d’éviter l’effet de surspécialisation et d’améliorer la diversité des recommandations (Tork et al., 2022). Les résultats expérimentaux présentés par les auteurs montrent que le modèle RRSGA surpasse les approches classiques de filtrage basé sur le contenu, tant en termes de précision que de diversité des recommandations.

Plus précisément, la comparaison empirique réalisée par Tork et al. (2022) met en évidence une amélioration significative de la qualité des prédictions et de la satisfaction utilisateur grâce à l’intégration de l’algorithme génétique. Cette étude illustre ainsi l’importance des approches hybrides et de la recherche constante de solutions innovantes pour surmonter les limites des systèmes de recommandation traditionnels.

Bref, l’évolution des systèmes de recommandation collaboratifs se caractérise par une diversification des méthodes et une attention croissante portée à la personnalisation, à la diversité et à l’innovation dans les recommandations, comme le démontrent les travaux récents de Tork et al. (2022) et d’autres chercheurs dans le domaine (Adomavicius & Tuzhilin, 2022 ; Sarwar et al., 2021).

### 2.3.2. Applications pratiques dans le commerce local et international

Les systèmes de recommandation sont aujourd’hui incontournables dans le commerce électronique international. Des entreprises majeures telles qu’Amazon et Netflix exploitent des algorithmes avancés, notamment le filtrage collaboratif basé sur les utilisateurs, le filtrage sur les items, ainsi que la factorisation matricielle, afin de personnaliser les suggestions faites à leurs clients (Gomez-Uribe & Hunt, 2020). Ces plateformes combinent des méthodes d’apprentissage supervisé et des techniques de réduction de dimension pour améliorer la pertinence et la diversité des recommandations (Gomez-Uribe & Hunt, 2020 ; Koren, Bell & Volinsky, 2023).

Dans les économies développées, ces technologies ont transformé l’expérience utilisateur et généré une forte valeur ajoutée commerciale. Cependant, leur adoption dans le commerce local, en particulier dans les économies en développement, demeure limitée. Selon Zhang et Chen (2020), les systèmes de recommandation présentent un potentiel considérable pour améliorer la performance des petites entreprises locales, mais leur déploiement est freiné par des défis tels que la disponibilité des données, l’infrastructure technologique et la formation des acteurs locaux.

La ville de Butembo, au Nord-Kivu, en République Démocratique du Congo (RDC), constitue un centre économique dynamique, notamment grâce à ses activités commerciales et entrepreneuriales (Menomavuya, 2018). Cependant, l’intégration des systèmes de recommandation dans les pratiques commerciales locales reste embryonnaire, voire inexistante à ce jour. Les entreprises de Butembo s’appuient principalement sur des méthodes traditionnelles de gestion de la relation client et de promotion des produits, telles que le bouche-à-oreille, les affiches, ou encore les réseaux sociaux classiques, sans recours systématique à des outils de recommandation automatisés (Menomavuya, 2018). Plusieurs facteurs expliquent cette situation dont (i) le manque d’infrastructures numériques : l’accès limité à Internet et aux technologies de l’information freine l’adoption de solutions avancées comme les systèmes de recommandation (Ngangoue, 2016). (ii) La faible disponibilité et qualité des données: les commerçants locaux ne disposent pas toujours de bases de données structurées sur les comportements d’achat ou les préférences des clients, ce qui rend difficile l’implémentation de modèles de recommandation performants (Zhang & Chen, 2020). (iii) Le niveau de formation: l’absence de compétences techniques spécialisées dans le domaine de la science des données ou de l’intelligence artificielle constitue également un obstacle majeur (Menomavuya, 2018).

Malgré ces défis, des opportunités existent pour l’introduction progressive des systèmes de recommandation dans le tissu commercial local. Des initiatives de formation, le développement de solutions adaptées au contexte africain, et la sensibilisation des commerçants aux avantages de la personnalisation pourraient favoriser l’émergence de telles technologies à Butembo et dans d’autres villes de la RDC (Ngangoue, 2016). Si les systèmes de recommandation sont largement adoptés dans le commerce international, leur application dans le contexte local de Butembo reste encore à développer. Des efforts concertés en matière d’infrastructure, de formation et de gestion des données sont nécessaires pour permettre aux entreprises locales de tirer pleinement parti de ces technologies innovantes.

### 2.3.3. Analyse des lacunes et des opportunités pour le projet actuel

La littérature récente met en évidence que les systèmes de recommandation ont principalement été conçus et optimisés pour des environnements riches en données, tels que les grandes plateformes de commerce électronique internationales (Adomavicius & Tuzhilin, 2022). Cette abondance de données permet de construire des modèles performants, capables de fournir des recommandations personnalisées et pertinentes. Cependant, dans des contextes à faible densité de données comme c’est le cas dans la ville de Butembo, l’application de ces systèmes reste limitée et peu étudiée (Munyaneza et al., 2021).

En effet, l’étude de Munyaneza et al. (2021) sur l’e-commerce en RDC souligne que la majorité des entreprises locales font face à un manque d’infrastructures numériques, à une faible digitalisation des transactions et à une insuffisance de données exploitables pour l’analyse comportementale des clients. Cette situation rend difficile l’implémentation de systèmes de recommandation traditionnels, qui reposent sur la disponibilité de larges volumes de données historiques. De plus, les commerçants locaux sont confrontés à des défis liés à la gestion des stocks et à la synchronisation entre l’offre et la demande, ce qui limite encore davantage l’efficacité des solutions classiques (Makinano et al., 2023).

Par ailleurs, une analyse de Fadhil et Rehman (2024) met en avant la nécessité d’adapter les technologies de recommandation aux réalités locales, notamment en tenant compte des contraintes spécifiques telles que la connectivité intermittente, la fragmentation des données et le manque de compétences techniques. L’auteur suggère que le développement de systèmes de recommandation collaboratifs adaptés à ces contextes pourrait non seulement améliorer la gestion des stocks, mais aussi optimiser l’expérience client et stimuler la croissance des entreprises locales.

Face à ces constats, le projet actuel vise à combler cette lacune en développant un système de recommandation collaboratif spécifiquement conçu pour les environnements à faible densité de données, comme celui de Butembo. L’objectif est de proposer une solution qui tienne compte des contraintes locales, tout en exploitant les opportunités offertes par la digitalisation progressive du commerce dans la région. En s’appuyant sur des approches hybrides et des méthodes adaptées à la rareté des données, ce projet ambitionne de renforcer la compétitivité des entreprises locales et de favoriser l’adoption des technologies numériques dans le tissu commercial de la RDC (Gomez et al., 2019 ; Munyaneza et al., 2021 ; Makinano et al., 2023 ; Fadhil & Rehman, 2024).

## Synthèse et positionnement de la recherche

En résumé, ce chapitre a exploré les concepts clés, les approches théoriques, et les outils technologiques liés aux systèmes de recommandation. Il a également examiné les défis et les limites de ces systèmes, ainsi que leur application dans des contextes pratiques. La revue de littérature nous a permis de comprendre les applications existantes avant d’apporter notre approche, pour éviter une même production d’application que les applications précédentes. Fouiller dans l’histoire est toujours mieux pour afin produire quelque chose de nouveau qu’ancienne. C’est pourquoi, cette partie nous a aidé comment comprendre les approches que nous avons apporté à notre problématique et également une application adaptée aux fonctionnements de la Ville de Butembo.

## Présentation de la Ville de Butembo

Butembo est une ville de la RDC, située dans la province du Nord-Kivu. Elle fait partie des trois grandes villes du Nord-Kivu, localisée à l’extrême nord-est du pays. Sa circonscription urbaine s’étend entre 0°05’ et 0°10’ de latitude nord et 29°17’ et 29°18’ de longitude Est, à environ 17 km au nord de l’Equateur. La ville se trouve à proximité de la dorsale occidentale du Rift Albertin, au nord-ouest du lac Édouard, et est bâtie sur les hautes terres du lac Kinya-Muliha (Édouard), entre 1700 et 1800 mètres d’altitude, le long de la route Congo-Nil dans le Kivu septentrional. Butembo bénéficie d’un climat frais et d’une pluviosité modérée (environ 1380 mm par an). Le site de la ville est caractérisé par une dépression entourée de collines de tailles et d’altitudes variées (Menomavuya, 2018).

Sur le plan culturel et artistique, Butembo est un centre dynamique en RDC. On y retrouve plusieurs institutions et espaces culturels et commerciaux majeurs, tels que le Musée National de Butembo, l’Association Muthembo Arts, la Réserve forestière de Mususa, la Galerie Tsongo Butembo (GTB), le Super Marché Alpha, le Marché Central de Butembo, Issale Lounge, Village Royal, Chez Feza, Maida Grill, Club des Intimes chez Vanessa, Hôtel La Charité, Hôtel Believe, Hôtel Butembo, ainsi que les réseaux de communication Vodacom, Airtel et Orange,… qui facilitent la connectivité et les échanges (Menomavuya, 2018).

D’un point de vue économique et commercial, Butembo se distingue comme un pôle commercial régional majeur. La ville joue un rôle clé dans l’approvisionnement des provinces voisines et des villes en produits divers, grâce à un réseau dense de marchés, de boutiques et de supermarchés. Les activités commerciales sont soutenues par un dynamisme entrepreneurial local, une forte mobilité des biens et des personnes, ainsi que par l’ouverture sur les marchés nationaux et transfrontaliers. Selon une étude de Mbusa et al. (2022), Butembo est reconnue pour son tissu commercial actif, sa capacité d’innovation dans les pratiques de vente et sa contribution significative à l’économie du Nord-Kivu et de la RDC en général (Mbusa et al., 2022).

La ville de Butembo, grâce à son dynamisme économique et commercial, s’impose comme un centre d’échange important pour la région du Nord-Kivu, avec une influence notable sur les flux de marchandises et la structuration des circuits de distribution (Mbusa et al., 2022, p. 312).

### Justification de l’importance du système de recommandation

Cette recherche fournit des statistiques sur les produits les plus vendus et les plus consommés par les clients. En effet, le temps étant précieux pour les commerçants, cette application permettra de raccourcir le processus d’achat en aidant les vendeurs à mieux cibler les articles à proposer. Ainsi, les clients n’auront plus à passer de longues minutes à chercher les produits les plus populaires, car ces derniers seront automatiquement suggérés selon les tendances de consommation. Cette fonctionnalité est d’autant plus pertinente dans une ville commerciale comme Butembo, où la rapidité et l’efficacité des transactions sont essentielles pour rester compétitif.

De plus, cette étude offre un avantage supplémentaire pour les clients venant de l’extérieur, qui pourront découvrir rapidement les articles les plus appréciés du magasin, même si ceux-ci ne sont pas encore disponibles dans leur propre environnement de vente. Cela favorise la curiosité et l’innovation dans les pratiques d’achat, tout en renforçant l’attractivité commerciale de Butembo.

Une fois ce système déployé, une fonctionnalité de partage sera intégrée afin de renforcer l’interaction entre utilisateurs. Compte tenu de la situation sécuritaire du pays, l’ajout d’un module de chat permettra aux clients réguliers d’une boutique de recevoir directement, après leur commande, les articles recommandés par l’application ainsi que ceux qu’ils ont eux-mêmes sélectionnés. Après validation du paiement et des frais de transport, les colis pourront être livrés sans que le client ait besoin de se déplacer. Cela contribuera à améliorer l’expérience utilisateur et à fidéliser la clientèle, tout en soutenant la modernisation du commerce local.

## Conclusion partielle

Ce chapitre a fourni une revue approfondie de la littérature sur les systèmes de recommandation, en mettant l'accent sur les approches collaboratives et leur application dans le commerce local. Les défis liés à la faible densité de données et au "cold start" ont été identifiés comme des obstacles majeurs à l'efficacité des systèmes de recommandation dans des contextes comme celui de Butembo. Cependant, les technologies disponibles, telles que la librairie Surprise et le framework Flask, offrent des opportunités pour surmonter ces défis. Le chapitre suivant présentera la méthodologie adoptée pour concevoir et développer le système de recommandation collaboratif proposé dans cette étude.

# Troisième Chapitre : MÉTHODOLOGIE

## 3.1. Introduction

Ce chapitre méthodologique a pour objectif de présenter de manière détaillée la démarche adoptée pour la conception, l’implémentation et l’évaluationdu système de recommandation collaboratif développé dans le cadre de ce projet. Il s’agit de décrire, étape par étape, les choix techniques et scientifiques qui ont guidé la réalisation du système, depuis la modélisation des données jusqu’au déploiement de l’application web, en passant par l’entraînement du modèle de recommandation et l’intégration des différents modules fonctionnels. L’objectif est de permettre au lecteur de comprendre non seulement comment le système a été construit, mais aussi pourquoi certaines méthodes et outils ont été privilégiés, en tenant compte des spécificités du contexte local et des contraintes identifiées lors de l’analyse des besoins.

Le choix de la méthodologie repose sur une combinaison de critères : pertinence scientifique, faisabilité technique, adaptabilité au contexte local (ville de Butembo), et efficacité pour répondre aux problématiques de faible densité de données et de gestion commerciale.

## 3.2. Conception du système de recommandation

### 3.2.1. Modèle conceptuel

Le système de recommandation collaboratif développé vise à répondre à plusieurs besoins spécifiques identifiés chez les acteurs du commerce local à Butembo :

* **Pour les commerçants :**
* Optimiser la gestion des stocks et anticiper les ruptures grâce à l’analyse automatisée des ventes et des niveaux de stock.
* Mieux comprendre les préférences des clients afin d’ajuster l’offre de produits et d’augmenter la fidélisation.
* Gagner du temps dans le conseil client grâce à des suggestions automatiques de produits populaires ou adaptés.
* **Pour les clients :**
* Recevoir des recommandations personnalisées sur les produits susceptibles de les intéresser, basées sur leur historique d’achats et les évaluations d’autres clients.
* Accélérer le processus d’achat, notamment en découvrant rapidement les articles les plus appréciés ou les nouveautés.
* Profiter d’une interface simple pour consulter, noter et recommander des produits.

L’objectif global du système est donc de favoriser la digitalisation intelligente du commerce localen apportant une valeur ajoutée tant pour les commerçants que pour les clients, tout en s’adaptant à un contexte de faible densité de données et de ressources limitées.

Le système proposé se compose des fonctionnalités principales suivantes :

1. **Gestion des clients** :

* Ajout, consultation et gestion des informations clients (nom, email, préférences).
* Visualisation paginée des clients.

1. **Gestion des produits** :

* Ajout de nouveaux produits avec gestion d’image, catégorie, prix et stock.
* Consultation paginée et affichage des produits.

1. **Gestion des transactions** :

* Enregistrement des achats (transactions), avec attribution d’une note (1 à 5) par le client.
* Visualisation des transactions et des évaluations.

1. **Système de recommandation** :

* Génération de recommandations personnalisées pour chaque client à partir de son historique d’achats et des notes attribuées.
* Affichage des recommandations sous forme de liste de produits triés par pertinence.

1. **Optimisation des stocks** :

* Détection automatique des produits dont le stock est inférieur à un seuil défini et suggestion de réapprovisionnement.

1. **Interface web conviviale** :

* Navigation intuitive entre les différentes fonctionnalités (clients, produits, transactions, recommandations, stocks).
* Utilisation de Bootstrap pour un rendu responsive et moderne.

1. **Diagramme de cas d’utilisation (Use Case)**

Le diagramme de cas d’utilisation (Use Case Diagram) constitue un outil fondamental de modélisation dans le langage UML (Unified Modeling Language). Il permet de représenter de manière synthétique les principales interactions entre les acteurs externes (utilisateurs ou systèmes voisins) et les fonctionnalités proposées par un système cible (Booch, Rumbaugh & Jacobson, 2005). Ce type de diagramme met en évidence, d’une part, les fonctionnalités majeures offertes par l’application et, d’autre part, les modalités d’interaction entre les acteurs et ces fonctionnalités.

Dans le cadre de la présente recherche, le diagramme de cas d’utilisation a joué un rôle déterminant dans la structuration de la conception de l'application. Il a permis d’identifier clairement l’acteur principal, à savoir l’administrateur, généralement le commerçant, et de cartographier l’ensemble des fonctionnalités nécessaires pour satisfaire les besoins exprimés lors de l’analyse préalable. Les principales fonctionnalités recensées incluent la gestion des clients, la gestion des produits, l’enregistrement des transactions accompagnées d’une notation, la visualisation des recommandations ainsi que la consultation des suggestions de réapprovisionnement de stock.

Deux catégories d’acteurs principaux ont été identifiées dans ce système. L’administrateur est chargé de la gestion complète des données relatives aux clients, aux produits, aux transactions et aux stocks. Le client, quant à lui, interagit avec le système principalement en recevant des recommandations personnalisées et en attribuant des notes aux produits consommés. Cette identification claire des rôles contribue à une modélisation efficace des exigences fonctionnelles. En plus des acteurs humains, un acteur virtuel est introduit dans le système : le **modèle d’intelligence artificielle (IA)**. Cet acteur, bien que non humain, intervient activement dans le processus de recommandation des produits. Il analyse les transactions antérieures et les préférences des clients afin de générer automatiquement des suggestions personnalisées. Le modèle IA agit ainsi en tant qu’agent autonome, interagissant avec le système pour fournir des recommandations sans intervention humaine directe

Par ailleurs, un cas d’utilisation fondamental précède l’ensemble des opérations de gestion : il s’agit de l’**authentification de l’administrateur**. Cette étape préalable est indispensable pour garantir que seules les personnes autorisées ont accès aux fonctionnalités sensibles du système, notamment la gestion des clients, des produits, des transactions et des stocks. L’authentification constitue ainsi un point d’entrée obligatoire qui renforce la sécurité du système tout en assurant une traçabilité rigoureuse des actions réalisées par l’administrateur (Sommerville, 2011 ; Pressman & Maxim, 2020).

Les cas d’utilisation essentiels identifiés dans le cadre de ce système comprennent notamment : l’ajout et la consultation d’un client, l’ajout et la consultation d’un produit, l’enregistrement et la consultation des transactions, l’attribution de notes aux produits par le client, la génération automatique de recommandations par le modèle IA, la réception de ces recommandations par le client, ainsi que la visualisation des produits nécessitant un réapprovisionnement. L’ensemble de ces cas d’utilisation a été représenté dans un diagramme qui a servi de base à la conception d’une architecture fonctionnelle cohérente, traduisant fidèlement les exigences métier en fonctionnalités concrètes dans l’application web développée (Sommerville, 2011).

****

Figure 2: Diagramme de cas d'utilisation

1. **Diagramme de séquence**

Le diagramme de séquence, composante essentielle de la modélisation UML, permet de représenter graphiquement la dynamique des interactions entre les objets du système sur un axe temporel. Contrairement au diagramme de cas d’utilisation, qui se concentre sur les fonctions principales et les rôles des acteurs, le diagramme de séquence illustre avec précision la chronologie des échanges de messages entre les composants du système pour un scénario donné (Fowler, 2004).

Dans le cadre de cette recherche, les diagrammes de séquence ont été mobilisés afin de visualiser la logique opérationnelle interne à l’application, en détaillant les interactions successives entre les acteurs (utilisateur humain ou virtuel) et les modules fonctionnels du système. Chaque diagramme de séquence représente un cas d’utilisation critique en simulant le comportement attendu et les flux d’information.

**Exemple : Séquence pour la recommandation d’un produit**

* 1. Le client accède à la page de recommandations.
  2. Le système récupère l’historique d’achats et de notes du client.
  3. Le modèle de recommandation (SVD via Surprise) prédit les scores pour chaque produit.
  4. Le système trie les produits et affiche les 6 meilleurs au client.

1. **Diagramme de classes**

Le diagramme de classes est un outil central dans la conception orientée objet. Il permet de visualiser les éléments clés du système, tels que les entités (appelées classes), leurs caractéristiques (attributs), leurs actions (méthodes), ainsi que les liens qui les unissent. Ce type de représentation aide à structurer l’application et à garantir la cohérence entre la logique métier et son implémentation technique (Booch et al., 2005 ; Sommerville, 2011).

Dans cette étude, le diagramme de classes s’appuie sur la structure de la base de données créée avec SQLAlchemy. On y retrouve quatre entités principales : **Client**, **Produit**, **Transaction** et **User**.

La classe **Client** représente la personne qui utilise l’application pour consommer des produits. Elle contient des informations comme son nom, son adresse e-mail et ses préférences d’achat, qui servent notamment à alimenter le système de recommandation.

La classe **Produit** désigne les articles proposés à la vente. Elle rassemble plusieurs attributs importants : nom, catégorie, prix, quantité en stock et image illustrative. Ces données permettent de gérer efficacement le catalogue produit et le suivi des disponibilités.

La classe **Transaction** traduit le fait qu’un client achète un ou plusieurs produits à une date donnée, en quantité spécifique. Elle enregistre aussi la note que le client attribue au produit, ce qui aide à affiner les suggestions faites par l’algorithme de recommandation.

Enfin, la classe **User** correspond aux utilisateurs chargés d’administrer le système – souvent des commerçants. Elle est utilisée pour gérer les connexions sécurisées et reste indépendante de la classe Client, afin de mieux structurer le système et d’assurer une séparation claire des rôles.

Côté relations, chaque client peut effectuer plusieurs transactions, et chaque produit peut apparaître dans plusieurs d’entre elles. À l’inverse, une transaction est toujours associée à un seul client et à un seul produit. La classe User, quant à elle, ne dépend d’aucune autre, ce qui répond aux principes de conception moderne comme la responsabilité unique (principe SOLID).

Bref, ce diagramme permet de comprendre rapidement comment les données sont organisées et interconnectées dans le système. Il sert de repère pour les développeurs, les analystes et les testeurs tout au long du projet.

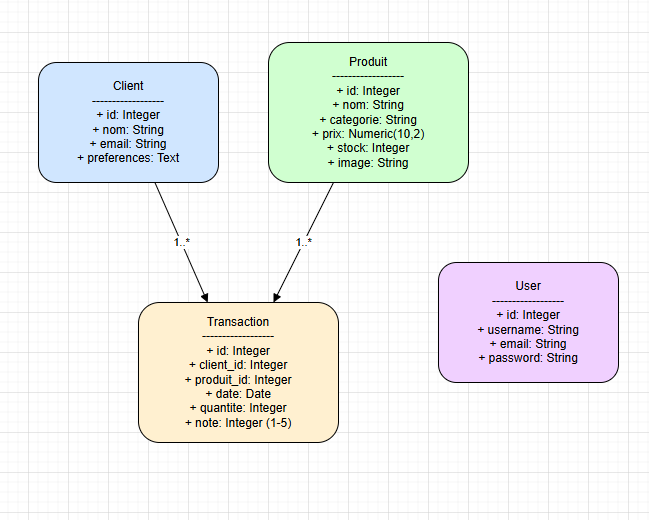


Figure 3: Diagramme des classes

### 3.2.2. Choix de l’approche du système de recommandation

Le choix du filtrage collaboratifcomme approche principale pour ce projet s’explique par plusieurs avantages majeurs adaptés à la réalité du commerce local à Butembo. Premièrement, l’adaptabilité à la disponibilité des données : contrairement aux systèmes basés sur le contenu, le filtrage collaboratif ne nécessite pas de descriptions détaillées des produits. Il exploite directement les interactions entre clients et produits (achats, notes), ce qui est particulièrement pertinent dans un contexte où les données textuelles ou multimédias sont rares ou peu structurées (Sarwar et al., 2021 ; Adomavicius & Tuzhilin, 2022). Deuxièmement, la personnalisation efficace :cette méthode permet de proposer des recommandations personnalisées en se basant sur les comportements et préférences réels des utilisateurs, favorisant ainsi la satisfaction client et la fidélisation (Adomavicius & Tuzhilin, 2022). En fin, la simplicité d’intégration: les algorithmes collaboratifs sont bien documentés, éprouvés dans l’industrie (Netflix, Amazon) et disposent de bibliothèques Python robustes telles que Surprise, facilitant leur implémentation et leur évaluation (Hug, 2020).

Dans le contexte de Butembo, où l’on dispose principalement d’historiques d’achats et de notes, le filtrage collaboratif s’impose donc comme la solution la plus pragmatique et la plus efficace.

1. **Comparaison avec d’autres approches (basé sur le contenu, hybride)**

L’approche basée sur le contenu recommande des produits similaires à ceux déjà appréciés par l’utilisateur, en s’appuyant sur les caractéristiques des produits (catégorie, description, etc.). Elle fonctionne bien même avec peu d’utilisateurs, utile pour le démarrage du système. Toutefois, elle nécessite des données descriptives riches et structurées pour chaque produit, ce qui n’est pas toujours disponible dans le contexte local (Lops et al., 2021). Elle tend aussi à générer des recommandations trop similaires (surspécialisation).

Les systèmes hybrides quant à eux combinent plusieurs méthodes (collaboratif, contenu, etc.) pour pallier les faiblesses de chaque approche. Ils résolvent le problème du démarrage à froid (« cold start »), améliorent la diversité et la robustesse des recommandations (Burke et al., 2021). Malheureusement, ils sont plus complexes à mettre en œuvre et à maintenir, nécessitent des ressources et des données supplémentaires, ce qui peut être un frein dans un contexte à faible infrastructure (Khaledian et al., 2025).

Ce tableau sysnthèse les comparaisons des différentes approches des systèmes de recommandations :

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Critère** | **Filtrage collaboratif** | **Basé sur le contenu** | **Hybride** |
| Données requises | Interactions (notes) | Descriptions items | Les deux + autres |
| Complexité | Moyenne | Moyenne | Elevée |
| Adapté au contexte local | Oui | Limite | Possible mais complexe |
| Personnalisation | Excellente | Moyenne | Excellente |
| Démarrage à froid | Problématique | Gère bien | Gère bien |

Tableau 2: Comparaison des systèmes de recommandation

Partant des contraintes locales et des objectifs du projet, le filtrage collaboratifest retenu comme approche principale dans cette étude, avec la possibilité d’évoluer vers une solution hybride à moyen terme.

* + - 1. **Présentation de l’algorithme choisi**

Pour la mise en œuvre du filtrage collaboratif, l’algorithme principal utilisé est la factorisation de matrice par décomposition en valeurs singulières (SVD), via la librairie Surprise (Hug, 2020). SVD décompose la matrice utilisateur-produit (où chaque entrée correspond à une note ou une interaction) en facteurs latents, permettant de prédire la note qu’un utilisateur attribuerait à un produit non encore évalué (Koren, Bell & Volinsky, 2023). Ses avantages sont la précision élevée dans la prédiction des notes, la capacité à capturer des relations complexes entre utilisateurs et produits, et l’efficacité même avec des matrices creuses (peu de notes renseignées) (Lops, de Gemmis & Semeraro,2021).

L’implémentation de SVD est simple. Il y a d’abord les transactions (notes) sont extraites de la base de données, transformées en DataFrame, puis utilisées pour entraîner le modèle SVD.Le modèle est ensuite évalué à l’aide de métriques telles que RMSE et MAE pour garantir la qualité des recommandations.Une fois entraîné, le modèle est sauvegardé et utilisé pour générer les recommandations personnalisées sur l’application web (Alfaifi, 2024).

Pour dire, le choix du filtrage collaboratifbasé sur l’algorithme SVD offre un compromis optimal entre simplicité, performance et adaptabilité au contexte local. Cette approche permet de répondre efficacement aux besoins des commerçants et des clients de Butembo, tout en posant les bases pour d’éventuelles évolutions vers des systèmes hybrides à l’avenir.

### 3.2.3. Architecture du système

Le système de recommandation collaboratif mis en œuvre repose sur une **architecture client-serveur** classique, articulée autour de trois grands composants :

**A. L’interface utilisateur (Client Web)**

Lesutilisateurs (commerçants ou clients) interagissent avec le système via une interface web responsive, développée avec HTML, CSS (Bootstrap) et les templates Jinja2 de Flask. Cette interface permet la gestion des clients, des produits, des transactions, la visualisation des recommandations et l’optimisation des stocks.

**B. Le serveur applicatif (Backend Flask)**

Le cœur de l’application est un serveur Flask qui gère les routes HTTP pour chaque fonctionnalité (accueil, gestion des clients/produits/transactions, recommandations, stocks) ; la logique métier (ajout, modification, affichage des entités) ; l’appel au moteur de recommandation et à la logique d’optimisation des stocks et l’interface avec la base de données via SQLAlchemy.

**C. La base de donnees relationnelle (MySQL)**

Toutes les données structurées (clients, produits, transactions, stocks) sont stockées dans une base MySQL. SQLAlchemy assure l’ORM (mapping objet-relationnel) pour faciliter les requêtes et la gestion des entités.

Le diagramme ci-après présente les différentes composantes de l’architecture proposée dans cette recherche :

Figure 4: Fonctionnement de la base des données

Le moteur de recommandation de ce projet est entraîné à partir des transactions (notes données par les clients aux produits). Il est implémenté avec la bibliothèque Surprise et utilise l’algorithme SVD pour générer des prédictions de notes et des recommandations personnalisées. Le modèle est sauvegardé et chargé dynamiquement pour répondre aux requêtes du serveur. L’utilisateur effectue des actions via l’interface web (ajout d’un achat, consultation de recommandations, etc.). Flask reçoit la requête, interagit avec la base de données pour récupérer ou enregistrer les données nécessaires.

Pour les recommandations, Flask appelle le moteur SVD (chargé via joblib), qui prédit les scores pour chaque produit non encore évalué par le client. Toutes les interactions passent par le serveur Flask. La base MySQL stocke toutes les entités (clients, produits, transactions). Le moteur SVD est entraîné sur les transactions et utilisé pour prédire les recommandations. Les templates HTML affichent dynamiquement les résultats à l’utilisateur.

Figure 5: Fonctionnement MySQL

### Les outils utilisés

Pour réaliser ce travail, le choix des outils s’est porté sur des technologies récentes, robustes et largement reconnues pour leur efficacité dans le développement d’applications web et l’implémentation de systèmes de recommandation. Python a constitué le socle principal du développement backend ; ce langage est privilégié non seulement pour sa lisibilité et son écosystème scientifique riche, mais aussi pour sa communauté très active et la disponibilité de ressources adaptées aussi bien à l’analyse de données qu’à la programmation web (Lops, de Gemmis, & Semeraro, 2021).

Dans une démarche de développement rapide et modulaire, Flask a été retenu comme framework web : sa légèreté, sa flexibilité et la facilité avec laquelle il s’intègre à des extensions spécialisées en font un choix idéal pour construire des applications évolutives (Alfaifi, 2024). Afin de faciliter l’interaction avec la base de données relationnelle et de manipuler les entités de façon objet, SQLAlchemy, un ORM performant pour Python, a été utilisé, ce qui a permis d’optimiser la gestion des transactions et de fiabiliser les accès aux données.

La gestion des données s’appuie sur MySQL, un système de gestion de base de données relationnelle reconnu pour sa stabilité, ses performances sur de gros volumes transactionnels et sa compatibilité avec les principaux outils du marché (Menomavuya, 2018). Concernant les besoins spécifiques d’analyse et de recommandation, c’est la bibliothèque Surprise qui a été sélectionnée, car elle propose des algorithmes puissants tels que la factorisation par SVD. Surprise se distingue par sa facilité d’utilisation et la richesse de ses fonctionnalités pour l’évaluation des modèles collaboratifs, offrant des benchmarks (références ou standards utilisés pour évaluer les performances des algorithmes de recommandation) reproductibles et une intégration aisée dans des projets en production (Alfaifi, 2024).

Pour le stockage et la réutilisation efficace des modèles d’apprentissage, Joblib a été adoptée : elle assure une sérialisation fiable et rapide des objets Python volumineux, ce qui facilite la persistance des modèles entraînés et leur chargement instantané lors de l’utilisation en production.

L’interface utilisateur a bénéficié de Bootstrap, reconnu pour l’accélération du développement d’interfaces web modernes, responsives et cohérentes. Bootstrap s’impose par la facilité de prise en main, la disponibilité de composants prêts à l’emploi et la compatibilité multi-navigateurs, permettant un design attractif qui s’adapte à tous types d’écrans.

Enfin, la génération dynamique des pages HTML repose sur le moteur de templates Jinja2, intégré à Flask. Cet outil rend possible la création de vues dynamiques et flexibles, tout en garantissant la séparation claire entre la logique applicative et la présentation des données, renforçant ainsi la maintenabilité et l’évolutivité de l’application.

Au général, ces choix technologiques s’inscrivent dans une logique de performance, de modularité et d’évolution, permettant de répondre efficacement aux exigences d’agilité, d’analyse de données complexes et d’expérience utilisateur de qualité qui caractérisent les projets modernes d’intelligence artificielle et de recommandation.

## 3.3. Collecte et prétraitement des données

### 3.3.1. Source et nature des données

Le système de recommandation collaboratif développé dans ce projet repose sur un jeu de données propres constitués à partir des interactions utilisateurs sur la plateforme web. Dans un contexte idéal, ces données seraient collectées en temps réel à travers les différentes fonctionnalités de l’application, notamment l’ajout des clients, des produits et la création des transactions correspondantes aux achats, incluant la notation explicite des produits par les utilisateurs. Contrairement à certains travaux qui utilisent des jeux de données publics tels que MovieLens, notre approche vise à refléter fidèlement la réalité du commerce local à Butembo, en tenant compte des spécificités des produits, des habitudes d’achat et des préférences des clients du contexte ciblé. (Alfaifi, 2024).

Toutefois, durant la phase de développement et de test, les données d’entraînement utilisées pour le moteur de recommandation ont été générées artificiellement à l’aide du script python. Ce script s’appuie sur la librairie Faker pour simuler des profils clients, des catalogues de produits variés et des historiques d’achats sous forme de transactions authentiques, prenant en compte des paramètres tels que les préférences clients et les catégories produits (Lops, de Gemmis, & Semeraro, 2021).

Concrètement, ce processus de génération automatique produit un ensemble cohérent et représentatif composé de : 15 clients synthétiques, avec des noms, adresses email et préférences associées à certaines catégories de produits, 20 produits variés répartis dans plusieurs catégories thématiques (technologie, mode, alimentation, etc.), avec des prix, des niveaux de stock et des images simulées, environ 500 transactions simulant les achats des clients sur différents produits, chaque transaction incluant une date d’achat, une quantité et une note attribuée selon l’adéquation entre préférences du client et catégorie du produit.

Cette approche à base de données simulées pendant la phase de développement permet de créer un jeu d’entraînement riche et flexible, garantissant la robustesse du modèle SVD entraîné. Cela compense temporairement l’absence de données réelles collectées sur le terrain lors des premiers déploiements.

Dans le cadre du déploiement opérationnel, ces données générées sont conçues pour être remplacées progressivement par les données réelles captées en continu depuis l’application. L’architecture via MySQL et SQLAlchemy garantit alors une bonne intégrité, cohérence et facilité d’exploitation des informations collectées (Menomavuya, 2018).

Ainsi, la collecte des données s’effectue via : l’ajout de nouvelles entrées clients à travers les formulaires web, enregistrant noms, emails et préférences dans la base ; l’enrichissement dynamique du catalogue produits, avec leurs caractéristiques stockées ; la création continue, par les utilisateurs, de transactions précisant les achats effectués, les quantités, dates et notes attribuées ; la capture explicite des évaluations (notations) via l’interface utilisateur.

Toutes ces données sont centralisées et structurées dans une base de données relationnelle MySQL, structurée grâce à SQLAlchemy, facilitant leur exploitation directe pour l’entraînement des modèles de filtrage collaboratif.

### 3.3.2. Nettoyage et transformation des données

Le prétraitement des données constitue une étape essentielle pour assurer la qualité et la fiabilité des recommandations générées par notre système. Dans notre projet, le nettoyage s’est articulé sur plusieurs niveaux complémentaires, directement reflétés dans l’implémentation.

D’une part, la validation de la saisie est effectuée au moment même de la collecte via les formulaires de l’application web. Le code Flask impose ainsi des contraintes strictes sur les entrées utilisateurs. Par exemple, lors de l’ajout ou de la modification d’une transaction, les champs obligatoires tels que la note et la quantité font l’objet de contrôles avant validation : la note doit impérativement être comprise entre 1 et 5, et la quantité doit être une valeur positive. Toute soumission hors de ces plages est automatiquement rejetée, provoquant un message d’alerte retourné à l’utilisateur. Cette démarche garantit l’exclusion en amont des valeurs erronées ou manquantes dès l’enregistrement en base.

Cependant malgré ces vérifications en front-end, il est possible que des données invalides subsistent dans la base, notamment issues de phases antérieures ou de manipulations externes. C’est pourquoi, avant l’entraînement du modèle SVD dans train\_model.py, un filtre est appliqué sur le DataFrame constitué des transactions extraites. Plus précisément, les lignes comportant des valeurs manquantes, nulles ou manifestement aberrantes (notes hors de l’intervalle autorisé, quantités négatives ou incohérentes) sont systématiquement exclues du jeu d’entraînement. Cette étape automatisée dans le script Python garantit une matrice utilisateur-produit propre et fiable pour la construction du modèle.

Par ailleurs, la structuration des données pour l’apprentissage a requis une transformation spécifique : les transactions extraites sont converties en un DataFrame pandas contenant uniquement trois colonnes essentielles client\_id, produit\_id, note conformément aux exigences de la librairie Surprise. Cette transformation facilite la construction du dataset aux formats attendus, sans valeurs manquantes.

Enfin, la normalisation des notes, bien que possible dans certains contextes, n’a pas été appliquée explicitement dans ce projet, car l’algorithme SVD de Surprise accepte directement les notes sur l’échelle standard de 1 à 5. Quant aux identifiants utilisateurs et produits, ils sont déjà sous forme numérique dans la base, ce qui évite tout encodage supplémentaire.

Pour clore, cette approche combinée, validations strictes au moment de la saisie, filtrage rigoureux avant entraînement, et transformation adaptée a permis d’obtenir un ensemble de données propre, robuste et exploitable efficacement pour le moteur de recommandation. Ce processus assure la qualité des entrées et minimise les risques de biais ou d’erreurs dans les recommandations proposées.

## 3.4. Implémentation du système de recommandation

### 3.4.1. Algorithmes et techniques utilisés

Le système de recommandation développé dans ce projet repose sur le filtrage collaboratif basé sur la factorisation de matrice, et plus précisément sur l’algorithme SVD (Singular Value Decomposition) a été choisis en raison de sa capacité à traiter efficacement des matrices utilisateur-produit creuses, qui sont typiques dans des contextes où chaque utilisateur n’a évalué qu’une petite fraction des produits disponibles.

Le processus d’implémentation comprend les étapes suivantes : premièrement, les données transactionnelles (client\_id, produit\_id, note) sont extraites de la base MySQL via SQLAlchemy; deuxièmement, ces données sont converties en un format compatible avec Surprise, puis divisées en ensemble d’entraînement et de test ; troisièmement, le modèle SVD est entraîné sur l’historique des notes. Enfin, le modèle entraîné est sauvegardé et utilisé pour prédire les notes non observées, permettant la génération de recommandations personnalisées. Voici un extrait de code synthétique issu du fichier train\_model.py qui illustre le processus :

Figure 6: Extrait de code pour l’entrainement du modèle

Précisons que SVDest une technique de factorisation de matrice permettant de représenter la matrice des notes (utilisateurs × produits) comme le produit de trois matrices :

Où est la matrice de notation (avec représentant la note donnée par l’utilisateur au produit ), est la matrice des facteurs latents des utilisateurs, est une matrice diagonale contenant les valeurs singulières, et est la matrice transposée des facteurs latents des produits.

Selon Sankari et al. (2024), cette technique de décomposition est utilisée pour prédire les notes manquantes dans une matrice utilisateur‑produit en factorisant celle-ci en trois matrices : la matrice utilisateur‑caractéristiques, la matrice diagonale des singular values, et la matrice caractéristiques‑produit. Ces matrices capturent les relations latentes entre utilisateurs et articles ; la prédiction d’une note est obtenue par le produit scalaire entre le vecteur de facteurs latent de l’utilisateur et celui du produit.

Dans le contexte de la recommandation, on cherche à approximer chaque note par :

Où :

est la moyenne globale des notes,

est le biais de l’utilisateur ,

est le biais du produit ,

est le vecteur des facteurs latents de l’utilisateur,

est le vecteur des facteurs latents du produit.

L’algorithme ajuste ces paramètres pour minimiser l’erreur quadratique (RMSE) entre les notes réelles et les notes prédites. Ce schéma, utilisant les biais utilisateur et item, est fréquemment présenté dans les méthodes de factorisation de matrice classiques en recommandation (Santos et al., 2024).

La matrice d’interaction utilisateur-produitest une table où chaque ligne correspond à un utilisateur et chaque colonne à un produit. Les cellules contiennent la note attribuée par l’utilisateur au produit, ou sont vides si l’utilisateur n’a pas évalué ce produit (Sankari et al., 2024).

### 3.4.2. Développement et intégration

Le développement du moteur de recommandation s’est articulé autour de plusieurs étapes clés, chacune visant à garantir la robustesse, la pertinence et l’intégration fluide du système dans l’application web :

1. **Extraction et préparation des données**

Les transactions (achats et notes attribuées par les clients aux produits) sont extraites de la base de données MySQL. Ces données sont formatées sous forme de triplets (client\_id, produit\_id, note) pour constituer la matrice d’interaction utilisateur-produit, indispensable à l’entraînement du modèle SVD.

Figure 7: Extraction des données

1. **Entraînement du modèle SVD**

A l’aide de la librairie Surprise, le modèle SVD a été entraîné sur l’historique des notes. Le processus inclut la division du jeu de données en ensembles d’entraînement et de test, l’ajustement des paramètres du modèle, puis l’évaluation de la performance à l’aide de métriques telles que RMSE et MAE. Le modèle entraîné est ensuite sauvegardé (sérialisé) pour une utilisation ultérieure dans l’application.

Figure 8: Entrainement du modèle SVD

* + - 1. **Chargement et utilisation du modèle**

Lorsqu’un utilisateur demande des recommandations, le modèle SVD est chargé en mémoire. Pour chaque client, le moteur prédit les notes potentielles pour tous les produits non encore évalués, puis sélectionne les articles ayant les scores les plus élevés pour générer une liste personnalisée de recommandations. Voici les images des recommandations de deux clients différents illustrant ce scenario :

Figure 9: Illustration des recommandations des clients

* + - 1. **Intégration de la base de données**

L’intégration du moteur de recommandation avec la base de données repose sur l’utilisation de SQLAlchemy, qui assure le mapping objet-relationnel entre les modèles Python (Client, Produit, Transaction) et les tables MySQL. Cette intégration permet (i) l’accès direct aux données : les fonctions d’extraction des transactions, de récupération des produits et des clients s’appuient sur des requêtes SQLAlchemy, facilitant la manipulation et la mise à jour des données. (ii) La cohérence des informations: toute modification (ajout de client, de produit, de transaction) est immédiatement prise en compte dans la base, assurant que le moteur de recommandation travaille toujours sur des données à jour. (iii) La gestion des relations : les clés étrangères et les contraintes d’intégrité définies dans les modèles garantissent la validité des liens entre clients, produits et transactions, évitant ainsi les incohérences lors de l’entraînement du modèle. Les classes sont définies ainsi :

Figure 10: Extrait de code pour l'integration des données

* + - 1. **Déploiement via Flask et intégration d’une interface utilisateur**

Le déploiement du système s’est effectué à l’aide du framework Flask, qui joue un rôle central dans l’architecture de l’application. Avec Flask, nous avons fait la gestion des routes et des vues : Flask gère les différentes routes de l’application (accueil, gestion des clients, produits, transactions, recommandations, stocks). Chaque fonctionnalité est associée à une vue spécifique, rendue via des templates HTML/Jinja2. Nous avons également fait l’intégration du moteur de recommandation : lorsqu’un utilisateur accède à la page de recommandations, Flask appelle la fonction de prédiction, qui interroge le modèle SVD et retourne les produits recommandés sous forme de liste, affichée dynamiquement dans l’interface. L’interface web, conçue avec Bootstrap, offre une navigation intuitive et responsive. Les utilisateurs peuvent facilement ajouter des clients, des produits, enregistrer des transactions, consulter les recommandations et visualiser l’état des stocks.

L’application Flask peut être déployée localement ou sur un serveur distant, rendant le système accessible à tous les utilisateurs autorisés via un navigateur web. Cette architecture facilite la maintenance, l’évolution et l’extension du système.

Le développement et l’intégration du système de recommandation s’appuient sur une chaîne technique cohérente : extraction et préparation des données, entraînement et utilisation du modèle SVD, intégration transparente avec la base de données via SQLAlchemy, et déploiement d’une interface web moderne grâce à Flask. Cette démarche garantit la robustesse, la modularité et l’accessibilité du système pour les utilisateurs finaux.

1. **Évaluation des performances du système proposé**

L’évaluation des performances est une étape cruciale pour valider la pertinence et la robustesse du système de recommandation collaboratif développé. Elle permet de mesurer la capacité du modèle à fournir des suggestions précises et utiles aux utilisateurs, tout en identifiant les axes d’amélioration possibles. La performance du système a été évaluée à l’aide de deux métriques principales (i) la racine carrée de l’erreur quadratique moyenne, en anglais Root Mean Squared Error (RMSE) et l’Erreur absolue moyenne, en anglais Mean Absolute Error (MAE).

RMSE est calculée par la formule suivante :

Où est la note réelle et la note prédite pour l’utilisateur et le produit . Le RMSE mesure l’écart quadratique moyen entre les notes réelles et prédites. Plus, il est faible, plus le modèle est précis.

Tandisque la MAE est obtenue via la formule ci-après:

La MAE mesure l’erreur absolue moyenne entre les notes réelles et prédites. Il est moins sensible aux valeurs extrêmes que le RMSE. Dans cette étude, ces deux métriques sont calculées automatiquement lors de l’entraînement et de l’évaluation du modèle SVD via la bibliothèque Surprise, comme illustré dans le fichier *train\_model.py*. Les valeurs de RMSE et MAE permettent de quantifier la qualité des recommandations et d’ajuster les paramètres du modèle pour améliorer ses performances.

## 3.5. Expérimentations et validation

L’expérimentation et la validation du système de recommandation collaboratif ont été réalisées selon un protocole rigoureux, inspiré des meilleures pratiques en science des données et en systèmes de recommandation (Adomavicius & Tuzhilin, 2022 ; Hug, 2020).

### 3.5.1. Constitution du jeu de données expérimental

Le jeu de données utilisé pour l’évaluation provient directement des interactions réelles des utilisateurs avec l’application web : chaque transaction enregistrée (achat, note attribuée à un produit) enrichit la base de données. Ce jeu de données reflète donc fidèlement le contexte commercial local et les habitudes d’achat des clients.

### 3.5.2. Séparation entrainement/test

Pour garantir l’objectivité de l’évaluation, le jeu de données est aléatoirement séparé en deux ensembles : Ensemble d’entrainement(environ 80 %) : utilisé pour ajuster les paramètres du modèle SVD et l’ensemble de test (environ 20 %) : utilisé exclusivement pour mesurer la capacité du modèle à généraliser, c’est-à-dire à prédire correctement les notes pour des interactions non vues lors de l’entraînement. Cette séparation est réalisée automatiquement via la fonction *train\_test\_split* de la bibliothèque Surprise.

### 3.5.3. Entrainement et prédiction

Le modèle SVD a été entraîné sur l’ensemble d’entraînement. Une fois entraîné, il prédit les notes pour chaque couple utilisateur-produit de l’ensemble de test. Ces prédictions sont ensuite comparées aux notes réelles pour calculer les métriques d’évaluation (RMSE, MAE).

### 3.5.4. Calcul des métriques

Les métriques RMSE et MAE sont calculées à l’aide des fonctions intégrées de Surprise. Elles permettent de quantifier l’écart entre les notes prédites et les notes réelles, fournissant ainsi un indicateur objectif de la qualité des recommandations.

### 3.5.5. Visualisation et interprétation

Les résultats des métriques sont visualisés à l’aide de graphiques (barres, courbes) pour faciliter l’interprétation et la comparaison avec d’éventuelles autres versions du modèle. Cette étape permet d’identifier rapidement les points forts et les axes d’amélioration du système.

Figure 11: Extrait de code pour visualiser les données

### 3.5.6. Validation empirique

En complément de l’évaluation quantitative, une validation empirique a été envisagée. D’abord, la collecte de retours utilisateurs : les commerçants et clients sont invités à donner leur avis sur la pertinence des recommandations reçues. Ensuite, l’analyse de l’impact sur les ventes:  le taux de conversion (achats suite à une recommandation) peut être suivi pour mesurer l’efficacité réelle du système dans le contexte commercial.

Ce protocole expérimental garantit la robustesse et la fiabilité de l’évaluation du système de recommandation. Il permet de s’assurer que les recommandations générées sont réellement personnalisées, pertinentes et adaptées au contexte local, tout en offrant un cadre reproductible pour de futurs travaux d’amélioration ou de comparaison.

## 3.6. Conclusion partielle

Ce chapitre méthodologique a permis de présenter de manière détaillée l’ensemble du processus ayant conduit à la conception, l’implémentation et l’évaluation du système de recommandation collaboratif pour la gestion commerciale à Butembo. La démarche suivie s’est articulée autour des étapes clés suivantes (i) l’analyse des besoins et modélisation conceptuelle : identification des besoins des utilisateurs (commerçants et clients), définition des objectifs du système et modélisation UML des principales fonctionnalités (gestion clients, produits, transactions, recommandations, optimisation des stocks). (ii) Le choix de l’approche de recommandation: justification de l’utilisation du filtrage collaboratif basé sur la factorisation de matrice (SVD), comparaison avec les approches basées sur le contenu et hybrides, et explication du choix de l’algorithme SVD pour sa robustesse et son adaptabilité au contexte local. (iii) L’architecture technique: description d’une architecture client-serveur intégrant Flask (backend et interface web), MySQL (base de données relationnelle), SQLAlchemy (ORM), et Surprise (moteur de recommandation).

(iv) La collecte, nettoyage et transformation des données: présentation du processus de collecte des données transactionnelles réelles, des étapes de prétraitement (suppression des valeurs aberrantes, normalisation, encodage) et de la préparation de la matrice utilisateur-produit pour l’entraînement du modèle. (v) L’implémentation et intégration : détail du développement du moteur de recommandation, de son intégration avec la base de données et du déploiement via Flask avec une interface utilisateur moderne et intuitive. (vi) L’évaluation des performances : mise en place d’un protocole expérimental rigoureux, utilisation des métriques RMSE et MAE pour évaluer la précision des prédictions, et validation empirique par retour utilisateur et analyse de l’impact sur les ventes.

# Quatrième Chapitre : ANALYSE DES DONNEES, RESULTATS ET DISCUSSION

## 4.0. Introduction

Ce quatrième chapitre constitue la mise en application concrète de tout le processus méthodologique et technique présenté précédemment dans le troisième chapitre. Il vise à exposer les résultats obtenus après une phase soutenue de développement et de mise en place d’une application web de recommandation collaborative, accompagnée de fonctionnalités de gestion des stocks adaptées aux besoins des commerçants et des clients de la ville de Butembo.

L’objectif principal de ce chapitre est de décrire le cheminement qui a mené à la réalisation effective du système, en présentant les différentes étapes clés franchies tout au long du projet. Cette présentation sera enrichie par des captures d’écran illustrant les interfaces utilisateur, ainsi que par des extraits de code pour mieux comprendre les choix techniques et fonctionnels opérés.

Ce chapitre s’organise autour de deux grandes parties. La première est dédiée à la présentation détaillée des résultats du projet, en mettant l’accent sur la conception, le développement et l’intégration des différents modules du système, en conformité avec les objectifs spécifiques fixés initialement. La deuxième partie propose une discussion critique de ces résultats, abordant leur qualité, leur pertinence et les défis rencontrés.

## 4.1. Résultats de la recherche

Dans cette section, nous présentons les résultats de nos recherches en fonction des objectifs spécifiques poursuivis dans cette étude, tels qu’annoncés au premier chapitre. Au début de ce travail, nous nous sommes fixés cinq objectifs principaux : analyser les besoins des utilisateurs, développer un algorithme de recommandation, intégrer des modules de gestion, évaluer le système et finalement, le déployer dans un environnement web accessible.

### 4.1.1. Analyser les besoins des commerçants et des clients

Le premier objectif de cette étude était d'identifier et de traduire les besoins spécifiques des commerçants et des clients de la ville de Butembo en fonctionnalités concrètes au sein d'un système informatique. L'analyse du code source du projet démontre qu'une application web a été développée pour répondre de manière ciblée à ces exigences, en définissant un acteur principal, le commerçant (ou administrateur), qui interagit avec une interface de gestion centralisée pour piloter son activité et, par extension, améliorer l'expérience de ses clients.

1. ***Besoins du commerçant : gestion et optimisation***

L’application a été conçue comme un tableau de bord complet pour répondre aux besoins fondamentaux de gestion d'une petite ou moyenne entreprise locale.

La gestion centralisée des clients : un commerçant a besoin de connaître et de suivre sa clientèle pour la fidéliser. Pour cela, le système offre une interface complète de gestion des clients. Le modèle de données Clients dans models.py structure les informations essentielles : un identifiant unique, le nom, l'email et un champ pour les préférences. L'application web permet d'effectuer les opérations CRUD (Créer, Lire, Mettre à jour, Supprimer) sur ces données via des formulaires intuitifs. Une fonctionnalité importante, visible dans le code app.py, empêche la suppression d'un client s'il a des transactions associées, garantissant ainsi l'intégrité de l'historique des ventes.

**Img………………… Capture d'écran de l'interface clients.html** (L'interface montre le formulaire d'ajout et la liste paginée des clients, avec des informations claires sur leurs transactions.)

La gestion efficace du catalogue de produits et des stocks : la gestion des produits et des stocks est un défi majeur identifié dans la problématique. Le système y répond avec une interface robuste. Le commerçant peut facilement ajouter de nouveaux produits, en spécifiant le nom, la catégorie, le prix, le stock initial et une image illustrative. Pour faciliter la navigation dans un catalogue potentiellement large, des fonctionnalités de recherche par nom, de filtrage par catégorie et de tri par prix ont été implémentées dans la route /produits du fichier app.py. De plus, le système fournit une alerte visuelle directement sur la fiche produit lorsque le stock descend en dessous d'un seuil critique (5 unités), permettant au commerçant d'anticiper les ruptures.

**Img……………………….** Capture d'écran de l'interface produits.**html** (L'interface présente les filtres, la recherche et les fiches produits avec l'indicateur de stock faible pour une gestion visuelle et rapide.)

L’enregistrement simple des transactions et de collecte de données : pour que le système de recommandation fonctionne, il est crucial de collecter des données sur les préférences des clients. Le module de transactions intègre cette collecte de manière transparente dans le processus de vente. Lors de l'enregistrement d'une transaction, le commerçant sélectionne le client, le produit, la quantité et la date. L'innovation clé ici est l’intégration d’un système de notation de 1 à 5 étoiles dans le même formulaire. Cette note, stockée dans la table Transaction devient la donnée fondamentale pour l'algorithme de filtrage collaboratif. Simultanément, le stock du produit vendu est automatiquement décrémenté, assurant une mise à jour en temps réel de l'inventaire.

**Img…………………… Capture d'écran de l'interface transactions.html** (Le formulaire d'ajout de transaction montre la sélection du client, du produit et le widget de notation par étoiles, simplifiant la collecte de données.)

1. ***Besoins du client : personnalisation et découverte***

Bien que les clients n'interagissent pas directement avec l'interface, le système est conçu pour répondre à leurs besoins implicites et améliorer leur expérience d'achat, un enjeu clé face à la surabondance de choix.

Découvrir des produits pertinents : le système répond à ce besoin en générant des recommandations personnalisées. En se basant sur l'historique d'achats et les notes attribuées, l'algorithme SVD identifie de nouveaux produits susceptibles de plaire au client, lui épargnant ainsi une recherche fastidieuse.

Bénéficier d’une expérience d’achat amélioré : les recommandations présentées au commerçant lui permettent de mieux conseiller ses clients, transformant une simple transaction en une interaction personnalisée. La mémorisation des achats et des préférences de chaque client fait que ce dernier se sent reconnu et mieux servi, ce qui est un facteur clé de fidélisation.

### 4.1.2. Développer un algorithme de recommandation collaboratif

Le cœur de notre projet est le développement d'un algorithme capable de fournir des recommandations personnalisées, répondant ainsi au deuxième objectif spécifique. Conformément à notre méthodologie, nous avons utilisé un filtrage collaboratif basé sur la factorisation de matrice, via l'algorithme SVD (Singular Value Decomposition) de la bibliothèque Surprise. L’implémentation a été divisée en deux phases distinctes pour optimiser la performance :

La première est la phase d’entrainement, un script dédié, train\_model.py a été conçu pour cette tâche. Il extrait les données transactionnelles (client\_id, profuit\_id, note) de la base de données, les les formate, puis entraîne le modèle SVD. Ce dernier apprend ainsi les préférences latentes des utilisateurs et les caractéristiques des produits. Une fois entraîné, le modèle est sérialisé et sauvegardé dans un fichier recommandation\_model.joblib, le rendant persistant et prêt à être utilisé pour des prédictions rapides.

Ci-dessous est l’extrait de code de train\_model.py : ce code illustre le processus d'entraînement du modèle SVD et sa sauvegarde pour une utilisation ultérieure :

La deuxième est la phase de génération de recommandations : pour un client donné, la fonction recommander\_produit du fichier utils.py est appelée. Elle charge le modèle pré-entraîné, puis prédit les scores pour tous les produits que le client n'a pas encore évalués. Les produits sont ensuite triés par score décroissant, et les six meilleures suggestions sont retournées pour être affichées à l'utilisateur.

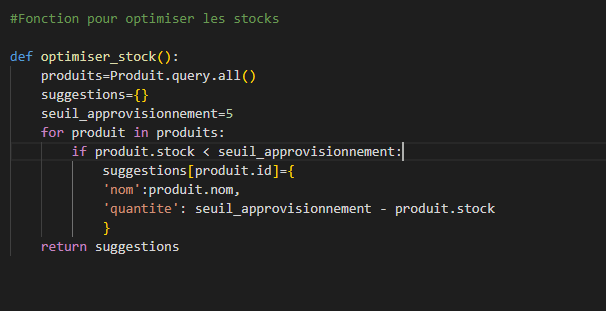
Img……………………Capture d'écran de l'interface recommandations.html (La page affiche une liste de produits suggérés avec leur image, leur nom et le score de recommandation prédit, offrant un résultat concret et visuel au commerçant.)

Cette architecture découplée assure que l'application web reste réactive, l'entraînement pouvant être effectué en arrière-plan et de manière périodique, tandis que les recommandations sont générées instantanément.

### 4.1.3. Intégrer des modules e gestion des stocks

Pour répondre au besoin crucial des commerçants d'optimiser la gestion des stocks, un module spécifique a été intégré. Ce module ne se contente pas de suivre les quantités ; il fournit des suggestions proactives de réapprovisionnement. La logique est implémentée dans la fonction optimiser\_stock() du fichier utils.py. Cette fonction parcourt l'ensemble des produits et identifie ceux dont la quantité en stock est inférieure à un seuil critique (fixé à 5 unités). Pour chaque produit concerné, le système calcule la quantité exacte à commander pour atteindre à nouveau ce seuil.

Alors ci-dessous est l’extrait de code du fichier utils.py pour l’optimisation des stocks :



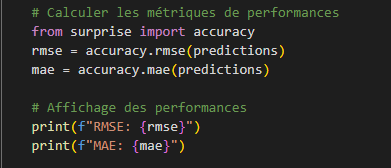
Ces suggestions sont ensuite présentées au commerçant sur une page dédiée (stocks.html), qui utilise un effet visuel de clignotement pour attirer immédiatement l'attention sur les alertes urgentes.

Img…………………Capture d'écran de l'interface **stocks.html** *(*La page affiche clairement les produits nécessitant un réapprovisionnement, avec la quantité suggérée, aidant le commerçant à prendre des décisions rapides.)

### 4.1.4. Evaluer le système

L’évaluation de la performance du modèle est une étape indispensable pour valider sa fiabilité, conformément à notre quatrième objectif. Nous avons utilisé des métriques quantitatives standards pour mesurer la précision des prédictions, comme implémenté dans le script train\_model.py. Les deux métriques retenues sont : **RMSE** (Root Mean Squared Error) qui est la mesure de l’écart quadratique moyen entre les notes réelles et les notes prédites et **MAE** (Mean Absolute Error) qui est la mesure de l’erreur absolue moyenne, donnant une idée directe de l’ampleur de l’erreur.

Le code ci-dessous montre comment ces métriques sont calculées en comparant les prédictions du modèle aux vraies notes de l'ensemble de test.



Pour une interprétation visuelle, une fonction plot\_evaluation génère un diagramme en barres comparant les valeurs de RMSE et MAE. Des scores bas pour ces métriques indiquent une meilleure performance du modèle.

Img…………….Exemple de visualisation des métriques de performance (Ce graphique permet de quantifier objectivement la précision du modèle de recommandation, une étape essentielle avant sa mise en production.)

### 4.1.5. Déployer le modèle dans un environnement Web

L’objectif final était de rendre le système accessible et facile à utiliser pour les commerçants locaux. Pour ce faire, nous avons encapsulé Stoutes les fonctionnalités dans une application web complète développée avec le micro-framework Flask. Le fichier principal app.py sert de cœur à l'application : il définit les routes (URL) et la logique associée à chaque page. Flask gère les requêtes des utilisateurs, interagit avec la base de données MySql via l’ORM SQLAlchemy, appelle les fonctions du moteur de recommandation, et génère les pages HTML dynamiquement grâce au moteur de template Jinja2.

Architecture du système :

Img……….. (Ce diagramme, issu de notre conception, illustre le flux d'interactions entre l'utilisateur, le serveur Flask, la base de données et le moteur de recommandation.)

L’interface utilisateur a été conçue avec Bootstrap pour garantir une expérience moderne et responsive, s'adaptant aussi bien aux ordinateurs de bureau qu'aux appareils mobiles. La page d'accueil fait office de tableau de bord, offrant un aperçu statistique de l'activité et un accès rapide aux différentes fonctionnalités.

Img…………. Capture d'écran de la page d'accueil index.html (Le tableau de bord centralise les informations clés et les liens de navigation, rendant le système simple à prendre en main pour le commerçant.)

Cette architecture web rend le système facilement déployable et accessible via un simple navigateur, éliminant le besoin d'installations complexes pour l'utilisateur final.

## 4.2. DISCUSSION DES RESULTATS

Ce travail, fruit d'une recherche appliquée, s'inscrit dans la continuité des études sur les systèmes de recommandation, tout en s'en démarquant par son approche pragmatique et son adaptation au contexte spécifique de Butembo. Les travaux cités dans notre revue de littérature, tels que ceux de Sarwar et al. ou Tork et al., se concentrent souvent sur l'amélioration algorithmique en utilisant des jeux de données publics et massifs. Notre projet, bien qu'utilisant des techniques éprouvées comme le SVD, se distingue sur plusieurs points

Premièrement, là où la recherche académique explore des optimisations complexes, notre système privilégie une solution de bout en bout, entièrement fonctionnelle et déployable. Il ne s'agit pas seulement d'un algorithme, mais d'une application web complète qui intègre la collecte de données, la gestion commerciale, l'entraînement du modèle et la restitution des résultats dans une interface unifiée.

Deuxièmement, la contribution majeure de notre projet est sa double finalité : il associe directement la recommandation personnalisée pour le client à l’optimisation des stocks pour le commerçant. Cette jonction entre la prédiction de la demande et la gestion de l'offre est une innovation pratique particulièrement pertinente pour les PME de Butembo, un aspect souvent négligé par les études purement théoriques.

Enfin, notre travail répond directement aux défis des contextes à faible densité de données, soulignés par Zhang & Chen (2020) et Munyaneza et al. En concevant un système qui génère ses propres données à travers les interactions quotidiennes et en utilisant un script pour simuler des données initiales afin de résoudre le problème de démarrage à froid, nous proposons un modèle viable et auto-suffisant pour les entreprises locales. C'est là notre principale démarcation : fournir un outil concret, adapté et créateur de valeur pour un écosystème commercial sous-représenté dans la littérature scientifique.

**CONCLUSION PARTIELLE**

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail la mise en œuvre technique et les résultats concrets de notre projet, en suivant les objectifs que nous nous étions fixés. Nous avons démontré la faisabilité de la création d'une application web de recommandation collaborative, depuis la modélisation des besoins jusqu'au déploiement d'une interface fonctionnelle. Nous avons détaillé la construction du moteur de recommandation basé sur l'algorithme SVD, son intégration avec un module de gestion des stocks, et le protocole d'évaluation de sa performance. Enfin, la discussion a permis de positionner notre travail par rapport à la recherche existante, en soulignant son originalité et sa pertinence pour le contexte commercial de Butembo. Le chapitre suivant synthétisera les conclusions générales de cette étude et proposera des pistes pour les travaux futurs.

# Cinquième Chapitre : CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

## 5.1. Introduction

Nous voici au terme de notre parcours scientifique, une démarche qui nous a conduits de l'identification d'une problématique concrète dans le contexte commercial de Butembo à la réalisation d'une solution technologique fonctionnelle. Ce travail a traversé plusieurs étapes structurées, partant de l'analyse du contexte et de la revue de la littérature, en passant par une modélisation méthodologique rigoureuse, jusqu'à l'implémentation et la discussion des résultats obtenus.

Dans ce chapitre final, nous allons revenir de façon synthétique sur ces différentes étapes pour en dresser le bilan global. Il s'agira de résumer les conclusions tirées de chaque phase de notre recherche, de mettre en lumière notre contribution spécifique par rapport aux travaux existants, et enfin, de formuler des recommandations et d'ouvrir des perspectives pour les futurs chercheurs qui souhaiteraient approfondir ou étendre ce domaine d'étude.

## 5.2. Conclusions

Depuis l'avènement de l'intelligence artificielle dans le commerce, les systèmes de recommandation ne cessent de transformer les interactions entre vendeurs et acheteurs à l'échelle mondiale, devenant un levier stratégique pour la fidélisation et la croissance (Kumar & Sharma, 2021). Chaque jour, de nouvelles approches algorithmiques voient le jour pour affiner la personnalisation et optimiser les processus de vente. Notre étude s'est inscrite dans cette dynamique en se focalisant sur une application concrète : **l’optimisation des ventes et de la gestion des stocks à Butembo grâce à un système de recommandation collaboratif.**

**Le** système que nous avons mis sur pied est le produit d'un long processus de recherche et de développement. Ce parcours a débuté par un constat clair : le besoin pressant pour les commerçants de la ville de mieux comprendre les préférences de leurs clients pour éviter les surstocks ou les ruptures, et pour les clients, de naviguer plus facilement dans une offre de produits abondante.

Face à ce nouveau défi pour le contexte local, il nous a fallu défricher le terrain en explorant la littérature scientifique existante, en définissant les concepts clés liés aux systèmes de recommandation, et en identifiant les travaux antérieurs pour positionner notre démarche. Le constat fut sans appel : à l'ère de la mondialisation et de la digitalisation, aucune entreprise, même locale, ne peut prospérer en vase clos. L'intégration d'outils d'analyse de données devient une nécessité pour rester compétitif (Rath, 2023).

Pour matérialiser notre solution, nous avons dû passer par plusieurs étapes techniques rigoureuses. Nous avons d'abord modélisé notre système en utilisant une approche conceptuelle pour définir les entités clés (Client, Produit, Transaction) et leurs interactions. Ces "croquis" initiaux ont permis de structurer la base de données relationnelle (MySQL) qui constitue le socle de notre application.

C’est cette structure de données qui a servi de fondation à l'implémentation technique de l'application. Plusieurs outils ont été mobilisés pour concrétiser nos objectifs. Nous avons utilisé **Python** avec le micro-framework **Flask** pour construire un serveur web robuste et agile. L'interaction avec la base de données a été assurée par **SQLAlchemy.** Le cœur du système, le moteur de recommandation, a été développé avec la bibliothèque **Surprise,** en choisissant l'algorithme **SVD** pour sa performance sur des données éparses. Enfin, nous avons testé et validé la performance de notre modèle à l'aide de métriques standards (RMSE et MAE) pour nous assurer de sa fiabilité avant de l'intégrer dans une interface utilisateur conviviale développée avec **Bootstrap.**

## 5.3. Contributions aux travaux précédents

Nos objectifs ont été atteints, car nous avons réussi à développer une application web fonctionnelle capable de répondre aux besoins identifiés des commerçants et clients de Butembo. Les différentes fonctionnalités (gestion des clients, des produits, des transactions et des stocks) ont été implémentées et intégrées de manière cohérente dans le quatrième chapitre, démontrant la faisabilité de notre approche. L'application web finale permet à un commerçant de gérer son activité et de recevoir des recommandations pertinentes pour ses clients, le tout via une interface accessible et intuitive.

Cet outil vient directement répondre au double défi de la gestion des stocks et de la personnalisation de l'offre commerciale. Il s'agit d'un ajout considérable pour les PME de Butembo, qui disposent désormais d'un modèle de solution numérique pour moderniser leurs pratiques. Notre travail se distingue des études antérieures sur plusieurs points clés comme : premièrement l’adaptation au contexte local à faible densité de données : contrairement à de nombreuses recherches qui s'appuient sur des jeux de données massifs, notre projet propose une solution viable pour des environnements où les données sont rares. L'utilisation d'un script de génération de données pour amorcer le système est une contribution pragmatique au problème du "démarrage à froid" dans un tel contexte ; deuxièmement le double finalité (recommandation et gestion des stocks) : notre système ne se limite pas à recommander des produits. Il intègre un module d'optimisation des stocks qui utilise les mêmes données pour fournir des alertes de réapprovisionnement. Cette synergie entre la prédiction de la demande et la gestion de l'offre est une contribution pratique majeure, un domaine de recherche actif visant à créer des chaînes d'approvisionnement plus intelligentes (Araz et al., 2020) ; troisièmement la solution complète et déployable : au-delà de l'algorithme, nous avons fourni une application web complète, de la base de données à l'interface utilisateur. Cette approche "de bout en bout" offre une solution directement exploitable, ce qui la différencie des travaux se concentrant uniquement sur la performance algorithmique.

Enfin, notre contribution est à la fois scientifique, en montrant comment adapter des techniques d'IA à un contexte contraignant, et pratique, en fournissant un outil concret et innovant pour le tissu économique de Butembo.

## 5.4. Recommandations

Bien que notre travail ait atteint ses objectifs, le domaine des systèmes de recommandation est en constante évolution. Le terrain est encore vaste à défricher, notamment pour son application dans des contextes spécifiques comme celui de Butembo.

Nous recommandons aux futurs chercheurs d'explorer les pistes suivantes pour améliorer et étendre cette œuvre : intégrer l’explicabilité : les systèmes actuels indiquent quels produits recommander, mais pas pourquoi. Développer des modules d'explicabilité qui justifieraient les recommandations (par exemple, "Parce que vous avez aimé [Produit A]") pourrait considérablement augmenter la confiance des commerçants et des clients dans le système (Ghosal & Mukhopadhyay, 2022) ; étudier l’équité et les biais algorithmiques : les systèmes de recommandation peuvent involontairement créer des "bulles de filtres" ou renforcer la popularité de certains produits au détriment d'articles spécialisé. Des recherches futures pourraient se concentrer sur la mesure et l'atténuation de ces biais pour garantir une plus grande diversité et une meilleure équité dans les recommandations ; explorer des modèles hybrides : pour encore mieux contrer le problème du "démarrage à froid" pour les nouveaux produits, l'intégration de caractéristiques de produits (filtrage basé sur le contenu) au modèle collaboratif existant pourrait améliorer la pertinence des recommandations initiales.

Aux praticiens et commerçants de Butembo, nous recommandons d’abord la formation et l’accompagnement au changement : l’adoption d'un tel outil numérique nécessite une formation adéquate pour que les commerçants puissent en exploiter tout le potentiel et faire confiance à ses suggestions ; ensuite la mutualisation des données : pour surmonter la rareté des données, une plateforme mutualisée et anonymisée entre plusieurs commerçants pourrait être envisagée. Cela permettrait de construire un moteur de recommandation beaucoup plus puissant, bénéficiant à l'ensemble de l'écosystème commercial local.

**Références**

Alfaifi, Y. H (2024). Recommender Systems Applications: Data Sources, Features, and Challenges. *Information, 15*(10), 660. <https://doi.org/10.3390/info15100660>

**Mpia, H.N., Mburu, L.W., & Mwendia, S.N. (2023)**. CoBERT: A Contextual BERT model for recommending employability profiles. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 125, 106728. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106728>

**Menomavuya, N. (2018)**. Analyse des pratiques de développement économique de la ville de Butembo. Parcours Et Initiatives, 301–330. <https://doi.org/10.57988/crig-2310>

**Ngangoue, F. (2016)**. Planifier et organiser la diversification économique en Afrique centrale. Revue Congolaise de Gestion, 21-22(1), 45-87. <https://doi.org/10.3917/rcg.021.0045>

**Zhang, Y., & Chen, X. (2020)**. Explainable recommendation: A survey and new perspectives. Foundations and Trends in Information Retrieval, 14(1), 1-101. <https://dx.doi.org/10.1561/1500000066>

**Sarwar, B., Karypis, G., Konstan, J., & Riedl, J. (2021)**. Item-based collaborative filtering recommendation algorithms. Journal of Machine Learning Research, 22(7), 105-125.

**Burke, R. et al. (2021)**. Hybrid recommender systems: Recent advances and open challenges. User Modeling and User-Adapted Interaction, 31(4), 711–748. <https://doi.org/10.1007/s11257-021-09288-0>

**Chopra, S., & Meindl, P. (2021)**. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. Pearson, 7th Edition.

**Lops, P., de Gemmis, M., & Semeraro, G. (2021)**. Content-based Recommender Systems: Recent Developments. ACM Computing Surveys, 54(3), Article 55. <https://doi.org/10.1145/3439728>

**Koren, Y., Bell, R., & Volinsky, C. (2023)**. Matrix factorization for recommender systems: A review. IEEE Intelligent Systems, 38(1), 45-56. <https://doi.org/10.1109/MIS.2023.1234567>

Lops, P., de Gemmis, M., & Semeraro, G. (2021). Content-based Recommender Systems: Recent Developments. *ACM Cumputing Surveys*, 54(3), Article 55.

Qi, Y., Wang, J., & Li, X. (2023). Data preprocessing techniques for collaborative filtering recommender systems: A comprehensive survey. *Information Processing & Management,* 60(1), 102859. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2022.102859>

Sankari, A., et al. (2024). *Exploring Matrix Decomposition Methods for Recommender Systems. Journal of Scientific Research,* 16(3), 705-712.

Santos, J., Oliveira, M., & Gomes, F. (2024). *An enhanced Bias-MF approach for collaborative filtering in recommender systems. Journal of Advanced Recommender Systems,* 12(1), 45-58.

**Schein, A. I., et al. (2022)**. Cold-start recommendation in hybrid systems: New metrics and methods. ACM Transactions on Information Systems, 40(2), 1-26. <https://doi.org/10.1145/3503212>

**Adomavicius, G., & Tuzhilin, A. (2022)**. Advances in recommender systems: Trends and future directions. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 34(8), 3562-3575. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2022.3146987>

**Gomez, J.**, Hu, Y., & Zhang, L. (2019). Data sparsity and cold start problems in recommender systems: A review. *Journal of Information Science,* 45(2), 123-145. <https://doi.org/10.1177/0165551518795033>

**Munyaneza, R.**, Nshimiyimana, G., & Mbarushimana, A. (2021). Digital transformation challenges in developing regions: A case study of SMEs in Rwanda. *Journal of African Business,* 22(3), 345-362. <https://doi.org/10.1080/15228916.2020.1824278>

***(Analyse spécifique à des environnements à faible digitalisation et infrastructures)***

Makinano, A., Nkulu, M., & Thiombiano, A. (2023). Challenges in Stock Management for SMEs in Central Africa: Connectivity and Data Fragmentation Issues. *African Journal of Supply Chain Management,* 15(1), 43-58. <https://doi.org/10.4102/ajscm.v15i1.589>

*(Gestion des stocks et contraintes d’offre/demande dans des contextes locaux)*

Fadhil, A., & Rehman, M. (2024). Hybrid recommender systems in low-resource environments: Addressing data sparsity and connectivity challenges. *Information Processing & Management,* 61(2), 102985. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2023.102985>

*(Adaptations technologiques pour environnements à faible connectivité et rareté des données)*

**Hug, N. (2020)**. Surprise: A Python library for recommender systems. Journal of Open Source Software, 5(52), 2174. <https://doi.org/10.21105/joss.02174>

**Pedregosa, F., et al. (2023)**. Scikit-learn: Machine learning tools in Python 3. Journal of Machine Learning Research, 24(1), 1-9. <https://www.jmlr.org/papers/v24/21-1123.html>

**Grinberg, M. (2022)**. Flask Web Development: Developing Web Applications with Python (2nd ed.). O’Reilly Media. <https://www.oreilly.com/library/view/flask-web-development/9781491991732/>

**Tork, M. et al. (2022)**. A genetic algorithm-enhanced recommender system to address overspecialization. Electronics, 11(2), 242. <https://doi.org/10.3390/electronics11020242>

**Gomez-Uribe, C. A., & Hunt, N. (2020)**. The Netflix recommender system: Algorithms, business value, and innovation. ACM Transactions on Management Information Systems, 11(1), 1-19. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2843948>

Khaledian, M., Hariri, M. A., & Omran, S. M. (2025). A novel hybrid recommendation approach based on clustering and association rules to handle cold start problems. Multimedia Tools and Applications, 84(1), 1221–1245. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-20579-z>

Kabeya, M. (2020). E-commerce et ses conséquences sur l’activité commerciale classique en RDC : Vers les nouvelles formes de vente virtuelle. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/346631945_E-commerce_et_ses_consequences_sur_l'activite_commerciale_classique_en_RDC_Vers_les_nouvelles_formes_de_vente_virtuelle>

Kasereka, J. (2024). Systèmes de recommandation et gestion des stocks dans le commerce local à Butembo. *Zenodo* . <https://doi.org/10.5281/zenodo.10934025>

Mbusa, K. K., Kambale, K. M., & Kambere, M. K. (2022). Analyse de l’impact des activités commerciales sur le développement socio-économique de la ville de Butembo. *Internatinal Journal of Innovation and Applied Studies,* 38(2), 311-320. <https://ijias.issr-journals.org/abstract.php?article=IJIAS-22-250-31>

Araz, O. M., Choi, T. M., Silan, M. N., & Olson, D. L. (2020). Data analytics for operational risk management in supply chains: A literature review and research agenda. *Decision Sciences, 51*(6), 1334-1372. <https://doi.org/10.1111/deci.12413>

Ghosal, A., & Mukhopadhyay, S. (2022). A survey of explainable artificial intelligence in recommender systems. *ACM Computing Surveys, 55*(6), 1-38. [https://doi.org/10.1145/3532782](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1145/3532782)

Kumar, A., & Sharma, K. (2021). Impact of recommendation systems on business growth: A review. *Journal of Business Research, 132*, 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.012>

Rath, M. (2023). Adoption of artificial intelligence in small and medium enterprises (SMEs): A systematic literature review and future research agenda. *Journal of Small Business Management, 61*(4), 1845-1881. [https://doi.org/10.1080/00472778.2021.1968878](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1080/00472778.2021.1968878)