République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Borj Bou Arréridj
Faculté des Mathématiques et d'Informatique
Département d'Informatique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master en Informatique

Spécialité : Réseaux et Multimédia & Technologie de l'information et de la communication

THÈME

Système de prédiction proactive des crises d'asthme

Présenté par :

Asma BOUGUETAYA
Samah ZAHRAOUI
Dina KHARFELLAH
Yousra YOUCEFI

Devant le jury composé de :

Président : Dr. Boubakeur MOUSSAOUI
Examinateur : Dr. Oussama SENOUCI
Encadrant : Dr. Nadjib BENAOUDA

Soutenu publiquement le : 30/06/2026

2025/2026

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail...

À nos chers parents,
Qui nous ont entourés de leur amour, de leurs prières et de leurs sacrifices tout au long de nos études. Que ce travail soit le reflet de leur soutien infini.

À nos familles respectives,
Pour leur patience, leurs encouragements quotidiens et leur présence précieuse dans les moments de doute.

À notre estimable enseignant et encadrant,
Pour sa guidance bienveillante et sa confiance.

À tous nos amis et camarades de promotion,
Avec qui nous avons partagé des moments inoubliables durant ce parcours universitaire.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de ce projet et à notre réussite.

Asma & Samah & Yousra & Dina

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Monsieur le Dr. Nadjib BENAOUDA, pour sa confiance, sa disponibilité constante, ses précieux conseils et ses corrections rigoureuses tout au long de la réalisation de ce projet d'études. Son expertise et sa vision scientifique nous ont guidés de manière déterminante.

Nos vifs remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et d'honorer notre soutenance de leur présence. Leurs remarques et critiques constructives ne pourront qu'enrichir la qualité de ce mémoire.

Nous remercions chaleureusement l'ensemble des enseignants du département d'Informatique qui ont contribué à notre formation tout au long de notre cursus universitaire.

Enfin, une pensée particulière va à nos familles et nos amis pour leur soutien moral indéfectible durant cette année intense de fin d'études. À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce projet, qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Résumé

L'asthme est une pathologie respiratoire chronique dont l'imprévisibilité des crises altère gravement la qualité de vie des patients. Ce travail de fin d'études présente la conception et le développement d'**AsthmaGuard**, un système prédictif intelligent et non invasif dédié au suivi personnalisé de l'asthme chez l'adulte. Reposant sur le paradigme de la santé mobile (*m-Health*), le système extrait passivement et en continu les biomarqueurs physiologiques (fréquence cardiaque, variabilité de la fréquence cardiaque, saturation SpO_2) à l'aide d'une montre connectée grand public. L'architecture d'intelligence artificielle implémentée combine trois modèles complémentaires : *XGBoost* pour l'évaluation des risques à long terme, *Causal-TFT* (*Temporal Fusion Transformer*) pour la prédiction imminente des crises à court terme basés sur les séries temporelles, et un système à *logique floue* intégrant les facteurs exogènes environnementaux. L'écosystème logiciel comprend une application mobile multiplateforme développée avec *Flutter* et une API backend robuste développée avec *Laravel*, conçues suivant la méthodologie agile *Scrum*. Les résultats ouvrent des perspectives majeures pour une médecine préventive et une meilleure autonomie du patient.

Mots-clés : Santé mobile, Intelligence Artificielle, Flutter, Laravel, XGBoost, Causal-TFT, Logique Floue, Séries Temporelles, Asthme.

Abstract

Asthma is a chronic respiratory condition whose unpredictable exacerbations severely impact patients' quality of life. This thesis presents the design and development of **AsthmaGuard**, an intelligent and non-invasive predictive system dedicated to personalized asthma management in adults. Built upon the mobile health (*m-Health*) paradigm, the system continuously and passively extracts physiological biomarkers (heart rate, heart rate variability, SpO_2 saturation) using a consumer smartwatch. The implemented artificiel intelligence architecture combines three complementary models : *XGBoost* for long-term risk assessment, *Causal-TFT* (*Temporal Fusion Transformer*) for imminent short-term crisis prediction using time-series data, and a *fuzzy logic* system integrating exogenous environmental factors. The software ecosystem features a cross-platform mobile application developed with *Flutter* and a robust backend API powered by *Laravel*, engineered using the agile *Scrum* methodology. The results open major perspectives for preventive medicine and enhanced patient autonomy.

Keywords : m-Health, Artificial Intelligence, Flutter, Laravel, XGBoost, Causal-TFT, Fuzzy Logic, Time Series, Asthma.

ملخص

يُعدّ الربو من الأمراض الصدرية المزمنة التي تؤثر تقلباتها الفجائية ونوباتها غير المتوقعة سلباً على جودة حياة المرضى. يقدم هذا بحث نهاية الدراسة تصميم وتطوير نظام **AsthmaGuard**، وهو نظام تنبئي ذكي وغير جراحي مخصص للمتابعة الشخصية لمرض الربو لدى البالغين. اعتماداً على نموذج الصحة المتنقلة (*m-Health*)، يقوم النظام باستخلاص المؤشرات الحيوية الفسيولوجية (معدل ضربات القلب، تقلب معدل ضربات القلب، ونسبة تشبع الأكسجين SpO_2) بشكل مستمر وتلقائي دون تدخل المريض، وذلك باستخدام ساعة ذكية تجارية عامة. تجمع بنية الذكاء الاصطناعي الهجينة المطبقة في هذا المشروع بين ثلاثة نماذج متكاملة: نموذج *XGBoost* لتقييم المخاطر على المدى الطويل، ونظام *Causal-TFT* (*Temporal Fusion Transformer*) للتنبؤ الوشيك بالنوبات على المدى القصير استناداً إلى السلاسل الزمنية، بالإضافة إلى نظام يعتمد على المنطق الضبابي (*Fuzzy Logic*) لدمج العوامل البيئية الخارجية المحيطة بالمرضى. يشتمل النظام البرمجي المتكامل على تطبيق للهواتف المحمولة متعدد المنصات تم تطويره باستخدام إطار العمل *Flutter*، مدعوماً بـواجهة برمجة تطبيقات (*API*) خلفية قوية تم بناؤها بواسطة *Laravel*، حيث تم تصميم وتطوير هذه المنظومة باتباع منهجية *Scrum* الرشيقة لإدارة المشاريع. تفتح النتائج المحققة آفاقاً واعدة نحو طب وقائي حديث يمنح مريض الربو استقلالية أكبر وتحكماً أفضل في حالته الصحية.

الكلمات المفتاحية: الصحة المتنقلة، الذكاء الاصطناعي، *Flutter*، *Laravel*، السلاسل الزمنية، المنطق الضبابي، مرض الربو.

Table des matières

Résumé **iii**

Abstract **iv**

ملخص **v**

Liste des figures **x**

Liste des tableaux **xi**

1 Introduction Générale **1**

1 Contexte et motivation 1

2 Problématique 2

3 Objectifs du projet 3

4 Contributions du projet 4

5 Méthodologie adoptée 5

6 Structure du mémoire 6

2 Étude de l'existant et collecte des besoins **8**

1 Introduction 8

2 Généralités sur l'asthme 9

2.1 Définition 9

2.2 Facteurs de risque 10

3 Symptômes et critères d'exacerbation 11

3.1 Signes cliniques typiques de l'asthme 11

3.2 Critères d'exacerbation 12

4 Diagnostic de l'asthme . . . 12
4.1 Démarche diagnostique de l'asthme selon les recommandations du GINA 12
4.2 Évaluation sur le plan fonctionnel respiratoire . . . 13
4.3 Examens complémentaires . . . 13
5 Prévention de la crise d'asthme . . . 14
6 Traitement . . . 14
6.1 Stratégies thérapeutiques . . . 14
6.2 Adaptation du traitement . . . 15
6.3 Prise en charge complémentaire . . . 15
7 Santé mobile dans le suivi de l'asthme . . . 16
8 Étude de l'existant . . . 17
8.1 Solutions classiques . . . 17
8.2 Solutions numériques et connectées pour la prise en charge de l'asthme 18
8.3 Synthèse et analyse critique des solutions . . . 18
8.4 Synthèse critique et positionnement du projet AsthmaGuard . . . 21
8.5 Perspectives possibles et intégration de l'IA . . . 22
9 Collecte des besoins . . . 22
9.1 Identification des parties prenantes . . . 23
9.2 Méthodes de collecte des besoins . . . 24
9.3 Besoins fonctionnels . . . 24
10 Modélisation UML des besoins . . . 26
10.1 Spécification des exigences fonctionnelles : diagramme des cas d'utilisation . . . 26
10.2 Modélisation structurelle statique : diagramme de classes . . . 29
10.3 Modélisation comportementale dynamique : diagramme de séquence . 32
11 Conclusion . . . 35

3 Méthodologie de développement du projet 36

1 Introduction . . . 36
2 Méthodologies agiles : vue d'ensemble . . . 36
3 Scrum : présentation détaillée . . . 37
3.1 Définition . . . 37
3.2 Justification du choix de Scrum . . . 38

3.3 Rôles Scrum . . . 39
3.4 Artéfacts Scrum . . . 39
3.5 Événements Scrum . . . 40
4 Application de la méthodologie Scrum à notre projet . . . 43
4.1 Présentation de l'équipe Scrum . . . 43
4.2 Objectif du produit . . . 44
4.3 Élaboration du Product Backlog . . . 44
4.4 Planification des sprints . . . 47
4.5 Application des événements de Scrum : exécution, revue et rétrospective 48
5 Conclusion . . . 48

4 Développement et évaluation des modèles IA 49
1 Introduction . . . 49
2 Concepts de base . . . 50
2.1 Types d'apprentissage . . . 50
2.2 Découpage du dataset . . . 51
2.3 Itérations et époques . . . 52
2.4 Métriques d'évaluation . . . 52
2.5 Présentation de la logique floue . . . 54
2.6 Définition . . . 55
2.7 Notions de base de la logique floue . . . 55
2.8 Structure d'un système de logique floue . . . 57
3 Modèle de prédiction du risque à long terme . . . 59
3.1 Présentation du modèle XGBoost . . . 59
3.2 Génération et exploitation du dataset synthétique . . . 60
3.3 Prétraitement des données . . . 61
3.4 Implémentation du modèle . . . 61
3.5 Résultats et discussion . . . 62
4 Modèle de prédiction de crise imminente . . . 63
4.1 Présentation du modèle Causal-TFT . . . 63
4.2 Génération et exploitation du dataset synthétique . . . 64
4.3 Prétraitement des données et reconstruction séquentielle . . . 64
4.4 Implémentation du modèle . . . 65

4.5 Résultats et discussion 65
5 Modèle de classification du risque environnemental 66
5.1 Conception du système à logique floue 67
5.2 Fonctions d'appartenance et règles floues 68
5.3 Implémentation 69
5.4 Résultats et discussion 70
6 Conclusion 70

5 Implémentation de la solution AsthmaGuard 72
1 Introduction 72
2 Architecture générale de la solution AsthmaGuard 73
2.1 Vue d'ensemble de la solution 74
2.2 Description des modéles 74
2.3 Flux global 74
3 Développement de l'application mobile 75
3.1 Intégration et synchronisation avec la smartwatch 75
3.2 API externes utilisées 75
3.3 Diagramme de flux de navigation 76
3.4 Technologies et frameworks utilisés 77
4 Développement du backend 79
4.1 API REST développées 79
4.2 Technologies et frameworks utilisés 81
4.3 Communication avec les modèles IA 81
4.4 Technologies et frameworks utilisés 81
5 Schéma de la base de données 81
5.1 Conventions de lecture 82
5.2 Tables Principales 82
5.3 Héritages et spécialisations 83
6 Scénario d'utilisation global 84
6.1 Découverte et premier accès 85
6.2 Auto-gestion et observance thérapeutique (version gratuite) 86
6.3 Passage à l'abonnement premium 87
6.4 Appairage de la montre connectée 88

6.5 Surveillance proactive et détection d'une crise imminente 89
6.6 Déclenchement de l'alerte SMS au contact d'urgence 90
6.7 Génération du rapport médical 91
7 Conclusion 92

6 Conclusion générale **93**
1 Synthèse des contributions 93
2 Bienfaits et Impacts du Système 94
3 Limites du travail 94
4 Perspectives et travaux futurs 95

Références **96**

Liste des abréviations

IA Intelligence Artificielle

m-Health Mobile Health (Santé mobile)

SpO2 Saturation pulsée en oxygène (Saturation en oxygène)

TFT Temporal Fusion Transformer

API Application Programming Interface (Interface de programmation d'applications)

GINA Global Initiative for Asthma

OMS Organisation Mondiale de la Santé

VEMS Volume Expiratoire Maximal par Seconde

CVF Capacité Vitale Forcée

DEP Débit Expiratoire de Pointe

EFR Exploration Fonctionnelle Respiratoire

SABA Short-Acting Beta2-Agonist (Bronchodilatateur à courte durée d'action)

ICS Inhaled Corticosteroids (Corticoïdes inhalés)

AIR Anti-Inflammatory Reliever

MART Maintenance and Reliever Therapy

LABA Long-Acting Beta2-Agonist (impliqué par ICS-LABA)

PDA Personal Digital Assistant (Assistant Numérique Personnel)

SIG Systèmes d'Information Géographique

FeNO Fractional exhaled Nitric Oxide

ERS European Respiratory Society

ATS American Thoracic Society

ACT Asthma Control Test

EHR Electronic Health Record

NLP Natural Language Processing (Traitement du langage naturel)

LLM Large Language Models (Modèles de langage)

UML Unified Modeling Language

MCD Modèle Conceptuel de Données

XP Extreme Programming

MVP Minimum Viable Product (Produit Minimum Viable)

US User Stories

PO Product Owner

SP Story Points

ML Machine Learning

TP True Positives

TN True Negatives

FP False Positives

FN False Negatives

XGBoost eXtreme Gradient Boosting

IMC Indice de Masse Corporelle

SHAP SHapley Additive exPlanations

AUC Area Under the ROC Curve (Aire sous la courbe)

FC Fréquence Cardiaque

PM2.5 Particules fines (diamètre inférieur à 2.5 µm)

PM10 Particules fines (diamètre inférieur à 10 µm)

NO2 Dioxyde d'azote

O3 Ozone

SLF Système à Logique Floue

IQA Indice de Qualité de l'Air

JWT JSON Web Token

MVC Modèle-Vue-Contrôleur

JSON JavaScript Object Notation

ORM Object-Relational Mapping

CP Clé Primaire

CE Clé Étrangère

XAI Explainable Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle Explicable)

FHIR Fast Healthcare Interoperability Resources

Table des figures

2.1 Pathologie de l'asthme 9
2.2 Diagramme des cas d'utilisation du système. 27
2.3 Diagramme de classes correspondant à notre MCD. 30
2.4 Diagramme de séquence pour les scénarios de prédiction et notification. 34

4.1 Représentation schématique de la matrice de confusion utilisée pour l'évaluation des modèles de classification. 53
4.2 Architecture d'un système de commande floue. 57
4.3 Comparaison des courbes ROC entre Random Forest et XGBoost (Risque à long terme) 62
4.4 Visualisation temporelle des prédictions à horizon +12h : Crises réelles vs Causal-TFT vs Random Forest 66

5.1 Architecture générale de la solution AsthmaGuard. 73
5.2 Diagramme de flux de navigation de l'application Asthma Guard. 78
5.3 Diagramme de routes APIs de l'application Asthma Guard. 80
5.4 Création d'un compte sécurisé et connexion à l'application. 85
5.5 Module de gestion des traitements : sélection d'un médicament de fond ou de crise. 86
5.6 Souscription à l'abonnement premium débloquant les fonctionnalités d'IA. . . 87
5.7 Appairage de la montre connectée et autorisation des données physiologiques. . 88
5.8 Alerte de crise imminente générée par le moteur de prédiction. 89
5.9 Séquence de déclenchement de l'alerte SMS vers le contact d'urgence. 90
5.10 Dossier médical consolidé : scores ACT, niveau GINA et historique des crises. . 91

Liste des tableaux

2.1 Analyse critique des catégories d'outils de suivi 19
2.2 Analyse comparative des applications mobiles leaders. 20

3.1 Comparaison entre méthodes agiles et méthodes traditionnelles 37
3.2 Product Backlog d'AsthmaGuard (Ajusté Fibonacci) 45

4.1 Comparaison des performances pour la prédiction du risque à long terme 62
4.2 Performances comparées pour la prédiction de crise imminente à horizon +12h 65
4.3 Synthèse de l'univers de discours des variables du système flou 67

Chapitre 1

Introduction Générale

1 Contexte et motivation

L'asthme représente une pathologie respiratoire chronique majeure, dont l'impact socio-économique et sanitaire est mondial. Affectant plus de 260 millions de personnes à travers le globe, cette affection se caractérise par une inflammation des voies aériennes entraînant des épisodes de crises largement imprévisibles. Cette imprévisibilité génère une anxiété constante chez les patients, augmente drastiquement les risques d'hospitalisation d'urgence et alourdit le fardeau des systèmes de santé publique.

Aujourd'hui, l'approche médicale traditionnelle révèle certaines limites, car elle s'inscrit majoritairement dans un paradigme de gestion réactive : l'intervention thérapeutique survient généralement une fois que les symptômes physiques sont déjà installés. Face à ce constat, l'émergence des technologies de la santé mobile (m-Health) et les avancées récentes en Intelligence Artificielle (IA) offrent une opportunité sans précédent. En exploitant la puissance d'analyse des données continues, il devient possible de transformer cette gestion réactive en une surveillance proactive et hautement personnalisée, intégrant notamment des capacités de prédiction de l'évolution de l'état du patient. Cette évolution motive ainsi le développement de solutions intelligentes d'accompagnement médical visant à améliorer la prise en charge des pathologies chroniques, en exploitant les capacités offertes par les technologies de la m-health et de l'IA. Dans ce contexte, notre projet AsthmaGuard s'inscrit dans cette dynamique en se focalisant plus particulièrement sur l'asthme, en tant que pathologie chronique nécessitant un

suivi continu et personnalisé.

2 Problématique

Une personne asthmatique est contrainte d'adopter un mode de vie rigoureux afin de limiter le risque de survenue de crises. Elle doit notamment éviter les facteurs déclencheurs tels que la poussière, le pollen ou la fumée, suivre correctement son traitement médical, surveiller l'apparition de symptômes précurseurs comme la toux persistante, l'essoufflement ou les sifflements respiratoires, et assurer un suivi médical régulier avec un spécialiste. Par ailleurs, les crises d'asthme constituent l'élément central et le plus critique de la maladie. Elles se caractérisent par leur apparition soudaine, leur imprévisibilité, ainsi que par une fréquence et une intensité variables selon les patients, influencées par de multiples facteurs environnementaux et physiologiques.

Face à ces contraintes quotidiennes et à la nature imprévisible des crises d'asthme, le recours aux technologies numériques de santé et aux techniques d'IA apparaît comme une approche prometteuse pour améliorer le suivi et la prise en charge des patients. Dans ce cadre, le marché de la m-health connaît une croissance importante, marquée par l'émergence de nombreuses solutions destinées à accompagner les patients asthmatiques dans la gestion de leur maladie. La plupart de ces solutions reposent sur des applications mobiles, parfois associées à des objets connectés permettant de collecter différentes données relatives à l'état de santé du patient. Toutefois, malgré cette diversité de solutions, la majorité des applications existantes présentent encore des limitations significatives. D'une part, elles reposent fortement sur la saisie manuelle des symptômes par le patient, ce qui limite leur fiabilité et les capacités d'anticipation à long terme. D'autre part, les solutions matérielles plus avancées nécessitent souvent l'acquisition de capteurs physiques externes, coûteux et contraignants à porter au quotidien. Enfin, un grand nombre de solutions actuelles n'intègrent pas de techniques d'IA permettant l'analyse avancée des données et la mise en place de mécanismes de prédiction ou d'aide à la décision.

Le défi scientifique et technique de notre projet consiste donc à combler ces lacunes en répondant à la question centrale suivante : *Comment concevoir un système prédictif fiable et non invasif, capable d'anticiper la survenue des crises d'asthme en exploitant exclusivement les données physiologiques collectées passivement par une montre connectée grand public, les*

données environnementales contextuelles, ainsi que les informations issues du dossier médical du patient, tout en assurant une restitution via une application mobile ?

Il s'agit de surmonter la difficulté liée à la fusion de séries temporelles physiologiques hétérogènes avec des facteurs de risque exogènes (pollution, pollens, météo) pour fournir des alertes précoces sans générer un taux excessif de faux positifs.

3 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet est de concevoir et de développer **AsthmaGuard**, un système prédictif intelligent accessible via une application mobile, destiné à la surveillance et à la prédiction des crises d'asthme chez des patients adultes (18 à 60 ans) présentant un asthme contrôlé à modérément sévère.

Le choix de cette tranche d'âge se justifie par l'influence significative de l'âge sur la manifestation et la prédiction de l'asthme. En effet, les profils cliniques, les facteurs déclenchants ainsi que les mécanismes physiopathologiques diffèrent sensiblement selon les groupes d'âge. Chez les enfants, les crises sont plus fréquemment associées à des infections virales et à des mécanismes immuno-allergiques, avec un caractère souvent intermittent. En revanche, chez les adultes, l'asthme tend à être plus persistant et parfois plus sévère, avec des déclencheurs variés tels que le stress, le tabagisme ou des comorbidités associées. Ainsi, l'âge constitue un facteur déterminant dans la compréhension et l'anticipation de l'évolution de la maladie. Dans ce contexte, ce travail se concentre dans un premier temps sur la population adulte afin de mieux cerner ses caractéristiques cliniques et de proposer des modèles prédictifs plus adaptés à cette catégorie de patients [1].

Dans cette optique, ce travail présente les objectifs de conception suivants :

- Concevoir un système intelligent capable de surveiller et de prédire les crises d'asthme chez des patients adultes à partir de données physiologiques, notamment issues de smartwatches, de données environnementales provenant d'API dédiées, ainsi que de données issues du dossier médical du patient. En particulier, développer une architecture d'IA intégrant trois modèles complémentaires : un modèle d'évaluation du risque à long terme, un modèle de prédiction des crises imminentes et un modèle d'évaluation

du risque environnemental.

- Mettre à la disposition des patients des fonctionnalités essentielles pour le suivi et la gestion de leur maladie.
- Assurer l'intégration et l'utilisation du système via une application mobile, offrant une interface simple, intuitive et accessible aux patients.

4 Contributions du projet

Au regard des objectifs précédemment cités, nos contributions se présentent comme suit :

1. **Proposition d'une architecture prédictive multi-modèles :** proposition d'une approche reposant sur trois modèles indépendants et complémentaires :

   - Un modèle d'évaluation du risque à long terme basé sur XGBoost, exploitant l'évolution progressive des indicateurs cliniques sur plusieurs jours (fenêtre de 5 à 15 jours). En fait, les études observationnelles et cliniques décrivent notamment une période de 5 à 15 jours durant laquelle l'inflammation des voies respiratoires s'installe progressivement, accompagnée d'une diminution du débit expiratoire de pointe (PEF), d'une dégradation de la qualité du sommeil et d'une augmentation de symptômes tels que la toux ou l'essoufflement, avant la survenue d'une exacerbation aiguë [2]. Ce modèle permet ainsi au patient d'anticiper les périodes à risque et de prendre préalablement les mesures préventives nécessaires afin de prévenir toute aggravation soudaine de son état.
   - Un modèle de prédiction des crises imminentes basé sur Causal-TFT, exploitant des données en temps réel issues de la smartwatch du patient, d'API environnementales ainsi que les données provenant de son dossier médical. Les indicateurs considérés incluent notamment la fréquence cardiaque, la variabilité de la fréquence cardiaque (HRV), la saturation en oxygène (SpO_2), le niveau d'activité physique, ainsi que des paramètres environnementaux tels que les concentrations de particules fines (PM2.5 et PM10), le niveau de pollens et les conditions météorologiques. Le modèle prend également en compte des informations propres au patient, telles que ses facteurs déclenchants, son indice de masse corporelle (IMC) et d'autres caractéristiques médicales pertinentes.

- Un classifieur du risque environnemental basé sur la logique floue, permettant d'évaluer le niveau de risque extérieur (faible, modéré, élevé) à partir de variables environnementales.

2. **Proposition de fonctionnalités de suivi et d'assistance complémentaires :** Outre les modèles de prédiction, le système intégrera des fonctionnalités de suivi de la maladie, notamment le suivi des traitements, les notifications de prise de médicaments, les notifications d'urgence vers les contacts d'urgence du patient, l'accès à des contenus éducatifs, ainsi que le partage des données avec le médecin du patient et d'autres fonctionnalités d'accompagnement.
3. **Développement applicatif :** Conception logicielle et implémentation du système via un backend Laravel exposé en API REST, et développement d'une application mobile Flutter offrant une interface intuitive et conviviale.

5 Méthodologie adoptée

Afin de mener à bien ce projet de fin d'études dans un environnement d'innovation assimilable à celui d'une *startup*, nous avons adopté une approche méthodologique structurée en plusieurs phases complémentaires.

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude approfondie des besoins des patients asthmatiques ainsi que des solutions existantes, qu'elles soient classiques ou numériques. Cette étude a été menée à travers des enquêtes et des entretiens avec des médecins et des patients asthmatiques, ainsi que par l'analyse d'articles scientifiques, de documents spécialisés et de ressources disponibles sur le web, afin d'identifier les approches les plus pertinentes. Le résultat de cette phase a été la production d'un cahier des charges dans lequel ont été identifiés et formalisés avec UML l'ensemble des besoins fonctionnels et non fonctionnels du système ainsi que nos besoins en données.

Sur le plan de l'ingénierie logicielle, nous avons adopté le framework **Scrum**, une méthode agile itérative et incrémentale permettant de structurer le développement du système en sprints successifs et de s'adapter rapidement aux évolutions des exigences. Cette phase a permis la définition des rôles, l'identification du product backlog, ainsi que la planification des sprints avec leurs objectifs, leurs user stories et leurs échéances. L'ensemble des composants du système,

y compris les modules d'intelligence artificielle, a été développé de manière incrémentale au cours de ces sprints.

Sur le plan de l'intelligence artificielle, la méthodologie repose sur une démarche scientifique rigoureuse intégrée au processus de développement. En raison de l'absence initiale de données réelles étiquetées, nous avons procédé à la génération de deux *datasets* synthétiques respectant des distributions et contraintes physiologiques réalistes : l'un destiné au modèle de prédiction à long terme et l'autre dédié à la prédiction des crises imminentes. Ces jeux de données ont permis d'entraîner, de valider et de tester les modèles développés (XGBoost et Causal-TFT) à l'aide de métriques d'évaluation standards telles que l'accuracy, le recall et le F1-score, avant leur intégration et leur exposition via des API REST au sein du backend Laravel.

6 Structure du mémoire

Afin d'exposer clairement notre démarche et nos contributions, ce manuscrit est organisé de la manière suivante :

- Le **Chapitre 2** dresse l'état de l'art du domaine et présente le cahier des charges réalisé. Il expose les fondements médicaux de l'asthme, analyse de manière critique les solutions classiques ainsi que les solutions m-Health existantes sur le marché, puis synthétise et formalise, à l'aide de diagrammes UML, les besoins fonctionnels et non fonctionnels ainsi que les exigences liées aux données de notre système.
- Le **Chapitre 3** détaille la méthodologie Agile Scrum adoptée pour la gestion de ce projet, en décrivant l'organisation de l'équipe, les artefacts produits et la planification des sprints.
- Le **Chapitre 4** constitue le noyau scientifique du mémoire. Il présente la conception, l'entraînement et l'évaluation de notre architecture d'intelligence artificielle composée de trois modèles (XGBoost, Causal-TFT et logique floue), ainsi que le processus de génération des données synthétiques.
- Le **Chapitre 5** est consacré à la réalisation pratique et à l'implémentation de la solution AsthmaGuard. Il présente l'architecture globale, les technologies utilisées (Flutter, Laravel, Python, FastAPI), la structure de la base de données, et les interfaces de l'application mobile.

- Enfin, une **Conclusion générale** clôt ce manuscrit en dressant le bilan des contributions apportées par ce projet et en proposant des perspectives d'évolution pour de futurs travaux.

Chapitre 2

Étude de l'existant et collecte des besoins

1 Introduction

L'asthme constitue l'une des maladies respiratoires chroniques les plus fréquentes dans le monde, touchant plus de 262 millions de personnes et responsable d'environ 455 000 décès chaque année selon l'Organisation Mondiale de la Santé [3]. En Algérie, comme dans de nombreux pays, cette pathologie représente un véritable enjeu de santé publique en raison de sa prévalence croissante, de son impact important sur la qualité de vie des patients et du coût élevé qu'elle engendre pour le système de santé [4].

Malgré les avancées thérapeutiques, la gestion de l'asthme reste complexe : les crises sont souvent imprévisibles, l'observance du traitement variable et le suivi quotidien difficile pour les patients [4]. Face à ces limites, les technologies mobiles (m-Health) et l'intelligence artificielle offrent aujourd'hui des perspectives prometteuses en permettant une surveillance continue, proactive et personnalisée de la maladie [5, 6, 7].

Le présent chapitre pose les bases scientifiques et contextuelles du mémoire. Il commence par une présentation complète des généralités sur l'asthme (définition, facteurs de risque, symptômes, diagnostic, prévention et traitements). Il aborde ensuite le rôle du m-Health dans le suivi de cette pathologie, réalise une étude critique de l'existant (solutions classiques et applications technologiques actuelles) et conclut par la collecte des besoins des différentes parties prenantes. Enfin, il présente une modélisation UML préliminaire des fonctionnalités du système et se termine par la conclusion du chapitre.

2 Généralités sur l'asthme

2.1 Définition

L'asthme est un terme général qui désigne des épisodes d'essoufflement causés par un rétrécissement intermittent des bronches. Il s'agit d'une inflammation des voies respiratoires qui les rend hypersensibles à certains facteurs déclenchants. Comme illustré dans la Figure 2.1, ceux-ci provoquent une contraction des bronches, réduisant le flux d'air et entraînant un essoufflement souvent sifflant [4, 8].

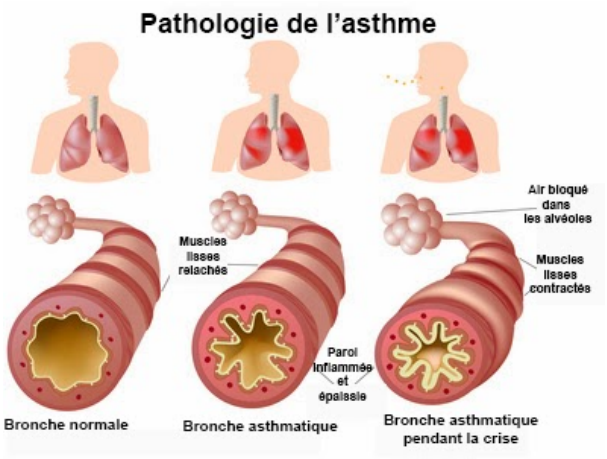


FIGURE 2.1 – Pathologie de l'asthme [1]

Selon les recommandations du GINA [2], l'asthme est défini comme [4] :*"une maladie hétérogène, généralement caractérisée par une inflammation chronique des voies respiratoires. Il est défini par la présence d'antécédents de symptômes respiratoires tels que les sifflements respiratoires (wheezing), l'essoufflement, l'oppression thoracique et la toux, qui varient dans le temps et en intensité, ainsi que par une limitation variable du débit expiratoire."*

En effet, l'hétérogénéité de cette maladie s'explique par la diversité des manifestations cliniques, des mécanismes physiopathologiques sous-jacents ainsi que des facteurs déclenchants, qui varient considérablement d'un patient à l'autre et au cours du temps chez un même individu.

1. https://www.vidal.fr/maladies/voies-respiratoires/asthme.html
2. L'Initiative mondiale pour l'asthme (The Global Initiative for Asthma, GINA) est une organisation collaborative créée en 1993, travaillant en partenariat avec l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) afin d'améliorer la prise en charge de l'asthme et de réduire la mortalité à l'échelle mondiale.

2.2 Facteurs de risque

Différents facteurs peuvent provoquer ou aggraver les troubles respiratoires, en particulier chez les personnes souffrant d'asthme. Parmi les principaux éléments déclencheurs figurent les allergènes, les irritants respiratoires, les facteurs environnementaux ainsi que certains facteurs liés à l'état de santé ou au mode de vie [4].

2.2.1 Allergènes

Ce sont des substances environnementales qui provoquent une réaction immunitaire [8], les plus fréquentes sont :

- Les acariens ;
- Les pollens ;
- Les animaux ;
- Les moisissures.

2.2.2 Irritants respiratoires

Contrairement aux allergènes, ils ne provoquent pas d'allergie mais irritent directement les bronches [4], par exemple :

- Le tabac ;
- Les odeurs fortes ;
- La fumée et le brouillard ;
- Les produits chimiques.
- Les expositions professionnelles (poussières, solvants, isocyanates).

2.2.3 Facteurs environnementaux

Les changements climatiques, en modifiant la température, l'humidité, la concentration pollinique et la qualité de l'air (notamment via l'augmentation des épisodes de pollution et de feux de forêt), exercent une influence significative sur la fréquence, la sévérité et le contrôle de l'asthme chez les patients exposés [3].

2.2.4 Autres facteurs

D'autres facteurs peuvent également déclencher ou aggraver les symptômes, notamment [9] :

- Certains médicaments tels que les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), l'aspirine, les bêtabloquants, et les inhibiteurs d'enzyme de conversion ;
- Les infections ;
- L'effort physique ;
- Les émotions fortes ;
- Le reflux gastro-œsophagien (RGO) ;
- L'obésité et le surpoids ;
- Facteurs génétiques ou familiaux.

3 Symptômes et critères d'exacerbation

Les troubles respiratoires liés à l'asthme se manifestent par une diversité de symptômes, dont l'intensité et la fréquence varient selon les individus et la sévérité de la maladie. La reconnaissance précise de ces manifestations est essentielle pour le diagnostic et la prise en charge appropriée. Cette section aborde à la fois les signes cliniques typiques de l'asthme et les critères permettant d'identifier une exacerbation.

3.1 Signes cliniques typiques de l'asthme

Parmi les manifestations les plus fréquentes de l'asthme, on retrouve [4] :

- **Essoufflement (dyspnée)** : difficulté à respirer, surtout lors d'un effort ou pendant la nuit.
- **Sifflement respiratoire (sibilance)** : bruit aigu entendu lors de la respiration, surtout à l'expiration.
- **Toux sèche** : souvent persistante, plus fréquente la nuit ou tôt le matin.
- **Oppression thoracique** : sensation de serrement ou de pression au niveau de la poitrine.

3.2 Critères d'exacerbation

Une exacerbation de l'asthme correspond à une aggravation des symptômes habituels par rapport à l'état habituel d'une personne. Les exacerbations sévères peuvent être fatales, même chez des patients présentant des symptômes peu fréquents. Une exacerbation peut se manifester par plusieurs signes, parmi lesquels [4] :

- Augmentation de l'intensité ou de la fréquence des symptômes respiratoires.
- Difficulté respiratoire importante.
- Toux et sifflements plus marqués.
- Diminution de la capacité respiratoire et gêne pour parler ou effectuer des activités normales.
- Besoin accru de médicaments bronchodilatateurs.

4 Diagnostic de l'asthme

Le diagnostic de l'asthme repose sur une évaluation complète incluant l'analyse des symptômes cliniques, l'exploration de la fonction respiratoire et la réalisation de certains examens complémentaires. Cette démarche permet également de confirmer le diagnostic, d'évaluer la sévérité de la maladie et de détecter la présence et l'intensité des exacerbations [8].

4.1 Démarche diagnostique de l'asthme selon les recommandations du GINA

Selon les recommandations du GINA, le diagnostic de l'asthme est établi selon une démarche structurée en plusieurs étapes [10] :

- **Étape 1, anamnèse clinique :** le médecin recherche la présence de symptômes respiratoires typiques et variables dans le temps, tels que les sifflements, l'essoufflement, l'oppression thoracique et la toux, souvent déclenchés ou aggravés par des facteurs spécifiques à chaque patient, tels que l'exercice, les allergènes, l'air froid ou les infections respiratoires.
- **Étape 2, confirmation fonctionnelle :** le médecin met en évidence une variabilité du débit expiratoire à l'aide de tests de la fonction respiratoire, notamment la réversibilité au bronchodilatateur à la spirométrie, la variabilité du débit expiratoire de pointe,

les tests de provocation bronchique ou encore l'amélioration après un traitement par corticoïdes inhalés.

- **Étape 3, confirmation du diagnostic :** si les critères cliniques et fonctionnels sont réunis, le diagnostic d'asthme est confirmé et doit être documenté dans le dossier médical du patient.
- **Étape 4, réévaluation si nécessaire :** en cas d'absence initiale de preuves objectives, le médecin peut répéter les tests dans des conditions appropriées ou réévaluer le patient après ajustement temporaire du traitement bronchodilatateur, lorsque cela est possible et sans risque.

Dans l'ensemble, le diagnostic de l'asthme repose donc sur la combinaison de symptômes évocateurs et de preuves fonctionnelles objectives, ce qui explique l'importance des explorations respiratoires détaillées ci-dessous.

4.2 Évaluation sur le plan fonctionnel respiratoire

L'exploration fonctionnelle respiratoire ou EFR constitue un examen fondamental pour confirmer le diagnostic et s'appuie sur plusieurs mesures clés [11] :

- **VEMS (volume expiratoire maximal seconde)** : mesure la quantité d'air expirée pendant la première seconde.
- **CVF (capacité vitale forcée)** : volume total d'air expiré après une inspiration profonde.
- **Rapport VEMS/CVF** : permet de détecter une obstruction bronchique.

Dans l'asthme, on observe généralement une obstruction réversible des voies respiratoires qui s'améliore après l'administration d'un bronchodilatateur.

4.3 Examens complémentaires

En complément des explorations fonctionnelles respiratoires, d'autres examens peuvent être réalisés afin de compléter le bilan diagnostique ou d'exclure d'autres pathologies respiratoires :

- Radiographie thoracique pour exclure d'autres pathologies pulmonaires.
- Tests allergologiques pour identifier les allergènes responsables.
- Mesure du débit expiratoire de pointe (DEP).
- Tests de provocation bronchique lorsque le diagnostic est difficile.

5 Prévention de la crise d'asthme

La prévention des crises d'asthme constitue un élément clé pour améliorer la qualité de vie des patients. Elle s'appuie sur diverses mesures préventives, en particulier [4] :

- Éviction des allergènes domestiques et professionnels ;
- Sevrage tabagique ;
- Vaccination ;
- Aération régulière des espaces ;
- Suivi médical régulier ;
- Éducation thérapeutique du patient.

6 Traitement

La prise en charge de l'asthme chez l'adulte et l'adolescent repose sur une stratégie globale visant à contrôler les symptômes, réduire le risque d'exacerbations et améliorer la qualité de vie. Selon les recommandations récentes du GINA [10], les patients ne doivent plus être traités par bronchodilatateurs de courte durée d'action (SABA [3]) seuls, mais doivent tous recevoir un traitement contenant des corticoïdes inhalés (ICS [4]).

Avant l'instauration du traitement, il est recommandé de confirmer le diagnostic, d'évaluer le contrôle des symptômes et les facteurs de risque, de mesurer la fonction pulmonaire si possible, d'éduquer le patient à l'utilisation correcte de l'inhalateur et de planifier un suivi.

6.1 Stratégies thérapeutiques

Le GINA propose deux approches principales pour le traitement de l'asthme : traitement préférentiel (Track 1) et traitement alternatif (Track 2).

6.1.1 Traitement préférentiel (Track 1)

L'approche recommandée repose sur l'utilisation d'une association à faible dose d'ICS-formotérol comme traitement de soulagement (anti-inflammatory reliever, AIR). Cette stratégie permet de réduire significativement le risque d'exacerbations sévères tout en assurant un bon

3. Short-Acting Beta$_2$-Agonist.
4. Inhaled Corticosteroids.

contrôle des symptômes. Dans cette approche, le même inhalateur peut être utilisé à la fois :

- en traitement d'entretien (prise régulière),
- et en traitement de secours (prise à la demande en cas de symptômes).

Cette stratégie est appelée Maintenance and Reliever Therapy (MART). Elle repose sur une différence d'utilisation du même traitement, notamment en termes de fréquence d'administration et de dose totale quotidienne, qui varie selon les besoins du patient :

- Aux stades précoces, l'ICS-formotérol est utilisé uniquement à la demande.
- Aux stades plus avancés, il est utilisé quotidiennement, avec des prises supplémentaires en cas de symptômes.

6.1.2 Traitement alternatif (Track 2)

Une approche alternative repose sur l'utilisation de SABA comme traitement de secours, associé soit à une prise simultanée de corticoïdes inhalés, soit à un traitement de fond quotidien par ICS (ou ICS-LABA).

Cependant, cette stratégie est moins recommandée en raison d'un risque plus élevé d'exacerbations sévères par rapport à l'approche basée sur l'ICS-formotérol.

6.2 Adaptation du traitement

Le traitement doit être réévalué régulièrement en fonction du contrôle de l'asthme. En cas de mauvais contrôle, il est essentiel de vérifier l'observance, la technique d'inhalation, les facteurs de risque et les comorbidités avant d'intensifier le traitement.

À l'inverse, si l'asthme est bien contrôlé pendant au moins trois mois, une réduction progressive du traitement peut être envisagée.

6.3 Prise en charge complémentaire

La prise en charge complémentaire de l'asthme implique l'identification et le traitement des facteurs d'exacerbation, notamment le tabagisme, les allergènes, la pollution ou l'utilisation excessive de bronchodilatateurs, ainsi que des maladies conjointes, telles que la rhinite, le reflux gastro-oesophagien, l'obésité, l'apnée du sommeil ou le stress. Cette approche participe de façon notable à l'amélioration du contrôle de l'asthme et à la prévention des exacerbations [4].

7 Santé mobile dans le suivi de l'asthme

La santé mobile (mobile health or m-Health) désigne l'utilisation de technologies mobiles telles que les smartphones, les tablettes et les objets connectés pour améliorer la santé et le suivi médical. Elle constitue une composante de la santé électronique (eHealth). Selon l'OMS, la m-Health est définie comme la pratique de la médecine et de la santé publique soutenue par des dispositifs mobiles, tels que les téléphones portables, les dispositifs de surveillance des patients, les assistants numériques personnels (PDA) et d'autres équipements sans fil [12].

La m-Health connaît une utilisation large et transformatrice dans de nombreux domaines de la santé, en exploitant les dispositifs mobiles pour fournir des services à une échelle sans précédent.

Les applications de la m-Health couvrent plusieurs domaines, notamment la prise en charge des maladies chroniques (par exemple, le suivi du diabète via des rappels par SMS dans des initiatives telles que Masiluleke en Afrique du Sud, ce qui a permis d'améliorer l'observance thérapeutique), la surveillance des maladies infectieuses (par exemple, les applications de dépistage de la tuberculose ayant permis d'identifier plus de 2 millions de cas dans le cadre du programme AMPATH au Kenya), la promotion de la santé, le suivi à distance des patients ainsi que la réponse aux urgences sanitaires [13, 14].

Ces systèmes intègrent fréquemment les SMS, les applications mobiles, les systèmes d'information géographique (SIG) et les objets connectés afin de permettre la collecte de données en temps réel et d'améliorer l'aide à la décision.

Dans le cadre de la prise en charge de l'asthme, ces technologies, associées à l'IA, transforment progressivement la gestion de la maladie en passant d'un modèle de soins réactifs à une surveillance proactive, continue et personnalisée [5, 6, 7].

Les smartphones peuvent jouer un rôle central dans la surveillance de l'asthme, en s'imposant comme une plateforme clé des solutions de santé mobile. Ils permettent notamment le suivi continu des symptômes, la mise en place de plans d'action personnalisés ainsi que l'envoi de rappels pour la prise du traitement. Dans le cas de l'asthme, ces outils peuvent également être intégrés à des dispositifs de mesure du débit expiratoire de pointe (peak flow meters) connectés via Bluetooth, facilitant ainsi un suivi objectif et régulier de la fonction respiratoire [15].

Par ailleurs, les montres intelligentes fournissent des données continues pertinentes, telles que la fréquence cardiaque, le niveau d'activité, le sommeil ou encore la saturation en oxygène (SpO_2), des paramètres pouvant être associés au risque d'exacerbation chez certains patients. D'autres dispositifs portables (wearables), tels que le patch RESP Biosensor, permettent d'enregistrer en continu la toux et les paramètres respiratoires (fréquence respiratoire, sifflements) sur 24 heures, offrant ainsi une représentation plus fidèle de la maladie que les évaluations ponctuelles [6, 16, 7].

Il est cependant crucial de noter que ces montres connectées ne peuvent en aucun cas remplacer l'examen clinique. Elles ne mesurent ni le VEMS, ni le DEP, ni la fractional exhaled nitric oxide (FeNO), qui demeurent les outils validés pour évaluer l'obstruction et l'inflammation bronchique. À l'heure actuelle, aucune recommandation internationale (GINA, ERS[5]/ATS[6]) ne considère une montre connectée comme un outil validé pour guider à elle seule l'ajustement d'un traitement. Elles constituent néanmoins un complément intéressant pour la télésurveillance chez des patients motivés [6, 7].

8 Étude de l'existant

L'étude des solutions actuelles destinées à accompagner les personnes asthmatiques permet d'analyser les approches classiques et technologiques afin d'identifier les limites et de définir des perspectives d'amélioration pertinentes. Dans cette section, nous étudierons les approches traditionnelles et les solutions technologiques modernes mises en œuvre pour soutenir les patients atteints d'asthme. Nous soulignerons aussi les atouts et les limites de chaque méthode, tout en envisageant l'intégration de solutions avant-gardistes comme l'IA, dans le but d'améliorer la gestion et le suivi des patients.

8.1 Solutions classiques

Dans le cadre des stratégies classiques de prise en charge de l'asthme, on retrouve principalement [4, 8] :

- **Plans d'action** : il s'agit d'instructions écrites, élaborées avec un professionnel de la santé, qui indiquent au patient comment ajuster ses médicaments en fonction de l'évo-

5. European Respiratory Society
6. American Thoracic Society

lution de ses symptômes ou de la mesure de son DEP.

- **Carnet de suivi** : outil papier permettant au patient de noter quotidiennement ses symptômes, l'utilisation de ses médicaments, ses lectures de débitmètre et ses déclencheurs.
- **Cliniques de l'asthme et l'éducation thérapeutique** : des structures souvent dirigées par des infirmières spécialisées pour enseigner aux patients la maîtrise gestuelle des inhalateurs et la gestion autonome de leur maladie.

8.2 Solutions numériques et connectées pour la prise en charge de l'asthme

Le marché mondial propose aujourd'hui plusieurs solutions numériques ciblant l'asthme, intégrant divers objets connectés et applications :

- **Montres intelligentes (smartwatches)** : elles peuvent fournir des données utiles sur la fréquence cardiaque, le niveau d'activité, le sommeil ou la saturation en oxygène (SpO_2).
- **Capteurs portables (wearables)** : des patchs comme le RESP[7] Biosensor enregistrent en continu la toux et la respiration (fréquence respiratoire, sifflements) sur 24 heures, offrant une vision plus fidèle de la maladie que les examens ponctuels [17, 18].
- **Inhalateurs intelligents** : des dispositifs connectés comme le RS01X ou Propeller Health surveillent en temps réel l'observance du traitement et la technique d'inhalation. Propeller Health, par exemple, combine un capteur physique attaché à l'inhalateur et une application mobile pour cartographier les lieux où surviennent les crises [19, 20].
- **Dispositifs médicaux connectés (spiromètres)** : des outils comme Zephyrx se connectent au smartphone via Bluetooth pour réaliser des EFR directement à domicile [11].
- **Solutions logicielles spécialisées** : applications dédiées (Smart Asthma, myAsthma, Asthma Tracker) proposant des algorithmes de prédiction ou des plans d'action numériques [21, 22].

8.3 Synthèse et analyse critique des solutions

Afin de comparer l'efficacité des outils disponibles, nous présentons d'abord une analyse critique par catégorie de solution dans le Tableau 2.1, suivie d'une étude comparative détaillée des applications leaders du marché dans le Tableau 2.2.

7. Respiratory.

TABLE 2.1 – Analyse critique des catégories d'outils de suivi

Type de Solution	Exemples Concrets	Avantages	Limites & Insuffisances
Solutions Classiques	Carnet de suivi, questionnaires ACT (Asthma Control Test) / GINA	Reposent sur des paramètres validés cliniquement pour le contrôle de la maladie.	Reposent sur la déclaration manuelle du patient. N'offrent pas de suivi en temps réel ni de prédiction avant l'aggravation.
Technologies Grand Public	Montres intelligentes (Smartwatches)	Fournissent des paramètres en continu (fréquence cardiaque, SpO_2) pouvant être associés à un risque d'exacerbation [2].	Ne remplacent jamais l'examen clinique. Ne mesurent ni le VEMS, ni le DEP, ni la FeNO. Aucune recommandation internationale (GINA, ERS/ATS) ne les valide pour guider l'ajustement des traitements.
Inhalateurs et capteurs intelligents	Propeller Health, RS01X, RESP Biosensor	Améliorent l'observance en surveillant la technique d'inhalation et objectivent les symptômes (toux, sifflements) sur 24h [19].	Nécessitent l'achat et la fixation d'un capteur physique supplémentaire (coût élevé). De plus, ils posent des problèmes de compatibilité matérielle, freinant leur accessibilité et leur adoption à long terme.
Dispositifs médicaux connectés	Spiromètres Bluetooth (Zephyrx)	Permettent de réaliser des EFR à domicile, mesurant objectivement l'obstruction bronchique [11].	Dépendent de l'effort expiratoire du patient pour être valides. Matériel souvent onéreux.

TABLE 2.2 – Analyse comparative des applications mobiles leaders.

App	Mode de collecte de données	Fonctionnalités clés	Connectivité médecin	Usage de l'IA	Limites majeures
Propeller Health [19]	Capteurs physiques fixés sur l'inhalateur + saisie manuelle des symptômes + données environnementales (météo, pollution).	Suivi automatique des inhalations (fréquence, horaires, adhérence), rapports de tendances, détection de zones à risque, feedback personnalisé, prévisions d'exacerbation et rappels.	Intégration via portail clinique ou API dédiée (visualisation de l'adhérence).	Algorithmes de prédiction de risque (modèles statistiques), sans IA conversationnelle.	Coûts supplémentaires des capteurs, contraintes de compatibilité avec les inhalateurs standards.
AsthmaMD	Saisie manuelle quotidienne : symptômes, inhalateurs, débit de pointe.	Carnet de suivi avec graphiques de tendance, zones de contrôle (vert/jaune/rouge), exports de rapports.	Pas de portail en temps réel ; envoi de rapports exportés (PDF/CSV).	Aucune IA explicite ; repose sur des règles simples et graphiques de tendance.	Forte dépendance à la saisie manuelle, risque d'oubli, pas de suivi automatique, moins adapté aux asthmes modérés/sévères.
Smart Asthma : Forecast Asthma	Mesures de débit de pointe via Smart Peak Flow (Bluetooth) + saisie manuelle.	Classification du contrôle (vert/jaune/rouge), prévision du risque d'aggravation, détection de zones à risque, rapports à partager.	Partage de rapports par e-mail ou export, pas d'intégration EHR (Electronic Health Record)	IA explicite : algorithme « AI forecast » pour anticiper les exacerbations.	Nécessité d'acheter le dispositif Smart Peak Flow, pas de suivi des inhalations, limité aux mesures de peak-flow.
myAsthma	Saisie manuelle des symptômes, traitements, déclencheurs + intégration possible avec Apple Health.	Auto-évaluation du contrôle, plan d'action personnalisé, bibliothèque éducative.	Prescrite via un professionnel de santé avec partage de résumés cliniques.	Pas d'IA explicite ; s'appuie sur questionnaires standards et règles de recommandation.	Pas de suivi automatique des inhalateurs, dépend entièrement de la saisie manuelle, accessibilité limitée.
Asthma Tracker	Saisie manuelle des symptômes, prescriptions et mesures de débit de pointe.	Journal de suivi avec tendances, résumés quotidiens, rappels personnalisés, rapports PDF/CSV, verrouillage biométrique.	Le médecin reçoit uniquement les rapports exportés ; aucune intégration synchrone.	Aucun usage d'IA ; analyse basique reposant sur des règles statiques.	Forte dépendance à la motivation du patient, pas de suivi automatique ni prédictions, limité pour faible observance.

8.4 Synthèse critique et positionnement du projet AsthmaGuard

L'analyse croisée des Tableaux 2.1 et 2.2 met en évidence un cloisonnement fonctionnel majeur au sein de l'écosystème technologique actuel de l'asthme. D'une part, les solutions cliniques haut de gamme (telles que les spiromètres connectés) fournissent des données physiologiques d'une excellente précision [11], mais imposent une charge de mesures actives répétées qui altère l'adhérence à long terme. D'autre part, les applications mobiles populaires souffrent d'une dépendance critique vis-à-vis de la saisie manuelle ou nécessitent l'acquisition de capteurs matériels propriétaires coûteux [19], ce qui limite fortement leur adoption par le grand public.

De plus, sur le plan algorithmique, la majorité des outils existants exploitent des systèmes experts rigides fondés sur des seuils statiques (règles des zones GINA). Bien que certaines solutions avancées intègrent des fonctionnalités prédictives, elles omettent de modéliser explicitement l'impact dynamique et non linéaire des facteurs exogènes, négligeant ainsi la synergie délétère entre les pics de pollution atmosphérique et la charge allergénique environnementale [23].

C'est précisément à l'intersection de ces verrous technologiques que se positionne le projet **AsthmaGuard**. Notre approche vise à lever ces limitations à travers trois innovations majeures :

1. **Une collecte passive et non invasive :** En exploitant les capteurs embarqués d'une montre intelligente (smartwatch) pour extraire les constantes physiologiques en continu, réduisant ainsi la dépendance aux saisies manuelles fastidieuses.
2. **Une modélisation de la synergie environnementale :** Par l'intégration d'un module d'inférence à logique floue, capable de classifier le risque exogène global en capturant les corrélations complexes entre polluants ($X_{pollution}$) et pollens (X_{pollen}).
3. **Une architecture prédictive hybride et interprétable :** En couplant des modèles de Machine Learning avancés (XGBoost) à des mécanismes d'explicabilité, garantissant au patient et au clinicien des alertes précoces, transparentes et directement exploitables avant l'apparition des premiers symptômes cliniques d'exacerbation.

8.5 Perspectives possibles et intégration de l'IA

L'identification des limites des solutions actuelles permet de définir des perspectives d'amélioration claires. Pour dépasser le cadre d'un modèle de soins purement réactifs, l'intégration de l'IA offre une surveillance proactive et personnalisée [24, 21].

L'IA transforme la gestion de l'asthme en faisant évoluer le modèle de soins d'une approche réactive vers une surveillance proactive, continue et personnalisée. Les principaux axes de recherche dans ce domaine sont les suivants [21] :

- **Précision diagnostique :** L'IA exploite l'analyse bioacoustique des sons respiratoires pour détecter l'asthme, particulièrement chez l'adulte, en identifiant les sifflements et autres biomarqueurs acoustiques caractéristiques de la maladie [25].
- **Prédiction des crises :** Des algorithmes tels que Random Forest et XGBoost analysent les dossiers médicaux pour stratifier les patients selon leur niveau de risque. Ils peuvent anticiper les hospitalisations, permettant ainsi une intervention précoce avant l'aggravation des symptômes [2, 26].
- **Synergie environnementale :** L'IA croise les données de santé individuelles avec les niveaux de pollution atmosphérique et de pollen pour alerter proactivement les patients lors des journées à haut risque [23].
- **Aide à la décision clinique :** le traitement du langage naturel (NLP) et les modèles de langage (LLM) permettent aux cliniciens d'extraire rapidement des informations pertinentes des dossiers médicaux et de mieux adhérer aux recommandations internationales (GINA) [27, 28].

9 Collecte des besoins

La phase de recueil des besoins est cruciale dans l'élaboration d'une solution, car elle permet de comprendre les attentes des utilisateurs et des parties prenantes, ainsi que de déterminer les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles. Dans cette section, nous présentons l'identification des parties prenantes, les méthodes employées pour recueillir leurs besoins et l'analyse qui en découle [29].

9.1 Identification des parties prenantes

Dans le cadre du développement d'un système dédié à la surveillance et à la prédiction des crises d'asthme, plusieurs parties prenantes interviennent dans le système. Chaque acteur possède un rôle spécifique dans l'utilisation et l'exploitation de la solution. Les principales parties prenantes identifiées sont les suivantes :

- **Patients asthmatiques (Utilisateurs principaux) :** Les patients constituent les utilisateurs principaux du système. Ils utilisent la plateforme pour surveiller leurs symptômes respiratoires (dyspnée, sifflements, toux), suivre leur traitement quotidien, recevoir des alertes précoces en cas de risque de crise et consulter les informations environnementales (pollution, pollen, météo) pouvant déclencher une crise. L'application peut exploiter les données collectées par des objets connectés, comme les montres intelligentes, afin d'analyser des paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque et l'activité physique.
- **Médecins et professionnels de santé :** Les professionnels de santé jouent un rôle important dans l'analyse et l'interprétation des données collectées. Ils consultent les rapports générés par le système à partir des prédictions issues des modèles d'analyse pour suivre l'évolution de l'état du patient, adapter le traitement en fonction des prédictions, prévenir les exacerbations et améliorer le contrôle de l'asthme. Le suivi médical reste essentiel, car les dispositifs connectés ne remplacent pas l'évaluation clinique et les examens médicaux spécialisés.
- **Développeurs et concepteurs du système :** Les développeurs sont responsables de la conception de l'application mobile, de l'intégration des capteurs des montres intelligentes, du développement des algorithmes d'IA permettant la détection et la prédiction des crises d'asthme, ainsi que de la sécurisation et de la gestion des données médicales.
- **Fournisseurs de données environnementales :** Certaines plateformes externes fournissent des informations environnementales importantes telles que la qualité de l'air, les niveaux de pollen et les conditions météorologiques. Ces données sont utilisées pour identifier les facteurs susceptibles de déclencher des crises d'asthme.

9.2 Méthodes de collecte des besoins

Plusieurs méthodes complémentaires ont été utilisées afin de garantir une compréhension approfondie des besoins des utilisateurs et des professionnels de santé :

- **Entretiens :** Nous avons réalisé des entretiens avec les patients asthmatiques et les professionnels de santé afin de comprendre les difficultés rencontrées dans le suivi de la maladie, les besoins en matière de surveillance et de prévention des crises, ainsi que les fonctionnalités attendues dans une application mobile de santé.
- **Questionnaires :** Nous avons utilisé des questionnaires pour recueillir les avis d'un grand nombre d'utilisateurs concernant les symptômes les plus fréquents, les facteurs déclencheurs de crise (allergènes, pollution, effort physique) et les attentes vis-à-vis d'un système de surveillance intelligent.
- **Observation et analyse du domaine :** Nous avons analysé le domaine médical de l'asthme afin d'identifier les paramètres essentiels à surveiller, tels que la fréquence respiratoire, la saturation en oxygène, la fréquence cardiaque et les symptômes respiratoires. Ces données peuvent être collectées via des capteurs physiologiques et traitées par des algorithmes d'intelligence artificielle pour détecter les signes précoces d'une crise.

9.3 Besoins fonctionnels

Les principales fonctionnalités de l'application AsthmaGuard sont :

- **Inscription :** permettre aux utilisateurs asthmatiques non inscrits de créer un compte en fournissant leurs informations personnelles.
- **Connexion :** permettre aux utilisateurs inscrits de s'authentifier de manière sécurisée pour accéder à l'application.
- **Gestion du profil :** permettre aux utilisateurs de consulter et de mettre à jour leurs informations personnelles et préférences.
- **Gestion du dossier médical :** permettre aux utilisateurs de renseigner et mettre à jour leur dossier médical, notamment :
  - Le nombre de crises d'asthme ;
  - Le questionnaire ACT ;
  - La sévérité selon les critères GINA ;

  - Les triggers (déclencheurs) ;
  - L'usage du bronchodilatateur.
- **Gestion des traitements :** permettre aux utilisateurs de gérer leurs traitements (ajouter, modifier, supprimer).
- **Gestion des triggers (déclencheurs) :** permettre à l'utilisateur d'ajouter, modifier ou supprimer les facteurs susceptibles de déclencher ou d'aggraver une crise d'asthme.
- **Intégration avec les montres intelligentes :** collecter automatiquement les données biométriques et physiologiques via la Smartwatch.
- **Intégration des données environnementales :** récupérer via des APIs externes les informations sur la qualité de l'air et les risques environnementaux.
- **Évaluation du risque environnemental :** analyser les données environnementales pour évaluer le risque pour l'utilisateur.
- **Prédiction des crises d'asthme :**
  - Prédire une crise imminente (court terme) ;
  - Prédire le risque à long terme.
- **Notifications :** informer l'utilisateur en temps réel en cas de risque de crise imminente ou de risque environnemental élevé ou le temps de prendre leur traitement.
- **Contacts d'urgence :** Informer les contacts d'urgence du patient si nécessaire dans les cas de crise imminente.
- **Consulter l'historique des prédictions :** permettre à l'utilisateur de visualiser l'historique de ses prédictions et des données collectées.
- **Accès aux contenus éducatifs :** fournir aux utilisateurs un accès à de la documentation et à des informations fiables sur l'asthme.
- **Génération et partage de rapports médicaux :** permettre la génération de rapports destinés aux médecins à partir de l'historique de prédiction du patient.

9.3.1 Besoins non fonctionnels

Les principaux besoins non fonctionnels sont :

- **Précision :** fournir des prédictions fiables.
- **Facilité d'utilisation :** une interface simple et intuitive.
- **Sécurité et confidentialité :** protection des données médicales.
- **Performance :** traitement rapide des données.

- **Disponibilité :** accès permanent au système pour un suivi continu.

10 Modélisation UML des besoins

Cette section présente la modélisation des besoins du système à l'aide du langage UML. Cette modélisation est abordée selon trois perspectives complémentaires :

- la perspective fonctionnelle, à travers les diagrammes de cas d'utilisation, qui permettent de représenter les fonctionnalités offertes par le système et les interactions avec les acteurs,
- la perspective statique, à travers le diagramme de classes, qui modélise la structure des données et les relations entre les entités du système,
- et la perspective dynamique, à travers les diagrammes de séquence, qui illustrent les interactions entre les acteurs et le système ainsi que le déroulement des différents scénarios.

10.1 Spécification des exigences fonctionnelles : diagramme des cas d'utilisation

Le diagramme des cas d'utilisation est l'outil d'UML dédié à la modélisation fonctionnelle d'un système. Il permet de capturer les besoins des utilisateurs en définissant le comportement attendu du système du point de vue de ses utilisateurs externes. Ses principes fondamentaux s'articulent autour de trois concepts principaux [30] :

- **Acteur** : Une entité externe (humaine, matérielle ou logicielle) qui interagit directement avec le système. On distingue l'acteur principal (pour qui le cas d'utilisation produit un bénéfice direct) des acteurs secondaires (qui fournissent un service au système).
- **Cas d'utilisation** : Une unité cohérente de fonctionnalités représentant un ensemble d'actions accomplies par le système en réponse à la demande d'un acteur.
- **Relations** : Les liens reliant les acteurs aux cas d'utilisation (associations), ou les cas d'utilisation entre eux. Ces dernières incluent l'inclusion (*«include»*, indiquant qu'un cas fait obligatoirement appel à un autre) et l'extension (*«extend»*, indiquant un comportement optionnel sous condition).

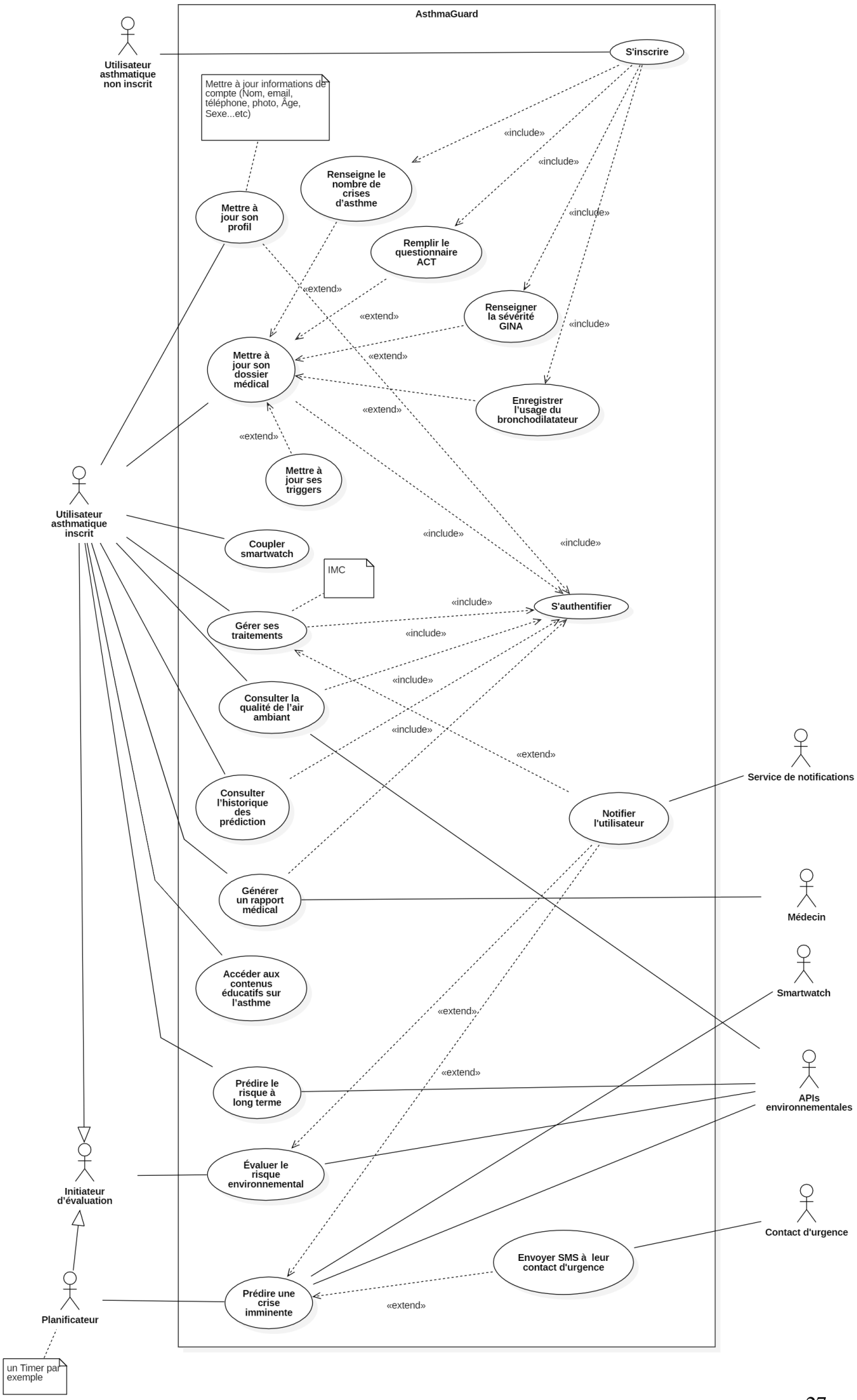


FIGURE 2.2 – Diagramme des cas d'utilisation du système.

Le diagramme de cas d'utilisation (Figure 2.2) permet de délimiter les frontières de notre système *AsthmaGuard* et d'identifier les interactions entre les acteurs et l'application. Cette modélisation formalise les fonctionnalités offertes par notre solution ainsi que les acteurs impliqués dans leur déclenchement et leur exécution. Les acteurs identifiés sont répartis en deux catégories : les acteurs primaires, qui initient les interactions avec le système, et les acteurs secondaires, qui interviennent dans la réalisation de certaines fonctionnalités.

Comme acteurs primaires, nous avons identifié :

- **Utilisateur asthmatique non inscrit :** il s'agit d'un utilisateur ne possédant pas encore de compte au sein du système. Son interaction principale consiste à s'inscrire afin d'accéder aux différentes fonctionnalités proposées.
- **Utilisateur asthmatique inscrit :** il s'agit d'un utilisateur disposant d'un compte et pouvant accéder aux fonctionnalités du système après authentification.
- **Planificateur :** acteur système (par exemple un mécanisme de planification temporelle) chargé de déclencher automatiquement le processus de prédiction du risque de crise imminente.
- **Initiateur d'évaluation :** acteur responsable du déclenchement de l'évaluation des risques environnementaux. Son introduction permet de modéliser le fait que cette évaluation peut être initiée soit par l'utilisateur asthmatique inscrit, soit automatiquement par un planificateur système.

Comme acteurs secondaires, indispensables à l'exécution de certaines fonctionnalités, nous distinguons :

- **Smartwatch :** dispositif connecté fournissant une partie des données physiologiques nécessaires à l'évaluation de l'état du patient et à la prédiction d'une crise imminente.
- **APIs environnementales :** services externes fournissant des données relatives à l'environnement immédiat du patient, telles que les conditions météorologiques, la qualité de l'air ou la concentration en allergènes.
- **Médecin :** destinataire des rapports médicaux générés et partagés par le patient.
- **Contact d'urgence :** destinataire des notifications d'urgence envoyées lorsqu'un risque élevé de crise imminente est détecté.

10.2 Modélisation structurelle statique : diagramme de classes

Le diagramme de classes constitue le pilier de la modélisation orientée objet en UML. Il permet de représenter la structure statique d'un système en mettant en évidence ses composants internes et les liaisons qui les unissent. Ses principes fondamentaux reposent sur trois concepts clés [30] :

- **Classe** : une entité abstraite regroupant des objets possédant les mêmes caractéristiques. Elle se compose d'un *nom*, d'*attributs* (les données ou variables) et de *méthodes* (les comportements ou fonctions).
- **Relations (ou associations)** : les liens logiques qui unissent les classes entre elles, caractérisés par des *multiplicités* (ou cardinalités) indiquant le nombre d'instances pouvant participer à la relation (ex. 1, $1..*$, $*$).
- **Mécanismes Avancés** : notamment l'*héritage* (généralisation/spécialisation), qui permet à une classe fille de s'approprier les attributs et méthodes d'une classe mère tout en y ajoutant ses propres spécificités, et la *composition/agrégation* représentant des liens d'inclusion de type "composant/composé".

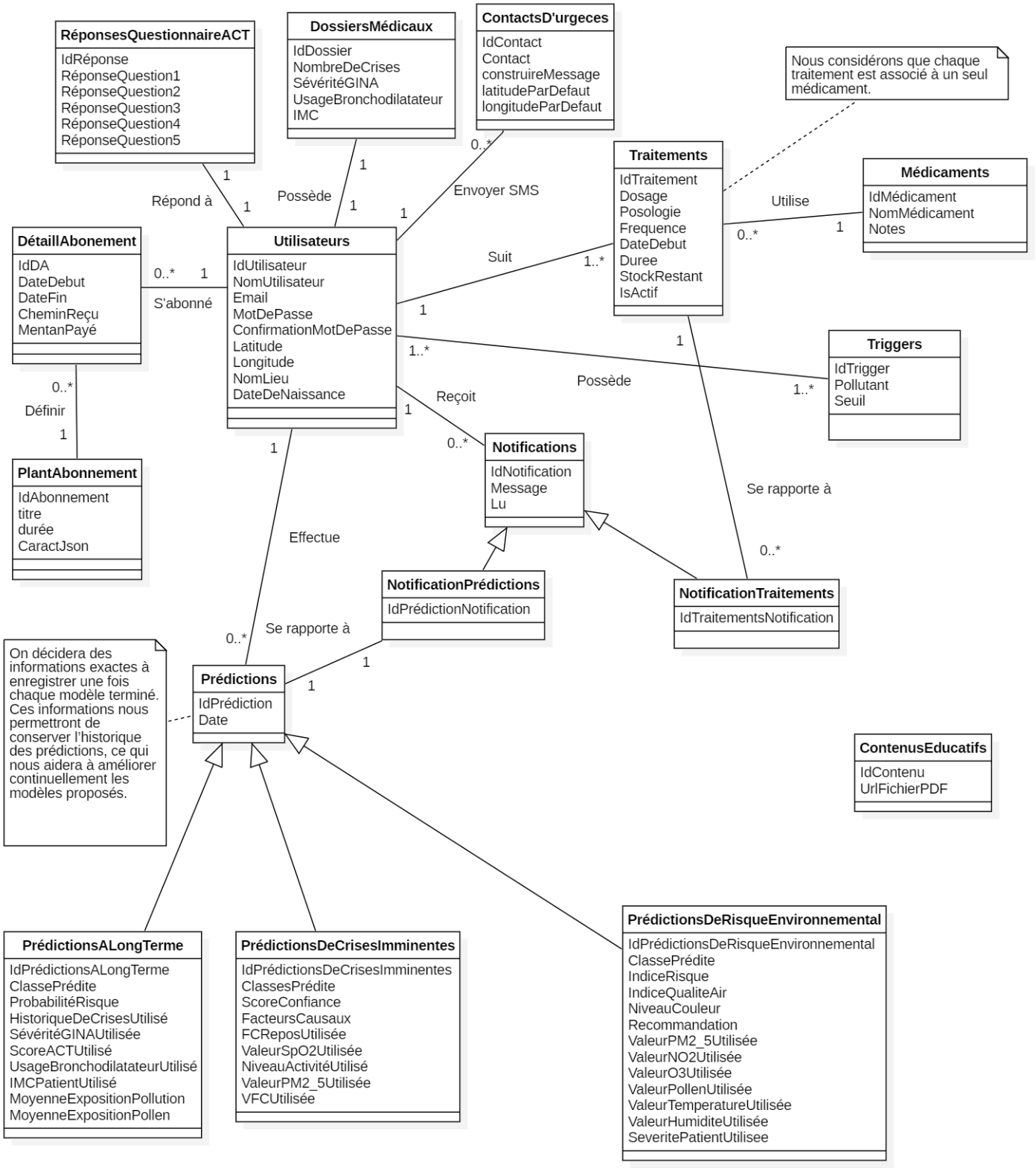


FIGURE 2.3 – Diagramme de classes correspondant à notre MCD.

Dans le cadre du système *AsthmaGuard*, le diagramme de classes de la Figure 2.3 représente le Modèle Conceptuel de Données (MCD) du système et offre une vue d'ensemble macrosco-

pique et simplifiée de la structure des données manipulées par la base de données relationnelle.

Il décrit les relations entre l'entité centrale `Utilisateur`, qui regroupe le profil et l'authentification, et ses principaux éléments de suivi médical, notamment le `DossierMédical` (incluant l'IMC et les données GINA), l'historique des `RéponsesQuestionnaireACT`, ainsi que ses propres *Triggers* (facteurs déclencheurs).

Le modèle distingue également différents types de `Prédictions` générées par les modèles d'IA développés, telles que le risque environnemental lié aux conditions environnementales externes, la crise imminente basée sur les données de la smartwatch, ainsi que les prévisions à plus long terme. Le stockage de ces prédictions est essentiel afin de permettre leur partage avec les médecins, ainsi que l'amélioration continue des performances des modèles prédictifs.

En outre, il décrit les données nécessaires au suivi des `Traitements` médicamenteux, à la gestion des différentes `Notifications` générées, à la gestion des abonnements des patients, ainsi qu'au suivi des contenus éducatifs proposés via l'application mobile.

10.3 Modélisation comportementale dynamique : diagramme de séquence

Le diagramme de séquence est l'artéfact UML privilégié pour la modélisation comportementale et dynamique du système. Il formalise la chronologie des échanges de messages entre les différents objets ou composants logiciels au cours de l'exécution d'un scénario précis. Ses principes fondamentaux reposent sur trois concepts clés [31] :

- **Ligne de vie (Lifeline)** : Représentée en ligne pointillée verticale, elle matérialise l'existence d'un acteur ou d'une instance d'objet au cours du temps.
- **Messages** : Flèches horizontales matérialisant l'invocation d'une opération ou le retour d'une information entre deux lignes de vie (messages synchrones, asynchrones ou réponses).
- **Blocs de contrôle (Fragments combinés)** : Structures graphiques (telles que *alt* pour une alternative conditionnelle, ou *loop* pour une répétition) permettant d'intégrer de la logique algorithmique complexe au sein du scénario temporel.

Dans notre cas, nous utiliserons des diagrammes de séquence système qui illustrent le déroulement de scénarios précis correspondant à certaines fonctionnalités du système. Ils permettent de représenter les interactions entre le système et les différents acteurs impliqués dans la réalisation d'une fonctionnalité donnée.

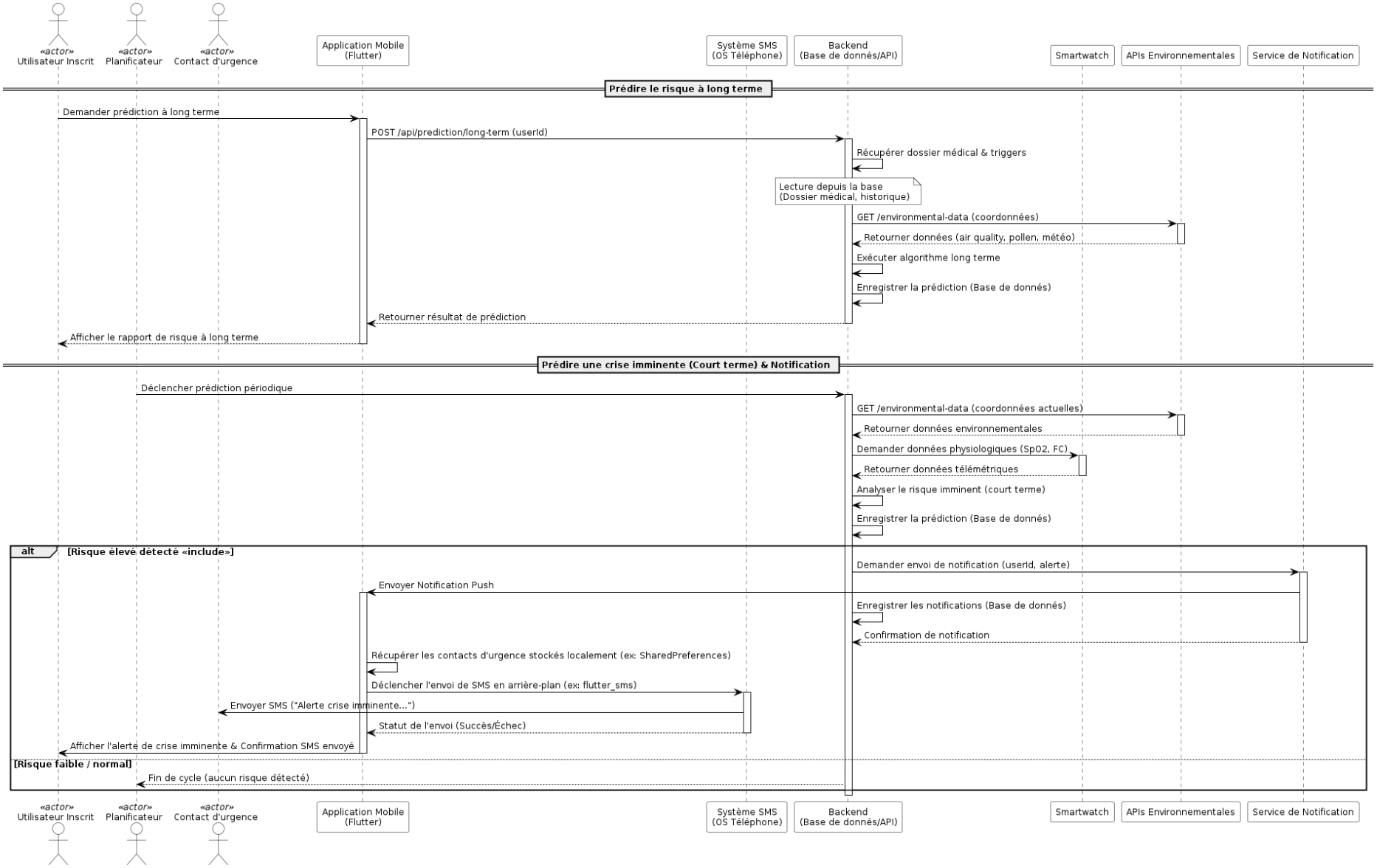
Dans ce type de diagramme, les lignes de vie ne correspondent plus à des objets logiciels internes, mais aux acteurs externes ainsi qu'au système lui-même (éventuellement décomposé en ses principaux composants), considéré comme une boîte noire. Son fonctionnement interne, notamment les interactions entre objets, n'est donc pas modélisé.

Dans cette partie consacrée à la modélisation fonctionnelle, nous présentons les diagrammes de séquence relatifs aux fonctionnalités de prédiction, en raison de leur importance centrale dans notre travail. Le diagramme de séquence de la Figure 2.4 fournit une aide conceptuelle importante en décrivant de manière globale les échanges de données entre l'application mobile (Flutter), le serveur central (API backend) et les services externes (smartwatch, APIs environnementales et services de notification).

Sans entrer dans le détail de l'implémentation, ce modèle illustre la manière dont le système orchestre de façon asynchrone et transparente deux processus métiers majeurs : d'une part, la demande ponctuelle d'une analyse prédictive à long terme initiée par l'utilisateur, et d'autre

part, l'exécution automatique et périodique, via un planificateur, des algorithmes de détection des crises imminentes à court terme. Il met également en évidence le déclenchement conditionnel des notifications push d'urgence vers le smartphone du patient en cas de dépassement des seuils de risque clinique, garantissant ainsi la réactivité requise par le cahier des charges du projet.

FIGURE 2.4 – Diagramme de séquence pour les scénarios de prédiction et notification.



11 Conclusion

En conclusion, ce deuxième chapitre a permis de poser les fondations scientifiques et méthodologiques indispensables au projet *AsthmaGuard*. L'étude de la pathologie de l'asthme et l'analyse critique des solutions existantes ont mis en évidence la nécessité de passer d'un modèle de soins réactifs à une surveillance proactive, en exploitant le potentiel de l'intelligence artificielle et des objets connectés.

La phase de collecte des besoins a permis de structurer les attentes des patients et des professionnels de santé, tandis que la modélisation UML (cas d'utilisation, classes et séquence) a formalisé les besoins fonctionnels, statiques (données) et dynamiques du système. Cette modélisation conceptuelle garantit une cohérence stricte entre les exigences métiers et la structure de la base de données.

Disposant désormais d'un cadre fonctionnel validé, nous pouvons aborder la mise en œuvre de notre méthodologie de développement logiciel basée sur Scrum. Le chapitre suivant sera ainsi dédié à l'application de cette démarche méthodologique, en détaillant l'organisation de l'équipe, le backlog adopté, ainsi que la planification des différents sprints suivis.

Chapitre 3

Méthodologie de développement du projet

1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie de développement adoptée pour notre projet. Dans un environnement de projet étudiant caractérisé par une forte incertitude et des besoins évolutifs, le choix d'une approche agile s'avère essentiel pour garantir la flexibilité, la réactivité et la maximisation de la valeur délivrée.

Le projet consiste à développer une application, dans un contexte de startup, intégrant des fonctionnalités d'IA. Ce contexte impose une adaptation rapide aux retours utilisateurs, aux avancées technologiques et aux contraintes émergentes, ce qui rend indispensable l'utilisation d'une méthodologie itérative et empirique.

Ce chapitre présente la méthodologie de développement adoptée dans le cadre de ce projet. Après un aperçu des approches agiles, nous détaillons la méthode Scrum (principes, rôles, artefacts et événements), puis son application concrète à notre projet à travers l'organisation de l'équipe, le Product Backlog et la planification des sprints. Le chapitre se termine par une synthèse ouvrant sur la suite du travail.

2 Méthodologies agiles : vue d'ensemble

Les méthodologies agiles représentent une approche moderne de la gestion de projets, particulièrement adaptée aux environnements incertains et évolutifs tels que les projets étudiants

ou de type startup. Elles ont émergé dans les années 1990 avec des pratiques comme l'Extreme Programming (XP) et ont été formalisées en février 2001 par la publication du *Manifeste Agile*, signé par 17 experts du développement logiciel. Ce manifeste privilégie [32] :

- les individus et leurs interactions plutôt que les processus et les outils .
- le logiciel fonctionnel plutôt que la documentation exhaustive .
- la collaboration avec le client plutôt que la négociation contractuelle .
- l'adaptation au changement plutôt que le suivi d'un plan.

Dans ce contexte, les méthodologies agiles se distinguent par leur flexibilité, leur capacité d'adaptation rapide à l'évolution des besoins et leur approche de livraison incrémentale de la valeur, tout en réduisant les risques projet.

Afin de mettre en évidence les avantages des méthodologies agiles par rapport aux approches traditionnelles, le tableau 3.1 présente une comparaison avec le modèle en cascade (Waterfall) selon plusieurs critères clés.

TABLE 3.1 – Comparaison entre méthodes agiles et méthodes traditionnelles

Critère	**Méthodes Agiles**	**Méthodes traditionnelles (Waterfall)**
Approche du développement	Itérative et incrémentale	Linéaire et séquentielle
Flexibilité face aux changements	Élevée	Faible
Livraison de valeur	Fréquent et continu	Unique, à la fin du projet
Gestion des risques	Réduite (détection précoce)	Élevée (risques détectés tardivement)
Collaboration et auto-organisation	Forte	Limitée (structure hiérarchique)
Documentation	minimale et juste suffisante	Exhaustive et obligatoire

3 Scrum : présentation détaillée

3.1 Définition

La méthodologie Scrum est un **cadre de travail léger** (*lightweight framework*) conçu pour aider les personnes, les équipes et les organisations à générer de la valeur grâce à des solutions adaptatives pour des problèmes complexes, comme le définit le *Scrum Guide* (novembre 2020) de Ken Schwaber et Jeff Sutherland [33].

Son objectif principal est de permettre une livraison incrémentale et itérative de valeur dans un environnement où les exigences sont incertaines et évolutives. Scrum ne prescrit pas une méthodologie rigide, mais fournit un cadre minimaliste qui favorise l'auto-organisation, la collaboration et l'amélioration continue.

Sa philosophie repose sur deux piliers fondamentaux :

- **l'empirisme** : la connaissance provient de l'expérience et des décisions prises sur la base de ce qui est connu (transparence, inspection et adaptation) ;
- **la pensée lean** : élimination des gaspillages et focalisation sur la valeur.

Le succès de Scrum dépend également du respect de cinq valeurs fondamentales : engagement, focus, ouverture, respect et courage [33].

3.2 Justification du choix de Scrum

Dans le cadre de notre projet de développement d'une application de type startup, où les besoins en IA évoluent rapidement (modèles, algorithmes, données, interfaces), Scrum s'est imposé comme le choix le plus adapté [33].

Contrairement aux méthodes traditionnelles (type Waterfall), Scrum offre une **flexibilité** et une **capacité d'adaptation** exceptionnelles face à l'incertitude inhérente aux projets IA. Grâce à ses cycles courts (Sprints) et à ses mécanismes d'inspection et d'adaptation réguliers, l'équipe peut intégrer rapidement les nouveaux retours, les évolutions technologiques ou les changements de priorités sans remettre en cause l'ensemble du projet.

Ce cadre permet :

- de livrer de la valeur de manière incrémentale dès les premiers Sprints (fonctionnalités IA minimales viables) ;
- de réduire les risques liés à l'incertitude des besoins IA ;
- de maintenir une forte réactivité face aux évolutions du marché ou des exigences utilisateurs, typiques d'un environnement startup.

Donc, Scrum répond parfaitement au contexte de notre projet : un environnement complexe et changeant où la capacité à inspecter, adapter et livrer fréquemment constitue un avantage compétitif majeur.

3.3 Rôles Scrum

Scrum définit trois rôles distincts au sein de l'**Équipe Scrum** (Scrum Team), une unité cohérente et auto-organisée sans hiérarchie interne. Ces trois rôles sont complémentaires et partagent la responsabilité collective de la réussite du produit [33]. Ces rôles sont les suivants :

- **Product Owner** : Seul responsable de la maximisation de la valeur du produit. Il gère le Product Backlog, le priorise et représente les besoins des parties prenantes. Il est la seule personne autorisée à modifier les priorités du backlog.
- **Scrum Master** : Responsable de la bonne mise en œuvre de Scrum. Il agit comme coach et facilitateur, lève les obstacles, favorise l'auto-gestion et l'amélioration continue. Il n'est pas un chef de projet traditionnel, mais un leader serviteur.
- **Développeurs** (Developers) : Professionnels qui créent tout aspect d'un Incrément utilisable et potentiellement livrable à chaque Sprint. Ils forment une équipe auto-organisée, pluridisciplinaire et auto-gérée.

Ces trois rôles forment une seule équipe unifiée, partageant le même objectif produit (*Product Goal*).

3.4 Artéfacts Scrum

Les artéfacts de Scrum représentent le travail ou la valeur afin de maximiser la transparence. Chaque artéfact contient un engagement pour s'assurer qu'il fournit des informations qui améliorent cette transparence et la focalisation par rapport à l'avancement. Ces artéfacts sont conçus pour que tous les membres de l'équipe aient la même compréhension de ce qui est produit et de son état réel [33].

Scrum s'appuie sur trois artéfacts essentiels qui structurent le travail et maximisent la transparence tout au long du projet. Ces artéfacts sont décrits dans les sections suivantes, en se basant sur la référence [33].

3.4.1 Product Backlog

Le Product Backlog est une liste émergente et ordonnée de ce qui est nécessaire pour améliorer le produit. Il constitue l'unique source du travail entrepris par l'équipe Scrum. C'est une liste dynamique, hiérarchisée et continuellement mise à jour qui reflète l'ensemble des exi-

gences du projet. L'engagement associé au Product Backlog est l'Objectif de Produit, qui décrit un état futur du produit et sert de cible de planification à long terme pour l'équipe Scrum. Il est de la responsabilité du Product Owner de maximiser la valeur du produit à travers la gestion rigoureuse de ce backlog.

3.4.2 Sprint Backlog

Le Sprint Backlog est composé de l'Objectif de Sprint (le pourquoi), de l'ensemble des éléments du Product Backlog sélectionnés pour le Sprint (le quoi), ainsi que d'un plan d'action pour livrer l'Incrément (le comment). Il s'agit d'un plan créé par et pour les développeurs. Ce backlog rend visible tout le travail que les développeurs estiment nécessaire pour atteindre l'objectif de sprint. Il représente une prévision très précise et en temps réel du travail de l'équipe pendant l'itération en cours.

3.4.3 Incrément

Un Incrément est un tremplin concret vers l'Objectif de Produit. Chaque incrément s'ajoute à tous les incréments précédents et doit être minutieusement vérifié pour garantir que l'ensemble fonctionne correctement. Pour apporter de la valeur, l'incrément doit obligatoirement être utilisable. Pour déterminer quand cet incrément est véritablement achevé, l'équipe s'appuie sur la **Definition of Done** (DoD). La définition de "done" est une description formelle de l'état de l'incrément lorsqu'il répond aux mesures de qualité requises pour le produit. Elle assure une compréhension commune et transparente de ce que signifie l'achèvement du travail pour toute l'équipe. Dès qu'un élément du Product Backlog répond à la Definition of Done, un incrément naît. À l'inverse, si un élément ne respecte pas cette définition, il ne peut en aucun cas être publié ni même présenté lors de la Revue de Sprint.

3.5 Événements Scrum

Dans Scrum, les événements (ou cérémonies) sont des activités structurées qui permettent d'assurer la transparence, l'inspection et l'adaptation tout au long du projet. Chaque événement possède un objectif précis et une durée limitée (time-box), garantissant ainsi l'efficacité du processus de développement. Ces événements constituent le cadre fondamental permettant à l'équipe Scrum de travailler de manière itérative et incrémentale [33] .

Les principaux événements Scrum qui structurent le déroulement d'un Sprint sont présentés ci-dessous.

3.5.1 Sprint

Le Sprint est l'événement central de Scrum. Il s'agit d'une itération de durée fixe (généralement entre 1 et 4 semaines) durant laquelle un incrément du produit est développé.

Chaque Sprint commence immédiatement après la fin du précédent, sans interruption. Durant cette période, l'équipe travaille à atteindre un objectif clairement défini appelé **Sprint Goal**.

Le Sprint permet :

- De structurer le travail en cycles courts.
- De favoriser la livraison continue de valeur.
- De réduire les risques en permettant des ajustements fréquents.

Selon [34], le Sprint constitue un cadre de travail stable dans lequel les changements sont contrôlés afin de préserver la cohérence des objectifs.

3.5.2 Sprint planning

Le Sprint Planning est l'événement qui marque le début du Sprint. Il a pour objectif de définir le travail à réaliser durant l'itération.

Durant cette réunion, l'équipe Scrum répond à trois questions principales :

- Pourquoi ce Sprint est-il important ? (définition du Sprint Goal)
- Que peut-on réaliser durant ce Sprint ?
- Comment le travail sera-t-il effectué ?

Le Product Owner présente les éléments prioritaires du Product Backlog, et les développeurs sélectionnent ceux qu'ils s'engagent à réaliser.

D'après le Scrum Guide [33], cette planification garantit que tous les membres de l'équipe partagent une compréhension commune des objectifs et du travail à accomplir.

3.5.3 Daily Scrum

Le Daily Scrum est une réunion quotidienne de courte durée (15 minutes maximum), destinée aux développeurs.

Son objectif est de :

- Suivre l'avancement du travail ;
- Identifier les obstacles éventuels ;
- Ajuster le plan du Sprint si nécessaire.

Chaque membre de l'équipe examine les progrès réalisés depuis la veille et planifie les tâches à accomplir pour la journée.

Selon [34], le Daily Scrum améliore la communication, renforce la collaboration et permet une prise de décision rapide.

3.5.4 Sprint review

La Sprint review se déroule à la fin du Sprint et consiste à présenter l'incrément réalisé aux parties prenantes.

Cette réunion permet :

- De démontrer le travail accompli.
- De recueillir des retours (feedback).
- D'ajuster le Product Backlog en fonction des nouvelles exigences.

Il s'agit d'un moment d'échange collaboratif entre l'équipe Scrum et les parties prenantes.

D'après le Scrum Guide [33], la Sprint review est essentielle pour maximiser la valeur du produit en intégrant les retours utilisateurs de manière continue.

3.5.5 Sprint retrospective

La Sprint Retrospective est le dernier événement du Sprint. Elle permet à l'équipe Scrum de réfléchir sur son fonctionnement et d'identifier des pistes d'amélioration.

Les objectifs principaux sont :

- Analyser ce qui a bien fonctionné.
- Identifier les difficultés rencontrées.

- Proposer des actions concrètes pour améliorer le prochain sprint.

Cet événement favorise l'amélioration continue de l'équipe et des processus.

Selon [34], la rétrospective est un élément clé pour renforcer la performance et la cohésion de l'équipe.

4 Application de la méthodologie Scrum à notre projet

Dans cette section, nous présentons les détails relatifs à l'application de la méthode Scrum dans la réalisation du projet. Tout d'abord, nous décrivons l'organisation de l'équipe selon les rôles Scrum. Nous rappelons ensuite l'objectif de notre solution et présentons le Product Backlog adopté pour mener le projet à terme. La planification des différents sprints est également illustrée. Enfin, nous terminons par une section décrivant la mise en œuvre des différents événements Scrum.

4.1 Présentation de l'équipe Scrum

Dans le cadre de ce projet, l'application de la méthode Scrum a nécessité une adaptation des rôles traditionnels pour correspondre à notre structure de travail. Les responsabilités ont été réparties de la manière suivante [33] :

- **Product Owner (PO) :** Représenté par Kherfallah Dina,Zahraoui Samah,bouguetaya asma et Youcefi Yousra en concertation avec notre encadrant M. Bennaouda Nadjib, ce rôle a consisté à définir la vision du produit, à identifier les besoins des utilisateurs cibles (patients asthmatiques) et à prioriser les éléments du Product Backlog pour maximiser la valeur délivrée à chaque itération.
- **Scrum Master :** Ce rôle a été assumé par M. Bennaouda Nadjib pour garantir le respect du cadre Scrum, faciliter les échanges, organiser les événements (planifications, revues) et lever les éventuels obstacles techniques rencontrés lors de l'implémentation des modèles ou de l'application mobile.
- **Équipe de développement :**En charge de la conception, du développement et des tests. L'intégration des capteurs et le développement des interfaces ont été réalisés par Youcefi Yousra, Zahraoui Samah, Kherfallah Dina et Bouguettaya Asma. L'entraînement des modèles d'intelligence artificielle a été pris en charge par Zahraoui Samah et Youcefi

Yousra, tandis que le développement du backend et la gestion de la base de données ont été assurés par Bouguetaya Asma,zahraoui samah,youcefi yousra et khoudour Asma.

4.2 Objectif du produit

L'objectif principal d'AsthmaGuard est de fournir une solution m-Health préventive et personnalisée pour la gestion de l'asthme. Le produit vise à anticiper les crises à court et long terme en combinant la collecte de constantes physiologiques (via smartwatch), l'analyse des données environnementales (qualité de l'air) et la tenue d'un journal thérapeutique rigoureux axé sur les traitements. L'application doit permettre aux utilisateurs d'agir de manière préventive grâce à des alertes détaillées et une interface d'urgence réactive.

4.3 Élaboration du Product Backlog

Le Product Backlog a été construit en décomposant les fonctionnalités nécessaires à l'atteinte de l'objectif du produit en *User Stories* (US). Chaque histoire a été évaluée en termes d'effort (complexité technique) et classée par priorité (Critique, Haute, Moyenne, Basse) pour définir le Produit Minimum Viable (MVP).

Le tableau 3.2 résume le backlog initial de notre projet :

TABLE 3.2 – Product Backlog d'AsthmaGuard (Ajusté Fibonacci)

ID	User Story	Priorité MVP	Effort
01	En tant que nouvel utilisateur, je veux créer un compte sécurisé afin d'accéder aux services.	Critique	3
02	En tant qu'utilisateur, je veux initialiser mon dossier médical afin de fournir une base au système.	Haute	3
03	En tant qu'utilisateur, je veux coupler ma smartwatch afin de collecter mes constantes (FC, SpO_2...etc).	Haute	5
04	En tant que Système, je veux générer/préparer le dataset synthétique court terme (Modèle 2) afin de l'entraîner et de le comparer avec un autre modèle .	Haute	8
05	En tant qu'utilisateur, je veux recevoir une alerte détaillée et une interface d'urgence afin d'agir préventivement.	Haute	5
06	En tant qu'utilisateur, je peux envoyer des SMS à mes contacts d'urgence.	Haute	3
07	En tant que Système, je veux configurer les règles floues (Modèle 3) afin de traiter les données environnementales.	Haute	5
08	En tant qu'utilisateur, je veux cliquer sur un bouton « Vérifier Air » afin de forcer l'analyse.	Haute	2
09	En tant que Système, je veux générer et préparer le dataset synthétique long terme (Modèle 1) afin de simuler les risques à 15j ensuite comparer avec un autre modèle.	Haute	8

Suite à la page suivante...

Table 3.2 – Suite de la page précédente

ID	User Story	Priorité MVP	Effort
10	En tant qu'utilisateur, je veux appuyer sur un bouton « Prédiction 15j » afin de rafraîchir manuellement mon score de risque.	Haute	2
11	En tant qu'utilisateur, je veux consulter mon score de risque long terme sur mon tableau de bord.	Haute	2
12	En tant qu'utilisateur, je veux gérer mes traitements (faire les fonctions CRUD) afin de tenir à jour mon journal thérapeutique.	Moyenne	5
13	En tant qu'utilisateur, je veux recevoir une alerte pour me rappeler l'heure d'obtention de mes traitement .	Moyenne	3
14	En tant qu'utilisateur, je veux consulter l'interface de qualité de l'air ambiant afin d'adapter mes activités.	Moyenne	2
15	En tant qu'utilisateur, je veux générer un rapport médical complet.	Basse	3
16	En tant qu'utilisateur, je veux accéder à des contenus éducatifs.	Basse	1
17	En tant qu'utilisateur, je veux consulter l'historique de mes crises et prédictions.	Basse	2

4.4 Planification des sprints

Afin d'assurer une livraison incrémentale et continue de valeur, l'effort total estimé a été réparti sur plusieurs itérations (Sprints) d'une durée fixe. La planification s'est concentrée en priorité sur la mise en place de la collecte de données et du suivi des traitements, suivis de l'intégration progressive des modèles prédictifs [32].

- **Sprint 1 : Fondations et Authentification** (Focus sur l'accès et le profil initial)
  Intégration des US : 01 (Création de compte - 3 SP), 02 (Initialisation dossier médical - 3 SP), 12 (CRUD Traitements - 5 SP).
  Total Effort : 11 Story Points.
- **Sprint 2 : Collecte Matérielle et Interface d'Urgence** (Focus sur les constantes et la sécurité immédiate)
  Intégration des US : 03 (Couplage smartwatch - 5 SP), 05 (Alerte détaillée et urgence - 5 SP), 06 (SMS d'urgence - 3 SP).
  Total Effort : 13 Story Points.
- **Sprint 3 : Modélisation Court Terme et prédiction du risque environnemental** (Focus sur le Modèle 2 et l'environnement)
  Intégration des US : 04 (Dataset et Modèle 2 court terme - 8 SP), 07 (Configuration règles floues Modèle 3 - 5 SP).
  Total Effort : 13 Story Points.
- **Sprint 4 : Anticipation Long Terme et Dashboard** (Focus sur le Modèle 1 à 15 jours)
  Intégration des US : 08 (Bouton « Vérifier Air » - 2 SP), 09 (Dataset et Modèle 1 long terme - 8 SP), 10 (Bouton « Prédiction 15j » - 2 SP), 11 (Score de risque sur tableau de bord - 2 SP).
  Total Effort : 14 Story Points.
- **Sprint 5 : Rappels, Suivi et Fonctionnalités Secondaires** (Focus sur l'optimisation et l'expérience utilisateur)
  Intégration des US : 13 (Alerte rappel traitement - 3 SP), 14 (Interface qualité air ambiant - 2 SP), 15 (Rapport médical complet - 3 SP), 16 (Contenus éducatifs - 1 SP), 17 (Historique crises et prédictions - 2 SP).
  Total Effort : 11 Story Points.

4.5 Application des événements de Scrum : exécution, revue et rétrospective

La méthodologie Scrum s'appuie sur des événements réguliers qui ont rythmé le cycle de vie du développement [33] :

- **Planification de Sprint (Sprint Planning) :** Au début de chaque itération, nous avons sélectionné les *User Stories* du Product Backlog à implémenter, en nous basant sur la vélocité estimée et les priorités du product owner.
- **Mêlée quotidienne (Daily Scrum / Points de synchronisation réguliers) :** Sous forme de courtes réunions de suivi de l'avancement, ces points ont permis de faire état du travail accompli, de planifier les tâches de la journée et de soulever rapidement les blocages techniques (ex. : ajustements de l'interface utilisateur).
- **Revue de sprint (Sprint Review) :** À la fin de chaque Sprint, un incrément fonctionnel du produit a été testé. Cela a permis de valider que les objectifs de l'itération étaient atteints.
- **Rétrospective de sprint (Sprint Retrospective) :** Cet événement de clôture a été l'occasion d'analyser nos méthodes de travail. Il nous a permis d'ajuster continuellement notre processus, que ce soit pour optimiser la collaboration ou restructurer certains aspects de l'application pour une meilleure fluidité.

5 Conclusion

En synthèse, ce chapitre a justifié le choix de Scrum comme cadre méthodologique adapté à notre projet de type startup, puis en a présenté les composantes clés (rôles, artefacts et événements). L'application concrète à AsthmaGuard s'est traduite par la définition d'une équipe Scrum, d'un objectif produit clair, d'un Product Backlog de 20 User Stories priorisées et d'une planification sur cinq Sprints couvrant l'ensemble du périmètre fonctionnel. Cette approche itérative et empirique nous garantit flexibilité, réduction des risques et livraison continue de valeur. Le prochain chapitre détaillera la conception technique et l'implémentation des différents modules.

Chapitre 4

Développement et évaluation des modèles IA

1 Introduction

Dans le cadre de la conception du système *AsthmaGuard*, l'IA constitue le moteur central permettant de passer d'une simple surveillance passive à une véritable gestion proactive de la maladie. Après avoir défini l'architecture globale et les mécanismes de collecte de données, ce chapitre se consacre au cœur analytique de notre solution : le développement, l'implémentation et l'évaluation des modèles de prédiction. L'objectif de cette étape est de doter l'application de la capacité d'anticiper les risques respiratoires en exploitant la richesse des données cliniques, physiologiques et environnementales recueillies.

Pour mener à bien cette démarche, ce chapitre s'articule autour de quatre axes majeurs. Dans un premier temps, nous introduirons les concepts théoriques fondamentaux de l'apprentissage automatique (*Machine Learning*) et de la logique floue, indispensables à la compréhension des choix méthodologiques, des processus d'entraînement et des métriques d'évaluation utilisés tout au long de notre étude.

Ensuite, nous détaillerons successivement la conception, l'entraînement et les résultats de nos trois modules d'IA, répondant chacun à une problématique temporelle et clinique spécifique :

- **Le modèle de prédiction du risque à long terme**, basé sur l'algorithme XGBoost,

visant à stratifier et profiler la stabilité clinique globale des patients.

- **Le modèle de prédiction de crise imminente**, exploitant l'architecture temporelle Causal-TFT pour anticiper les dégradations respiratoires à un horizon de 24 heures, démontrant au passage sa nette supériorité face aux approches d'apprentissage classiques.
- **Le système de classification du risque environnemental**, fondé sur un moteur d'inférence floue, offrant une évaluation transparente, interprétable et en temps réel de l'impact de la qualité de l'air sur le patient.

À travers cette démarche structurée, nous mettrons en évidence la rigueur de notre protocole d'évaluation, validant ainsi la viabilité technique, scientifique et médicale de nos modèles avant leur intégration finale au sein de la plateforme.

2 Concepts de base

Dans cette section, nous présentons brièvement quelques concepts fondamentaux liés à cette partie du développement des modèles de prédiction. En particulier, nous faisons un tour d'horizon des notions de base du Machine Learning, telles que les principaux types d'apprentissage, le découpage des datasets, ainsi que les notions d'époque et d'itération. Nous présentons également les principales métriques d'évaluation couramment utilisées dans ce processus d'évaluation. Une section est consacrée aux concepts de logique floue, que nous utiliserons pour l'implémentation du modèle de prédiction des risques environnementaux. Ces concepts sont essentiels et permettront au lecteur de mieux comprendre le processus d'entraînement, d'implémentation des modèles ainsi que les techniques d'évaluation utilisées dans les prochaines parties de ce mémoire.

2.1 Types d'apprentissage

Une machine peut apprendre selon quatre grandes catégories principales, qui varient en fonction du degré et de la nature de la supervision durant l'entraînement. Les principales catégories sont [35, 36, 29, 37] :

- **Apprentissage supervisé :** dans ce premier type, la machine apprend avec l'aide d'un enseignant. Elle apprend principalement à partir de données annotées par des humains. Par exemple, pour une tâche de reconnaissance d'images distinguant un chat d'un chien,

chaque image d'entraînement doit être étiquetée comme étant un chat ou un chien. Ce processus est appelé annotation (ou labellisation). Durant l'entraînement, le réseau reçoit un ensemble d'exemples en entrée, et ses sorties sont comparées aux résultats attendus. L'apprentissage se poursuit jusqu'à ce que le réseau soit capable de produire des sorties correctes.

- **Apprentissage non supervisé :** dans ce type d'apprentissage, la machine apprend de manière autonome, sans supervision. Les données d'entraînement ne sont pas étiquetées, ce qui permet à la machine de regrouper des instances similaires et d'effectuer des tâches de clustering ou de classification. Toutefois, elle n'est pas capable d'attribuer des étiquettes significatives de manière autonome, car elle ne possède pas de connaissance préalable du contenu des données.
- **Apprentissage semi-supervisé :** dans ce cas, les algorithmes utilisent des données partiellement étiquetées, généralement constituées d'une grande quantité de données non étiquetées et d'une petite partie de données étiquetées. Les modèles semi-supervisés présentent deux principaux avantages. Premièrement, l'utilisation d'une faible quantité de données étiquetées permet d'obtenir une précision nettement supérieure à celle des modèles non supervisés. Deuxièmement, ils nécessitent beaucoup moins d'effort et de temps que l'apprentissage entièrement supervisé, car seule une partie des données doit être annotée.
- **Apprentissage par renforcement :** une machine apprend à partir de l'expérience et reçoit des récompenses positives ou négatives en fonction de ses actions. Cette méthode diffère fortement des autres types d'apprentissage. Le système d'apprentissage, appelé agent, observe son environnement, choisit et exécute des actions, puis reçoit des récompenses ou des pénalités. Il doit ensuite apprendre de manière autonome la meilleure stratégie, appelée politique, afin de maximiser la récompense cumulative dans le temps. Une politique définit l'action qu'un agent doit choisir dans une situation donnée.

2.2 Découpage du dataset

Le Machine Learning repose sur les données afin de permettre à une machine d'apprendre à partir de l'expérience et de réaliser des prédictions. Les données doivent être pertinentes par rapport à la tâche considérée, et plus le jeu de données est volumineux, plus le modèle est capable d'apprendre et de généraliser efficacement. Un ensemble de données réduit limite géné-

ralement la capacité du modèle à reconnaître des patterns variés, ce qui entraîne une diminution de la précision des prédictions ainsi qu'une capacité de généralisation plus faible.

Dans les études en machine learning, on utilise généralement au minimum deux ensembles de données, et idéalement trois, afin de garantir une évaluation rigoureuse et une bonne généralisation du modèle [38] :

- L'ensemble d'entraînement (training set) est utilisé pour ajuster les paramètres du modèle et permettre au réseau d'apprendre les relations présentes dans les données.
- L'ensemble de développement, également appelé ensemble de validation (validation set), est utilisé pour évaluer le modèle durant l'entraînement, notamment pour l'ajustement des hyperparamètres et l'amélioration des performances.
- L'ensemble de test (test set) est utilisé pour évaluer le modèle final après l'entraînement, afin de vérifier son efficacité et sa capacité de généralisation sur des données nouvelles et inconnues.

2.3 Itérations et époques

Dans le Machine Learning ML, une époque (epoch) correspond à un passage complet sur l'ensemble du jeu de données d'entraînement durant le processus d'apprentissage. Au cours de chaque époque, le modèle voit une fois chaque exemple d'entraînement. Cependant, le jeu de données est généralement divisé en sous-ensembles plus petits appelés batches. Chaque batch est traité lors d'une itération, durant laquelle le modèle ajuste ses paramètres en fonction des données contenues dans ce lot. Ainsi, une seule époque comprend plusieurs itérations. Le nombre d'itérations par époque dépend de la taille des batches : des batches plus petits entraînent un plus grand nombre d'itérations par époque, tandis que des batches plus grands réduisent ce nombre. Cette distinction permet de mieux contrôler le processus d'entraînement ainsi que la vitesse d'apprentissage [35, 38].

2.4 Métriques d'évaluation

Les métriques d'évaluation jouent un rôle essentiel dans les tâches de Machine Learning et de Deep Learning, car elles permettent d'évaluer les performances, la fiabilité et la capacité de généralisation des modèles développés. Elles sont principalement utilisées durant les phases

d'entraînement et de test afin d'optimiser les modèles et de mesurer leur efficacité sur des données nouvelles. Dans le cadre de notre travail, nous nous focalisons principalement sur les métriques utilisées pour les problèmes de classification.

Avant de présenter ces métriques, il est nécessaire de définir la matrice de confusion, qui constitue la base de l'évaluation en classification supervisée. Il s'agit d'un tableau permettant de comparer les valeurs prédites par le modèle aux valeurs réelles, en distinguant les prédictions correctes et incorrectes.

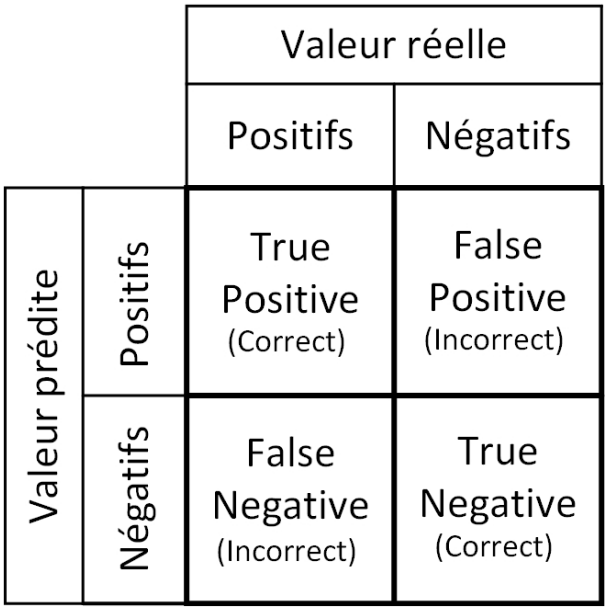


FIGURE 4.1 – Représentation schématique de la matrice de confusion utilisée pour l'évaluation des modèles de classification [39].

À partir de cette matrice, on définit les éléments suivants :

- **TP (True Positives)** : nombre d'instances positives correctement classifiées,
- **TN (True Negatives)** : nombre d'instances négatives correctement classifiées,
- **FP (False Positives)** : nombre d'instances négatives incorrectement classifiées comme positives,
- **FN (False Negatives)** : nombre d'instances positives incorrectement classifiées comme négatives.

À partir de ces notions, les principales métriques de classification sont définies comme suit [40] :

- **Exactitude (Accuracy)** : cette métrique mesure le rapport entre le nombre de prédic-

tions correctes et le nombre total d'échantillons évalués.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{4.1}$$

- **Sensibilité / Rappel (Sensitivity ou Recall)** : elle mesure la capacité du modèle à identifier correctement les instances positives.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{4.2}$$

- **Spécificité (Specificity)** : elle mesure la capacité du modèle à identifier correctement les instances négatives.

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \tag{4.3}$$

- **Précision (Precision)** : cette métrique représente la proportion des instances correctement prédites positives parmi toutes les instances prédites positives.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{4.4}$$

- **F1-Score** : il correspond à la moyenne harmonique entre la précision et le rappel, permettant d'obtenir un compromis entre ces deux métriques.

$$F1\text{-}Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \tag{4.5}$$

2.5 Présentation de la logique floue

Cette section présente un bref aperçu de la logique floue en commençant par sa définition. Elle introduit ensuite les principales notions et concepts associés, nécessaires à la compréhension de cette approche. Enfin, elle se conclut par une illustration du principe d'application de la logique floue à travers un système de commande flou.

2.6 Définition

La logique floue est une approche mathématique permettant de représenter et de traiter l'incertitude, l'imprécision et les connaissances approximatives dans les processus de raisonnement et de prise de décision. Elle a été introduite par le chercheur Lotfi Zadeh en 1965 [41] à travers la théorie des ensembles flous (Fuzzy Sets). Contrairement à la logique classique, où une proposition est soit vraie soit fausse, la logique floue autorise des degrés de vérité compris entre 0 et 1. Cette caractéristique permet de modéliser des concepts vagues du langage humain, tels que *chaud*, *froid*, *rapide* ou *lent*. Par exemple, une température de 28°C peut être considérée à la fois comme *tiède* avec un degré d'appartenance de 0,4 et comme *chaude* avec un degré d'appartenance de 0,6. De même, un véhicule roulant à 60 km/h peut être perçu comme *rapide* dans une zone urbaine, mais comme *lent* sur une autoroute. Ces situations illustrent la capacité de la logique floue à représenter des réalités nuancées qui ne peuvent pas être décrites efficacement par une logique binaire [42, 43].

Grâce à cette flexibilité, la logique floue permet de concevoir des systèmes capables de prendre des décisions dans des environnements où les informations sont imprécises ou incomplètes. Elle est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment le contrôle industriel (machines à laver, climatiseurs ou systèmes de régulation), l'intelligence artificielle, les systèmes experts, la robotique, les réseaux de capteurs sans fil, ainsi que les systèmes d'aide à la décision.

2.7 Notions de base de la logique floue

Dans ce qui suit, nous introduisons les notions fondamentales de la logique floue. Bien que les notions présentées ci-dessous aient été introduites séparément pour faciliter leur compréhension, leurs interactions et leur contribution au processus de raisonnement flou seront mises en évidence dans la section suivante, qui décrit le fonctionnement d'un système de logique floue et son utilisation pour la prise de décision en présence d'incertitude. Les concepts fondamentaux associés sont présentés brièvement ci-après [42, 44, 45, 43] :

- **Valeur nette (Crisp value)** : Il s'agit d'une valeur précise et déterministe, sans ambiguïté, utilisée comme entrée dans un système flou, par exemple 25°C ou 60 km/h.
- **Variable linguistique (Linguistic variable)** : Variable dont les valeurs sont exprimées

sous forme de termes linguistiques plutôt que numériques, tels que la température qui peut être décrite par *chaud*, *tiède* ou *froid*.

- **Univers de discours (Universe of discourse)** : Ensemble de toutes les valeurs possibles d'une variable. Par exemple, pour la température, l'univers de discours peut être compris entre 0°C et 50°C.
- **Fonction d'appartenance (Membership function)** : Fonction qui associe à chaque valeur de l'univers de discours un degré d'appartenance compris entre 0 et 1. Par exemple, 30°C peut appartenir à l'ensemble *chaud* avec un degré de 0,7.
- **Ensemble flou (Fuzzy set)** : Ensemble défini sur un univers de discours dont les éléments appartiennent avec un degré compris entre 0 et 1, permettant de représenter des notions imprécises. Par exemple, dans l'ensemble flou *chaud*, une température de 30°C peut avoir un degré d'appartenance de 0,7, ce qui signifie qu'elle est partiellement considérée comme chaude.
- **Fuzzification (Fuzzification)** : Processus de transformation d'une valeur nette en degrés d'appartenance à des ensembles flous. Par exemple, une température de 28°C peut être représentée par 0,6 pour *tiède* et 0,4 pour *chaud*.
- **Variables d'entrée / sortie (Input/Output variables)** : Les variables d'entrée représentent les données mesurées (par exemple la température), tandis que les variables de sortie représentent les actions du système (par exemple la vitesse du ventilateur).
- **Règles floues (Fuzzy rules)** : Règles de type SI–ALORS permettant de modéliser le raisonnement humain. Par exemple : SI la température est chaude ALORS la vitesse du ventilateur est élevée.
- **Base de règles floues (Fuzzy base)** : Ensemble structuré regroupant toutes les règles floues du système, comme celles utilisées dans un climatiseur intelligent pour réguler automatiquement la température.
- **Moteur d'inférence (Inference engine)** : Mécanisme qui applique les règles floues aux entrées fuzzifiées afin de produire une sortie. Par exemple, il détermine la vitesse du ventilateur à partir de la température et de l'humidité.
- **Opérateurs flous (Fuzzy operators)** : Opérateurs utilisés pour combiner ou modifier les ensembles flous tels que ET, OU et NON. Par exemple, une règle peut être activée si la température est chaude ET l'humidité est élevée.
- **Agrégation (Aggregation)** : Étape consistant à combiner les résultats de plusieurs

règles pour obtenir une sortie globale unique.

- **Défuzzification** : Processus de conversion d'une sortie floue en une valeur numérique précise exploitable. Par exemple, un résultat flou peut être transformé en une vitesse de ventilateur de 1200 tours par minute.

2.8 Structure d'un système de logique floue

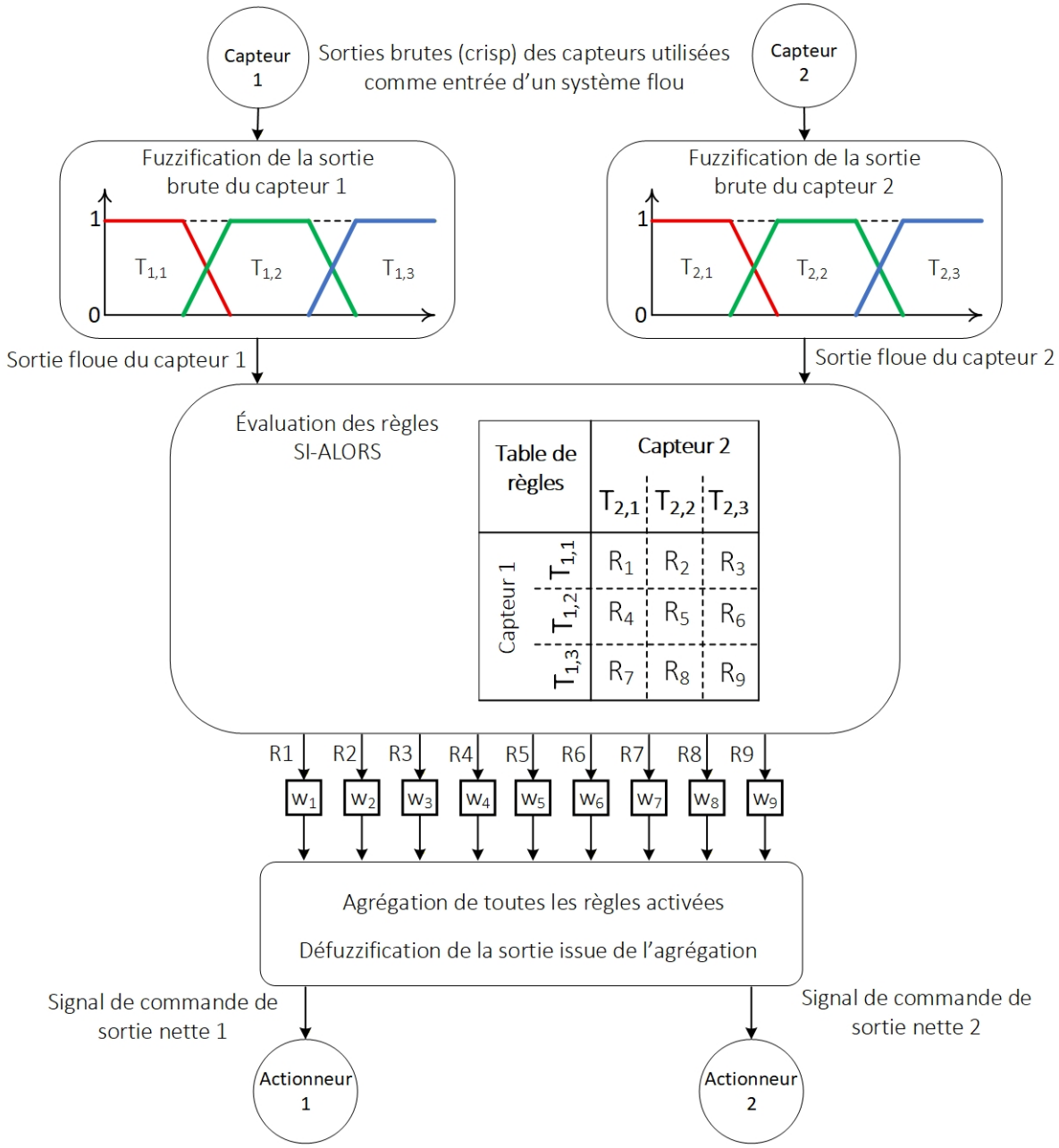


FIGURE 4.2 – Architecture d'un système de commande floue [42].

Dans cette section, nous présentons brièvement le principe d'application de la logique floue en nous basant sur l'architecture d'un système de commande floue. La Figure 4.2 illustre les

différentes étapes de ce processus. Ce dernier peut être résumé comme suit, à travers l'exemple d'un système de contrôle climatique utilisant deux capteurs (température et humidité) et un ventilateur comme actionneur [42] :

- **Acquisition des entrées (crisp)** : collecte des valeurs précises issues des capteurs. Par exemple, une température de $28°C$ et une humidité de 70%.
- **Fuzzification** : transformation des entrées crisp en variables linguistiques floues. La température est décrite par les termes linguistiques (T) *Froid*, *Moyen*, *Chaud*, tandis que l'humidité est décrite par *Faible*, *Moyenne*, *Élevée*.
- **Définition de la base de règles** : construction de règles SI–ALORS reliant les deux entrées à la sortie. Par exemple :
  - Règle 1 : *SI le niveau de PM25 est Très élevé OU le niveau de pollen est Très élevé ALORS le risque est Élevé*.
  - Règle 2 : *SI le niveau de PM25 est Élevé OU le niveau de pollen est Élevé ET que la sévérité clinique est Sévère ALORS le risque est Élevé*.
  - Régle 3 : *SI le niveau de PM25 est Moyen OU le niveau de pollen est Élevé ALORS le risque est Moyen*.
  - Régle 4 : *SI le niveau de PM25 est Bas ET le niveau de pollen est Bas ALORS le risque est Faible*.
  - Régle 5 :*SI le niveau de NO2 est Élevé OU le niveau de O3 est Élevé ET que la sévérité clinique est Sévère ALORS le risque est Élevé*.
  - Régle 6 : *SI la température est Chaude ET que le niveau de PM25 est Moyen OU le niveau de pollen est Moyen ALORS le risque est Moyen*.
  - Régle 7 : *SI l'humidité est Élevée ET que le niveau de pollen est Élevé ALORS le risque est Moyen*.
  - Régle 8 : '*SI la sévérité clinique est Sévère ET que le niveau de PM25 est Moyen OU le niveau de pollen est Moyen ALORS le risque est Élevé*.
- **Combinaison des conditions** : utilisation des opérateurs logiques (ET / OU) pour combiner les degrés d'appartenance des deux capteurs et évaluer les conditions des règles.
- **Évaluation des règles** : calcul du degré d'activation (firing strength, w) de chaque règle. Par exemple, pour les valeurs d'entrée données, la Règle 1 peut être activée à 0.6 et la Règle 2 à 0.4, selon les degrés d'appartenance de la température et de l'humidité.
- **Agrégation des règles activées** : combinaison des sorties des règles activées afin d'ob-

tenir une sortie floue globale représentant la vitesse du ventilateur. Les contributions des deux règles sont fusionnées (par exemple par l'opérateur MAX) pour former une seule sortie floue.

- **Défuzzification** : transformation de la sortie floue en une valeur précise, par exemple une vitesse du ventilateur de 70%.
- **Génération du signal de commande** : envoi du signal final à l'actionneur (ventilateur) afin d'ajuster sa vitesse en fonction des conditions mesurées.

3 Modèle de prédiction du risque à long terme

Dans le cadre du développement de notre système *Asthmagard*, l'anticipation des complications respiratoires est une fonctionnalité critique. Ce module est dédié à la prédiction du risque à long terme d'exacerbation chez les patients, en se basant sur une combinaison de facteurs cliniques, démographiques et environnementaux. L'objectif principal est d'identifier de manière proactive les profils à haut risque afin d'adapter leur suivi thérapeutique et de prévenir les crises sévères.

3.1 Présentation du modèle XGBoost

Pour aborder ce problème de classification binaire, nous avons opté pour le modèle **XGBoost** (*eXtreme Gradient Boosting*) développé par Chen et Guestrin [46]. Il s'agit d'un algorithme d'apprentissage automatique supervisé basé sur un arbre de décision optimisé par boosting de gradient.

Le choix de XGBoost repose sur plusieurs critères scientifiques et pratiques :

- **Performance sur les données structurées :** Il est largement reconnu pour sa supériorité algorithmique sur les données tabulaires hétérogènes (combinant variables cliniques et métriques environnementales).
- **Gestion de la non-linéarité et des interactions :** Le modèle est capable de capturer des relations complexes et des effets d'interaction inter-variables sans nécessiter de transformations préalables lourdes.
- **Régularisation intégrée :** Contrairement aux arbres de décision classiques, XGBoost intègre des pénalités L_1 (Lasso) et L_2 (Ridge) dans sa fonction objectif, limitant ainsi

drastiquement les risques de surapprentissage (*overfitting*).

3.2 Génération et exploitation du dataset synthétique

Afin d'entraîner et de valider notre modèle de manière robuste, un jeu de données synthétique comprenant $N = 25\,000$ échantillons a été généré. Ce dataset simule de manière réaliste les dossiers médicaux de patients asthmatiques en intégrant trois axes majeurs de caractéristiques (*features*), enrichis par des variables d'interactions non linéaires :

1. **Facteurs cliniques :** L'historique des crises sur les 12 derniers mois (X_{crises}), le niveau de sévérité initial établi selon les directives internationales GINA [47] (X_{GINA}), le score issu du test de contrôle de l'asthme (*Asthma Control Test*) [48] (X_{ACT}), et la fréquence d'utilisation des bronchodilatateurs à courte durée d'action sur les 7 derniers jours (X_{broncho}).
2. **Facteurs démographiques :** L'âge, le sexe, et l'Indice de Masse Corporelle (X_{IMC}).
3. **Facteurs environnementaux :** La moyenne d'exposition aux particules polluantes PM2.5 ($X_{\text{pollution}}$) et l'indice de concentration des pollens (X_{pollen}) sur une fenêtre glissante de 7 jours.
4. **Variables d'interaction complexes :** L'effet croisé entre l'historique et la sévérité ($X_{\text{crises}} \times (5 - X_{\text{GINA}})$) ainsi que l'indice de charge environnementale combinée ($X_{\text{pollution}} \times X_{\text{pollen}}/1000$).

Le score de risque global (normalisé théoriquement entre 0 et 1) a été modélisé mathématiquement en attribuant des coefficients spécifiques basés sur la littérature médicale. La formulation sous-jacente suit l'équation 4.6 :

$$\begin{aligned} \text{Risk_Score} = {} & 0.25 \cdot X_{\text{crises}} - 0.20 \cdot (5 - X_{\text{GINA}}) + 0.032 \cdot (25 - X_{\text{ACT}}) \\ & + 0.095 \cdot X_{\text{broncho}} + 0.0038 \cdot X_{\text{pollution}} + 0.0009 \cdot X_{\text{pollen}} \\ & + 0.015 \cdot [X_{\text{crises}} \cdot (5 - X_{\text{GINA}})] + 0.012 \cdot \left[\frac{X_{\text{pollution}} \cdot X_{\text{pollen}}}{1000} \right] + \varepsilon \end{aligned} \tag{4.6}$$

Où $\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, 0.10)$ représente un bruit gaussien modélisant la variabilité biologique intra-patient et les facteurs environnementaux non observés. La variable cible finale ($Y \in \{0,1\}$) est

ensuite binarisée par l'application d'un seuil critique strict fixé à 0.48. La distribution finale du jeu de données se compose de 16 005 cas à haut risque (64.02%) et 8 995 cas stables (35.98%).

3.3 Prétraitement des données

Le pipeline de prétraitement a été conçu pour garantir une évaluation rigoureuse et impartiale. Après l'extraction de la matrice des caractéristiques $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{25000\times 11}$ et du vecteur cible $\mathbf{y}$, les données ont été partitionnées :

- **Ensemble d'entraînement (80% -** 20 000 **lignes) :** Dédié à l'ajustement des poids des arbres de décision.
- **Ensemble de test (20% -** 5 000 **lignes) :** Isolé pour l'évaluation finale de la capacité de généralisation.

Une stratification (`stratify=y`) a été appliquée lors de la division (*split*) afin de préserver rigoureusement la distribution de la classe minoritaire au sein des deux sous-ensembles, éliminant ainsi tout biais d'évaluation lié à un déséquilibre de distribution lors de l'échantillonnage aléatoire.

3.4 Implémentation du modèle

L'architecture logicielle a été implémentée en Python à l'aide du package `xgboost`. Afin de contrer l'impact du déséquilibre des classes, le paramètre d'échelle `scale_pos_weight` a été calculé dynamiquement sur l'ensemble d'entraînement ($\frac{N_{\text{négatifs}}}{N_{\text{positifs}}}$). Le classifieur `XGBClassifier` a été configuré avec un jeu d'hyperparamètres optimisés :

- `n_estimators = 600` : Nombre total d'arbres de régression construit séquentiellement.
- `learning_rate = 0.06` : Facteur d'atténuation (*shrinkage*) appliqué à chaque mise à jour pour stabiliser la convergence.
- `max_depth = 8` : Profondeur maximale de chaque arbre pour capturer les interactions d'ordre élevé.
- `subsample = 0.88` et `colsample_bytree = 0.88` : Taux de sous-échantillonnage des lignes et des caractéristiques à chaque itération.

Une fois l'apprentissage stabilisé, le modèle final is sérialisé. Parallèlement, un interpréteur basé sur la théorie des jeux coopératifs SHAP (*SHapley Additive exPlanations*) [49] a été

instancié via l'objet `TreeExplainer` pour extraire la contribution exacte de chaque variable.

3.5 Résultats et discussion

L'évaluation de la performance prédictive s'est appuyée sur la métrique de l'aire sous la courbe ROC (*AUC*) ainsi que sur l'*Accuracy*. Lors de la phase de test, le modèle XGBoost a été complet à un modèle de forêt aléatoire (*Random Forest*). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – Comparaison des performances pour la prédiction du risque à long terme

Modèle	**AUC**	**Accuracy**	**Précision**	**Rappel**	**F1-Score**
Random Forest	0.9791	0.9188	0.94	0.93	0.94
XGBoost	**0.9812**	**0.9266**	**0.94**	**0.94**	**0.94**

Le modèle XGBoost surpasse la forêt aléatoire avec une *AUC* de **0.9812** et une exactitude globale de **92.66%**. Pour visualiser cette capacité de discrimination, les courbes ROC de chaque classifieur ont été superposées sur la figure 4.3. L'analyse graphique confirme la supériorité d'XGBoost, dont la courbe s'approche au plus près de la borne supérieure gauche, attestant d'un excellent compromis entre la sensibilité et la spécificité.

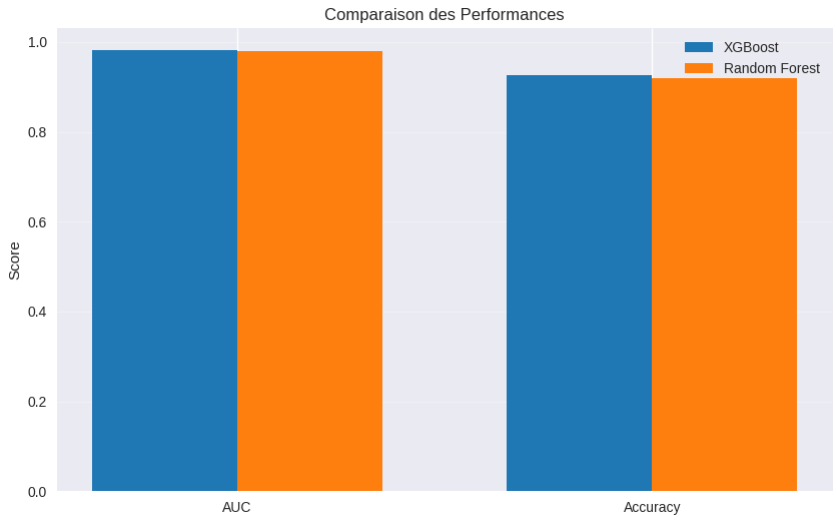


FIGURE 4.3 – Comparaison des courbes ROC entre Random Forest et XGBoost (Risque à long terme)

L'analyse de l'importance des caractéristiques par le calcul du gain SHAP démontre que les facteurs cliniques historiques (fréquence des crises passées et score ACT) ainsi que l'utilisation des bronchodilatateurs constituent les vecteurs prédictifs dominants. L'intégration conjointe de XGBoost et du module SHAP apporte une forte valeur ajoutée au système *Asthmagard*.

Contrairement aux modèles de type “boîte noire” (*black-box*), cette approche permet d’obtenir une explication locale pour chaque prédiction délivrée au patient. Par exemple, pour une alerte donnée, le médecin peut identifier immédiatement l’origine du risque accru (facteurs comportementaux ou environnementaux extérieurs). Cette transparence renforce la confiance des utilisateurs et facilite une prise de décision clinique personnalisée et immédiate.

4 Modèle de prédiction de crise imminente

Alors que l’évaluation du risque à long terme permet d’établir une cartographie clinique globale et stable du patient, la gestion quotidienne et proactive de l’asthme exige une réactivité à très court terme. Ce module est dédié au développement d’un modèle prédictif capable de détecter les signaux physiologiques et environnementaux avant-coureurs d’une dégradation respiratoire. L’objectif est d’anticiper la survenue d’une crise d’asthme plusieurs heures avant l’apparition des premiers symptômes cliniques, offrant ainsi au patient un horizon décisionnel suffisant pour adapter son comportement ou son traitement de secours.

4.1 Présentation du modèle Causal-TFT

Alors que la prédiction à long terme s’attache à dresser un profil de risque statique et global, la gestion au quotidien de l’asthme nécessite une approche dynamique capable de détecter les signaux précurseurs d’une crise à très court terme. Pour ce faire, ce module introduit une architecture inspirée du **Causal-TFT** (*Causal Temporal Fusion Transformer*), un modèle d’apprentissage profond adapté aux séries temporelles multivariées.

Le modèle repose sur l’intégration de mécanismes d’attention (*Self-Attention*) capables de capturer des dépendances temporelles à long et court terme, tout en isolant des structures causales et cumulatives. En pratique, l’architecture logicielle modélise l’historique séquentiel récent à l’aide de décalages temporels (*Lags*), permettant à un algorithme de gradient boosting d’agir comme un approximateur de l’attention séquentielle du TFT, optimisant ainsi la détection des ruptures de tendance dans les constantes physiologiques du patient.

4.2 Génération et exploitation du dataset synthétique

Pour valider cette approche chronologique, nous avons généré un jeu de données multi-patients hautement granulaire composé de $N_{\text{patients}} = 5$ individus suivis chacun sur un horizon de 1 000 heures (soit 5 000 points de données temporelles au total). Ce dataset simule les flux de données continus issus de capteurs connectés (smartwatches) et de stations environnementales :

- **Signaux physiologiques continus :** La fréquence cardiaque au repos ($FC_{\text{repos}} \sim \mathcal{N}(75, 12)$ bpm) et la saturation en oxygène ($SpO_2 \sim \mathcal{N}(95.5, 2)$ %).
- **Activité physique :** Le volume de pas ou de mouvements, modélisé par une distribution binomiale négative (NB($n = 5, p = 0.01$)) restreinte à l'intervalle $[0, 2000]$.
- **Exposition environnementale horaire :** La concentration en particules fines PM2.5, modélisée par une distribution Gamma (Gamma(shape $= 2$, scale $= 25$)) bornée entre 10 et 150 $\mu g/m^3$.

Le déclenchement d'une crise d'asthme étant le résultat d'une accumulation de contraintes temporelles, un score de causalité cumulative a été défini sur une fenêtre glissante de 6 heures (Équation 4.7) :

$$\text{Score_Causal}_t = 0.50 \cdot \mathbb{I}(\overline{SpO_2}_{[t-6,t]} < 95.0) + 0.35 \cdot \mathbb{I}(\overline{PM2.5}_{[t-6,t]} > 50) + 0.15 \cdot \mathbb{I}(FC_{\text{repos},t} > 85) \tag{4.7}$$

Où $\mathbb{I}$ représente la fonction indicatrice et $\overline{X}$ désigne la moyenne mobile de la variable sur les 6 dernières heures. L'état de crise imminente ($Y_t \in \{0, 1\}$) est projeté à un horizon prédictif de **+12 heures** si ce score dépasse un seuil de sensibilité fixé à 0.42.

4.3 Prétraitement des données et reconstruction séquentielle

Afin de répliquer le mécanisme de mémoire temporelle du TFT sans subir la lourdeur d'un réseau de neurones récurrent complet, le pipeline de prétraitement reconstruit explicitement l'historique séquentiel sous forme de caractéristiques causales décalées (*Time-lags*). Pour chaque pas de temps t, le modèle intègre les valeurs passées aux horizons $t-1, t-2, t-3, t-4$ et $t-6$ pour les trois variables critiques : SpO_2, $PM2.5$ et FC_{repos}.

Ce processus étend l'espace des caractéristiques initiales à une matrice élargie de 20 di-

mensions causales. Après suppression des lignes contenant des valeurs manquantes dues aux décalages initiaux, la série temporelle est segmentée chronologiquement sans mélange aléatoire (*Time-series Split*) :

- **Train set (80%) :** Les premières 800 heures du patient pour l'apprentissage.
- **Test set (20%) :** Les 200 dernières heures, conservées strictement pour simuler un suivi prospectif en temps réel.

4.4 Implémentation du modèle

L'architecture prédictive a été codée en Python. Pour contrebalancer le fort déséquilibre de la variable cible, un calcul du facteur d'échelle a été intégré à l'aide du ratio d'équilibrage `scale_pos_weight` appliqué directement sur le classifieur `XGBClassifier`. Le modèle **Causal-TFT (XGBoost fenêtré)** a été paramétré avec un taux d'apprentissage `learning_rate = 0.05`, une profondeur `max_depth = 5` et `n_estimators = 150`. À des fins de comparaison, un modèle de référence **Random Forest Standard** a été entraîné en parallèle. Ce dernier utilise une approche classique "instantanée", configurée pour prédire l'état à $t + 12h$ en exploitant uniquement les 5 caractéristiques brutes relevées à l'instant t précis (`class_weight='balanced'`).

4.5 Résultats et discussion

L'évaluation sur l'ensemble de test a mis en évidence l'apport fondamental de la prise en compte de l'historique séquentiel. Les métriques de performances sont synthétisées dans le tableau 4.2.

TABLE 4.2 – Performances comparées pour la prédiction de crise imminente à horizon +12h

Modèle	Accuracy	Précision (PPV)	Rappel (Sensibilité)	F1-Score
Random Forest (Standard)	0.9091	0.0000	0.0000	0.0000
Causal-TFT (Fenêtré)	**0.9301**	**0.6842**	**0.7222**	**0.7027**

Les résultats démontrent l'échec critique du modèle *Random Forest Standard*. En ne se basant que sur l'instant t, il obtient un score de rappel de 0.0000, signifiant son incapacité totale à capturer la signature d'une crise d'asthme à venir. L'analyse instantanée ne permet pas de détecter le risque, car la baisse de la SpO_2 ou l'augmentation des PM2.5 n'ont d'effet pathologique que lorsqu'elles s'inscrivent dans la durée.

À l'inverse, l'approche **Causal-TFT** affiche des performances remarquables avec une exactitude de **93.01%** et une sensibilité (Rappel) de **72.22%**. Afin d'illustrer concrètement ce comportement, la figure 4.4 superpose les prédictions des deux modèles face aux crises réelles observées sur la fenêtre temporelle de test. On y observe graphiquement l'absence de réaction du modèle Random Forest, tandis que le modèle Causal-TFT anticipe fidèlement les périodes d'exacerbation à l'horizon fixé.

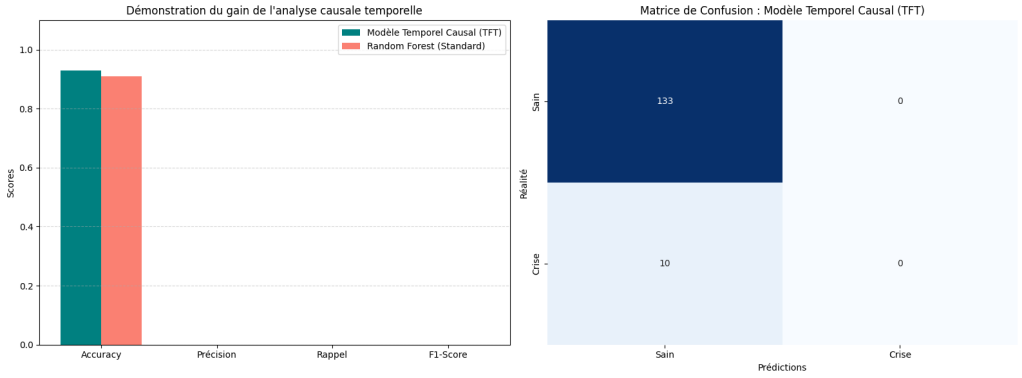


FIGURE 4.4 – Visualisation temporelle des prédictions à horizon +12h : Crises réelles vs Causal-TFT vs Random Forest

En intégrant les *lags* de 1 à 6 heures, le modèle parvient à reconstituer la trajectoire descendante de la fonction respiratoire et l'accumulation des polluants. Pour l'application *Asthmagard*, ce module offre la possibilité d'émettre des alertes médicales précises 12 heures avant l'apparition des premiers symptômes cliniques, laissant le temps au patient d'ajuster son traitement de crise ou de modifier son comportement environnemental.

5 Modèle de classification du risque environnemental

Le troisième modèle du système AsthmaGuard est dédié à l'évaluation en temps réel du risque lié aux facteurs environnementaux extérieurs. Contrairement aux deux premiers modules reposant sur l'apprentissage automatique supervisé (XGBoost et Causal-TFT), ce module exploite un **Système à Logique Floue (SLF)** basé sur les concepts fondateurs de la théorie des ensembles flous [50].

Ce choix technologique est justifié par plusieurs critères stratégiques :

- **Gestion de l'incertitude :** Les variations des données environnementales et leur impact sur la santé humaine comportent des frontières floues qui s'accommodent parfaitement d'une modélisation par ensembles flous.

- **Interprétabilité médicale absolue :** Le comportement du modèle est entièrement régi par des règles explicites, facilement auditables et validées par des experts cliniques [51].
- **Indépendance vis-à-vis des données réelles :** Le système ne nécessite aucune phase d'entraînement préalable sur un historique de données étiquetées.
- **Légèreté algorithmique :** L'exécution du modèle est hautement optimisée, le rendant parfaitement adapté pour un déploiement sur des architectures cloud à faible latence ou des systèmes embarqués.

5.1 Conception du système à logique floue

Le système est conçu selon un modèle d'inférence floue de type **Mamdani**. Il traite sept variables d'entrée (antécédents) représentatives de la qualité de l'air, des conditions météorologiques capturées par API environnementales, et du profil clinique de l'utilisateur. Il génère une variable unique de sortie (conséquent) traduisant l'indice de risque global.

Le tableau 4.3 synthétise l'univers de discours défini pour chaque variable du système :

TABLE 4.3 – Synthèse de l'univers de discours des variables du système flou

Nature de la variable	**Nom de la variable**	**Univers de discours**	**Unité / Échelle**
Antécédent (Entrée)	`pm25`	$[0,250]$	$\mu g/m^3$
Antécédent (Entrée)	`no2`	$[0,120]$	$\mu g/m^3$
Antécédent (Entrée)	`o3`	$[0,180]$	$\mu g/m^3$
Antécédent (Entrée)	`pollen`	$[0,800]$	grains/m^3
Antécédent (Entrée)	`temperature`	$[-5,42]$	°C
Antécédent (Entrée)	`humidite`	$[10,100]$	%
Antécédent (Entrée)	`severite`	$[0,2]$	Échelle clinique (*Mild, Moderate, Severe*)
Conséquent (Sortie)	`risque`	$[0,100]$	Échelle de risque normalisée

5.2 Fonctions d'appartenance et règles floues

Pour transformer les mesures physiques en concepts linguistiques (fuzzification), nous utilisons des **fonctions d'appartenance triangulaires** (trimf). Mathématiquement, pour une variable x et un triplet de paramètres $[a,b,c]$ délimitant la base et le sommet du triangle, la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ est définie par la relation 4.8 :

$$\mu_A(x) = \text{trimf}(x;a,b,c) = \max\left(0, \min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right)\right) \tag{4.8}$$

Configuration des partitions floues : Les triplets de paramètres $[a,b,c]$ retenus pour caractériser l'ensemble des variables linguistiques ont été calibrés d'après les seuils de sécurité sanitaires internationaux [52] et sont détaillés ci-dessous :

- **Particules fines** (`pm25`) **:** Bas $[0,0,35]$, Moyen $[25,50,80]$, Élevé $[65,130,250]$.
- **Dioxyde d'azote** (`no2`) **:** Bas $[0,0,30]$, Moyen $[25,45,70]$, Élevé $[60,90,120]$.
- **Ozone** (`o3`) **:** Bas $[0,0,55]$, Moyen $[45,75,110]$, Élevé $[100,140,180]$.
- **Pollens** (`pollen`) **:** Bas $[0,0,150]$, Moyen $[130,300,500]$, Élevé $[450,650,800]$.
- **Température** (`temperature`) **:** Confort $[10,22,28]$, Chaud $[27,34,42]$.
- **Humidité** (`humidite`) **:** Confort $[30,55,70]$, Élevée $[65,82,100]$.
- **Sévérité du patient** (`severite`) **:** *Mild* $[0,0,0.6]$, *Moderate* $[0.4,1,1.6]$, *Severe* $[1.4,2,2]$.
- **Risque environnemental** (`risque`) **:** Faible $[0,20,45]$, Moyen $[40,65,82]$, Élevé $[78,90,100]$.

Base de règles d'inférence : La base de connaissances du modèle articule les règles métiers fondamentales du projet AsthmaGuard, complétées par des règles de granularité croisée pour capturer les co-facteurs météo-sensibles :

R1 : SI (`pm25` est *eleve*) ET (`severite` est *severe*) ALORS (`risque` est *eleve*).

R2 : SI (`pm25` est *moyen*) OU (`pollen` est *eleve*) ALORS (`risque` est *moyen*).

R3 : SI (`pm25` est *bas*) ET (`pollen` est *bas*) ALORS (`risque` est *faible*).

R4 : SI (`pollen` est *eleve*) ALORS (`risque` est *moyen*).

R5 : SI (`pollen` est *eleve*) ET (`severite` est *moderate*) ALORS (`risque` est *moyen*).

R6 : SI (`no2` est *eleve* OU `o3` est *eleve*) ET (`severite` est *severe*) ALORS (`risque` est *eleve*).

R7 : SI (`temperature` est *chaud*) ET (`pm25` est *moyen* OU `pollen` est *moyen*) ALORS

(`risque` est *moyen*).

R8 : SI (`humidite` est *elevee*) ET (`pm25` est *moyen*) ALORS (`risque` est *moyen*).

R9 : SI (`severite` est *severe*) ET (`pm25` est *moyen* OU `pollen` est *moyen*) ALORS (`risque` est *eleve*).

5.3 Implémentation

L'implémentation logicielle s'appuie sur la bibliothèque Python `scikit-fuzzy` [53] combinée avec le framework `FastAPI` pour exposer le modèle sous forme de microservice web d'inférence.

Inférence et Défuzzification : Après l'agrégation et l'activation des règles par l'opérateur de l'implication de Mamdani (opérateur minimum), l'ensemble flou résultant pour la variable `risque` est converti en une valeur numérique nette (score de 0 à 100) par la méthode de **défuzzification par centroïde**. Cette méthode calcule le centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance agrégée. En cas d'anomalie ou d'absence de données d'entrée, une valeur de repli sécurisée fixée à 40.0 est appliquée par un bloc d'exception.

Logique de décision et Seuils métiers : Le score net calculé fait l'objet d'une segmentation stricte afin de déterminer le niveau d'alerte visuel et la recommandation sanitaire poussée à l'utilisateur final :

$$\begin{aligned} x_{\text{risque}} \geq 70 &\implies \text{Niveau : Élevé (Rouge)} \rightarrow \text{“Évitez les efforts extérieurs et portez un masque”} \\ 45 \leq x_{\text{risque}} < 70 &\implies \text{Niveau : Moyen (Orange)} \rightarrow \text{“Soyez prudent et limitez les activités extérieures”} \\ x_{\text{risque}} < 45 &\implies \text{Niveau : Faible (Vert)} \rightarrow \text{“Conditions acceptables pour une activité extérieure”} \end{aligned} \tag{4.9}$$

De plus, le module calcule de manière déterministe un Indice de Qualité de l'Air (IQA) corrélé, normé sur une plage de 0 à 300, selon la formule 4.10 :

$$\text{IQA} = \lfloor \text{score}_{\text{risque}} \times 3 \rfloor \tag{4.10}$$

5.4 Résultats et discussion

La validation fonctionnelle du module a été opérée en intégrant le moteur flou au sein de l'architecture d'API globale de la plateforme AsthmaGuard, matérialisée par l'interface OpenAPI (`/predict/environmental`).

Analyse d'un cas d'inférence nominal : Les tests d'intégration démontrent la pertinence des interactions de variables configurées. Prenons l'exemple d'un scénario de test concret soumis à l'API :

- **Vecteur d'entrée :** Un patient présentant une sévérité asthmatique clinique modérée (`"Moderate"`), exposé à de faibles concentrations de polluants particulaires et gazeux (`pm25` : 15.0, `no2` : 20.0, `o3` : 30.0), sous un climat tempéré et confortable (`temperature` : 22.0, `humidite` : 50.0), mais subissant une forte charge allergénique atmosphérique (`pollen` : 600.0).
- **Comportement du moteur flou :** La valeur de pollen égale à 600 active fortement l'ensemble flou `pollen['eleve']`. Cette activation déclenche simultanément les règles **R2**, **R4** et **R5**.
- **Résultat généré par l'API :** La défuzzification par centroïde produit un score précis de **62.2**. Ce score se positionne dans la plage intermédiaire $[45, 70[$, basculant automatiquement le système au niveau de risque **"Moyen"** associé à la couleur **"Orange"** et calculant un indice de qualité de l'air de **186**. La recommandation dynamique générée, *"Soyez prudent et limitez les activités extérieures"*, correspond fidèlement aux directives cliniques attendues face à un pic pollinique pour ce profil de patient.

Ce comportement confirme que le modèle ne masque pas les risques sectoriels (comme un pic de pollen isolé) derrière de bonnes moyennes globales de pollution gazeuse, ce qui s'avère crucial pour la sécurité des patients asthmatiques. Le système flou remplit ainsi pleinement ses objectifs de réactivité en temps réel, de transparence algorithmique et de robustesse opérationnelle.

6 Conclusion

Ce chapitre a permis de détailler le cœur analytique et prédictif du système *AsthmaGuard*, en établissant dans un premier temps les fondements théoriques de l'apprentissage automatique

et de la logique floue, pour ensuite les appliquer à des problématiques cliniques et environnementales concrètes.

La conception de notre intelligence artificielle s'est structurée autour de trois modèles hautement spécialisés et complémentaires, répondant chacun à une temporalité distincte de la maladie :

- **La stratification du risque à long terme**, propulsée par le modèle XGBoost, a prouvé sa forte capacité de généralisation face aux modèles classiques. En capturant les interactions complexes entre l'historique clinique et l'exposition environnementale, il permet de profiler les patients à haut risque avec une grande précision.
- **L'anticipation des crises imminentes**, abordée sous l'angle séquentiel avec l'approche Causal-TFT, a démontré l'importance vitale de la mémoire temporelle. En surclassant de manière décisive l'analyse instantanée standard, ce modèle réussit à extraire les signaux physiologiques faibles pour offrir une fenêtre de prévention cruciale de 12 heures.
- **L'évaluation en temps réel du risque environnemental**, modélisée par un système d'inférence floue, apporte une couche de sécurité interprétable et instantanée. En s'affranchissant de l'opacité des modèles d'apprentissage profond, ce module traduit des conditions atmosphériques complexes en recommandations sanitaires immédiates et transparentes.

En combinant la robustesse du gradient boosting, l'analyse causale des séries temporelles et l'explicabilité de la logique floue, nous avons abouti à une architecture décisionnelle complète. Ces modèles permettent au système *AsthmaGuard* de dépasser le stade de la simple surveillance passive pour devenir un véritable outil proactif d'aide à la décision.

Le prochain chapitre sera consacré à l'intégration concrète de cette intelligence artificielle au sein d'une architecture logicielle complète. Nous y aborderons la mise en place des microservices ainsi que le développement de l'interface mobile cross-platform, étape indispensable pour mettre cette puissance analytique directement entre les mains des patients de manière ergonomique et accessible.

Chapitre 5

Implémentation de la solution AsthmaGuard

1 Introduction

L'implémentation de la solution **AsthmaGuard** repose sur une architecture logicielle à trois niveaux, capable de gérer à la fois des données relationnelles classiques (profils patients, dossiers médicaux, traitements) et des flux continus de données temporelles provenant d'une montre connectée (fréquence cardiaque, SpO2, HRV) ainsi que d'API environnementales (qualité de l'air, pollens, météo). Ce chapitre présente la conception et le déploiement technique du système. Nous y décrivons l'architecture globale, la répartition des modules (application mobile Flutter, backend Laravel, serveur d'inférence FastAPI), le schéma relationnel de la base de données, ainsi que les API REST qui assurent la communication entre l'application mobile et les modèles d'IA effectivement développés dans ce travail : **XGBoost** pour la prédiction du risque à long terme et un **système à logique floue** pour l'évaluation du risque environnemental et le modèle de prédiction de crise imminente basé sur Causal-TFT.

2 Architecture générale de la solution AsthmaGuard

Pour répondre aux exigences de réactivité, de scalabilité et de sécurité indispensables à une application médicale, la solution AsthmaGuard s'appuie sur une répartition claire des responsabilités. Cette section détaille l'agencement structurel de notre écosystème, en mettant en lumière l'organisation de ses composants, la spécialisation de ses modules applicatifs ainsi que la cinématique globale des flux de données.

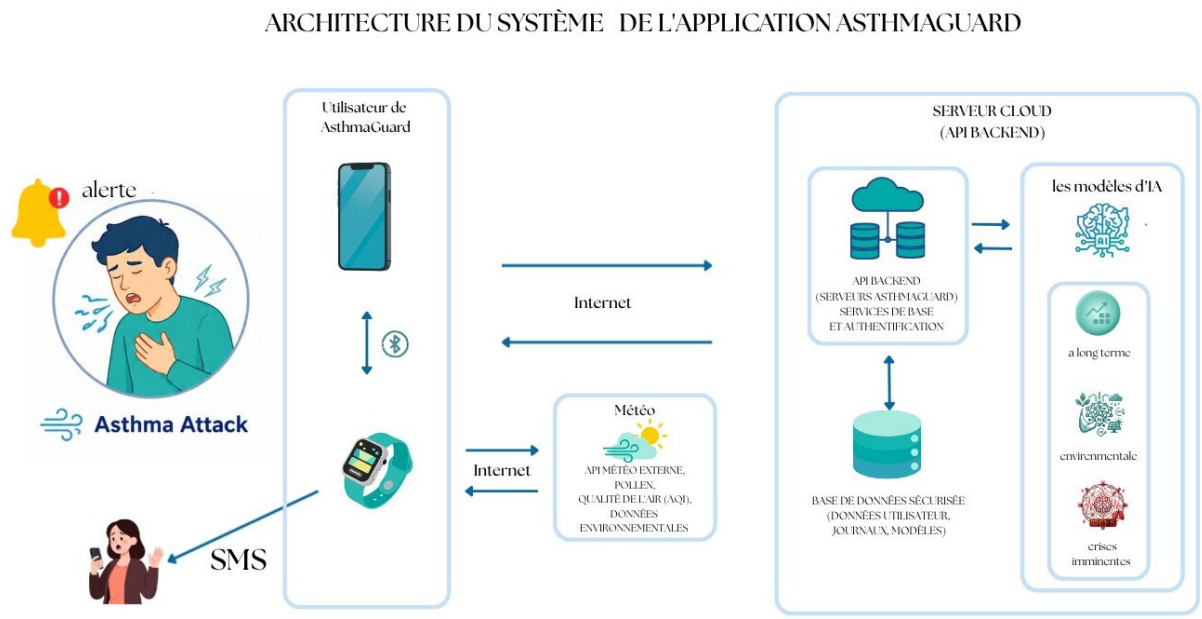


FIGURE 5.1 – Architecture générale de la solution AsthmaGuard.

2.1 Vue d'ensemble de la solution

La solution AsthmaGuard repose sur une architecture moderne à trois niveaux (*3-tiers*) :

1. **Client (Frontend) :** Représenté par une application mobile grand public et une montre connectée (*smartwatch*). La montre collecte les données physiologiques de manière passive, tandis que l'application mobile offre une interface utilisateur graphique pour la visualisation et la gestion quotidienne de la pathologie.
2. **Backend REST :** Développé avec le framework **Laravel**, il sert de passerelle centrale, gérant la logique métier (*Business Logic*), l'authentification sécurisée, le stockage relationnel et la planification des tâches.
3. **Serveur d'IA (Serveur IA) :** Propulsé par **FastAPI** (Python), ce serveur isole et exécute de manière performante nos trois modèles prédictifs (XGBoost, Causal-TFT, et le Classifieur à logique floue).

2.2 Description des modéles

Le système est découpé en quatre micro-modéles applicatifs interconnectés :

- **Modéle utilisateur & Profil clinique :** Gère l'authentification, la sécurisation des profils de santé, l'indice de masse corporelle (X_{IMC}) et les contacts d'urgence.
- **Modéle collecte IoT & Environnement :** Récupère les métriques issues de la montre connectée (fréquence cardiaque, SpO_2, sommeil) et interroge périodiquement les API environnementales (météo, indices de pollution et de pollens).
- **Modéle inférence & IA :** Transmet les données collectées au serveur Python pour évaluer le risque à long terme et les alertes de crise imminente.
- **Modéle notification & Suivi :** Déclenche des notifications *push* d'urgence vers le smartphone du patient et ses contacts en cas de risque critique, et gère l'agenda de prise des traitements et permet le partage des informations de santé avec le médecin .

2.3 Flux global

le flux de base du système se déroule comme suite :

1. La montre connectée synchronise en arrière-plan les données physiologiques (ex. fréquence cardiaque, SpO_2) avec l'application mobile.

2. L'application mobile pousse ces métriques vers le backend Laravel, qui y adjoint les données du profil médical et les données environnementales locales.
3. Un planificateur de tâches (*Task Scheduler / Cron Job*) appelle à intervalles réguliers les services du serveur FastAPI en lui transmettant un vecteur de caractéristiques structuré.
4. Le serveur FastAPI retourne les scores de risques calculés. Si un seuil critique est dépassé, le backend Laravel génère immédiatement une alerte *push* synchrone.

3 Développement de l'application mobile

L'application mobile constitue le point d'ancrage de l'utilisateur avec la solution Asthma-Guard. Cette section aborde les mécanismes techniques mis en œuvre pour assurer la collecte transparente des données de santé, l'intégration des facteurs environnementaux exogènes, l'ergonomie de l'interface à travers son flux de navigation, ainsi que le choix du framework de développement.

3.1 Intégration et synchronisation avec la smartwatch

L'application mobile s'appuie sur les API natives de services de santé centralisés (Health Connect sur Android et Apple Health sur iOS) pour s'abstraire des protocoles matériels propriétaires des différents fabricants. Cette architecture logicielle permet de collecter de manière totalement passive et non invasive les constantes physiologiques de l'utilisateur, préalablement synchronisées par la montre connectée. Les métriques de santé spécifiquement le nombre de pas, la fréquence cardiaque et la saturation en oxygène (SpO2)...etc, sont interrogées localement par intervalles temporels définis. Elles sont ensuite agrégées et structurées avant leur transmission vers le serveur, garantissant ainsi une interopérabilité matérielle maximale tout en minimisant la consommation énergétique et les requêtes réseau de l'appareil mobile.

3.2 API externes utilisées

Afin d'enrichir le contexte médical du patient avec des variables exogènes indispensables aux prédictions, le système s'appuie sur deux catégories d'API tierces :

- **API Météorologique :** Récupération en temps réel des conditions climatiques locales (température, humidité relative, pression atmosphérique, vitesse du vent).

- **API de Qualité de l'Air & Environnement :** Fournit les concentrations en temps réel des particules fines ($PM_{2.5}$ et PM_{10}) ainsi que l'indice de charge allergénique (niveaux de pollens de graminées, d'arbres, etc.).

3.3 Diagramme de flux de navigation

Les diagrammes de flux de navigation illustrent les étapes suivies par l'utilisateur pour atteindre des objectifs précis au sein de l'application, en représentant les transitions entre les écrans ainsi que les interactions possibles. Nous présentons ci-dessous le diagramme de flux relatif à l'acteur principal de la plateforme *Asthma Guard*, en mettant l'accent sur les fonctionnalités clés telles que l'authentification, le suivi médical, les prédictions de risque et le déclenchement des alertes d'urgence.

3.4 Technologies et frameworks utilisés

L'application mobile est développée avec le framework open-source **Flutter** (langage Dart). Ce choix se justifie par sa capacité à compiler nativement des applications multiplateformes (Android et iOS) à partir d'une base de code unique, garantissant des performances graphiques élevées et une intégration native simplifiée avec les capteurs Bluetooth.

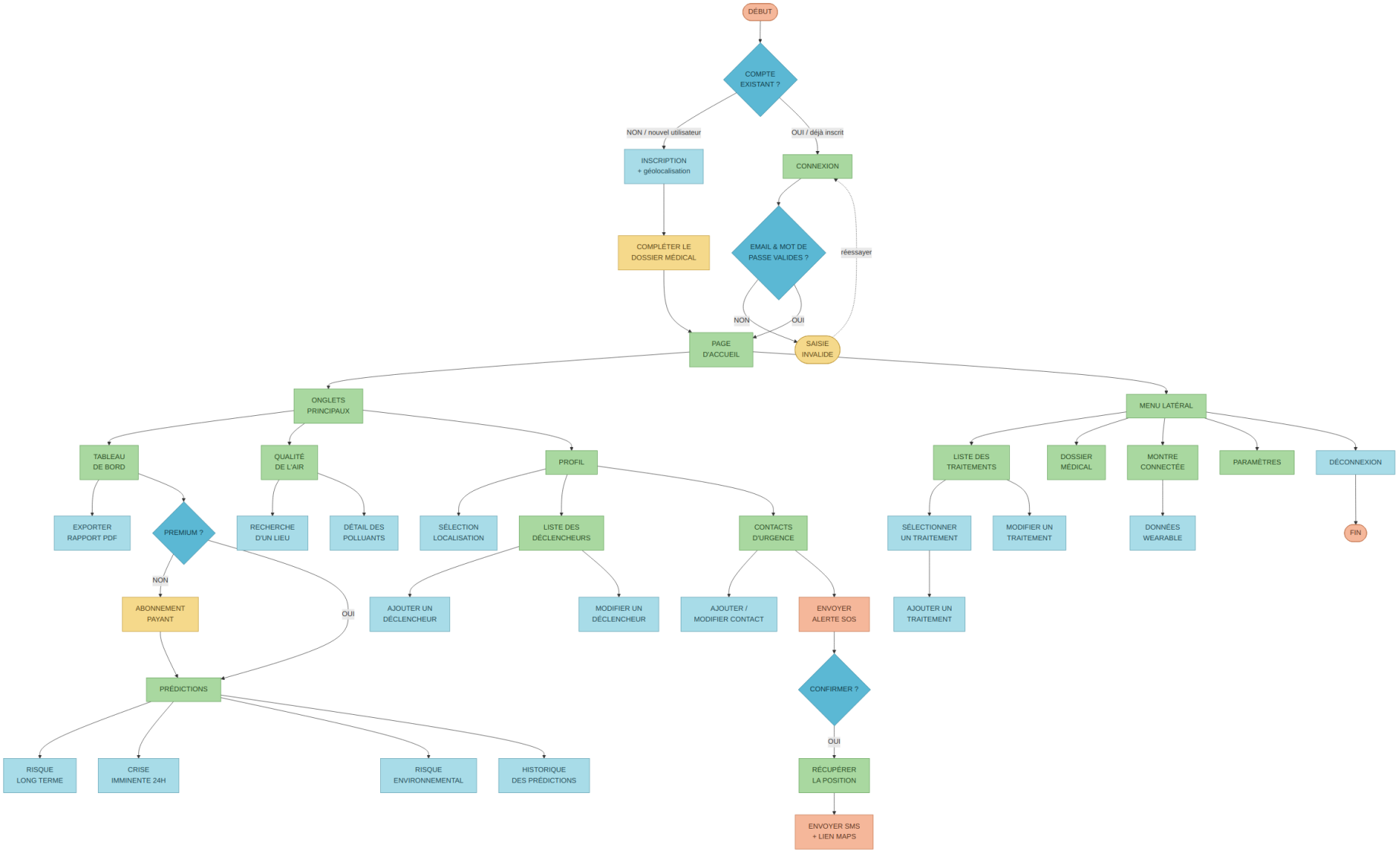


FIGURE 5.2 – Diagramme de flux de navigation de l'application Asthma Guard.

4 Développement du backend

Le backend joue le rôle de chef d'orchestre du système d'information d'AsthmaGuard, en assurant la liaison entre le stockage des données, l'application mobile et le serveur d'IA. Nous décrivons ci-après la structure des points de terminaison mis à disposition, les protocoles d'échange mis en place pour l'inférence des modèles IA, ainsi que la pile technologique retenue pour ce cœur de réseau.

4.1 API REST développées

Le backend expose une API REST standardisée, sécurisée par des jetons d'accès (*JWT Tokens / Laravel Sanctum*). L'architecture logicielle respecte le modèle MVC (*Modèle-Vue-Contrôleur*). Parmi les points de terminaison (*endpoints*) clés développés, nous comptons :

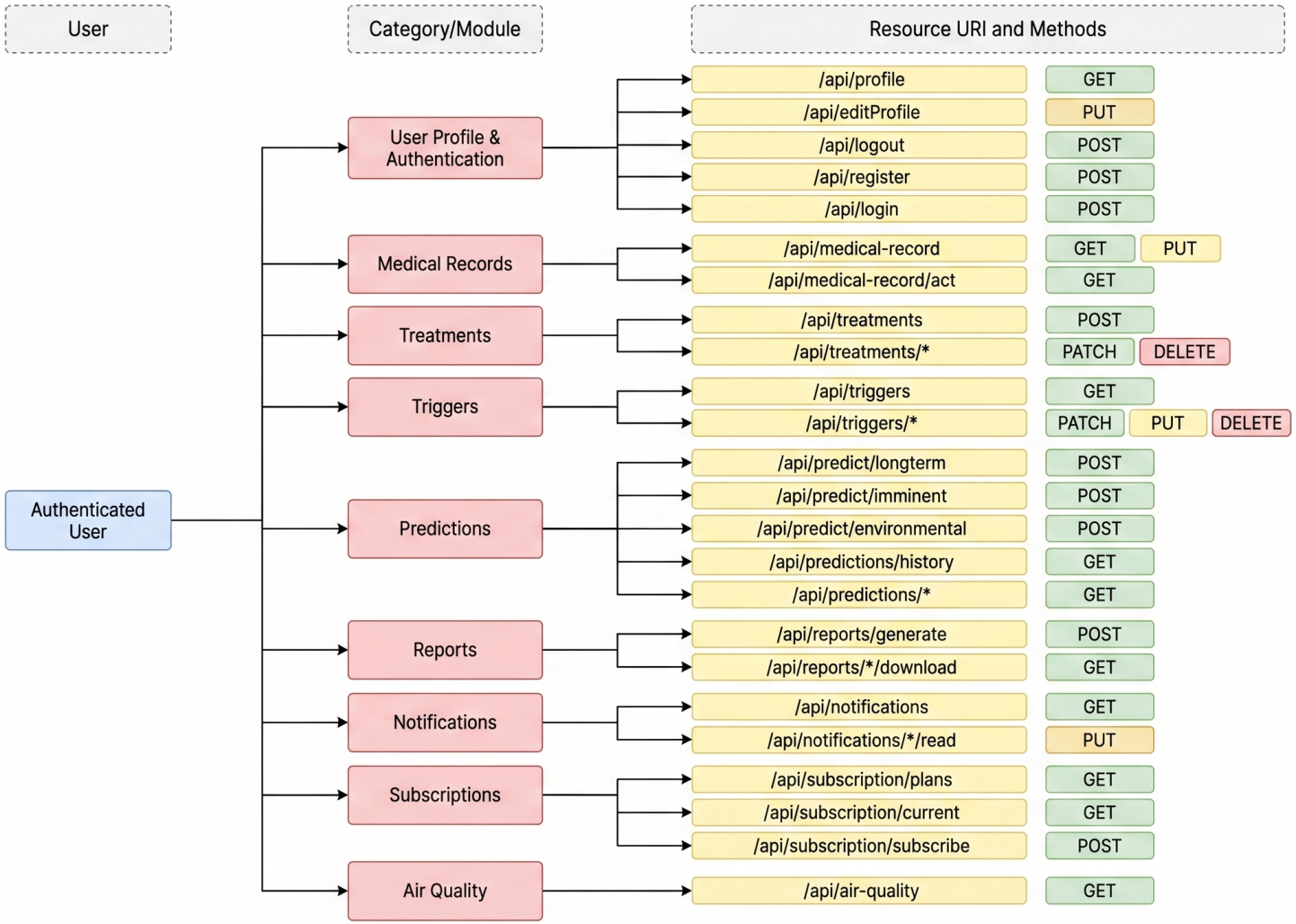


Figure 1: AsthmaGuard API Routes Diagram

FIGURE 5.3 – Diagramme de routes APIs de l'application Asthma Guard.

4.2 Technologies et frameworks utilisés

4.3 Communication avec les modèles IA

La communication entre le backend Laravel et le serveur d'IA (FastAPI) s'effectue via des requêtes HTTP de type `POST` asynchrones, utilisant le format d'échange de données **JSON**. Lorsqu'un calcul de risque est requis, Laravel construit le dictionnaire de données tabulaires (regroupant l'historique des crises X_{crises}, le score X_{ACT}, l'indice X_{IMC}, ainsi que les moyennes environnementales $X_{pollution}$ et X_{pollen}) et l'envoie à FastAPI. Le script Python charge en mémoire les modèles entraînés (tels que le classifieur XGBoost sérialisé via `joblib`), exécute l'inférence et renvoie instantanément la probabilité de risque ainsi que les valeurs SHAP d'explicabilité au backend Laravel.

4.4 Technologies et frameworks utilisés

- **Laravel (PHP 8.2) :** Framework backend retenu pour sa gestion robuste des files d'attente (*Queues*), son ORM puissant (*Eloquent*) et ses outils de planification de tâches natifs.
- **FastAPI (Python 3.10) :** Framework web asynchrone ultra-rapide utilisé pour empaqueter et exposer les modèles de Machine Learning et de Deep Learning, profitant d'une exécution de code optimisée.
- **MySQL :** Système de gestion de base de données relationnelle utilisé pour le stockage, l'organisation et la sécurisation des données utilisateurs, des profils cliniques, des mesures collectées par les objets IoT ainsi que des informations de suivi médical.

5 Schéma de la base de données

La persistance des données et la cohérence des informations médicales reposent sur une modélisation relationnelle rigoureuse. Le modèle logique des données présenté ci-dessous décrit de manière formelle et structurée l'ensemble des tables, des attributs ainsi que les dépendances fonctionnelles qui régissent la base de données de notre application.

5.1 Conventions de lecture

- Attribut : Clé Primaire (CP)
- **#Attribut** : Clé Étrangère (CE)

5.2 Tables Principales

- **utilisateurs** (IdUtilisateur, Email, MotDePasse, Age, Sexe, Téléphone, UrlImage, remember_token)

  Note : Email possède une contrainte unique.
- **dossiersMédicaux** (IdDossier, **#IdUtilisateur**, NombreDeCrises, SévéritéGINA, UsageBronchodilatateur, IMC)

  Flèche : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur)
- **médicaments** (IdMédicament, NomMédicament, DescriptionMédicament)
- **triggers** (IdTrigger, NomTrigger, DescriptionTrigger, seuil)
- **plansAbonnement** (idAbonnement, titre, durée, caract_json)
- **réponsesQuestionnaireAct** (IdRéponse, RéponseQuestion1, RéponseQuestion2, **#IdUtilisateur**)

  Flèche : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur)
- **détailAbonnement** (idDA, dateDebut, dateFin, cheminReçu, MontantPayé, **#IdUtilisateur**, **#idAbonnement**)

  Flèches : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur) et #idAbonnement → plansAbonnement(idAbonnement)
- **triggers_utilisateurs** (IdTriggerUtilisateur, **#IdUtilisateur**, **#IdTrigger**, threshold, severity)

  Flèches : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur) et #IdTrigger → triggers(IdTrigger). Le couple (IdUtilisateur, IdTrigger) est unique.
- **traitements** (IdTraitement, DateDébut, Durée, Posologie, TempsDePrise, **#IdUtilisateur**, **#idMedicament**)

  Flèches : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur) et #idMedicament → médicaments(IdMédicament)
- **notifications** (IdNotification, Message, Lu, **#IdUtilisateur**)

  Flèche : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur)

- **rapportsMédicaux** (IdRapport, periodeDebut, periodeFin, includePredictions, cheminFichier, **#IdUtilisateur**, created_at)
  Flèche : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur)
- **prédictions** (IdPrédiction, Date, **#IdUtilisateur**)
  Flèche : #IdUtilisateur → utilisateurs(IdUtilisateur)
- **jetonsAccèsPersonnels** (id, tokenable_type, tokenable_id, name, token, abilities, last_used_at, expires_at, created_at, updated_at)
  Note : token possède une contrainte unique. Relation polymorphe (tokenable_type, tokenable_id) sans contrainte de clé étrangère formelle.

5.3 Héritages et spécialisations

5.3.1 Spécialisations de la table prédictions

- **prédictionsaLongTerme** (**#IdPrédiction**, ClassePrédite, HistoriqueDeCrisesUtilisé, SévéritéGINAUtilisée, ScoreACTUtilisé)
  Note : Clé primaire et étrangère vers prédictions(IdPrédiction)
- **prédictionsDeCrisesImminentes** (**#IdPrédiction**, ClassesPrédite, FacteursCausaux, FCReposUtilisée, VFCUtilisée)
  Note : Clé primaire et étrangère vers prédictions(IdPrédiction)
- **prédictionsDeRisqueEnvironnemental** (**#IdPrédiction**, ClassePrédite, Recommandation, ValeurPM2_5Utilisée, ValeurNOUtilisée)
  Note : Clé primaire et étrangère vers prédictions(IdPrédiction)

5.3.2 Association entre notifications et prédictions

- **notificationPrédictions** (IdPrédictionNotification, **#IdNotification**, **#IdPrédiction**)
  Flèches : #IdNotification → notifications(IdNotification) et #IdPrédiction → prédictions(IdPrédiction). Table d'association résolvant la relation N :M entre notifications et prédictions.

6 Scénario d'utilisation global

Afin d'illustrer de manière concrète l'articulation des différentes fonctionnalités d'*AsthmaGuard*, nous décrivons dans cette section un scénario d'utilisation représentatif. Celui-ci retrace le parcours d'Ahmed, un patient de 34 ans atteint d'asthme persistant, depuis sa découverte de l'application jusqu'à l'exploitation de ses fonctionnalités prédictives les plus avancées. Ce fil conducteur permet de mettre en évidence la complémentarité entre l'auto-gestion thérapeutique, la surveillance proactive assistée par intelligence artificielle et le partage de l'information clinique avec le corps médical.

6.1 Découverte et premier accès

Le parcours débute lorsqu'Ahmed découvre *AsthmaGuard* à l'occasion d'une campagne de sensibilisation relayée sur les réseaux sociaux par un médecin pneumologue. Séduit par la promesse d'un suivi personnalisé et d'une anticipation des crises, il télécharge l'application mobile, développée avec le framework Flutter, et l'installe sur son smartphone. Lors de sa première connexion, Ahmed crée un compte sécurisé (Figure 5.4) et renseigne son profil de santé. Cette authentification garantit la confidentialité de ses données médicales et conditionne le chargement d'un espace personnel dédié à son suivi.

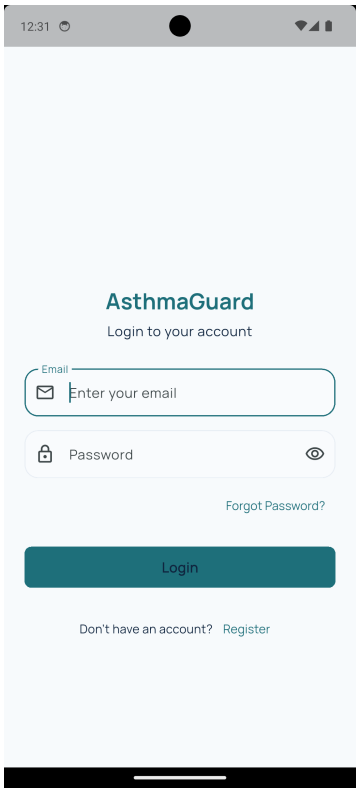


FIGURE 5.4 – Création d'un compte sécurisé et connexion à l'application.

6.2 Auto-gestion et observance thérapeutique (version gratuite)

Dans un premier temps, Ahmed exploite les fonctionnalités de la version gratuite de l'application, centrées sur l'auto-gestion et l'amélioration de son observance thérapeutique. Il accède au module de traitement, où il sélectionne ses médicaments au sein d'une bibliothèque distinguant les traitements de fond des bronchodilatateurs de crise (Figure 5.5). Pour chaque traitement, il précise la posologie, les horaires de prise et la durée de la cure. Sur cette base, le système lui adresse quotidiennement des notifications de rappel afin de sécuriser ses prises médicamenteuses. Chaque confirmation de prise vient alimenter un journal thérapeutique, qui constitue un historique précieux pour le suivi de son observance.

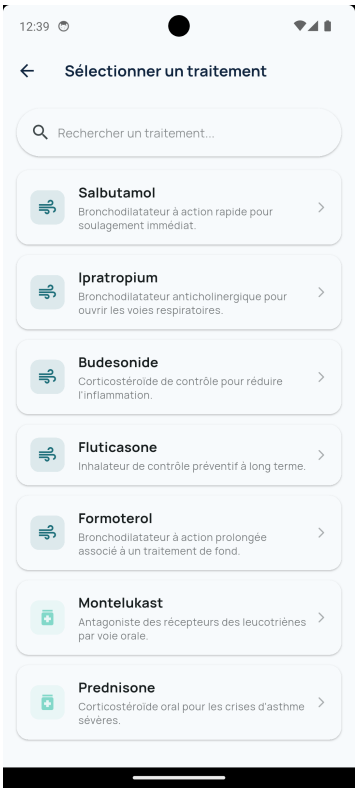
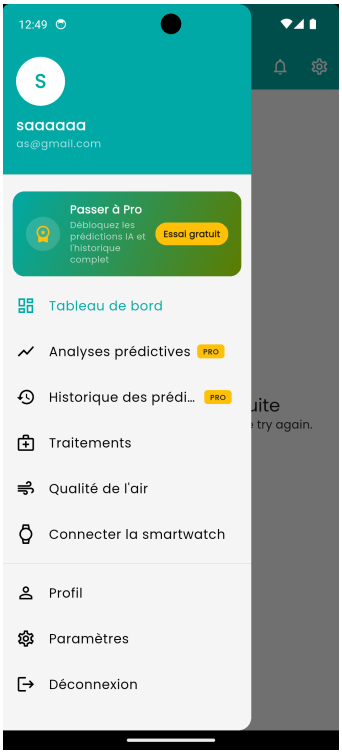


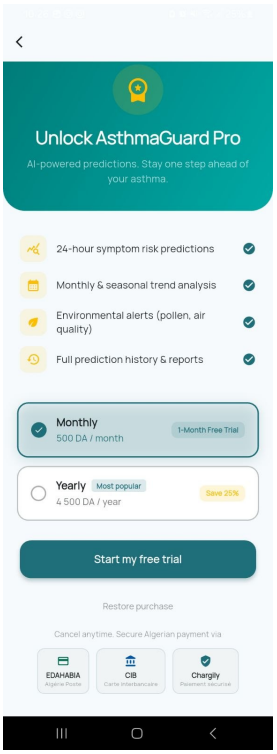
FIGURE 5.5 – Module de gestion des traitements : sélection d'un médicament de fond ou de crise.

6.3 Passage à l'abonnement premium

Convaincu par la clarté de l'interface et l'utilité du journal thérapeutique, Ahmed décide de bénéficier d'une protection prédictive continue. Il souscrit alors à un plan d'abonnement *premium* au sein de l'application (Figure 5.6). Cette souscription débloque l'accès complet aux couches d'intelligence artificielle avancées de la plateforme, en particulier les analyses prédictives, l'historique enrichi des prédictions et la surveillance continue du risque de crise.



(a) Bannière d'invitation à passer à la version Pro.



(b) Détail des fonctionnalités débloquées par l'abonnement.

FIGURE 5.6 – Souscription à l'abonnement premium débloquant les fonctionnalités d'IA.

6.4 Appairage de la montre connectée

Pour activer une surveillance passive et non invasive, Ahmed procède à l'appairage de sa montre connectée avec l'application (Figure 5.7). Après avoir sélectionné son écosystème (Apple Watch, Samsung Galaxy Watch, Huawei Watch ou Wear OS), il autorise l'accès aux indicateurs physiologiques requis par les modèles de prédiction : fréquence cardiaque au repos, variabilité de la fréquence cardiaque (RMSSD), saturation en oxygène (SpO_2), qualité du sommeil, niveau de stress et activité physique. Ces autorisations établissent le flux de données nécessaire au fonctionnement du moteur prédictif.

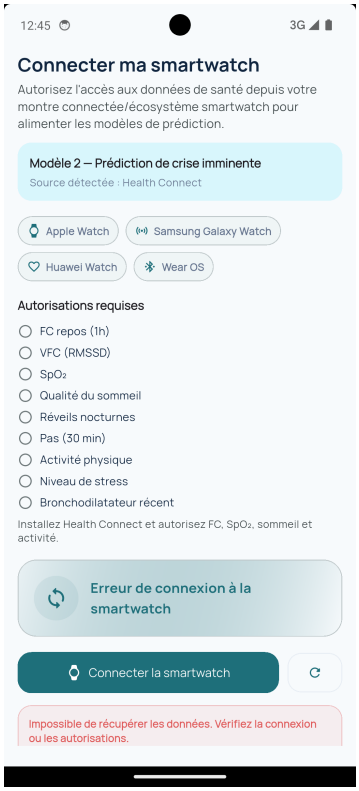


FIGURE 5.7 – Appairage de la montre connectée et autorisation des données physiologiques.

6.5 Surveillance proactive et détection d'une crise imminente

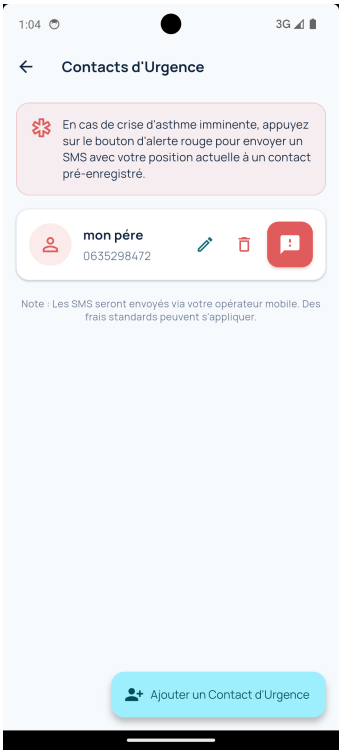
Dès lors, le système fonctionne en mode pleinement proactif. Les séries temporelles physiologiques captées par la montre d'Ahmed sont transmises en continu à l'application, qui les combine aux données environnementales (qualité de l'air, taux de pollen) pour évaluer son risque respiratoire en temps réel. Un jour, alors qu'Ahmed est en déplacement, le modèle détecte une dégradation de ses indicateurs et estime une probabilité élevée de crise imminente (Figure 5.8). L'application affiche immédiatement une alerte assortie d'une recommandation de traitement préventif, permettant à Ahmed de réagir avant l'apparition des symptômes.



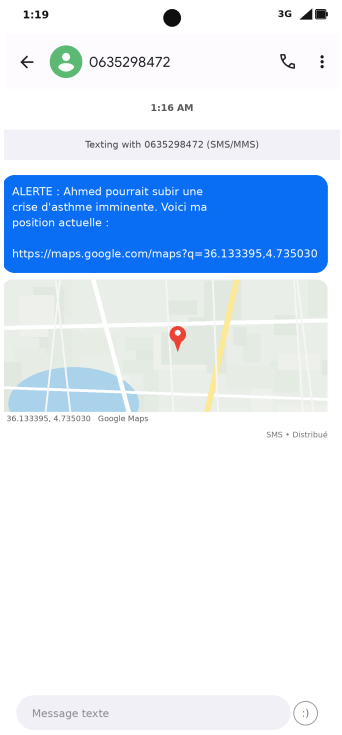
FIGURE 5.8 – Alerte de crise imminente générée par le moteur de prédiction.

6.6 Déclenchement de l'alerte SMS au contact d'urgence

Face à la sévérité de la situation, Ahmed actionne le bouton d'alerte d'urgence de l'application. Celle-ci transmet automatiquement un **SMS** au contact d'urgence préalablement enregistré, en l'occurrence un proche, contenant un message d'alerte ainsi qu'un lien de géolocalisation indiquant sa position actuelle (Figure 5.9). Ce dispositif réduit significativement le délai d'intervention en permettant à son proche d'être informé sans délai et de le localiser avec précision.



(a) Contact d'urgence enregistré.



(b) SMS géolocalisé envoyé.

FIGURE 5.9 – Séquence de déclenchement de l'alerte SMS vers le contact d'urgence.

6.7 Génération du rapport médical

Quelques semaines plus tard, à l'approche de sa consultation mensuelle, Ahmed ouvre l'écran de son dossier médical (Figure 5.10). En quelques interactions, il consulte et consolide l'historique de ses indices de risque, ses scores de contrôle ACT (*Asthma Control Test*), son niveau de sévérité selon la classification GINA (*Global Initiative for Asthma*) ainsi que ses statistiques d'observance. Ces éléments, exportables sous forme de document PDF synthétique, fournissent à son pneumologue une vision objective et longitudinale de l'évolution de la maladie, et facilitent ainsi une décision thérapeutique éclairée.



FIGURE 5.10 – Dossier médical consolidé : scores ACT, niveau GINA et historique des crises.

Ce scénario illustre la montée en puissance progressive de l'accompagnement offert par *AsthmaGuard* : d'une simple aide à l'observance dans sa version gratuite, l'application évolue, grâce à l'abonnement premium et à l'intégration des données physiologiques, vers un véritable système de surveillance prédictive et de protection d'urgence, tout en restituant au médecin une information clinique structurée et exploitable.

7 Conclusion

La modélisation rigoureuse de la base de données relationnelle et la structuration découplée de notre backend (Laravel d'une part, FastAPI d'autre part) garantissent la haute disponibilité et l'extensibilité du système **AsthmaGuard**. Cette infrastructure logicielle offre un support performant pour la manipulation fluide des variables cliniques et environnementales complexes nécessaires à nos algorithmes prédictifs. Elle assure ainsi une transition logicielle réussie d'une prise en charge médicale historiquement réactive vers une plateforme d'e-santé résolument proactive, transparente et hautement sécurisée pour le patient asthmatique.

Chapitre 6

Conclusion générale

1 Synthèse des contributions

Ce travail de fin d'études a été consacré à la conception, au développement et à l'évaluation d'**AsthmaGuard**, un système prédictif intelligent et non invasif destiné à transformer la prise en charge de l'asthme chez l'adulte. En s'appuyant sur les technologies de la santé mobile (*m-Health*) et de l'intelligence artificielle, ce projet a permis de surmonter plusieurs verrous technologiques liés au suivi continu, passif et personnalisé de cette pathologie chronique.

Dans le cadre de ce mémoire, nos contributions majeures s'articulent autour de trois axes fondamentaux :

- **Une architecture prédictive hybride multi-modèles :** Nous avons développé et intégré trois modèles d'intelligence artificielle indépendants et complémentaires. Le premier, basé sur l'algorithme *XGBoost*, évalue le risque d'exacerbation à long terme (fenêtre de 5 à 15 jours) en analysant l'évolution des indicateurs cliniques. Le deuxième repose sur le modèle *Causal-TFT* (*Temporal Fusion Transformer*) pour prédire de manière imminente à court terme la survenue d'une crise en exploitant passivement les séries temporelles physiologiques. Le troisième est un classifieur basé sur la *logique floue* modélisant l'impact des facteurs environnementaux exogènes (pollution et indices polliniques).
- **Une collecte de données passive et non invasive :** Contrairement aux solutions existantes fortement dépendantes de saisies manuelles contraignantes, AsthmaGuard intègre

l'extraction en continu des constantes biométriques (fréquence cardiaque, variabilité de la fréquence cardiaque, saturation en oxygène SpO_2) mesurées passivement par une montre connectée grand public, maximisant ainsi l'adhérence du patient.

- **Un écosystème logiciel complet et agile :** Le système a été concrétisé par l'implémentation d'une application mobile multiplateforme développée avec le framework *Flutter* et d'un backend robuste en *Laravel* exposant des API REST sécurisées. La gestion de ce projet a suivi rigoureusement la méthodologie *Scrum* répartie sur cinq sprints, garantissant une livraison continue de valeur.

2 Bienfaits et Impacts du Système

L'implémentation d'AsthmaGuard dépasse le cadre d'une simple prouesse technique pour offrir des bénéfices concrets et mesurables à différents niveaux du parcours de soin :

- **Pour le patient (Autonomie et Sécurité) :** En prédisant les risques d'exacerbation à court et long terme, le système transforme le patient en un acteur proactif de sa propre santé. La réduction de l'anxiété liée à l'imprévisibilité des crises améliore significativement sa qualité de vie au quotidien.
- **Pour le corps médical (Suivi objectif) :** L'accès à un historique continu et passif des constantes physiologiques (SpO_2, fréquence cardiaque) offre aux pneumologues une vision objective de l'évolution de la pathologie, facilitant un ajustement thérapeutique plus précis lors des consultations.
- **Pour le système de santé (Optimisation des ressources) :** En anticipant les crises majeures, AsthmaGuard contribue potentiellement à la diminution des hospitalisations d'urgence et des consultations non programmées, allégeant ainsi la charge économique et structurelle des services de santé publique.

3 Limites du travail

Malgré les résultats prometteurs obtenus lors de l'évaluation de nos modèles, plusieurs limitations doivent être soulevées afin d'inscrire ce travail dans une démarche scientifique objective :

- **Dépendance aux données synthétiques :** En raison de l'absence initiale de bases

de données réelles, médicalisées et étiquetées associant télémétrie passive et crises d'asthme, l'entraînement et la validation des modèles ont été réalisés sur des jeux de données synthétiques. Bien que générés selon des distributions physiologiques réalistes, ces jeux de données ne peuvent remplacer exhaustivement la variabilité et le bruit inhérents aux données réelles de patients.

- **Limites inhérentes aux technologies grand public :** Bien que la montre intelligente facilite une collecte passive et ergonomique, elle ne constitue en aucun cas un outil de diagnostic clinique validé. Elle ne peut mesurer des indicateurs pulmonaires fondamentaux comme le VEMS ou le Débit Expiratoire de Pointe (DEP), indispensables selon les recommandations internationales (*GINA*) pour ajuster de manière autonome un traitement médical.
- **Sensibilité aux faux positifs :** La fusion de séries temporelles hétérogènes et exogènes présente un défi permanent d'équilibrage des métriques (exactitude, rappel, F1-score). Un taux même minime de faux positifs à court terme pourrait induire une « fatigue de l'alerte » chez l'utilisateur, altérant sa confiance envers l'application.

4 Perspectives et travaux futurs

Les fondations conceptuelles et techniques posées par AsthmaGuard ouvrent des perspectives d'évolution majeures pour la recherche et le déploiement clinique à court et moyen terme :

À court terme : Validation clinique en conditions réelles

Mener une étude observationnelle pilote en collaboration avec des professionnels de santé pour tester l'application sur un échantillon de patients adultes. Cela permettra de collecter des données cliniques réelles, de ré-entraîner les modèles d'IA et de valider l'ergonomie de l'interface Flutter.

À moyen terme : Amélioration algorithmique et explicabilité (XAI)

Approfondir les mécanismes d'explicabilité des modèles (comme SHAP ou LIME) pour fournir aux cliniciens et aux patients les facteurs causaux exacts ayant déclenché l'alerte. Intégrer également l'analyse bioacoustique de la toux via le microphone du smartphone pour enrichir les biomarqueurs.

À long terme : Extension de la population cible et interopérabilité

Adapter les modèles prédictifs à la population pédiatrique, dont les facteurs déclen-

chants et les manifestations cliniques diffèrent sensiblement de l'adulte. Assurer l'interopérabilité d'AsthmaGuard avec les standards de dossiers médicaux partagés (EHR/FHIR) pour une synchronisation transparente avec les systèmes de santé publique.

En somme, AsthmaGuard démontre qu'une synergie maîtrisée entre l'ingénierie logicielle agile, la *m-Health* et l'intelligence artificielle est capable de poser les jalons d'une médecine préventive moderne, offrant aux patients asthmatiques un nouvel outil pour réinvestir leur autonomie et améliorer durablement leur qualité de vie.

Références

[1] E. V. Ponte, A. Lima, P. C. A. Almeida, J. P. V. de Jesus, V. B. Lima, N. Scichilone, A. Souza-Machado, and A. Cruz, "Age is associated with asthma phenotypes," *Respirology*, vol. 22, no. 8, pp. 1558–1563, 2017. [Online]. Available : https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/resp.13102

[2] J. Finkelstein and I. c. Jeong, "Machine learning approaches to personalize early prediction of asthma exacerbations," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1387, no. 1, pp. 153–165, 2017, pMCID : PMC5266630. [Online]. Available : https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/nyas.13218

[3] World Health Organization, "Asthma," 2024, WHO Fact Sheet. [Online]. Available : https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/asthma

[4] Global Initiative for Asthma (GINA), "Global strategy for asthma management and prevention," 2025. [Online]. Available : https://ginasthma.org/2025-gina-strategy-report/

[5] Q. Xiao *et al.*, "Effectiveness of mhealth interventions for asthma self-management : A systematic review and meta-analysis," *Studies in Health Technology and Informatics*, vol. 250, pp. 144–145, 2018. [Online]. Available : https://doi.org/10.3233/978-1-61499-872-3-144

[6] L. Taylor, X. Ding, D. Clifton, and H. Lu, "Wearable vital signs monitoring for patients with asthma : A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 1734–1751, 2023. [Online]. Available : https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3224411

[7] S. Holgate, R. Polosa, T. Haahtela, A. Agusti, K. Rabe, K. Chung, E. Bel, J. Bousquet, J. Virchow, M. Hilty *et al.*, "Management of severe asthma : a european respiratory society/american thoracic society guideline," *European Respiratory Journal*, vol. 55,

no. 1, p. 1901528, 2020. [Online]. Available : https://doi.org/10.1183/13993003.00588-2019

[8] National Asthma Education and Prevention Program, "Expert panel report 3 (epr-3) : Guidelines for the diagnosis and management of asthma," National Heart, Lung, and Blood Institute, Bethesda, MD, Tech. Rep., 2007. [Online]. Available : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK7232/

[9] H. K. Reddel, L. B. Bacharier, E. D. Bateman, D. M. Halpin, E. Meier *et al.*, "Global initiative for asthma strategy 2021 : executive summary and rationale for key changes," *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 205, no. 1, pp. 17–35, 2022. [Online]. Available : https://doi.org/10.1164/rccm.202109-2205PP

[10] Global Initiative for Asthma (GINA), "Gina summary guide 2025," 2025. [Online]. Available : https://ginasthma.org/2025-gina-summary-guide/

[11] M. A. Althobiani, Y. Ranjan, J. Jacob, M. Orini, R. J. B. Dobson, J. C. Porter, J. R. Hurst, and A. A. Folarin, "Evaluating a remote monitoring program for respiratory diseases : Prospective observational study," *JMIR Formative Research*, vol. 7, p. e51507, 2023, pMCID : PMC10709787. [Online]. Available : https://formative.jmir.org/2023/1/e51507

[12] World Health Organization, *mHealth : New Horizons for Health through Mobile Technologies*, ser. Global Observatory for eHealth Series. Geneva : World Health Organization, 2011, vol. 3. [Online]. Available : https://www.afro.who.int/publications/mhealth-new-horizons-health-through-mobile-technologie

[13] D. L. Mudzengi, H. Chomutare, J. Nagudi, T. Ntshiqa, J. L. Davis, S. Charalambous, and K. Velen, "Using mhealth technologies for case finding in tuberculosis and other infectious diseases in africa : Systematic review," *JMIR Mhealth Uhealth*, vol. 12, 2024. [Online]. Available : https://doi.org/10.2196/53211

[14] H. Cole-Lewis and T. Kershaw, "Text messaging as a tool for behavior change in disease prevention and management," *Epidemiologic Reviews*, vol. 32, no. 1, pp. 56–69, 03 2010. [Online]. Available : https://doi.org/10.1093/epirev/mxq004

[15] K. Huckvale, C. Morrison, J. Ouyang, A. Ghaghda, and J. Car, "The evolution of mobile

apps for asthma : an updated systematic assessment of content and tools," *BMC Medicine*, vol. 13, p. 58, 2015. [Online]. Available : https://doi.org/10.1186/s12916-015-0303-x

[16] Strados Labs, "Wheeze monitor & asthma wearable device | resp® biosensor," https://stradoslabs.com/therapeutic-areas-wearable-asthma-monitoring-device/, 2024, accessed : 2026-03-28.

[17] S. Majumder, T. Mondal, and M. J. Deen, "Wearable sensors for remote health monitoring," *Sensors*, vol. 17, no. 1, 2017. [Online]. Available : https://doi.org/10.3390/s17010130

[18] A. Pantelopoulos and N. G. Bourbakis, "A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 40, no. 1, pp. 1–12, 2010. [Online]. Available : https://doi.org/10.1109/TSMCC.2009.2032660

[19] A. H. Y. Chan, J. Harrison, P. N. Black, E. A. Mitchell, and J. M. Foster, "Using electronic monitoring devices to measure inhaler adherence : A practical guide for clinicians," *The Journal of Allergy and Clinical Immunology : In Practice*, vol. 3, no. 3, pp. 335–349.e5, 2015. [Online]. Available : https://www.jaci-inpractice.org/article/S2213-2198(15)00053-7/fulltext

[20] R. Merchant, S. J. Szefler, B. G. Bender, M. Tuffli, M. A. Barrett, R. Gondalia, L. Kaye, D. Van Sickle, and D. A. Stempel, "Impact of a digital health intervention on asthma resource utilization," *World Allergy Organization Journal*, vol. 11, no. 1, p. 28, 2018. [Online]. Available : https://doi.org/10.1186/s40413-018-0209-0

[21] E. Topol, *Deep Medicine : How Artificial Intelligence Can Make Healthcare Human Again*. Basic Books, 2019. [Online]. Available : https://drerictopol.com/portfolio/deep-medicine/

[22] A. Esteva, A. Robicquet, B. Ramsundar *et al.*, "A guide to deep learning in healthcare," *Nature Medicine*, vol. 25, pp. 24–29, 2019. [Online]. Available : https://doi.org/10.1038/s41591-018-0316-z

[23] G. D'Amato, C. Vitale, A. De Martino, G. Viegi, M. Lanza, A. Molino, A. Sanduzzi,

A. Vatrella, I. Annesi-Maesano, and M. D'Amato, "Effects on asthma and respiratory allergy of climate change and air pollution," *Multidisciplinary Respiratory Medicine*, vol. 10, p. 39, 2015, pMID : 26697186 ; PMCID : PMC4687168. [Online]. Available : https://mrmjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40248-015-0036-x

[24] A. Bohr and K. Memarzadeh, Eds., *Artificial Intelligence in Healthcare*. Academic Press, 2020. [Online]. Available : https://doi.org/10.1016/C2018-0-04097-9

[25] R. X. A. Pramono, S. Bowyer, and E. Rodriguez-Villegas, "Automatic adventitious respiratory sound analysis : A systematic review," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 5, p. e0177926, 2017. [Online]. Available : https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177926

[26] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, New York, 2006, vol. 4. [Online]. Available : https://link.springer.com/book/9780387310732

[27] F. Jiang, Y. Jiang, H. Zhi, Y. Dong, H. Li, S. Ma, Y. Wang, Q. Dong, H. Shen, and Y. Wang, "Artificial intelligence in healthcare : past, present and future," *Stroke and Vascular Neurology*, vol. 2, no. 4, pp. 230–243, 2017. [Online]. Available : https://doi.org/10.1136/svn-2017-000101

[28] D. Jurafsky and J. H. Martin, *Speech and Language Processing : An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition, with Language Models*, 3rd ed., 2026, online manuscript released January 6, 2026. [Online]. Available : https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/

[29] A. Géron, *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow : Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*, 2nd ed. O'Reilly Media, 2019. [Online]. Available : https://www.oreilly.com/library/view/hands-on-machine-learning/9781492032632/

[30] P. Roques, *UML 2 : modéliser une application Web*, 4th ed., ser. Les cahiers du programmeur. Eyrolles.

[31] G. Roy, "Conception de bases de donne'es avec uml."

[32] K. Beck, M. Beedle, A. van Bennekum, A. Cockburn, W. Cunningham, M. Fowler, J. Grenning, J. Highsmith, A. Hunt, R. Jeffries, J. Kern, B. Marick, R. C. Martin, S. Mellor,

K. Schwaber, J. Sutherland, and D. Thomas, “Manifeste pour le développement agile de logiciels,” 2001. [Online]. Available : https://agilemanifesto.org/iso/fr/manifesto.html

[33] K. Schwaber and J. Sutherland, “The scrum guide : The definitive guide to scrum : The rules of the game,” November 2020, version November 2020. [Online]. Available : https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf

[34] K. Schwaber, *Agile Project Management with Scrum*. Microsoft Press, 2004. [Online]. Available : https://www.microsoftpressstore.com/store/agile-project-management-with-scrum-9780735619937

[35] A. Vannieuwenhuyze, *Intelligence artificielle vulgarisée : Le Machine Learning et le Deep Learning par la pratique*. ENI Editions, 2019.

[36] S. Chakraverty, D. M. Sahoo, and N. R. Mahato, *Concepts of Soft Computing : Fuzzy and ANN with Programming*. Springer, 2019. [Online]. Available : https://doi.org/10.1007/978-981-13-7430-2

[37] W. Pedrycz and S.-M. Chen, *Deep Learning : Concepts and Architectures*. Springer, 2020. [Online]. Available : https://doi.org/10.1007/978-3-030-31756-0

[38] E. Charniak and A. Bohy, *Introduction au Deep Learning*. Dunod, 2021.

[39] S. Mokhtari, K. Yen, and J. Liu, “Effectiveness of artificial intelligence in stock market prediction based on machine learning,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 183, pp. 1–8, 06 2021.

[40] L. Alzubaidi, J. Zhang, A. J. Humaidi, A. Al-Dujaili, Y. Duan, O. Al-Shamma, J. Santamaría, M. A. Fadhel, M. Al-Amidie, and L. Farhan, “Review of deep learning : concepts, cnn architectures, challenges, applications, future directions,” *Journal of Big Data*, vol. 8, no. 1, p. 53, 2021. [Online]. Available : https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8

[41] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–359, 1965.

[42] S. F. Barrett, “Fuzzy logic,” in *Arduino V : Machine Learning, 2nd Edition*, ser. Synthesis Lectures on Digital Circuits & Systems. Springer, 2026, ch. 5, pp. 241–267.

[43] M. Maksimovic, V. Vujovic, and V. Milosevic, “Fuzzy logic and wireless sensor networks – a survey,” *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 27, p. 877–890, 08 2014.

[44] S. Tomasiello, W. Pedrycz, and V. Loia, *Contemporary Fuzzy Logic, A Perspective of Fuzzy Logic with Scilab*, 05 2022.

[45] G. D’Aniello, “Fuzzy logic for situation awareness : a systematic review,” *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, pp. 1–20, 02 2023.

[46] T. Chen and C. Guestrin, “Xgboost : A scalable tree boosting system,” in *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016, pp. 785–794. [Online]. Available : https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

[47] Global Initiative for Asthma (GINA), “Global strategy for asthma management and prevention,” 2023, consulté le 30 mai 2026. [Online]. Available : https://ginasthma.org

[48] R. A. Nathan, C. A. Sorkness, M. Kosinski, M. Schatz, J. T. Li, P. Marcus, J. J. Murray, and W. H. Garber, “Development of the asthma control test : A survey for assessing asthma control,” *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 113, no. 1, pp. 59–65, 2004.

[49] S. M. Lundberg and S.-I. Lee, “A unified approach to interpreting model predictions,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NeurIPS 2017)*, 2017, pp. 4765–4774. [Online]. Available : https://papers.nips.cc/paper/7062-a-unified-approach-to-interpreting-model-predictions

[50] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965. [Online]. Available : https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

[51] E. H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 1975. [Online]. Available : https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2

[52] World Health Organization, *WHO global air quality guidelines : particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, 2021. [Online]. Available : https://iris.who.int/handle/10665/345329

[53] J. Warner, J. Sexauer, twmeggs, and Unicomp21, “scikit-fuzzy : Fuzzy logic toolkit for

scipy," 2019. [Online]. Available : https://github.com/scikit-fuzzy/scikit-fuzzy