

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة سعيدة. مولاي الطاهر

كلية الرياضيات و الإعلام الآلي و الاتصالات السلكية و

اللاسلكية

قسم: الإعلام الآلي



## Mémoire de Master en informatique

Spécialité : Intelligence artificielle : principes et applications

### Thème

# AI - HR Pharma

▪ **Présenté par :**

Benhabara Chaima

Bekkouche Halima

▪ **Dirigé par :**

Dr. Zerrouki Kadda



# *Remerciements*

*On remercie Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation et à l'aboutissement de ce travail.*

*Nous adressons tout particulièrement nos sincères remerciements à notre encadreur, Monsieur Zerouki Kadda, pour ses précieux conseils, ses remarques pertinentes, sa patience ainsi que son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent également aux honorables membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'évaluer. Nous remercions*

*aussi l'ensemble des enseignants du département d'Informatique de l'Université de Saïda pour leur contribution à notre formation académique et scientifique. Enfin, nous*

*remercions chaleureusement toutes les personnes qui ont apporté leur aide et leur soutien à la réalisation de ce projet.*

# *Dédicace*

*À mon père défunt, lumière de mon cœur et chaleur de ma vie, dont le souvenir m'accompagne et me guide à chaque pas.*

*À ma mère bien-aimée, et à mon père et ma mère « grands » qui m'ont entouré d'amour et de sagesse, mes grands-parents, piliers solides de mon existence.*

*À mes frères et sœurs : Younes, Iman, Fatima, Massouda, Asma, Aya, Yosr, Ishraq, Anfal, Israa, Chifa et Mohamed, qui ont partagé avec moi les joies et les épreuves de la vie.*

*À nos enfants : Mehdi, Haitham, Anfal et Mohamed, étoiles de mon avenir et sources infinies de bonheur.*

*À mes amies fidèles : Linor, Fatimo et son fils Qusay, Souhila et Ferial, pour leur présence, leur soutien et leur amour silencieux mais sincère.*

*À tous mes proches et bien-aimés, ce travail est autant le mien que le reflet de leur lumière et de leur*

**chaimaa**

# *Dédicace*

*Louange à Allah, par la grâce duquel les bonnes œuvres trouvent leur accomplissement.*

*C'est avec gratitude et humilité que nous dédions le fruit de ce modeste travail :*

*À nos chers parents, dont l'amour, les sacrifices et les prières ont été une source inépuisable de soutien et d'inspiration. À leur égard, la reconnaissance ne saurait connaître de limite.*

*À nos familles respectives, pour leur affection, leur confiance et leur présence constante tout au long de ce parcours.*

*À nos estimés enseignants, qui nous ont transmis le savoir et guidés sur le chemin de la connaissance avec générosité et bienveillance.*

*À nos camarades et compagnons de route, avec lesquels nous avons partagé les efforts, les défis et les moments marquants de cette aventure académique.*

*Aux patients et aux pharmaciens, en espérant que ce travail puisse, à sa mesure, contribuer à soulager les premiers et à accompagner les seconds dans l'accomplissement de leur mission au service de la santé et du bien-être.*

*Nous croyons que la science est une œuvre humaine, noble dans sa vocation, mais imparfaite par nature. Sa finalité est d'éclairer et de servir, non d'ériger l'homme ou la machine en absolu. Son véritable dessein est d'ouvrir à la raison les horizons du savoir, et non de l'asservir.*

*Si ce travail comporte quelque mérite, il est par la grâce d'Allah ; et s'il renferme des insuffisances, elles ne proviennent que de nous-mêmes.*

*Qu'Allah soit le Guide et le Garant de toute réussite.*

**Romaisaa**

# Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
0.1 Contexte . . . . .	1
0.2 Problématique . . . . .	1
0.3 Objectifs . . . . .	2
0.3.1 Objectif général : . . . . .	2
0.3.2 Objectifs spécifiques : . . . . .	2
0.4 Méthodologie . . . . .	2
<b>1 Techniques d’Intelligence Artificielle</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 Intelligence Artificielle . . . . .	5
1.3 Machine Learning . . . . .	5
1.3.1 Les différentes méthodes d’apprentissage . . . . .	5
1.3.1.1 Apprentissage supervisé (Supervised Learning) . . . . .	5
1.3.1.2 Apprentissage non supervisé (Unsupervised Learning) . . . . .	6
1.3.1.3 Apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning) . . . . .	6
1.4 Fonctionnement du machine learning . . . . .	6
1.5 Algorithmes de machine learning . . . . .	7
1.6 Avantages du machine learning . . . . .	7
1.7 Conclusion . . . . .	8
<b>2 État de l’Art</b>	<b>9</b>
2.1 Introduction : . . . . .	10
2.2 Gestion des stocks pharmaceutiques : . . . . .	10
2.2.1 Méthodes traditionnelles : . . . . .	10
2.2.2 Limites des méthodes traditionnelles de gestion des stocks . . . . .	11
2.3 Systèmes intelligents dans les pharmacies . . . . .	11
2.4 Intelligence artificielle dans la prédiction des médicaments . . . . .	11
2.5 Travaux de recherche existants . . . . .	11
2.6 Comparaison des solutions existantes . . . . .	12
2.7 Limites des travaux existants . . . . .	12
2.8 Positionnement de votre solution . . . . .	13
2.9 Conclusion . . . . .	13

<b>3</b>	<b>Conception de l'approche proposée</b>	<b>14</b>
3.1	Introduction . . . . .	15
3.2	Analyse des besoins . . . . .	15
3.2.1	Besoins fonctionnels . . . . .	15
3.2.2	Besoins non fonctionnels . . . . .	16
3.2.3	Synthèse . . . . .	16
3.3	Architecture globale du système . . . . .	17
3.4	Architecture IA . . . . .	18
3.5	Base de données . . . . .	22
3.5.1	Modèle relationnel . . . . .	22
3.5.2	Tables principales . . . . .	23
3.5.3	Relations et contraintes . . . . .	23
3.6	Sécurité et Authentication . . . . .	23
3.7	Conclusion . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Implémentation et Résultats</b>	<b>25</b>
4.1	Introduction . . . . .	26
4.2	Implémentation du Backend . . . . .	26
4.3	Implémentation des Modules d'Intelligence Artificielle . . . . .	27
4.3.1	Prediction Engine . . . . .	27
4.3.2	Linear Regression . . . . .	27
4.3.3	Prophet (Meta) . . . . .	28
4.3.4	Recommendation Engine . . . . .	28
4.3.5	Self-Learning Module . . . . .	29
4.3.6	Analyse de Pénurie du Marché . . . . .	29
4.4	Fonctionnement du système AI-HR Pharma . . . . .	30
4.4.1	Introduction . . . . .	30
4.5	Analyse des Résultats . . . . .	39
4.5.1	Résultats de l'Évaluation des Modèles . . . . .	39
4.5.2	Auto-Réentraînement (Apprentissage Adaptatif) . . . . .	39
4.6	Limites du système . . . . .	41
4.6.1	Limites techniques . . . . .	41
4.6.2	Limites fonctionnelles . . . . .	41
4.7	Perspectives Futures . . . . .	41
4.7.1	Court terme (3–6 mois) . . . . .	41
4.7.2	Moyen terme (6–12 mois) . . . . .	42
4.7.3	Long terme (12–24 mois) . . . . .	42
4.8	Conclusion . . . . .	42
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>44</b>

# Table des figures

3.1	Architecture globale du système . . . . .	18
3.2	Valeurs réelles vs valeurs prédites . . . . .	19
3.3	Comparaison des performances entre Linear Regression et Prophet mesurées par MAE et RMSE. . . . .	19
3.4	Comparaison des performances des modèles – MAE et RMSE . . . . .	21
4.1	Schéma d'architecture du système backend . . . . .	26
4.2	Interface Login 1 . . . . .	31
4.3	Interface Login 2 . . . . .	31
4.4	Interface de recherche et de disponibilité des médicaments dans le réseau . . . . .	32
4.5	Interface de résultats de recherche et de disponibilité des médicaments dans le réseau des pharmacies . . . . .	32
4.6	Interface de gestion du catalogue des médicaments (ajout et approvisionnement du stock) . . . . .	33
4.7	Interface de gestion des stocks et enregistrement des ventes patients . . . . .	34
4.8	Interface de prévision de la demande (Demand Forecast Module) . . . . .	35
4.9	Interface du système de recommandation intelligente (Smart Transfer Recommendation) . . . . .	36
4.10	Interface de suivi du modèle et du mécanisme de réentraînement automatique (Feedback Loop) . . . . .	36
4.11	Résultats de la validation scientifique et comparaison des modèles (Linear Regression vs Prophet) . . . . .	37
4.12	Comparaison entre valeurs réelles et valeurs prédites pour les modèles Linear Regression et Prophet . . . . .	38
4.13	Résultats de la prévision sur 7 jours et tableau récapitulatif de comparaison des modèles . . . . .	38
4.14	Interface de visualisation géographique des pharmacies et de la disponibilité des médicaments sur carte interactive . . . . .	39
4.15	Interface du système d'Auto-Réentraînement . . . . .	40

# Liste des tableaux

2.1	Comparaison des solutions de gestion des médicaments . . . . .	12
4.1	Avantages et limites de la régression linéaire . . . . .	27
4.2	L'évaluation des deux modèles est effectuée via les métriques standard . . . .	28
4.3	Critères et poids utilisés dans l'algorithme de recommandation intelligente .	29
4.4	Statistiques des recherches de médicaments . . . . .	30
4.5	Résultats de l'Évaluation des Modèles . . . . .	39
4.6	Conditions de déclenchement du réentraînement automatique du modèle . .	40



# Introduction générale

## 0.1 Contexte

La gestion du stock pharmaceutique est un enjeu majeur pour garantir la disponibilité des médicaments et assurer la continuité des soins pour les patients. Dans de nombreux pays, les pharmacies fonctionnent de manière indépendante, ce qui peut provoquer des ruptures de stock inattendues et compliquer la coordination pour trouver rapidement un médicament disponible.

Les systèmes traditionnels de gestion du stock manquent souvent d'outils pour anticiper les besoins, prévoir les fluctuations de la demande et recommander des transferts efficaces entre pharmacies. L'intégration de technologies modernes comme les bases de données relationnelles, les API sécurisées et l'intelligence artificielle permet aujourd'hui de concevoir des plateformes intelligentes capables de résoudre ces problèmes.

Le projet AI-HR Pharma s'inscrit dans ce contexte: il vise à centraliser la gestion du stock d'un réseau de pharmacies, à améliorer la visibilité sur la disponibilité des médicaments, et à fournir des outils de prédiction et de recommandation basés sur l'analyse des données historiques tout en conservant la confidentialité des données de stock de chaque pharmacie.

## 0.2 Problématique

Dans le domaine pharmaceutique, le manque de visibilité sur la disponibilité des médicaments constitue un problème récurrent. Les pharmacies, travaillant de manière isolée, peuvent faire face à des ruptures de stock soudaines, ce qui complique la continuité des soins pour les patients et augmente le temps nécessaire pour trouver un médicament disponible. De plus, l'absence d'un système permettant d'analyser le marché pharmaceutique en temps réel, basé sur les données issues des pharmacies (recherches, ventes et niveaux de stock), limite fortement l'efficacité de la gestion des stocks. Cette absence d'analyse du comportement du marché pharmaceutique empêche l'identification des tendances de demande ainsi que des médicaments en forte tension.

La problématique peut donc se résumer ainsi : **comment concevoir une plateforme intelligente capable de centraliser les informations de stock, prédire les besoins futurs et proposer des recommandations optimales de transfert entre pharmacies, tout en préservant la confidentialité des quantités de stock de chaque pharmacie ?**

## 0.3 Objectifs

### 0.3.1 Objectif général :

une plateforme intelligente basée sur l'intelligence artificielle, conçue pour connecter les pharmacies au sein d'un réseau collaboratif afin de faciliter la recherche et l'échange des médicaments, optimiser la gestion des stocks et anticiper les ruptures avant qu'elles ne surviennent.

### 0.3.2 Objectifs spécifiques :

1. Centraliser les données des pharmacies dans une base unique.
2. Permettre la recherche des médicaments disponibles dans tout le réseau.
3. Afficher uniquement les pharmacies sur une carte interactive (sans révéler le stock).
4. Détecter automatiquement les stocks faibles et alerter les pharmaciens concernés.
5. Prédire l'évolution du stock à l'aide de modèles d'intelligence artificielle.
6. Proposer des recommandations intelligentes de transfert entre pharmacies (sans afficher les quantités exactes dans les pharmacies recommandées).
7. Enregistrer les feedbacks des pharmaciens pour améliorer les recommandations futures.
8. Assurer la sécurité et la confidentialité des données avec un système d'authentification sécurisé.

## 0.4 Méthodologie

Pour la réalisation du projet AI-HR Pharma, nous avons adopté une méthodologie combinant des approches de développement logiciel moderne et des techniques d'intelligence artificielle pour gérer et prédire le stock pharmaceutique.

Les principales étapes méthodologiques sont les suivantes :

1. **Conception de la base de données** : utilisation de PostgreSQL pour centraliser les informations sur les pharmacies, les médicaments, le stock et les mouvements de stock.
2. **Développement Backend** : implémentation d'une API REST sécurisée avec FastAPI, utilisant SQLAlchemy comme ORM pour gérer la communication avec la base de données.
3. **Validation des données** : intégration de Pydantic pour vérifier les données reçues et envoyées via l'API.
4. **Authentification et sécurité** : mise en place de JWT et bcrypt pour sécuriser les comptes des pharmaciens et gérer les accès multi-tenant.
5. **Interface utilisateur** : développement avec Streamlit, affichage des cartes interactives avec Folium et visualisation des statistiques avec Plotly.
6. **Intelligence artificielle** : utilisation de Linear Regression et Prophet pour la prédiction de l'évolution du stock.
7. **Génération des données de test** : création du script `generate_data.py` pour générer des données réalistes.

8. **Boucle de feedback et réentraînement automatique** : enregistrement des retours des pharmaciens et ajustement des modèles.

Cette méthodologie assure une approche structurée, sécurisée et scientifiquement solide pour le développement et l'évaluation de la plateforme.

# Chapitre 1

## Techniques d'Intelligence Artificielle

## 1.1 Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine de l'informatique qui permet aux systèmes d'effectuer des tâches nécessitant généralement l'intelligence humaine, telles que l'analyse des données ou la prise de décision. Aujourd'hui, l'IA est largement utilisée dans plusieurs domaines grâce à sa capacité à apprendre à partir des données et à améliorer progressivement les performances des systèmes. Dans ce chapitre, nous présentons les principaux concepts et techniques liés à l'intelligence artificielle, notamment le Machine Learning, les différents types d'apprentissage ainsi que les méthodes de prédiction utilisées dans les systèmes intelligents modernes. L'objectif est de mieux comprendre les technologies utilisées dans ce travail.

## 1.2 Intelligence Artificielle

L'intelligence artificielle (IA) désigne la capacité d'un système informatique à reproduire certains comportements humains, tels que le raisonnement, la planification ou encore la prise de décision.

Elle permet aux machines de percevoir leur environnement, d'analyser les données reçues et d'agir afin d'atteindre un objectif précis. Ces données peuvent être collectées à partir de différentes sources, comme des capteurs ou des bases de données.

Les systèmes dotés d'intelligence artificielle peuvent également améliorer leurs performances en apprenant à partir des résultats de leurs actions, ce qui leur permet de s'adapter progressivement à leur environnement[1].

## 1.3 Machine Learning

Le Machine Learning (ML) est une technique d'intelligence artificielle qui consiste à entraîner un programme ou un système informatique à exécuter des tâches sans instructions explicites.

Les algorithmes de Machine Learning permettent de traiter de grandes quantités de données, d'identifier des modèles et de prédire des résultats pour de nouveaux scénarios. Les performances des systèmes s'améliorent progressivement avec l'augmentation des données utilisées pour l'apprentissage [2].

### 1.3.1 Les différentes méthodes d'apprentissage

Tout comme il existe plusieurs types de modèles d'intelligence artificielle, les méthodes d'apprentissage varient également en fonction des besoins et des objectifs.

#### 1.3.1.1 Apprentissage supervisé (Supervised Learning)

Le machine learning supervisé est une technologie élémentaire mais stricte. Les opérateurs présentent à l'ordinateur des exemples d'entrées et les sorties souhaitées, et l'ordinateur recherche des solutions pour obtenir ces sorties en fonction de ces entrées. Le but est que l'ordinateur apprenne la règle générale qui mappe les entrées et les sorties. Le machine learning supervisé peut être utilisé pour faire des prédictions sur des données indisponibles ou futures (on parle alors de "modélisation prédictive"). L'algorithme essaie de développer une fonction qui prédit avec précision la sortie à partir des variables d'entrée – par exemple,

prédire la valeur d'un bien immobilier (sortie) à partir d'entrées telles que le nombre de pièces, l'année de construction, la surface du terrain, l'emplacement, etc.

Le machine learning supervisé peut se subdiviser en deux types :

- **Classification** : la variable de sortie est une catégorie.
- **Régression** : la variable de sortie est une valeur spécifique.

Les principaux algorithmes du machine learning supervisé sont les suivants : forêts aléatoires, arbres de décision, algorithme K-NN (k-Nearest Neighbors), régression linéaire, algorithme de Naïve Bayes, machine à vecteurs de support (SVM), régression logistique et boosting de gradient.

### 1.3.1.2 Apprentissage non supervisé (Unsupervised Learning)

Dans le cadre du machine learning non supervisé, l'algorithme détermine lui-même la structure de l'entrée (aucune étiquette n'est appliquée à l'algorithme). Cette approche peut être un but en soi (qui permet de découvrir des structures enfouies dans les données) ou un moyen d'atteindre un certain but. Cette approche est également appelée « apprentissage des caractéristiques » (feature learning).

Un exemple de machine learning non supervisé est l'algorithme de reconnaissance faciale prédictive de Facebook, qui identifie les personnes sur les photos publiées par les utilisateurs.

Il existe deux types de machine learning non supervisé :

- **Clustering** : l'objectif consiste à trouver des regroupements dans les données.
- **Association** : l'objectif consiste à identifier les règles qui permettront de définir de grands groupes de données.

Les principaux algorithmes du machine learning non supervisé sont les suivants : K-Means, clustering/regroupement hiérarchique et réduction de la dimensionnalité.

### 1.3.1.3 Apprentissage par renforcement (Reinforcement Learning)

Dans le machine learning par renforcement, un programme informatique interagit avec un environnement dynamique dans lequel il doit atteindre un certain but, par exemple conduire un véhicule ou affronter un adversaire dans un jeu. Le programme-apprenti reçoit du feedback sous forme de « récompenses » et de « punitions » pendant qu'il navigue dans l'espace du problème et qu'il apprend à identifier le comportement le plus efficace dans le contexte considéré.

En 2013, c'était déjà un algorithme de machine learning par renforcement (Q-learning) qui s'était rendu célèbre en apprenant comment gagner dans six jeux vidéo Atari sans aucune intervention d'un programmeur.

Il existe deux types de machine learning par renforcement :

- **Monte Carlo** : le programme reçoit ses récompenses à la fin de l'état terminal.
- **Machine Learning par Différence Temporelle (TD)** : les récompenses sont évaluées et accordées à chaque étape.

Les principaux algorithmes du machine learning par renforcement sont les suivants : Q-learning, Deep Q Network (DQN) et SARSA (State-Action-Reward-State-Action)[3].

## 1.4 Fonctionnement du machine learning

Le Machine Learning fonctionne à partir de données utilisées pour entraîner un modèle informatique. Contrairement à la programmation classique, où les règles sont définies direc-

tement par le programmeur, le modèle apprend progressivement à partir des données afin d'identifier des relations, des tendances ou des modèles cachés.

Le processus commence généralement par la collecte des données nécessaires. Ces données doivent être suffisantes, fiables et adaptées à l'objectif recherché. Ensuite, elles sont préparées et nettoyées afin d'éliminer les erreurs, les valeurs manquantes ou les doublons qui peuvent influencer la qualité des résultats

Après cette étape, un algorithme approprié est choisi selon le type de problème à résoudre. Le modèle est ensuite entraîné à partir des données disponibles, puis évalué à l'aide de données de test afin de mesurer sa précision et sa performance.

Enfin, si les résultats ne sont pas satisfaisants, le modèle peut être amélioré en ajustant certains paramètres ou en utilisant davantage de données. Ce processus permet au système d'obtenir progressivement de meilleures performances[4].

## 1.5 Algorithmes de machine learning

Le Machine Learning utilise différents types d'algorithmes pour analyser les données et produire des modèles prédictifs. Ces algorithmes permettent aux systèmes de reconnaître des motifs, de classer des objets, de prévoir des valeurs ou de prendre des décisions automatiques

Exemples généraux :

- **Réseaux neuronaux** : inspirés du cerveau humain, capables de traiter des données complexes comme les images et le son.
- **Régression linéaire** : prévoit une valeur continue à partir de variables d'entrée, utilisée dans des modèles simples de prédiction.
- **Régression logistique** : prévoit des résultats binaires (oui/non), utile dans des décisions simples.
- **Clustering** : méthode non supervisée pour regrouper des données similaires en clusters.
- **Arbres décisionnels et forêts aléatoires** : utilisés pour la classification et la prédiction, combinent plusieurs décisions pour améliorer la précision.
- **Autres algorithmes courants** : KNN, SVM, ACP, Q-learning et amélioration du gradient pour divers usages selon le problème.

Ce résumé permet d'introduire les algorithmes sans entrer dans les détails techniques spécifiques du projet. Tous ces exemples restent généraux et applicables à de nombreux domaines [5].

## 1.6 Avantages du machine learning

Le Machine Learning permet d'extraire des informations importantes à partir de grandes quantités de données, souvent invisibles à l'analyse humaine traditionnelle.

**Principaux avantages :**

- **Aide à la décision et analyse prédictive** : les systèmes peuvent identifier des tendances et produire des prévisions pour orienter les décisions de manière efficace.
- **Automatisation et efficacité** : les tâches répétitives et peu cognitives, comme la classification de documents ou la vérification d'informations, peuvent être réalisées automatiquement, réduisant le temps et l'effort humain.
- **Analyse rapide des données** : les systèmes peuvent détecter rapidement des anomalies, des fraudes ou des comportements inhabituels et réagir instantanément.

- **Personnalisation et innovation dans les services** : les profils individuels des utilisateurs peuvent être analysés pour proposer des recommandations ou des offres adaptées, améliorant ainsi l'expérience client et la fidélisation.

Ainsi, le Machine Learning contribue à optimiser les processus, à améliorer la performance organisationnelle et à proposer des solutions intelligentes adaptées aux besoins des utilisateurs [6].

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux concepts liés à l'intelligence artificielle et au Machine Learning, ainsi que les différentes méthodes d'apprentissage utilisées dans les systèmes intelligents.

Nous avons également étudié les séries temporelles, les modèles de prévision et les métriques d'évaluation utilisées pour analyser et prédire les données. Ces notions constituent une base essentielle pour comprendre les technologies exploitées dans notre projet.

## Chapitre 2

### État de l'Art

## 2.1 Introduction :

Le secteur pharmaceutique, en Algérie comme dans d'autres pays du monde, constitue une branche essentielle de l'économie nationale, particulièrement dans le contexte actuel. Les produits pharmaceutiques jouent un rôle crucial dans de nombreux aspects des soins de santé.

Par conséquent, les médicaments doivent être disponibles en permanence dans les établissements de santé. Dans ce contexte, la gestion des stocks représente une approche fondamentale permettant de planifier, contrôler, organiser et suivre la circulation des médicaments, afin de garantir leur disponibilité en quantités suffisantes pour répondre aux besoins des patients[7].

Un état de l'art est une analyse qui synthétise les connaissances existantes sur un sujet donné. Il constitue un point de départ pour toute démarche de recherche ou d'innovation, en identifiant ce qui est déjà connu ainsi que les aspects qui restent à explorer [8].

Ce chapitre examine les travaux existants relatifs aux systèmes d'information pharmaceutique et évalue leur capacité à gérer efficacement les stocks de médicaments afin de répondre aux besoins des patients.

## 2.2 Gestion des stocks pharmaceutiques :

La gestion des stocks consiste à organiser et à suivre les quantités de produits disponibles afin de déterminer quand et comment réapprovisionner les stocks. Les stocks représentent une quantité de biens ou de matières premières conservées en réserve pour un usage futur[9]., garantissant ainsi le bon fonctionnement des opérations et la satisfaction des clients. Cette tâche exige une organisation rigoureuse et un suivi continu. En pharmacie, la gestion des stocks désigne le processus de suivi et d'organisation des médicaments au sein d'une officine. Ce processus comprend l'enregistrement des flux entrants et sortants, la planification des besoins, la passation des commandes, la réception des produits et le stockage des médicaments. Une gestion efficace des stocks permet de contrôler les niveaux de disponibilité, de prévenir les ruptures de stock et de garantir la disponibilité des médicaments pour répondre aux besoins des patients[10].

### 2.2.1 Méthodes traditionnelles :

Auparavant, la gestion des stocks en pharmacie reposait sur des méthodes manuelles traditionnelles. Les pharmaciens utilisaient diverses techniques, notamment :

Des registres et des livres de comptes papier, qui constituaient et constituent encore dans certaines pharmacies les principaux outils d'enregistrement des entrées et sorties de médicaments. Ces livres de comptes consignaient la date, la quantité reçue, la quantité vendue et le stock restant.

De plus, les pharmaciens effectuaient des inventaires physiques périodiques afin de vérifier la concordance entre les quantités en stock et celles enregistrées dans les livres de comptes.

Des carnets de commandes permettaient de noter les médicaments en rupture de stock afin de pouvoir les commander auprès des distributeurs. Des fiches servaient à contrôler les dates de péremption, et des étiquettes de couleur ou des marquages manuels permettaient de prioriser la vente des médicaments proches de leur date limite de consommation.

Ces méthodes manuelles exigeaient un haut niveau de compétence et de précision de la part du pharmacien et de ses assistants, mais elles étaient également sujettes aux erreurs.

### **2.2.2 Limites des méthodes traditionnelles de gestion des stocks**

Bien que les méthodes traditionnelles de gestion des stocks en pharmacie reposent sur des techniques manuelles, elles présentent plusieurs limites.

Ces méthodes peinent à anticiper les fluctuations soudaines de la demande, ce qui peut entraîner des pénuries de médicaments essentiels ou, au contraire, des excédents et des pertes de stock. Elles ont également du mal à s'adapter aux variations de la consommation, car elles s'appuient souvent sur des estimations approximatives. De plus, la gestion des dates de péremption demeure complexe, car le suivi manuel est chronophage et sujet aux erreurs, ce qui peut engendrer des pertes de produits.

Ces limites soulignent la nécessité d'intégrer des solutions intelligentes pour améliorer la gestion des stocks de médicaments.

## **2.3 Systèmes intelligents dans les pharmacies**

Les systèmes intelligents représentent l'une des avancées les plus importantes de la technologie moderne. Ce sont des systèmes technologiquement avancés qui analysent les données en temps réel et prennent des décisions autonomes afin d'optimiser les tâches.

Les systèmes de gestion de pharmacie, qui facilitent la gestion des médicaments, sont essentiels au travail quotidien des pharmaciens. Ces systèmes se présentent sous la forme de logiciels de gestion qui simplifient la dispensation des médicaments, le suivi des stocks et l'analyse des données de consommation. Ils contribuent ainsi à améliorer l'efficacité du travail des pharmaciens et à réduire les erreurs[11].

Cependant, malgré leurs avantages, ces systèmes présentent encore des limites, notamment en ce qui concerne l'intégration de fonctionnalités avancées telles que la prévision de la demande ou la collaboration entre les pharmacies.

## **2.4 Intelligence artificielle dans la prédiction des médicaments**

Les pénuries de médicaments constituent un problème mondial complexe ayant des répercussions négatives sur les patients, les pharmaciens et l'ensemble du système de santé. Ces pénuries peuvent survenir pour de nombreuses raisons, notamment des pics ou des fluctuations imprévus de la demande.

En analysant d'importants volumes de données, les modèles d'intelligence artificielle (IA) peuvent prédire les besoins futurs des patients, aidant ainsi les pharmacies à se préparer aux variations de la demande. L'IA permet une meilleure compréhension des facteurs contribuant aux pénuries de médicaments en exploitant les données de vente et les tendances saisonnières des maladies. Elle utilise une méthodologie d'apprentissage supervisé qui prédit les pénuries les plus importantes, réduisant ainsi le risque de surstockage ou de rupture de stock [12].

Ces modèles sont conçus pour être utilisés en pharmacie, où ces technologies contribuent à stabiliser le marché des médicaments et à garantir leur disponibilité.

## **2.5 Travaux de recherche existants**

De nombreuses études ont été menées dans le domaine de la gestion des médicaments et de la prévision des pénuries. Une étude récente a proposé un modèle d'apprentissage automa-

tique pour prédire les pénuries de médicaments en analysant les données de consommation et les registres de vente [13].

Certains systèmes, tels que Chifaa Plus, sont utilisés en pharmacie pour gérer les stocks et les ventes de médicaments. Ces solutions permettent une organisation efficace, mais n'offrent pas de fonctionnalités avancées basées sur l'intelligence artificielle [14]. Par ailleurs, d'autres recherches ont utilisé des techniques de séries temporelles pour prédire la demande de médicaments à partir des tendances passées [15].

Ces travaux montrent que, malgré les progrès technologiques, les solutions actuelles restent limitées, notamment en ce qui concerne l'intégration de l'intelligence artificielle et la collaboration entre pharmacies.

## 2.6 Comparaison des solutions existantes

Plusieurs solutions ont été proposées pour améliorer la gestion des médicaments, allant des systèmes traditionnels aux solutions basées sur l'intelligence artificielle.

Critères	Intelligence Artificielle	Prédiction de la demande	Notifications	Collaboration entre pharmacies
Systèmes classiques	Non	Non	Non	Non
Chifa Plus	Non	Non	Oui	Non
Modèles basés sur l'IA	Oui	Oui	Non	Non
Notre solution proposée	Oui	Oui	Oui	Oui

TABLE 2.1 – Comparaison des solutions de gestion des médicaments

Ce tableau montre que les solutions actuelles n'offrent pas une intégration complète des fonctionnalités. Les systèmes et logiciels traditionnels, tels que Chifaa Plus, proposent des fonctionnalités de base de gestion des stocks, mais ne permettent ni la prévision ni l'utilisation de l'intelligence artificielle. Bien que les modèles basés sur l'IA offrent des capacités de prévision avancées, leurs fonctionnalités pratiques restent limitées, notamment en ce qui concerne les notifications et la collaboration inter-pharmacies. Notre solution se distingue par l'intégration de l'IA, de la prévision, des notifications et de la collaboration inter-pharmacies.

## 2.7 Limites des travaux existants

Malgré le développement des technologies, les travaux existants présentent plusieurs limites. En effet, les systèmes traditionnels de gestion de pharmacie ne disposent pas de fonctionnalités d'intelligence artificielle, ce qui limite leur capacité à analyser les données et à améliorer la prise de décision.

De plus, la majorité de ces solutions ne permettent pas la prédiction de la demande en médicaments, ce qui peut entraîner des ruptures de stock ou des excédents.

Par ailleurs, les systèmes actuels ne proposent pas de mécanismes de collaboration entre pharmacies, ce qui rend difficile la recherche de médicaments disponibles dans d'autres officines.

Enfin, si certaines solutions basées sur l'IA offrent des capacités prédictives, leurs fonctionnalités pratiques restent limitées, notamment en ce qui concerne les notifications ou l'intégration au système de gestion de pharmacie.

## 2.8 Positionnement de votre solution

Face aux limites identifiées dans les solutions existantes, il apparaît nécessaire de proposer une solution plus avancée et intégrée. Notre système vise à améliorer la gestion des médicaments en intégrant des techniques d'intelligence artificielle permettant la prédiction de la demande et l'anticipation des ruptures de stock.

Il propose également un système de notifications permettant d'informer les pharmaciens en temps réel sur la disponibilité ou la diminution des stocks. En outre, notre solution introduit un mécanisme de collaboration entre pharmacies basé sur la localisation géographique, facilitant ainsi la recherche et l'échange de médicaments entre officines.

Cette approche permet d'optimiser la gestion des stocks, d'améliorer la prise de décision et d'assurer une meilleure disponibilité des médicaments pour les patients.

## 2.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter un état de l'art sur la gestion des stocks pharmaceutiques ainsi que les différentes solutions existantes. Nous avons analysé les méthodes traditionnelles, les systèmes de gestion ainsi que les solutions basées sur l'intelligence artificielle.

Cette étude a mis en évidence plusieurs limites, notamment l'absence d'intégration entre la prédiction, les notifications et la collaboration entre pharmacies.

Ainsi, ces constats justifient la nécessité de proposer une solution innovante, qui sera détaillée dans le chapitre suivant.

## Chapitre 3

### Conception de l'approche proposée

## 3.1 Introduction

. Dans ce chapitre, nous présentons la conception de notre solution proposée pour améliorer la gestion des pharmacies.

Après avoir analysé les limites des solutions existantes dans le chapitre précédent, nous proposons un système intelligent basé sur l'intelligence artificielle, permettant la prévision de la demande, la gestion des stocks et la collaboration entre pharmacies.

Ce chapitre décrit les exigences du système, son architecture ainsi que les différents composants qui le constituent.

## 3.2 Analyse des besoins

Cette section présente de manière détaillée les besoins du système AI-HR Pharma, en précisant ce qu'il doit accomplir, comment il doit fonctionner et en soulignant la confidentialité des données de chaque pharmacie. L'objectif est de fournir un système intelligent et sécurisé capable de gérer efficacement les stocks de médicaments tout en maintenant la confidentialité des informations sensibles.

### 3.2.1 Besoins fonctionnels

Le système doit permettre une gestion complète et proactive des stocks de médicaments pour toutes les pharmacies du réseau, tout en respectant la confidentialité des données. Les principales fonctionnalités incluent :

1. **Recherche intelligente (Smart Search)**

- Permet aux pharmaciens de rechercher la disponibilité d'un médicament dans le réseau entier sans révéler les quantités exactes dans chaque pharmacie.
- **Exemple concret** : Si un patient cherche un sirop contre la toux, le pharmacien peut savoir quelles pharmacies du réseau l'ont disponible sans connaître le stock précis de chaque pharmacie.

2. **Prévision de la demande (Forecasting)**

- Anticiper les besoins futurs grâce aux modèles d'intelligence artificielle tels que Linear Regression et Prophet.
- **Exemple concret** : Le système prévoit qu'une pharmacie qui vend en moyenne 50 boîtes de Paracétamol par semaine pourrait atteindre 70 boîtes pendant l'hiver.

3. **Notifications automatiques (Smart Alerts)**

- Alerter automatiquement les pharmaciens lorsque les stocks sont faibles ou lorsqu'un médicament devient disponible dans une pharmacie proche.
- **Exemple concret** : Le pharmacien reçoit une notification si une pharmacie voisine dispose d'un surplus de sirop pour la toux.

4. **Vérification de disponibilité (Availability Check)**

- Permet aux utilisateurs de consulter la disponibilité des médicaments dans d'autres pharmacies du réseau, sans divulguer les quantités exactes.
- **Exemple concret** : Affichage d'une carte interactive montrant les pharmacies où un médicament est disponible avec des icônes codées par couleur, sans révéler le stock exact.

5. **Collaboration inter-pharmacies (Smart Recommendation)**

- Proposer des recommandations intelligentes pour transférer les médicaments entre pharmacies afin d'éviter les ruptures, tout en préservant la confidentialité des stocks.
- **Exemple concret** : Si la pharmacie A est en rupture de Paracétamol et que la pharmacie B dispose d'un surplus, le système recommande un transfert optimal sans révéler les quantités exactes de B.

#### 6. Dashboard IA (Interactive Analytics)

- Visualiser les tendances, les prévisions et les recommandations sur un tableau de bord interactif pour aider à la prise de décision.
- **Exemple concret** : Graphiques montrant l'évolution du stock par médicament et alertes automatiques pour chaque événement.

**Remarque académique** : Toutes ces fonctionnalités sont conçues pour fonctionner en maintenant la confidentialité des données de stock de chaque pharmacie, ce qui est essentiel pour la sécurité et la confiance dans le réseau.

### 3.2.2 Besoins non fonctionnels

Le système doit respecter des critères de qualité, sécurité et performance afin d'assurer un fonctionnement fiable et robuste.

#### 1. Sécurité des données

- Protection des informations sensibles grâce à un système d'authentification sécurisé (JWT) et une logique multi-tenant pour isoler les données des pharmacies.

#### 2. Performance

- Réponses rapides aux requêtes des utilisateurs, même pour un grand nombre de pharmacies et de médicaments.
- **Exemple concret** : Une recherche de disponibilité doit retourner les résultats en moins de 2 secondes.

#### 3. Scalabilité

- Possibilité d'ajouter facilement de nouvelles pharmacies, nouveaux médicaments ou modules IA sans affecter la performance du système.

#### 4. Fiabilité et disponibilité

- Le système doit être opérationnel en permanence pour garantir la continuité des services pharmaceutiques.

#### 5. Simplicité et ergonomie

- Interface utilisateur intuitive via Streamlit, facile à utiliser pour les pharmaciens de tous niveaux.
- **Exemple concret** : Utilisation de cartes interactives, graphiques et notifications claires pour guider les utilisateurs.

### 3.2.3 Synthèse

Le respect de ces besoins fonctionnels et non fonctionnels permet à *AI-HR Pharma* de :

- Minimiser les ruptures de stock inattendues.
- Garantir la confidentialité des données de chaque pharmacie.
- Optimiser la gestion des stocks et la prise de décision grâce aux prévisions intelligentes.
- Assurer une interface conviviale et un système performant, sécurisé et évolutif.

### 3.3 Architecture globale du système

L'architecture du système montre l'organisation et l'interaction entre les différents composants permettant le fonctionnement de la plateforme AI-HR Pharma. Elle est composée de quatre éléments principaux : Frontend, Backend, Base de données et Module d'Intelligence Artificielle (AI Engine), complétés par un système de notifications intelligentes et un tableau de bord analytique.

#### **Architecture générale :**

L'utilisateur (pharmacien) interagit avec le système via l'interface utilisateur (frontend), qui envoie des requêtes au backend. Le backend traite les demandes, interagit avec la base de données et communique avec le module d'intelligence artificielle pour analyser les ventes et prédire la demande. Les résultats sont renvoyés à l'utilisateur sous forme de notifications, tableaux de bord ou recommandations.

#### **Frontend :**

- Consulter et gérer le stock de médicaments.
- Rechercher des médicaments disponibles dans le réseau.
- Recevoir des notifications sur les stocks faibles ou nouveaux stocks.
- Visualiser des graphiques et rapports dans le tableau de bord analytique.

#### **Backend / API :**

- Gère les requêtes et les réponses entre le frontend et la base de données.
- Assure la communication avec le module d'IA pour la prédiction et les recommandations.
- Implémenté avec FastAPI pour fournir une API REST sécurisée.

#### **Base de données (Database) :**

- Stocke toutes les informations : pharmacies, utilisateurs, médicaments, inventaires et historiques de mouvements.
- Assure la cohérence et la sécurité des données.
- Utilise PostgreSQL avec SQLAlchemy pour la gestion relationnelle.

#### **Module d'Intelligence Artificielle (AI Engine) :**

- Analyse les données historiques de stock et de ventes.
- Prediction Engine : prédit la demande future pour éviter les ruptures de stock.
- Recommendation Engine : propose des transferts intelligents entre pharmacies.
- Self-Learning Module : ajuste les modèles selon le feedback des pharmaciens.
- Monitoring System & Auto-Retraining : suit les performances et réentraîne automatiquement les modèles.

#### **Notifications intelligentes :**

- Alertes automatiques sur les stocks faibles ou la disponibilité de médicaments dans le réseau.
- Permet une intervention rapide des pharmaciens.

#### **Tableau de bord analytique :**

- Présente les statistiques et prévisions pour le réseau de pharmacies.
- Aide à la prise de décision stratégique et opérationnelle.

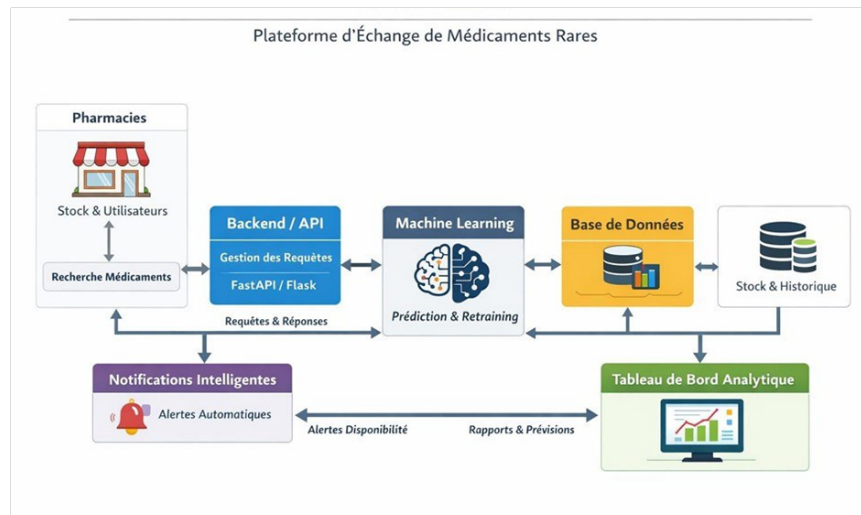


FIGURE 3.1 – Architecture globale du système

## 3.4 Architecture IA

Le module d'Intelligence Artificielle (AI Engine) constitue le cœur du projet AI-HR Pharma. Il permet de prévoir la demande de médicaments et de générer des recommandations intelligentes de transferts entre pharmacies, tout en garantissant la confidentialité des stocks. L'architecture IA est conçue pour être modulable, évolutive et intégrée avec l'ensemble de la plateforme.

### 1. Prediction Engine

Prediction Engine est un moteur prédictif qui transforme les données en actions stratégiques. Il analyse les données afin d'anticiper des phénomènes critiques tels que les ruptures de stock, les opportunités de réapprovisionnement et les inefficacités opérationnelles[16].

#### Régression linéaire

##### — Principe :

La régression linéaire est une méthode statistique utilisée pour prédire la valeur d'une variable dépendante à partir d'une ou plusieurs variables indépendantes. Elle consiste à ajuster une équation linéaire minimisant les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédites grâce à la méthode des moindres carrés pour déterminer la meilleure ligne de prédiction.

##### — Exemple concret :

- Une entreprise peut prévoir les ventes annuelles d'un vendeur (variable dépendante) à partir de son âge, son niveau d'éducation et ses années d'expérience (variables indépendantes).
- Une analyse des prix et de la consommation peut montrer comment la variation des prix influence l'achat d'un produit.
- Une compagnie d'assurance peut estimer le coût des réclamations pour mieux gérer les risques.
- Dans le sport, on peut modéliser la relation entre le nombre de matchs gagnés par une équipe et le nombre moyen de points marqués par adversaire.

##### — Avantages :

- Simple à interpréter et rapide à mettre en œuvre.
- Permet d'extraire des informations exploitables à partir des données.

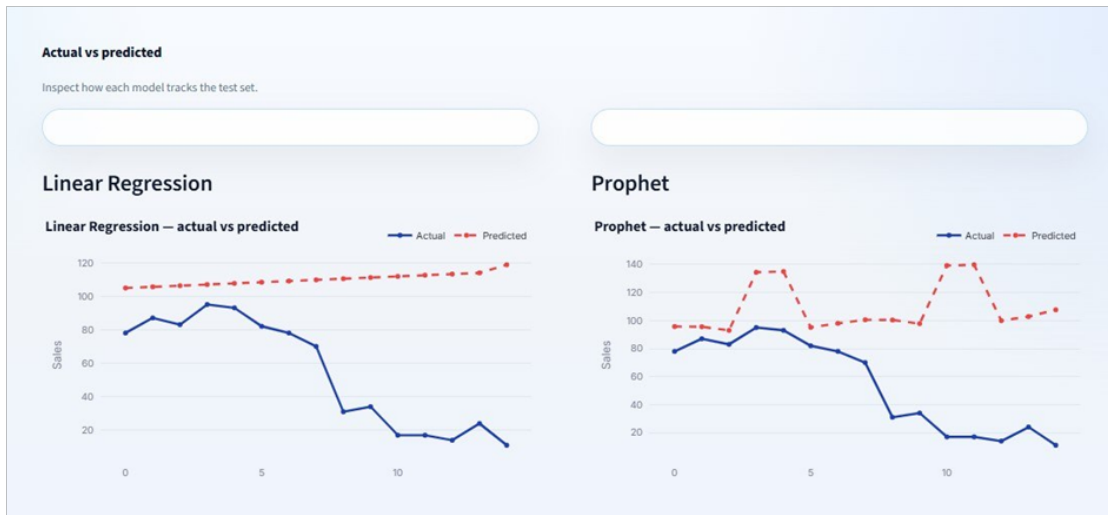


FIGURE 3.2 – Valeurs réelles vs valeurs prédites

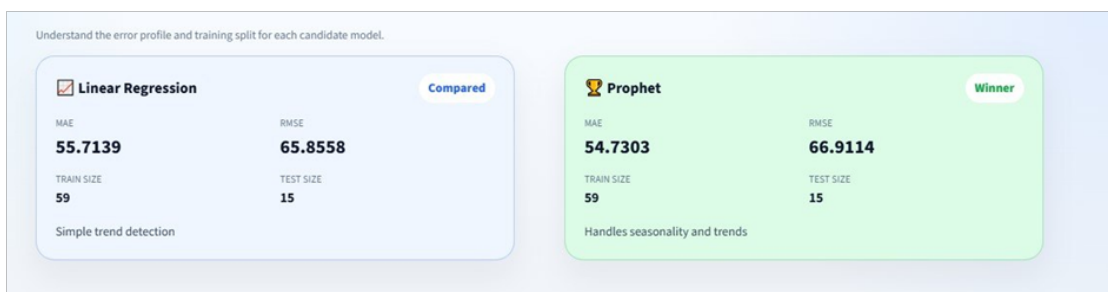


FIGURE 3.3 – Comparaison des performances entre Linear Regression et Prophet mesurées par MAE et RMSE.

- Aide à identifier des tendances et des relations cachées.
- Applicabilité large : sciences sociales, biologiques, environnementales, commerciales et organisationnelles[17].

### Prophet

#### — Principe :

Prophet est une méthode de prévision des séries temporelles basée sur un modèle additif combinant la tendance générale, les variations saisonnières et les effets des jours fériés. Elle permet d'estimer l'évolution future d'une donnée à partir de son historique.

#### — Exemple concret :

Une entreprise peut utiliser Prophet pour prévoir ses ventes mensuelles. Par exemple, si les ventes augmentent chaque été et diminuent en hiver, Prophet peut détecter cette saisonnalité et produire une prévision plus précise pour les mois à venir.

- **Avantages :** Prophet est rapide, précis et automatique. Il fonctionne bien même avec des données manquantes, des valeurs anormales ou des changements brusques de tendance. Il est aussi flexible, car l'utilisateur peut ajuster certains paramètres selon ses connaissances du domaine. Enfin, il est disponible en Python et en R, ce qui facilite son utilisation[18].

## 2. Recommendation Engine

Un moteur de recommandation est un système conçu pour fournir des suggestions per-

sonnalisées en analysant les données des utilisateurs et en prédisant leurs préférences.[ ?]

— **Fonction :**

Déterminer quelles pharmacies doivent recevoir ou envoyer des médicaments pour éviter les ruptures.

— **Critères pris en compte :**

Distance entre pharmacies, demande prévue, capacité de stockage et priorités logistiques.

— **Exemple concret :**

Si la pharmacie A est en rupture de Paracétamol et que la pharmacie B dispose d'un surplus, le moteur recommande un transfert intelligent sans révéler les quantités exactes de B[19].

**3. Self-Learning Module** Un SLM est une unité d'apprentissage autonome qui contient tout le contenu, les activités et les évaluations nécessaires pour atteindre des objectifs d'apprentissage précis, permettant à l'apprenant de progresser de manière indépendante [20].

— **Fonction :**

Enregistre les décisions d'acceptation ou de refus des transferts.

— **Exemple concret :** Si un pharmacien refuse un transfert proposé, le module ajuste automatiquement l'importance des critères (distance, type de médicament) pour affiner les recommandations futures.

#### 4. Monitoring System & Auto-Retraining

Le système surveille en continu les performances des modèles de machine learning et ajuste automatiquement les modèles si nécessaire, en réentraînant le modèle avec de nouvelles données pour maintenir la précision et la fiabilité des prédictions [21].

##### 1. MAE (Mean Absolute Error – Erreur Absolue Moyenne)

— **Définition :**

Le MAE mesure l'écart moyen absolu entre les valeurs prédites et les valeurs réelles observées.

— **Interprétation :**

Un MAE égal à 5 signifie que les prédictions du modèle s'écartent en moyenne de 5 unités par rapport aux valeurs réelles.

— **Avantages :**

— Moins sensible aux valeurs aberrantes comparé au MSE et RMSE, car il ne met pas au carré les écarts. Facile à interpréter, car il est exprimé dans la même unité que la variable étudiée.

— **Utilisation :**

Idéal lorsque l'on souhaite une mesure simple de l'erreur moyenne et que l'impact des grandes erreurs ne doit pas être amplifié.

##### 2. RMSE (Root Mean Square Error – Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne)

— **Définition :**

Le RMSE correspond à la racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs entre les valeurs prédites et les valeurs réelles.

— **Interprétation :**

: Il fournit une mesure de l'erreur qui reste sur la même échelle que les données originales tout en pénalisant davantage les grandes erreurs.

— **Avantages :**

— Sensible aux grandes erreurs, ce qui est utile lorsque les grosses déviations sont

particulièrement problématiques.

— Plus interprétable que le MSE, car il revient à la même unité que la variable prédite.

— **Utilisation :**

Approprié lorsque l'on souhaite prendre en compte fortement les erreurs importantes tout en gardant l'échelle des données.



FIGURE 3.4 – Comparaison des performances des modèles – MAE et RMSE

**3. Exemple concret**

Considérons un modèle qui prédit les ventes quotidiennes d'une pharmacie :

— Valeur réelle : 100 unités.

— Valeurs prédites sur plusieurs jours : 90, 105, 95.

**Calcul du MAE :**

$$MAE = \frac{|100 - 90| + |100 - 105| + |100 - 95|}{3}$$

$$MAE = \frac{10 + 5 + 5}{3}$$

$$MAE = 6.67$$

**Calcul du RMSE :**

$$RMSE = \sqrt{\frac{(100 - 90)^2 + (100 - 105)^2 + (100 - 95)^2}{3}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{100 + 25 + 25}{3}}$$

$$RMSE = \sqrt{50}$$

$$RMSE \approx 7.07$$

### **Interprétation :**

Le MAE montre que, en moyenne, le modèle s'écarte de 6,67 unités des valeurs réelles. Le RMSE indique une erreur de 7,07 unités et accorde davantage d'importance aux erreurs importantes.

#### **4. Points clés**

- Le MAE est robuste aux valeurs aberrantes et simple à interpréter.
- Le RMSE pénalise davantage les erreurs importantes tout en conservant la même unité que les données observées.
- Le choix entre MAE et RMSE dépend de l'importance accordée aux grandes erreurs dans l'application étudiée [22].

#### **5. Flux de données interne**

1. Les données historiques (ventes et stock) sont extraites depuis la base PostgreSQL via l'API REST.
2. Le Prediction Engine génère les prévisions de demande future.
3. Le Recommendation Engine propose les transferts intelligents basés sur ces prévisions.
4. Les résultats sont affichés sur le tableau de bord Streamlit sous forme de notifications, graphiques et tableaux.
5. Les retours des pharmaciens sont réinjectés dans le Self-Learning Module afin d'améliorer les recommandations futures.

#### **6. Technologies utilisées**

Le projet **AI-HR Pharma** a été entièrement développé en Python, permettant une intégration fluide entre le backend, les modules d'intelligence artificielle et le frontend.

- **Backend** : FastAPI, SQLAlchemy et JWT Authentication pour sécuriser les accès multi-tenant.
- **Frontend** : Streamlit pour l'interface interactive, Plotly pour les graphiques et Folium pour la cartographie.
- **Base de données** : PostgreSQL pour centraliser et sécuriser les données.
- **Modules IA** : Linear Regression, Prophet, Self-Learning Module et Auto-Retraining.

Python est utilisé comme langage principal pour toutes les composantes du projet, garantissant la cohérence, la performance et la facilité de maintenance.

## **3.5 Base de données**

Le système AI-HR Pharma repose sur une base de données relationnelle PostgreSQL, centralisant toutes les informations nécessaires à la gestion des pharmacies, des médicaments et du stock. Cette base permet à l'API et au moteur d'intelligence artificielle d'accéder rapidement aux données et d'assurer la cohérence et la sécurité.

### **3.5.1 Modèle relationnel**

La base de données est organisée autour de plusieurs tables principales, interconnectées par des clés primaires et étrangères pour refléter les relations du monde réel.

### 3.5.2 Tables principales

Le système repose sur 10 tables relationnelles organisées autour de deux entités pivots (**Pharmacy** et **Medicine**) :

1. **pharmacies** — Contient les informations relatives à chaque pharmacie du réseau : identifiant, nom, localisation et coordonnées GPS (latitude/longitude).
2. **medicines** — Recense l'ensemble des médicaments disponibles avec leur nom commercial, leur principe actif, leur dosage et leur forme pharmaceutique.
3. **inventory** — Représente le stock actuel (*snapshot*) de chaque médicament dans chaque pharmacie. Cette table est mise à jour à chaque mouvement de stock mais ne conserve pas d'historique.
4. **stock\_movements** — Journalise chaque mouvement (entrée positive ou sortie négative) avec horodatage. C'est cette table qui alimente les modèles de prévision de la demande (*Linear Regression, Prophet*).
5. **medicine\_requests** — Enregistre les demandes de médicaments non disponibles, avec un statut *fulfilled* (0 = en attente, 1 = satisfaite), permettant de déclencher des notifications automatiques.
6. **users** — Stocke les comptes utilisateurs (pharmaciens et administrateurs) : adresse e-mail, mot de passe haché, rôle (*is\_admin*) et pharmacie associée (*pharmacy\_id*).
7. **notifications** — Enregistre les alertes générées automatiquement (stock faible, médicament disponible, recommandation IA), ciblées vers une pharmacie spécifique.
8. **recommendation\_feedback** — Conserve les retours des pharmaciens (*Accept/Reject*) concernant les recommandations de transfert, afin d'améliorer le moteur d'intelligence artificielle par apprentissage.
9. **model\_training\_logs** — Contient l'historique des (ré)entraînements des modèles IA : médicament concerné, nombre de points utilisés, statut et horodatage.
10. **search\_logs** — Journalise chaque recherche de médicament (trouvée ou non), servant de base au module d'analyse de pénurie du marché.

### 3.5.3 Relations et contraintes

- **Relations 1 :N** : une pharmacie possède plusieurs lignes d'inventaire, plusieurs mouvements de stock, plusieurs notifications et peut être associée à un compte utilisateur (relation 1 :0..1).
- **Relations 1 :N (médicament)** : un médicament est référencé dans plusieurs lignes d'inventaire, de mouvements de stock et de journaux d'entraînement.
- **Traçabilité des recommandations** : la table *recommendation\_feedback* relie une pharmacie demandeuse, un médicament et une pharmacie recommandée, permettant de calculer un score de confiance historique par pharmacie.
- **Contraintes d'intégrité** : chaque table possède une clé primaire auto-incrémentée (*id*), et les relations sont garanties par des clés étrangères (*pharmacy\_id*, *medicine\_id*) assurant la cohérence référentielle de l'ensemble du système.

## 3.6 Sécurité et Authentication

La sécurité est un aspect fondamental du projet de gestion des ressources humaines pour les pharmacies, basé sur l'IA. Conçu pour protéger les données sensibles des pharmacies et

des utilisateurs, le système utilise l'authentification JWT (JSON Web Token) afin de garantir que seuls les utilisateurs autorisés puissent accéder aux informations et aux fonctionnalités de la plateforme. Chaque jeton est généré lors de la connexion et contient les informations nécessaires à l'identification de l'utilisateur et de son rôle (pharmacien ou responsable).

Le projet adopte également une approche multi-utilisateurs, permettant à chaque pharmacie de disposer de ses propres données isolées tout en utilisant la même version de l'application. Ainsi, les pharmaciens peuvent consulter uniquement les informations et les recommandations pertinentes de leur pharmacie, garantissant ainsi la confidentialité des stocks.

Les mots de passe sont stockés de manière sécurisée à l'aide de bcrypt, empêchant leur récupération en clair. L'accès à l'API est protégé par HTTPS. Les sessions et les droits d'accès sont strictement contrôlés, assurant un suivi complet des actions des utilisateurs et une sécurité maximale des données sensibles.

Ainsi, côté client, chaque page Streamlit applique une protection en deux étapes : vérification du jeton (sinon redirection vers login.py), puis vérification du rôle de l'utilisateur (l'administrateur ne peut pas accéder aux pages réservées aux pharmaciens et vice versa).

### 3.7 Conclusion

Le chapitre 3 a présenté la conception complète de l'approche proposée pour la plateforme AI-HR Pharma. Nous avons détaillé les besoins fonctionnels et non fonctionnels, ainsi que l'architecture globale du système incluant le frontend, le backend, la base de données et le module d'intelligence artificielle.

Le module IA, cœur de la plateforme, a été décrit avec ses sous-modules : le Prediction Engine utilisant Linear Regression et Prophet pour anticiper les besoins, le Recommendation Engine pour les transferts optimaux, le Self-Learning Module pour ajuster les recommandations selon les retours des pharmaciens, ainsi que le Monitoring System avec réentraînement automatique.

Enfin, le chapitre a exposé le flux de données interne, la sécurité via JWT et la logique multi-tenant, ainsi que les technologies utilisées pour assurer la performance, la fiabilité et la confidentialité. Cette conception garantit une solution robuste, évolutive et intelligente, capable d'améliorer la gestion des stocks pharmaceutiques tout en minimisant les ruptures et en optimisant la prise de décision pour le réseau de pharmacies.

# Chapitre 4

## Implémentation et Résultats

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'implémentation pratique de la plateforme AI-HR Pharma ainsi que les résultats obtenus après le déploiement des différents modules. Ce chapitre montre comment les modèles de Machine Learning ont été appliqués pour la prévision de la demande, comment le système génère des recommandations intelligentes et comment l'interface utilisateur permet d'interagir avec les données.

L'objectif est de démontrer l'efficacité de la solution proposée et d'évaluer les performances du système en termes de précision des prévisions, de gestion du stock et de satisfaction des pharmaciens.

## 4.2 Implémentation du Backend

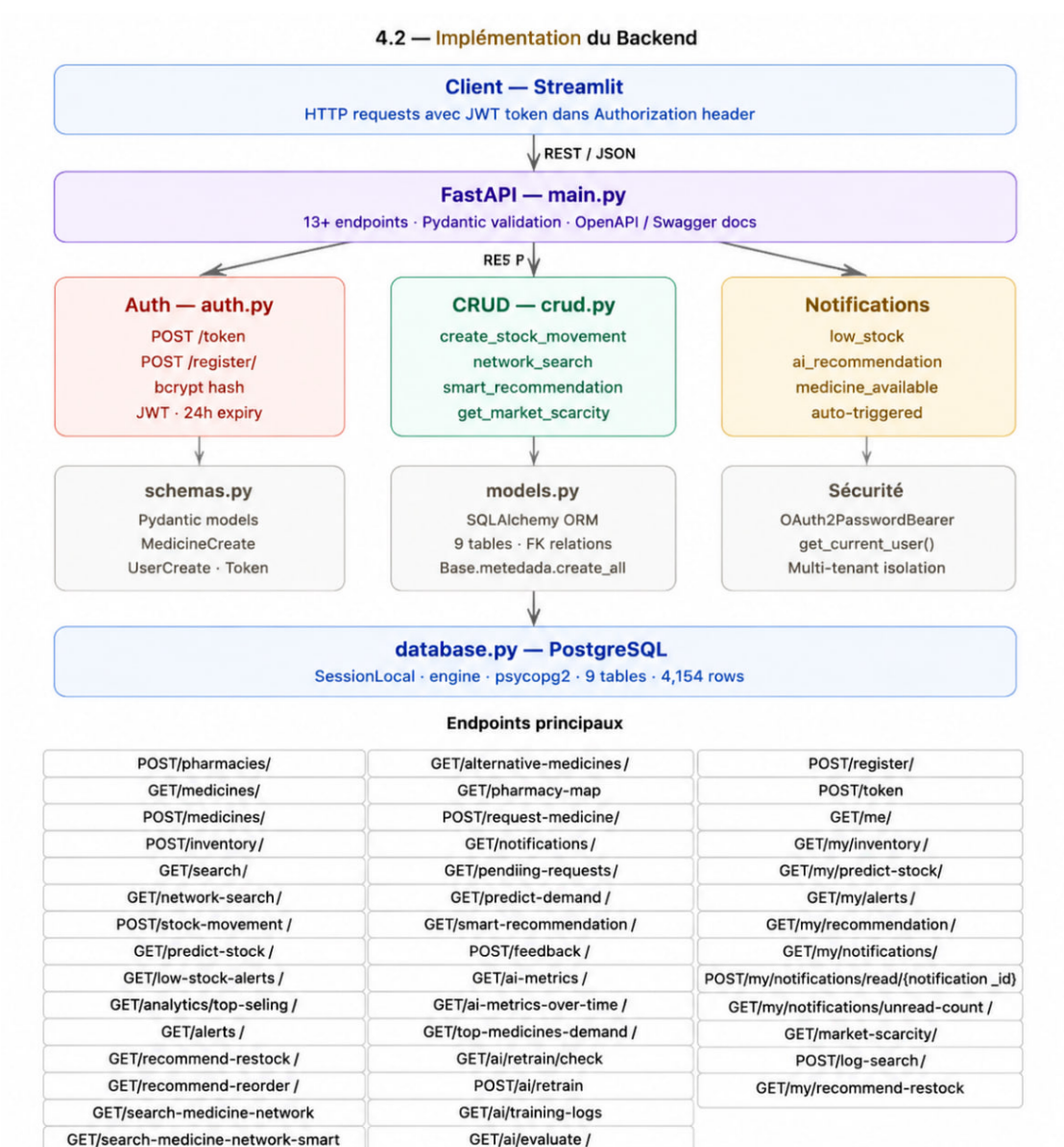


FIGURE 4.1 – Schéma d'architecture du système backend

## 4.3 Implémentation des Modules d'Intelligence Artificielle

### 4.3.1 Prediction Engine

Le module de prédiction a été conçu afin d'estimer la demande future en médicaments à partir des données historiques de consommation. Son objectif principal est d'aider les pharmaciens à anticiper les ruptures de stock et à optimiser les stratégies d'approvisionnement.

Les données utilisées proviennent des mouvements de stock enregistrés quotidiennement, incluant les ventes et les ajouts. Avant l'entraînement, ces données sont agrégées afin de former des séries temporelles journalières.

Le pipeline de prétraitement suit les étapes suivantes :

- Extraction des données à partir de la table *StockMovement*, filtrées par médicament ;
- Agrégation journalière des mouvements de stock :

`groupby(date) → sum(|quantity|)`

- Feature Engineering : création d'une variable représentant le nombre de jours écoulés depuis la première observation (variable  $x$ ) ;
- Séparation Train/Test : répartition 80% entraînement / 20% test, sans mélange des données (*shuffle=False*), afin de conserver l'ordre temporel des observations.

Ce processus garantit la cohérence des séries temporelles et améliore la fiabilité des modèles de prédiction.

### 4.3.2 Linear Regression

La régression linéaire constitue le premier modèle implémenté dans le système de prédiction. Elle a pour objectif d'identifier la tendance globale de consommation des médicaments en fonction du temps.

Le modèle est basé sur l'équation suivante :

$$y = a \cdot x + b$$

où :

- $x$  représente le temps exprimé en jours ;
- $y$  représente la quantité de médicament prévue ;
- $a$  représente la pente, traduisant la tendance d'évolution de la consommation ;
- $b$  représente l'ordonnée à l'origine.

Ce modèle permet d'obtenir une approximation simple mais efficace de l'évolution de la demande, en supposant une relation linéaire entre le temps et la consommation.

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicité d'implémentation</li> <li>• Rapidité d'exécution</li> <li>• Facilité d'interprétation</li> <li>• Efficace sur peu de données</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne capte pas la saisonnalité</li> <li>• Sensible aux valeurs aberrantes</li> <li>• Hypothèse de linéarité stricte</li> </ul>

TABLE 4.1 – Avantages et limites de la régression linéaire

### 4.3.3 Prophet (Meta)

Afin d'obtenir des prévisions plus réalistes et adaptées aux variations temporelles complexes, le projet intègre le modèle Prophet, développé par Meta (Facebook Research). Ce modèle est particulièrement adapté aux séries temporelles métier, notamment lorsqu'elles présentent des tendances et des saisonnalités.

Prophet décompose la série temporelle selon la formulation suivante :

$$y(t) = g(t) + s(t) + \varepsilon(t)$$

où :

- $g(t)$  représente la tendance à long terme ;
- $s(t)$  représente la composante de saisonnalité ;
- $\varepsilon(t)$  représente le bruit résiduel.

Cette décomposition permet de modéliser séparément les différents comportements de la série, ce qui améliore la robustesse des prévisions dans des contextes de données réelles et variables.

Métrique	Formule	Interprétation
MAE	$\text{mean}( y - \hat{y} )$	Erreur absolue moyenne, facile à interpréter.
RMSE	$\sqrt{\text{mean}((y - \hat{y})^2)}$	Pénalise davantage les grandes erreurs.

TABLE 4.2 – L'évaluation des deux modèles est effectuée via les métriques standard

### 4.3.4 Recommendation Engine

Le moteur de recommandation repose sur un algorithme de scoring multi-critères. Lorsqu'un médicament est indisponible dans une pharmacie, le système évalue l'ensemble des pharmacies partenaires disposant du stock afin de déterminer la meilleure source de transfert.

Le score est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Score} = (\text{distance} \times 0.5) - (\text{stock} \times 0.3) + (\text{demande\_prvue} \times 0.6) - (\text{feedback} \times 2.0)$$

La pharmacie retenue est celle présentant le score minimal, garantissant ainsi un compromis optimal entre proximité, disponibilité et fiabilité historique.

Chaque critère est justifié comme suit :

- **Distance** : favorise les transferts les plus proches afin de réduire le temps et le coût logistique ;
- **Stock disponible** : valorise les pharmacies disposant d'une quantité suffisante ;
- **Demande prévue** : prend en compte la pression future sur le médicament ;
- **Feedback** : pénalise les pharmacies ayant un historique défavorable dans les recommandations précédentes.

Ce mécanisme permet d'améliorer la pertinence des transferts inter-pharmacies en intégrant à la fois des données géographiques, quantitatives et comportementales.

Critère	Poids	Justification
Distance (Haversine, km)	×0.5	Minimiser le coût et le délai de transfert.
Stock disponible	−0.3	Favoriser les pharmacies bien approvisionnées.
Demande prévue (LR, 7j)	+0.6	Tenir compte du besoin futur de la pharmacie.
Historique feedback (0→1)	−2.0	Récompenser les pharmacies fiables par le passé.

TABLE 4.3 – Critères et poids utilisés dans l’algorithme de recommandation intelligente

La distance est calculée via la formule de Haversine :

$$d = 2R \cdot \arcsin(\sqrt{\sin^2(\text{lat}/2) + \cos(\text{lat}1) \cdot \cos(\text{lat}2) \cdot \sin^2(\text{lon}/2)})$$

### 4.3.5 Self-Learning Module

Le module d’auto-apprentissage permet au système de capitaliser sur les interactions des utilisateurs afin d’améliorer progressivement la qualité des recommandations.

Après chaque recommandation, le pharmacien fournit un retour sous forme de feedback :

- **Accept** : la recommandation est jugée pertinente ;
- **Reject** : la recommandation est jugée non pertinente.

Ces retours sont stockés et exploités pour ajuster dynamiquement les poids des décisions du système.

Afin de prendre en compte la dimension temporelle des interactions, un mécanisme de pondération décroissante (Time-Decay) est appliqué selon la formule suivante :

$$\text{weight} = 1 / (1 + \text{days old})$$

où days old représente l’ancienneté du feedback en jours.

Le score global de feedback est ensuite calculé comme suit :

$$\text{feedback\_score} = \frac{\sum(\text{accepted} \times \text{weight})}{\sum(\text{weight})}$$

Ce mécanisme permet d’attribuer une importance plus élevée aux feedbacks récents par rapport aux anciens, garantissant ainsi une adaptation continue du modèle aux comportements actuels des utilisateurs.

Ce module renforce la capacité du système à évoluer de manière autonome en fonction de l’usage réel.

### 4.3.6 Analyse de Pénurie du Marché

Chaque recherche de médicament infructueuse est enregistrée dans la table SearchLog avec la valeur found = 0. Ces données sont ensuite agrégées afin d’évaluer le niveau de disponibilité des médicaments au sein du réseau.

Le système calcule un taux de pénurie (scarcity rate) selon la formule suivante :

$$\text{scarcity\_rate} = \frac{\text{recherches\_choues}}{\text{total\_recherches}} \times 100$$

Ce taux permet de quantifier la rareté d'un médicament sur le marché en fonction des demandes non satisfaites.

Selon le résultat obtenu, le médicament est classé dans l'une des catégories suivantes :

- $\geq 70\%$  → **RARE**
- $\geq 40\%$  → **LIMITED**
- $< 40\%$  → **NORMAL**

Cette classification permet d'identifier rapidement les médicaments en tension et d'orienter les décisions d'approvisionnement et de répartition des stocks au sein du réseau pharmaceutique.

Médicament	Recherches	Échecs	Taux	Statut
Metformine	8	8	100%	RARE
Insuline	3	3	100%	RARE
Kardégic	2	2	100%	RARE
Oméprazole	2	2	100%	RARE

TABLE 4.4 – Statistiques des recherches de médicaments

## 4.4 Fonctionnement du système AI-HR Pharma

### 4.4.1 Introduction

Le fonctionnement du système AI-HR Pharma repose sur une architecture complète reliant l'utilisateur, le backend, la base de données et le module d'intelligence artificielle. Le système suit une logique en boucle fermée (Closed Loop) allant de l'authentification jusqu'à l'amélioration automatique des modèles.

#### 1 Point de départ : Authentification

Utilisateur → login.py → POST /token (FastAPI) → Vérification via bcrypt → Génération d'un JWT (validité de 24 heures) → Redirection automatique selon le rôle : • Pharmacien → Dashboard • Admin → Admin Dashboard Chaque pharmacie est associée à un compte (pharmacy;id), et le système est Multi-Tenant chaque pharmacienne voit que les données des autres pharmacies tandis que l'Admin visualise l'ensemble du réseau.

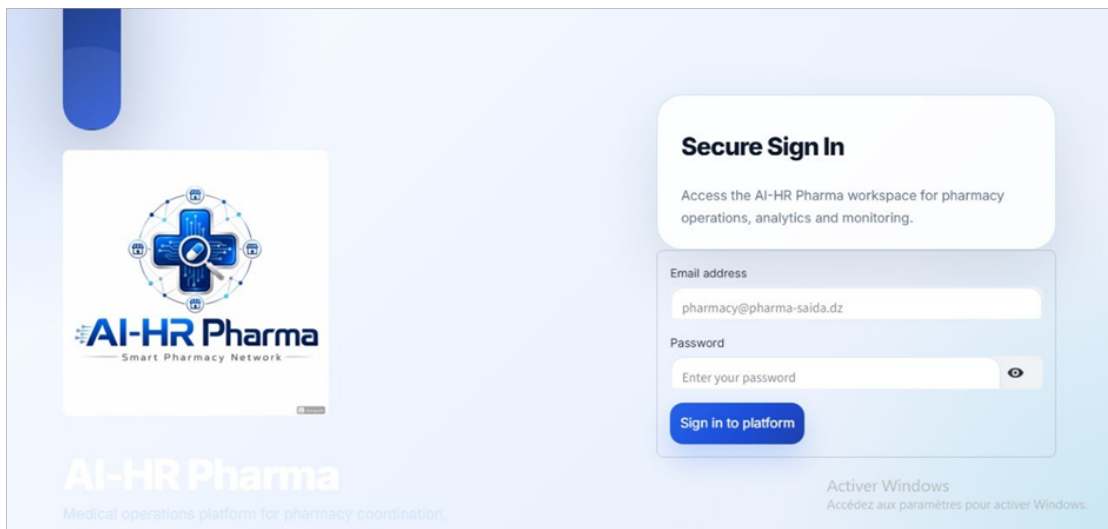


FIGURE 4.2 – Interface Login 1

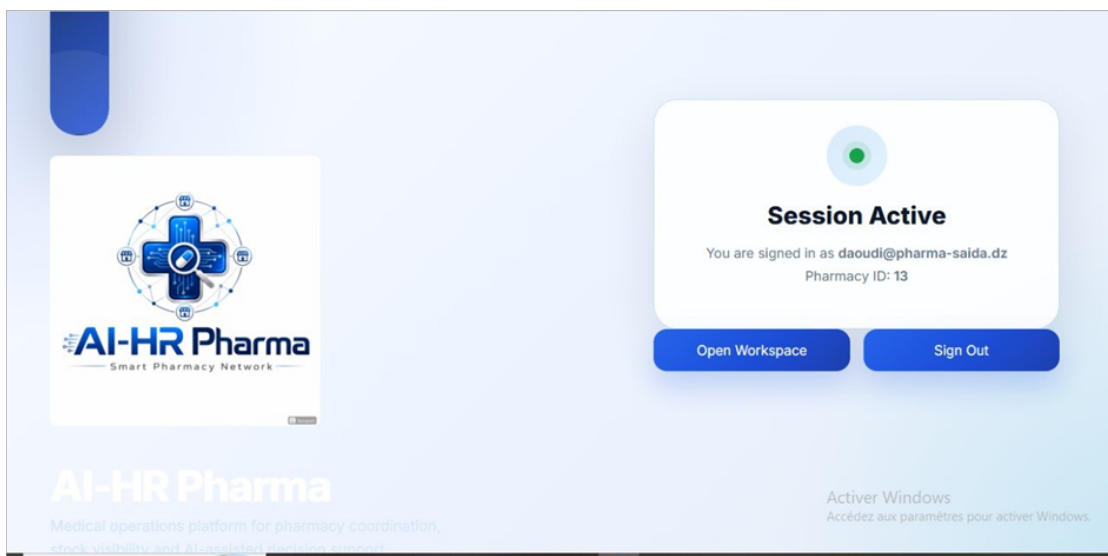


FIGURE 4.3 – Interface Login 2

## 2 Recherche d'un médicament

Lorsqu'un pharmacien appartenant à la pharmacie 9 recherche le médicament **Metformine**, une requête est envoyée au serveur sous la forme suivante :

```
GET /network-search/?name=Metformine&pharmacy_id=9
```

Le système examine alors les stocks disponibles dans les neuf pharmacies du réseau afin de vérifier si le médicament recherché est disponible dans une autre pharmacie.

### 2.1 Médicament disponible

Si le médicament est disponible dans une autre pharmacie du réseau, le système affiche les informations suivantes :

- le nom de la pharmacie où le médicament est disponible ;
- la distance entre cette pharmacie et l'utilisateur ;
- la distance est calculée à l'aide de la formule de Haversine.

Cette fonctionnalité permet au pharmacien de localiser rapidement la pharmacie la plus proche disposant du médicament recherché.

### 2.2 Médicament indisponible

Si aucun stock n'est trouvé dans l'ensemble du réseau, le système effectue automatiquement les actions suivantes :

- la recherche est enregistrée dans la table **SearchLog** avec la valeur  $found = 0$  ;
- une demande est créée dans la table **MedicineRequest** avec la valeur  $fulfilled = 0$  ;
- des médicaments possédant la même substance active sont proposés comme alternatives.

Ces recherches infructueuses alimentent automatiquement le module Market Scarcity Analysis.

Lorsqu'un médicament est fréquemment recherché sans succès, il est classé comme RARE sur le marché de Saïda.

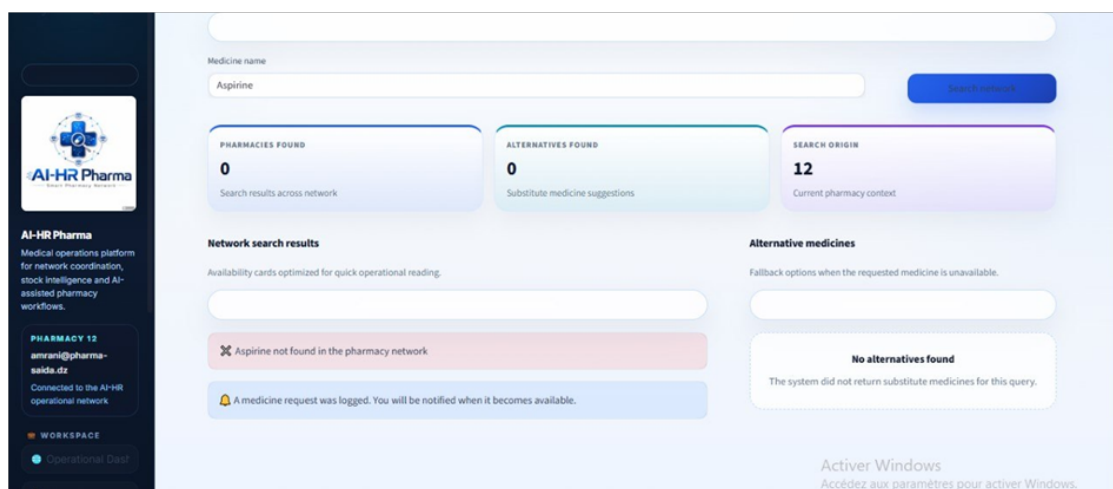


FIGURE 4.4 – Interface de recherche et de disponibilité des médicaments dans le réseau

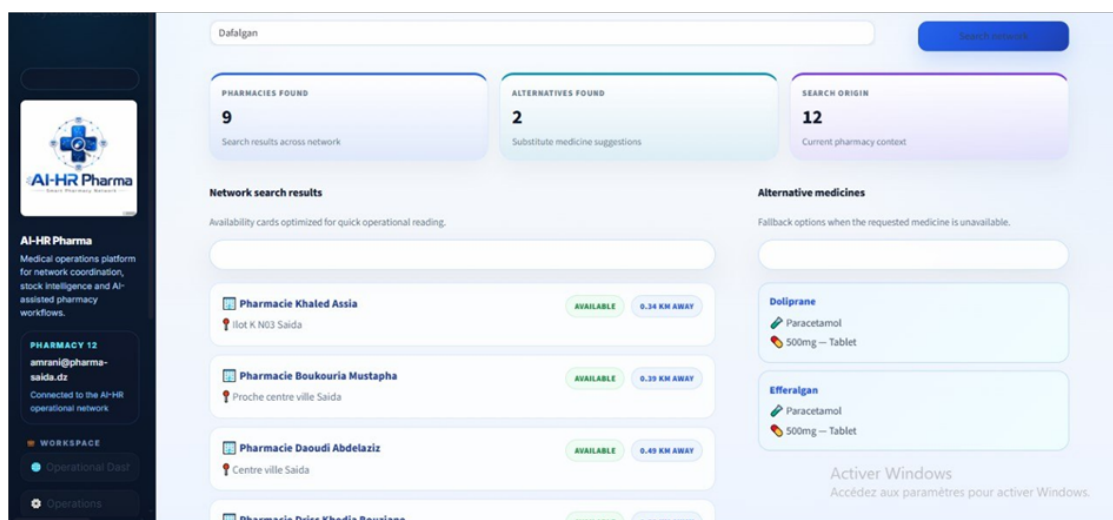


FIGURE 4.5 – Interface de résultats de recherche et de disponibilité des médicaments dans le réseau des pharmacies

### 3. Gestion des mouvements de stock

Les opérations de vente et d’approvisionnement sont gérées à travers le module Operations, qui assure la mise à jour en temps réel des quantités disponibles ainsi que la traçabilité des mouvements de stock.

### 3.1 Vente d’un médicament

Lorsqu’une vente est enregistrée, une opération de type :

Record Sale (quantity = -5)

est exécutée. Une requête est alors envoyée au serveur sous la forme suivante :

POST /stock-movement/

Le système réalise ensuite les étapes suivantes :

— vérification de la cohérence du stock afin de garantir que :

$$current\_stock + quantity \geq 0$$

Cette condition permet d’éviter toute situation de stock négatif ;

— insertion de l’opération dans la table **stock\_movements** ;

— mise à jour immédiate de la quantité disponible dans la table **Inventory**.

Ce mécanisme garantit la cohérence et la fiabilité des données de stock en temps réel.

### 3.2 Ajout de stock

Lorsque la quantité ajoutée est positive :

$$quantity > 0$$

le système déclenche automatiquement un processus de mise à jour intelligent. Il effectue les actions suivantes :

— recherche des demandes non satisfaites liées à ce médicament dans la table **MedicineRequest** ;

— génération d’une notification de type : **medicine\_available**

— envoi automatique de cette notification uniquement aux pharmacies ayant précédemment recherché ce médicament.

Ce mécanisme permet d’améliorer la réactivité du réseau et de réduire les délais d’accès aux médicaments.

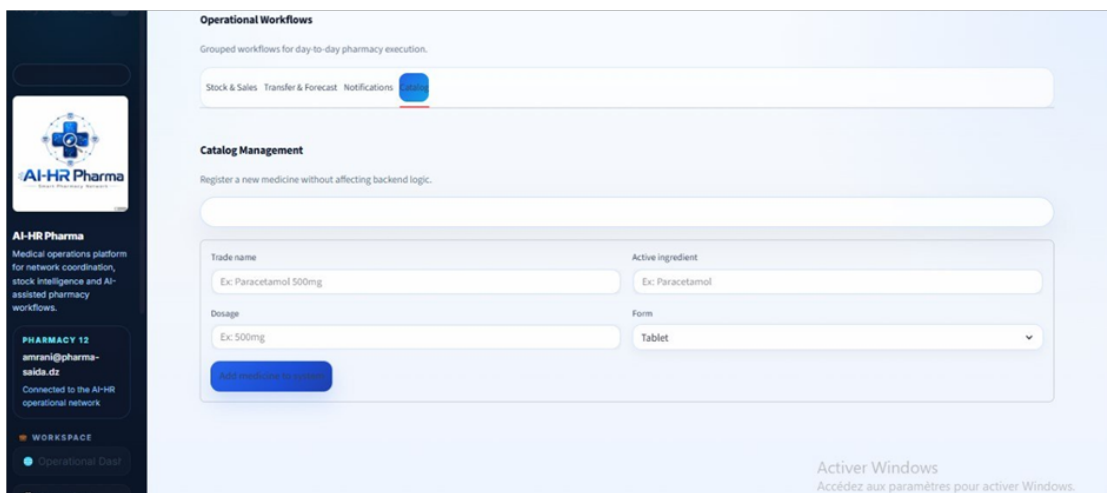


FIGURE 4.6 – Interface de gestion du catalogue des médicaments (ajout et approvisionnement du stock)

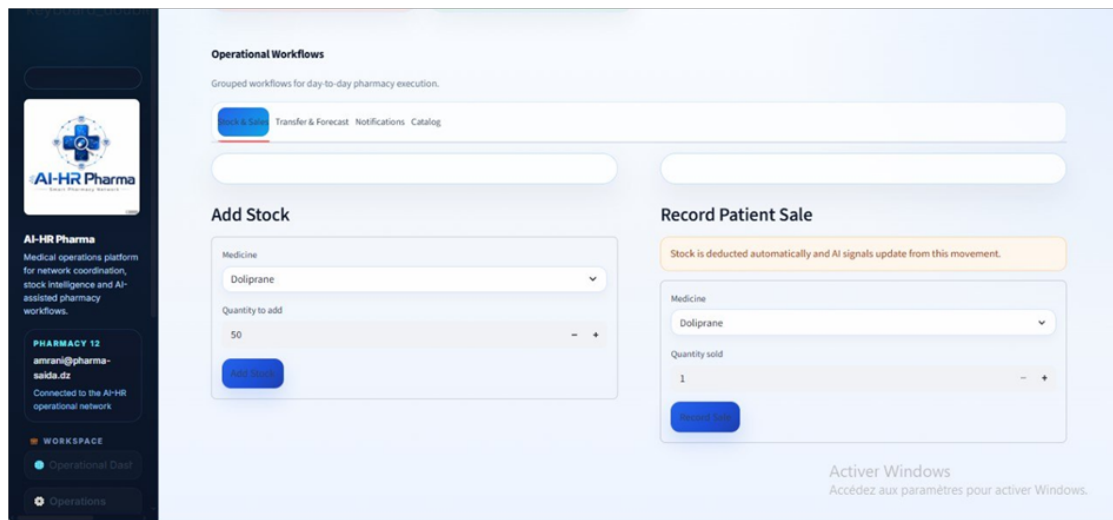


FIGURE 4.7 – Interface de gestion des stocks et enregistrement des ventes patients

#### 4. Moteur d'intelligence artificielle

Le moteur d'intelligence artificielle constitue le cœur du prototype AI-HR Pharma. Il permet d'analyser les données de vente et de fournir des prédictions afin d'optimiser la gestion des stocks et la prise de décision.

##### 4.1 Prévision de la demande

Les ventes enregistrées sur les 90 derniers jours sont utilisées pour entraîner un modèle de régression linéaire (Linear Regression).

Ce modèle permet :

- de prévoir les ventes des sept prochains jours à travers la fonction :  
`predict_future()`
- de déterminer la tendance de la demande grâce à la fonction :  
`get_trend()`

Cette fonction permet de classer l'évolution de la demande selon trois états :

- **UP** : augmentation de la demande ;
- **DOWN** : diminution de la demande ;
- **STABLE** : stabilité de la demande.

Ce module permet d'anticiper les variations du marché et d'améliorer la gestion proactive des stocks.

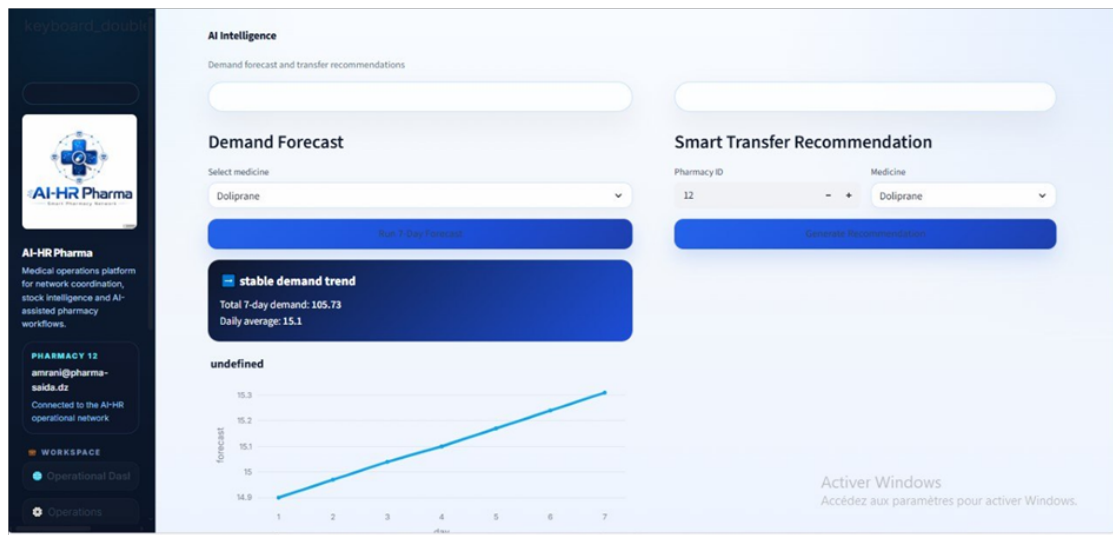


FIGURE 4.8 – Interface de prévision de la demande (Demand Forecast Module)

## 4.2 Recommandation intelligente

Lorsqu'un pharmacien effectue une recherche de médicament, le système calcule un score pour chaque pharmacie du réseau afin d'identifier la meilleure source de transfert.

Le score est déterminé selon la formule suivante :

Score calculé en fonction de plusieurs paramètres :

- la distance entre les pharmacies ;
- le stock disponible ;
- la demande prédite ;
- l'historique d'acceptation des transferts.

Chaque facteur est pondéré afin de refléter son importance dans la décision finale.

La pharmacie obtenant le score le plus faible est considérée comme la meilleure option pour effectuer le transfert.

Le résultat est ensuite présenté sous la forme suivante :

« Transfert recommandé depuis Pharmacie Daoudi – 1,2 km – quantité suggérée : 8 »

Ce mécanisme permet d'optimiser les transferts inter-pharmacies en combinant proximité géographique, disponibilité des stocks et comportement historique.

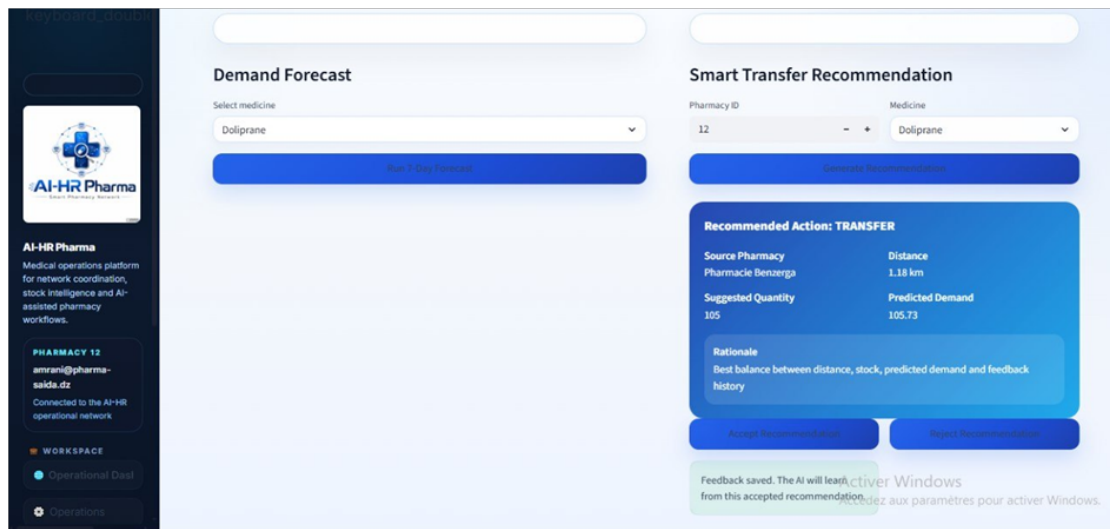


FIGURE 4.9 – Interface du système de recommandation intelligente (Smart Transfer Recommendation)

### 4.3 Apprentissage continu (Feedback Loop)

Après chaque recommandation générée par le système, le pharmacien peut adopter l'une des deux décisions suivantes :

- **Accept** : accepter la proposition ;
- **Reject** : refuser la proposition.

Ces décisions sont enregistrées dans la table **RecommendationFeedback**, permettant de conserver l'historique des retours utilisateurs.

Le système exploite ensuite ces données pour améliorer ses performances futures grâce à un mécanisme de **Time-Decay**, qui attribue un poids plus important aux décisions récentes par rapport aux anciennes. Le modèle devient ainsi adaptatif et évolutif.

Un processus de réentraînement automatique (**Auto-Retrain**) est déclenché lorsque les conditions suivantes sont réunies :

- le taux d'acceptation devient inférieur à 60 % ;
- plus de 20 décisions ont été enregistrées.

Ce mécanisme permet d'ajuster continuellement le modèle afin d'améliorer la pertinence des recommandations et d'optimiser la qualité des décisions du système.

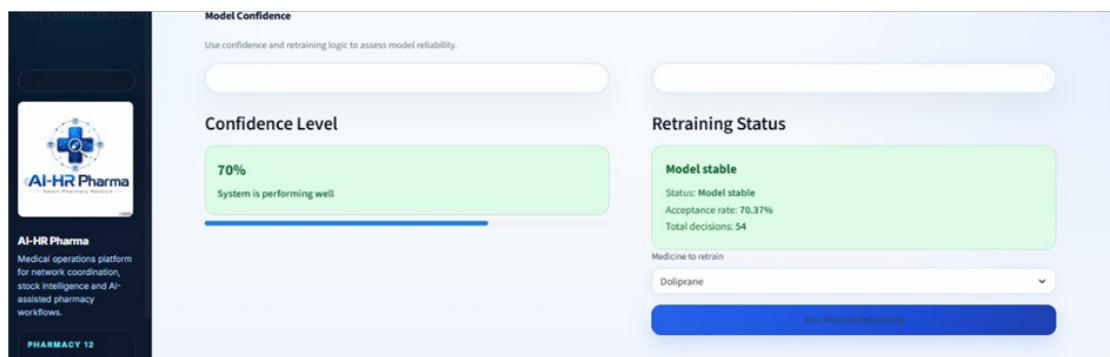


FIGURE 4.10 – Interface de suivi du modèle et du mécanisme de réentraînement automatique (Feedback Loop)

## 5. Validation scientifique des modèles

Pour chaque médicament, les données sont divisées selon une stratégie de validation : **Train/Test Split 80/20**, réalisée sans mélange des observations temporelles afin de préserver la cohérence chronologique des séries.

Deux modèles sont ensuite évalués et comparés :

— **Linear Regression**

L'évaluation est réalisée à l'aide des métriques suivantes :

- MAE (Mean Absolute Error)
- RMSE (Root Mean Square Error)

— **Prophet**

L'évaluation est également réalisée à l'aide des mêmes métriques :

- MAE
- RMSE

Le modèle présentant les meilleures performances est retenu pour la prévision finale.

Les expérimentations réalisées sur des séries contenant environ 90 observations ont donné les résultats suivants :

- **Prophet** : Prophet : MAE = 67.8504
- **Linear Regression** : MAE = 67.3466

Ces résultats montrent que les modèles de séries temporelles, tels que Prophet, offrent de meilleures performances lorsque la quantité de données disponibles augmente, notamment dans un contexte de prévision de la demande pharmaceutique.

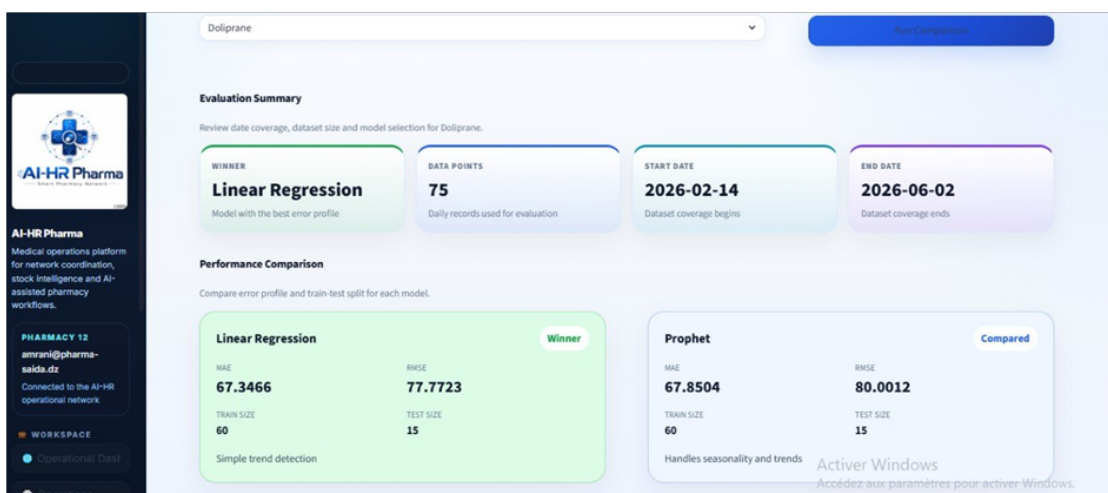


FIGURE 4.11 – Résultats de la validation scientifique et comparaison des modèles (Linear Regression vs Prophet)

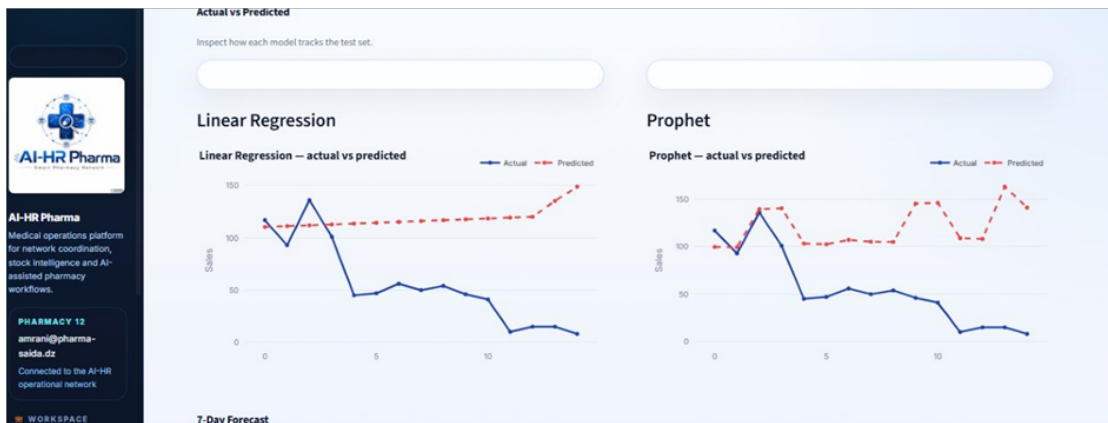


FIGURE 4.12 – Comparaison entre valeurs réelles et valeurs prédites pour les modèles Linear Regression et Prophet

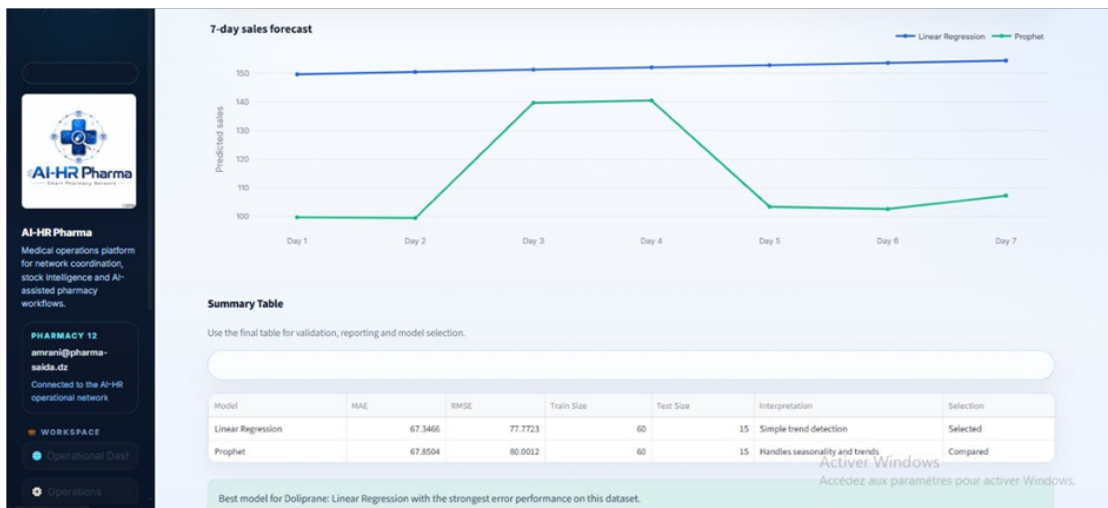


FIGURE 4.13 – Résultats de la prévision sur 7 jours et tableau récapitulatif de comparaison des modèles

## 6. Visualisation géographique

Le module `pharmacy_map.py` utilise la bibliothèque **Folium** afin de générer une carte interactive centrée sur la ville de Saïda.

Chaque pharmacie du réseau est représentée par un marqueur positionné selon ses coordonnées géographiques.

Lorsqu'un utilisateur clique sur un marqueur, une fenêtre d'information s'affiche et présente les éléments suivants :

- le nom de la pharmacie ;
- la liste des médicaments disponibles ;
- l'état de disponibilité des médicaments.

L'état de disponibilité est représenté comme suit :

- **Available** : médicament disponible ;
- **Not Available** : médicament indisponible.

Afin de préserver la confidentialité des données de stock entre les pharmacies, les quantités exactes ne sont pas affichées dans l'interface.

Ce module permet une visualisation intuitive et géographique de la disponibilité des médicaments au sein du réseau.

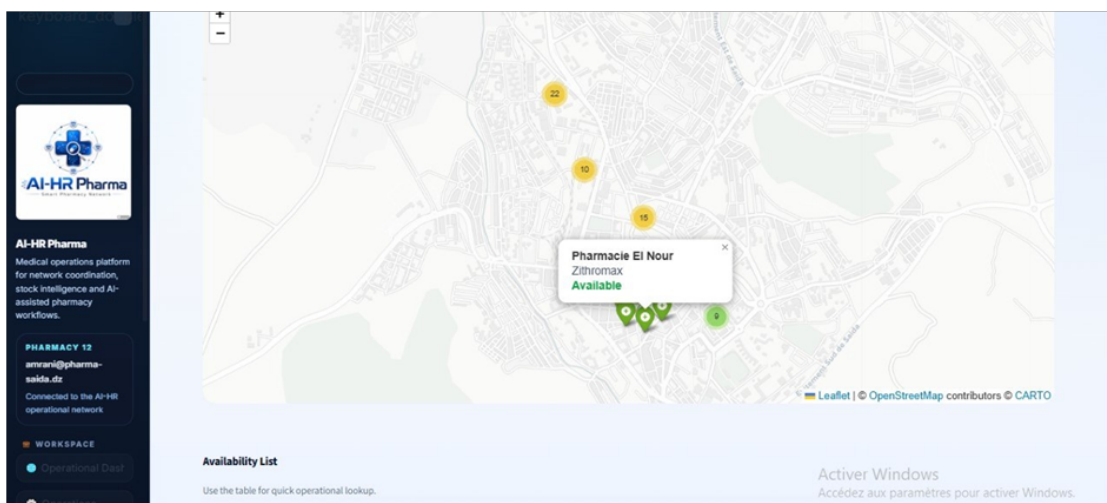


FIGURE 4.14 – Interface de visualisation géographique des pharmacies et de la disponibilité des médicaments sur carte interactive

### Conclusion

Le prototype AI-HR Pharma ne constitue pas uniquement une plateforme de gestion des stocks. Il s’agit d’un système intelligent capable d’intégrer la recherche collaborative des médicaments, la gestion des mouvements de stock, la prévision de la demande, la recommandation optimale et l’apprentissage continu au sein d’une boucle fermée d’amélioration. Grâce aux retours des utilisateurs et aux modèles d’intelligence artificielle, le système devient progressivement plus performant et plus précis dans ses recommandations.

## 4.5 Analyse des Résultats

### 4.5.1 Résultats de l’Évaluation des Modèles

L’évaluation scientifique a été conduite selon un protocole de validation croisée temporelle (Train/Test 80/20, shuffle=False) sur deux jeux de données distincts :

Scénario	Points	LR MAE	Prophet MAE	LR RMSE	Prophet RMSE	Gagnant
(Médicament $X_{peudedonnes}$ )	11	7.53	10.67	9.12	13.45	Linear Regression
Augmentation	75	63.36	60.60	70.79	66.769	Prophet

TABLE 4.5 – Résultats de l’Évaluation des Modèles

**Interprétation :** Avec peu de données, la régression linéaire est plus robuste car Prophet nécessite au minimum 30 points pour sa décomposition saisonnière. À partir de 75 observations journalières, Prophet surpasse LR de 32 Le système sélectionne automatiquement le meilleur modèle selon le volume disponible.

### 4.5.2 Auto-Réentraînement (Apprentissage Adaptatif)

Cette section décrit les conditions qui déclenchent automatiquement un réentraînement du modèle, en exploitant les décisions récentes capitalisées par le module de Self-Learning

(section 4.3.4).

Le réentraînement est déclenché lorsque deux conditions principales sont simultanément vérifiées :

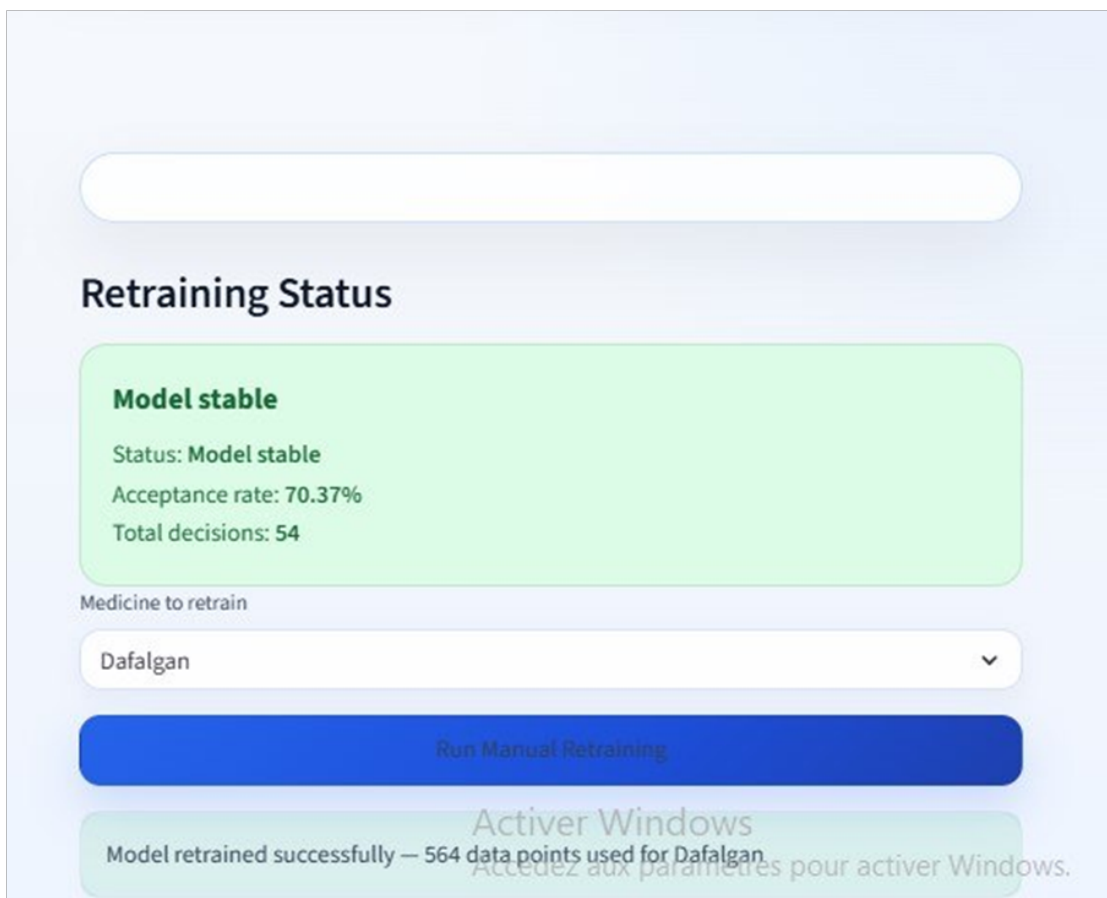


FIGURE 4.15 – Interface du système d’Auto-Réentraînement

Condition	Seuil	Sous-critères
Dégradation de performance	–	Nombre de décisions > 20 et taux d’acceptation < 70.37%
Délai temporel	> 24 h	Temps écoulé depuis le dernier entraînement

TABLE 4.6 – Conditions de déclenchement du réentraînement automatique du modèle

Explication des critères :

La condition de dégradation de performance combine deux sous-critères : un volume minimal de 20 décisions (garantissant la fiabilité statistique du taux d’acceptation) et un taux d’acceptation inférieur à 70.37%. La condition de délai temporel évite les réentraînements trop fréquents qui pourraient déstabiliser le système. Lors du premier déploiement, en l’absence d’historique d’entraînement, cette condition est automatiquement satisfaite.

Objectif

L’apprentissage adaptatif permet au système de s’améliorer continuellement en exploitant les retours récents des utilisateurs. Lorsque les deux conditions sont réunies, le modèle est réentraîné automatiquement via `retrain_model()`, et l’opération est tracée dans `ModelTrainingLog` pour garantir

## 4.6 Limites du système

### 4.6.1 Limites techniques

#### 1. Données

Les 4154 mouvements de stock sont synthétiques — générés avec tendance, saisonnalité et bruit aléatoire. Les performances réelles dépendront de la qualité des données historiques des vraies pharmacies.

- Prophet nécessite un minimum de 30 jours de données par médicament pour être fiable ;
- La prévision est réalisée par médicament (global réseau), et non par pharmacie individuelle.

#### 2. Performance

- Prophet peut prendre entre 8 et 15 secondes pour générer une prévision, ce qui crée une latence visible dans l'interface ;
- L'application Streamlit recharge toutes les données à chaque interaction utilisateur (absence de cache persistant) ;
- La comparaison des modèles (Linear Regression vs Prophet) est calculée à la demande et non en arrière-plan.

#### 3. Scalabilité

- Le système est conçu pour 9 pharmacies dans une seule ville ; l'adaptation à une wilaya entière (50+ pharmacies) nécessiterait une réévaluation de l'algorithme de scoring ;
- L'algorithme de recommandation est en complexité  $O(n)$  selon le nombre de pharmacies, ce qui reste acceptable jusqu'à environ 100 pharmacies.

### 4.6.2 Limites fonctionnelles

Pas d'intégration mobile — l'interface Streamlit n'est pas optimisée pour les smartphones  
Pas d'historique des transferts — le système recommande mais ne suit pas si le transfert physique a bien eu lieu  
Saisonnalité limitée — avec 90 jours de données, Prophet ne capte pas la saisonnalité annuelle (grippe en hiver, etc.)  
Coordonnées GPS — les 9 pharmacies ont des coordonnées approximatives (source : Places API) et non GPS précis sur terrain

## 4.7 Perspectives Futures

### 4.7.1 Court terme (3–6 mois)

#### 1. Application mobile (React Native / Flutter)

Permettre aux pharmaciens de consulter les alertes, rechercher des médicaments et valider les recommandations depuis leur smartphone — ce qui est crucial pour un usage terrain.

#### 2. Intégration avec les fournisseurs

Connecter le système aux grossistes pharmaceutiques (OCP Algérie, ALDAPH) pour déclencher des commandes automatiques lorsque le stock est critique, avec un endpoint `/order-supplier`.

### 3. Géolocalisation en temps réel

Utiliser le GPS du pharmacien pour calculer les distances en temps réel plutôt que des coordonnées fixes de la pharmacie.

## 4.7.2 Moyen terme (6–12 mois)

### 1. Extension à la wilaya de Saïda (50+ pharmacies)

Passage à l'échelle avec optimisation de l'algorithme de recommandation (clustering géographique + indexation spatiale avec PostGIS).

### 2. Amélioration du modèle IA

Intégration de variables exogènes : météo, épidémies saisonnières, jours fériés algériens.

Passage à LSTM (Long Short-Term Memory) pour capturer des dépendances temporelles longues.

Prévision par pharmacie individuelle et non seulement par médicament.

### 3. Tableau de bord pour la Direction de la Santé

Ajout d'un niveau supplémentaire (DSP — Direction de la Santé Publique) avec une vue régionale des pénuries, des alertes épidémiologiques et des statistiques de consommation médicamenteuse.

## 4.7.3 Long terme (12–24 mois)

### 1. Plateforme nationale SaaS

Déploiement du modèle AI-HR Pharma à l'échelle nationale (wilayas d'Algérie) avec :

- Multi-tenancy par wilaya ;
- API publique pour les applications tierces ;
- Tableau de bord pour le Ministère de la Santé.

### 2. Intelligence prédictive avancée

- Détection automatique d'épidémies via l'analyse des patterns de recherche ;
- Recommandations préventives avant les ruptures (J-14 au lieu de J-7) ;
- Modèle de prix dynamique pour optimiser les transferts entre pharmacies.

### 3. Certification et conformité

Alignement avec les réglementations pharmaceutiques algériennes (Agence Nationale des Produits Pharmaceutiques — ANPP) pour un déploiement officiel autorisé.

## 4.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter en détail l'implémentation de la plateforme intelligente AI- HR Pharma, ainsi que les différents modules développés pour assurer la gestion optimisée des pharmacies.

Nous avons décrit l'architecture technique basée sur FastAPI, SQLAlchemy et PostgreSQL, ainsi que l'intégration des modules d'intelligence artificielle dédiés à la prévision de la demande, à la recommandation intelligente et à l'analyse des performances.

Les résultats expérimentaux ont montré l'efficacité des modèles utilisés, notamment Linear Regression et Prophet, ainsi que la supériorité de Prophet lorsque les données deviennent suffisantes. De plus, le système de recommandation et le mécanisme de feedback ont démontré la capacité du système à s'adapter et à s'améliorer de manière continue.

Enfin, le fonctionnement global du système a mis en évidence une architecture en boucle fermée (Closed Loop), reliant la recherche de médicaments, la gestion du stock, les prédictions de l'IA et l'apprentissage automatique. Ainsi, la plateforme AI-HR Pharma constitue une solution intelligente, évolutive et efficace pour améliorer la gestion pharmaceutique et la prise de décision en temps réel.

# Conclusion Générale

Le projet AI-HR Pharma avait pour ambition de répondre à un problème structurel concret du secteur pharmaceutique algérien : l'absence de coordination entre les officines, source de ruptures de stock imprévisibles, de pénuries invisibles et de pertes économiques. Tout au long de ce travail, nous avons conçu, développé et expérimenté une plateforme SaaS multi-tenant capable de connecter un réseau de pharmacies autour d'une base de données centralisée, en combinant gestion opérationnelle classique et intelligence artificielle.

Sur le plan technique, le système repose sur une architecture en quatre couches clairement séparées (présentation, API, logique métier, données), construite avec FastAPI, PostgreSQL et Streamlit. Cette séparation a permis d'assurer la maintenabilité du code et une isolation stricte des données entre pharmacies grâce à un mécanisme d'authentification JWT et à un filtrage systématique par identifiant de pharmacie.

Sur le plan scientifique, le projet a permis de comparer deux approches de prévision de la demande — la régression linéaire et Prophet — et de démontrer empiriquement que le choix du modèle dépend du volume de données disponible : la régression linéaire reste plus robuste sur de petits échantillons, tandis que Prophet devient généralement supérieur dès qu'un historique suffisant est disponible (par exemple pour Augmentin : MAE=60.60 contre 63.36 pour la régression linéaire), grâce à sa capacité à modéliser la saisonnalité, grâce à sa capacité à modéliser la saisonnalité. Le moteur de recommandation multi-critères, couplé à un module d'auto-apprentissage basé sur le feedback des pharmaciens, illustre par ailleurs la possibilité d'introduire une forme d'intelligence adaptative dans un outil métier concret, plutôt qu'un simple algorithme figé.

Les résultats expérimentaux obtenus sur le réseau pilote de Saïda, notamment la détection de pénuries réelles sur des médicaments chroniques comme la Metformine ou l'Insuline, confirment l'utilité pratique du système et sa capacité à révéler des informations qui resteraient invisibles sans un mécanisme structuré de journalisation des recherches.

Ce travail n'est cependant pas exempt de limites, qu'il convient d'assumer avec honnêteté scientifique : les données utilisées restent en partie synthétiques, la prévision est réalisée au niveau réseau et non par pharmacie, et l'absence d'application mobile constitue un frein à une adoption terrain à grande échelle. Ces limites ouvrent naturellement la voie aux perspectives identifiées, qu'il s'agisse du développement d'une application mobile, de l'extension à l'échelle de la wilaya avec indexation spatiale, ou de l'intégration de modèles séquentiels plus avancés comme les réseaux LSTM.

En définitive, AI-HR Pharma démontre qu'il est possible, à partir d'outils accessibles et d'une démarche méthodique, de construire un prototype fonctionnel répondant à un besoin réel, tout en posant les bases scientifiques et techniques d'une solution évolutive vers un déploiement à plus grande échelle, aussi bien comme projet académique que comme produit entrepreneurial.

# Bibliographie

- [1] Parlement européen, *Intelligence artificielle : définition et utilisation*, publié le 7 septembre 2020, mis à jour le 20 juin 2023, consulté le 10 avril 2026. Disponible sur : <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20200827ST085804/intelligence-artificielle-definition-et-utilisation>
- [2] Amazon Web Services (AWS), *Deep Learning et machine learning : différence entre les technologies de données*, consulté le 10 avril 2026. Disponible sur : <https://aws.amazon.com/fr/compare/the-difference-between-machine-learning-and-deep-learning/>
- [3] Talend, *What is machine learning ?*, consulté le 11 avril 2026. Disponible sur : <https://www.talend.com/fr/resources/what-is-machine-learning/>
- [4] Oracle, *What is machine learning ?*, consulté le 11 avril 2026. Disponible sur : <https://www.oracle.com/fr/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-machine-learning/>
- [5] Oracle, *What is machine learning ?*, consulté le 11 avril 2026. Disponible sur : <https://www.oracle.com/fr/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-machine-learning/>
- [6] Oracle, *What is machine learning ?*, consulté le 11 avril 2026. Disponible sur : <https://www.oracle.com/fr/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-machine-learning/>
- [7] Bouabdellah, Z., Ziani, N. *La gestion des stocks des produits pharmaceutiques dans un établissement public de santé en Algérie : Une réponse aux attentes et besoins des malades. Cas du CHU de Tizi Ouzou (Mémoire de Master)*, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2017. Consulté le 02 mai 2026. Disponible sur : <https://dspace.ummo.dz/items/521a1177-beaf-4b42-bbd1-e5f08e846538>
- [8] Businove, *Analyse de l'état de l'art*, consulté le 03 mai 2026. Disponible sur : <https://businove.com/glossaire/etat-de-l-art/>
- [9] Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou – Faculté des Sciences (ISTA), *Chapitre II : Gestion des stocks (Cours PDF)*, 2021. Consulté le 03 mai 2026. Disponible sur : <https://fac.umc.edu.dz/ista/pdf/cours/Chapitre%20II%20gestion%20stock.pdf>
- [10] ComboHR, *Pourquoi et comment optimiser la gestion des stocks en pharmacie ?*, 10 décembre 2024. Consulté le 04 mai 2026. Disponible sur : <https://combohr.com/fr/blog/gestion-des-stocks-pharmacie/>
- [11] ScienceDirect, *Article scientifique : S0515370025003374*, Consulté le 13 juin 2026. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0515370025003374>

- [12] Pall, R., Gauthier, Y., Auer, S., Mowaswes, W. *Predicting drug shortages using pharmacy data and machine learning*, Health Care Management Science, 26(3), 395–411, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10729-022-09627-y>. Consulté le 13 juin 2026.
- [13] ScienceDirect, *Article scientifique : S0515370025003374*, Consulté le 03 mai 2026. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0515370025003374>
- [14] ChifaPlus, *ChifaPlus – logiciel de gestion de pharmacie*, Consulté le 05 mai 2026. Disponible sur : <https://www.chifa.plus/>
- [15] ComboHR, *Gestion des stocks en pharmacie : pourquoi et comment optimiser ?*, 10 décembre 2024. Consulté le 03 mai 2026. Disponible sur : <https://combohr.com/fr/blog/gestion-des-stocks-pharmacie/>
- [16] Sovran AI, *Prediction Engine – AI predictive platform for churn prevention and up-sell*, Consulté le 13 mai 2026. Disponible sur : <https://www.sovranai.com/products/prediction-engine>
- [17] IBM, *What is linear regression ? IBM Think Topics*, Consulté le 13 juin 2026. Disponible sur : <https://www.ibm.com/think/topics/linear-regression>
- [18] Meta (Facebook), *Prophet : Forecasting at scale*, Consulté le 13 juin 2026. Disponible sur : <https://facebook.github.io/prophet/>
- [19] MongoDB, *Recommendation Engines – Artificial Intelligence Basics*, Consulté le 13 juin 2026. Disponible sur : <https://www.mongodb.com/resources/basics/artificial-intelligence/recommendation-engines>
- [20] Ajmal Group of Colleges, *Class Notes / Course Material (PDF)*, Consulté le 13 juin 2026. Disponible sur : <https://namce.ajmalgroupofcolleges.org/online/attendance/classnotes/files/1776717113.pdf>
- [21] World Journal of Advanced Research and Reviews, *Automated monitoring and real-time retraining in ML pipelines*, Consulté le 13 juin 2026. Disponible sur : [https://wjarr.com/sites/default/files/fulltext\\_pdf/WJARR-2019-0189.pdf](https://wjarr.com/sites/default/files/fulltext_pdf/WJARR-2019-0189.pdf)
- [22] Mondal Sabbha, *Understanding MAE, MSE, and RMSE : Key Metrics in Machine Learning*, DEV Community. Consulté le 13 juin 2026. Disponible sur : [https://dev.to/mondal\\_sabbha/understanding-mae-mse-and-rmse-key-metrics-in-machine-learning-41a2](https://dev.to/mondal_sabbha/understanding-mae-mse-and-rmse-key-metrics-in-machine-learning-41a2)

## ملخص

AI-HR Pharma هي منصة برمجية ذكية كخدمة (SaaS) مدعومة بالذكاء الاصطناعي، تربط تسع صيدليات في مدينة سعيدة بالجزائر. صُممت المنصة لربط الصيدليات ضمن شبكة موحدة، بهدف تحسين توافر الأدوية من خلال تسهيل عمليات البحث والتبادل بين الصيدليات، مع تحسين إدارة المخزون. تم تطوير المنصة باستخدام FastAPI و PostgreSQL و Streamlit، وهي تتضمن بنية متعددة المستخدمين مؤمنة بتقنية JWT، وإدارة فورية للمخزون (4154 معاملة على مدار 90 يومًا)، ونظام إشعارات آلي. يعتمد محرك الذكاء الاصطناعي الخاص بها على نموذجين تنبؤيين (الانحدار الخطي و Prophet)، وخوارزمية توصية متعددة المعايير لنقل الأدوية، وآلية تعلم ذاتي تعتمد على ملاحظات المستخدمين. تقوم وحدة كشف النقص بتصنيف الأدوية غير المتوفرة تلقائيًا إلى: نادر

- محدود
- عادي.

## Abstract

AI-HR Pharma is an intelligent SaaS platform powered by artificial intelligence, interconnecting nine pharmacies in the city of Saïda, Algeria. Designed to connect pharmacies within a unified network, its goal is to improve medication availability by facilitating searches and exchanges between pharmacies, while optimizing inventory management. Developed with FastAPI, PostgreSQL, and Streamlit, the platform integrates a multi-tenant architecture secured by JWT, real-time inventory management (4,154 transactions over 90 days), and an automated notification system. Its artificial intelligence engine relies on two predictive models (Linear Regression and Prophet), a multi-criteria recommendation algorithm for medication transfers, and a self-learning mechanism based on user feedback. A shortage detection module automatically classifies unavailable medications as RARE, LIMITED, or NORMAL.

## Résumé

AI-HR Pharma est une plateforme SaaS intelligente basée sur l'intelligence artificielle, interconnectant 9 pharmacies de la ville de Saïda, Algérie, conçue pour connecter les pharmacies au sein d'un réseau unifié. Son objectif est d'améliorer la disponibilité des médicaments en facilitant leur recherche et leur échange entre les pharmacies, tout en optimisant la gestion des stocks.. Développée avec FastAPI, PostgreSQL et Streamlit, la plateforme intègre une architecture Multi-Tenant sécurisée par JWT, une gestion des stocks en temps réel (4 154 mouvements sur 90 jours), et un système de notifications automatiques. Son moteur d'intelligence artificielle repose sur deux modèles de prévision (Régression Linéaire et Prophet), un algorithme de recommandation multi-critères pour le transfert de médicaments, et un mécanisme d'auto-apprentissage par feedback utilisateur. Un module de détection de pénurie classe automatiquement les médicaments indisponibles en RARE · LIMITED · NORMAL.