الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Chahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Genie civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme** de **Master Académique**

En : Filière de travaux publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art

Par:

ZEMIT Mohammed Lamine
MESNADI Manar

Sujet

Optimisation de la gestion de la maintenance des pistes selon le Trafic et les conditions climatiques (Aéroport de Cheikh Laarbi Tebessi- Tébessa)

Présenté et soutenu publiquement, le 08/06/2026 , devant le jury composé de :

Messaoud Farid	MAA	Président
Roili Ahmed	Professeur	Rapporteur
Melaoui Rachida	MAA	Examinateur

Promotion : 2025/2026

Dédicaces

Louange à Allah d'une louange qui égale Ses bienfaits,

À ma famille

À ceux qui ont été mon soutien et ma source de force, à ceux qui ont constitué le pilier inébranlable et l'ombre protectrice face à la fatigue du chemin. Merci pour vos sacrifices écrits à l'encre de la patience, et pour vos prières qui m'ont ouvert des portes qui étaient fermées. Je vous dédie le fruit de cet effort ; vous en êtes l'origine, et je ne suis que le prolongement de votre générosité.

À mon encadreur Professeur Rouili Ahmed, qui m'a accompagné par ses orientations judicieuses, et a enrichi ce travail par ses précieuses remarques, je lui adresse mes sincères remerciements et mon profond respect.

À mon oncle Tayeb, je lui adresse mes plus sincères expressions de remerciement et de gratitude pour son soutien continu et sa présence constante à mes côtés.

Je présente également mes sincères remerciements à Sihem et Fadhila, pour leur aide précieuse et les facilités qu'elles nous ont accordées durant la période de stage à l'aéroport, car leur coopération et leur bonne conduite ont eu un grand effet dans la résolution des difficultés et la réussite de notre expérience de terrain dans les meilleures conditions.

À toute personne ayant contribué par une bonne parole, un soutien sincère ou un conseil loyal… je dédie ce modeste travail comme signe de fidélité et de gratitude, en espérant avoir rempli une petite partie de votre bienfait, et que ce projet soit une pierre utile dans mon parcours scientifique et professionnel.

Zemit Mohmmed lamine

Dédicaces :

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents, pour leur amour, leur soutien et leurs sacrifices tout au long de mon parcours.

À mon frère Mohamed El Amine, ainsi qu'à mes frères : Kamel et aux enfants de la famille (Mansa et Abdessami), pour leur présence et leur encouragement.

À mes sœurs : Khadija, Chahrazed, Maroua, Salwa et Souad, ainsi qu'à leurs enfants Rahaf, Nesrine, Zakaria, Adam et Ala, pour leur affection et leur soutien.

À mes précieuses amies : Imane, Aïcha, Aya, Lamia et Asma, avec qui j'ai partagé les moments de stress, de doute, mais aussi de réussite.

À mon binôme, Zemit Mohamed El Amine, pour sa collaboration et son sérieux tout au long de ce travail.

À mon encadreur Professeur Rouili Ahmed, pour ses conseils et son accompagnement précieux.

Enfin, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite que ce travail soit le fruit de mes efforts et le début d'un avenir meilleur, inch'Allah.

Mesnadi Manar

Liste des abréviations

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ICAO en anglais).

FAA : Fédéral Aviation Administration (États-Unis).

STAC : Service Technique de l'Aviation Civile (France).

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile (France).

ASTM: American Society for Testing and Materials (États-Unis).

AASHO: American Association of State Highway Officials (Ancient nom de l'AASHTO).

FICAV : Fiche d'Information et de Caractérisation des Aéroports et Voies.
ACN : Aircraft Classification Number (Numéro de classification de l'aéronef).

PCN : Pavement Classification Number (Numéro de classification de la chaussée).

PSI : Present Serviceability Index(Indice d'aptitude au service actuel).
PCI : Pavement Condition Index (Indice de l'état de la chaussée).

APMS : Airport Pavement Management System (Système de gestion des chaussées d'aéroport).

SGBA : Système de gestion des chaussées d'aéroport

BB : Béton bitumineux.
GB : Grave bitume.

GNT : Graves non traitées.

Sommaire :

Chapitre I : Introduction

1.1 Introduction..... 02

1.2 Problématique..... 02

1.3 Objectifs du travail..... 03

1.4 Méthodologie..... 03

1.5 Plan du mémoire..... 04

Chapitre II : Revue bibliographique et cadre conceptuel

Introduction..... 06

2.1 Les infrastructures aéroportuaires..... 06

2.2 Les phénomènes de dégradation des pistes..... 09

2.3 Les systèmes de gestion de maintenance..... 24

2.4 Recherches existantes et limites identifiées..... 28

Chapitre III : Méthodologie de recherche

3.1 Démarche générale..... 32

3.2 Présentation du site d'étude..... 33

3.3 Collecte et analyse de données..... 38

3.4 Évaluation de l'état de la piste..... 42

3.5 Méthode d'optimisation..... 48

Conclusion..... 50

Chapitre IV : Système de gestion des bases d'aérodromes (SGBA)

4.1 Introduction..... 53

4.2 Description des menus et modules du logiciel SGBA..... 54

4.3 Méthodologie d'évaluation dans le SGBA..... 57

4.4 Exploitation des résultats..... 60

4.5 Avantages et limites du SGBA..... 62

Conclusion..... 63

Chapitre V : Analyse et résultats

5.1 Introduction.....65
5.2 Analyse détaillée des conditions de trafic et climats.....66
5.3 Évaluation de la dégradation actuelle de la piste12/30.....72
5.4 Simulation et évolution du vieillissement.....74
5.5 Optimisation du plan de maintenance (Approche SGBA).....75
Conclusion.....80

Chapitre VI : Stratégies Mondiales de maintenance et innovation technologique des grandes Hubs aéroportuaires

6.1 Introduction.....82
6.2 Systèmes de surveillance structurelle intégrés (SHM).....87
6.3 Diagnostic aéroportuaire par télédétection.....92
6.4 Robotique et automatisation des réparations.....89
6.5 Analyse comparative..... 94
6.6 Détection automatique des fissures par intelligence artificielle.....99
6.7 Segmentation avancée et caractérisation des fissures.....103
6.8 Prédiction de l'évolution des fissures.....105
6.9 Stratégies de maintenance et réparation.....107
6.10 Intégration dans système intelligent.....113
6.11 Limites et perspectives.....116
Conclusion.....119

Conclusion Générale

Conclusion Générale..... 121

Liste des figures

Chapitre II : Revue bibliographique et cadre conceptuel

Figure 2.1 : L'aire de mouvement 08

Figure 2.2 : Illustration de l'orniérage 15

Figure 2.3 : Fissure de joint 17

Figure 2.4 : Fissures de fatigue ou retrait 19

Figure 2.5 : Fissures paraboliques 20

Figure 2.6 : Faïençage 22

Chapitre III : Méthodologie de recherche

Figure 3.1 : Plan de masse de l'aérodrome de Tébessa 35

Figure 3.2 : Plan de situation de l'aérodrome de Tébessa 35

Figure 3.3 : Histogramme des états de l'indice de service 48

Figure 3.4 : Exemple de fissure observée sur la piste 12/30 51

Figure 3.5 : Exemple de dégradation longitudinale observée 52

Figure 3.6 : Exemple de dégradation observée 53

Chapitre V : Analyse et Résultats

Figure 5.1 : Évolution des paramètres climatiques (2019–2024) 67

Figure 5.2 : Évolution des mouvements globaux (2023–2025) 70

Chapitre VI : Stratégies Mondiales de maintenance et innovation technologique des grandes Hubs aéroportuaires

Figure 6.1 : Prototype d'un robot de colmatage automatisé avec asservissement visuel 95

Liste des tableaux

Chapitre III : Méthodologie de recherche

Tableau 3.1 : Principales données d'identification de l'aérodrome 34

Tableau 3.2 : Caractéristiques des infrastructures de l'aérodrome 36

Tableau 3.3 : Principales caractéristiques de la piste étudiée 39

Tableau 3.4 : Statistiques du trafic aérien (2023-2025) 41

Tableau 3.5 : Types d'aéronefs 42

Tableau 3.6 : Données mensuelles des précipitations (mm/jr) 44

Tableau 3.7 : Données mensuelles des températures 45

Tableau 3.8 : Données annuelles moyennes des vents 46

Tableau 3.9 : Structure de la piste 12/30 47

Tableau 3.10 : Indice de service par mailles 49

Tableau 3.11 : Les types des dégradations 50

Chapitre V : Analyse et Résultats

Tableau 5.1 : Évolution des paramètres climatiques (2019-2024) 67

Tableau 5.2 : Évolution des mouvements globaux (2023-2025) 70

Tableau 5.3 : Typologie des aéronefs et fréquence historique 71

Tableau 5.4 : Évaluation de l'Indice de Service par maille 75

Tableau 5.5 : Quantification des dégradations majeures sur la piste 12/30 76

Tableau 5.6 : Priorisation des actions de maintenance selon IS 79

Chapitre VI : Stratégies Mondiales de maintenance et innovation technologique des grandes Hubs aéroportuaires

Tableau 6.1 : comparaison des stratégies de maintenance selon différents critères 86

Tableau 6.2 : Tableau de synthèse 94

Tableau 6.3 : Analyse comparative 99

Tableau 6.4 : Analyse comparative 109

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'optimisation de la gestion et de la maintenance des chaussées aéronautiques, en prenant comme cas d'étude la piste 12/30 de l'aéroport de Tébessa, une infrastructure soumise aux effets combinés des contraintes climatiques et d'un trafic aérien soutenu. L'étude s'appuie sur une méthodologie d'évaluation rigoureuse reposant sur l'utilisation du Système de Gestion des Bases Aéronautiques (SGBA) et sur un maillage précis de la piste, permettant de déterminer l'Indice de Service (IS) et de mettre en évidence des dégradations significatives, notamment des fissurations longitudinales étendues ainsi que des zones caractérisées par une faible portance.

L'analyse technico-économique met en évidence l'intérêt d'une stratégie de maintenance préventive précoce, qui permet de limiter les interventions lourdes de réhabilitation structurelle et de maîtriser les coûts à long terme. Enfin, ce travail ouvre des perspectives innovantes vers le concept de « chaussées intelligentes », fondé sur l'intégration de capteurs à fibres optiques dans une approche de surveillance structurelle (SHM), permettant un suivi en temps réel et facilitant la transition vers une maintenance prédictive, en vue d'assurer la durabilité et la sécurité des infrastructures.

Mots-clés : SGBA, indice de service, maintenance préventive, aéroport de Tébessa, fissurations longitudinales, monitoring structurel (SHM).

الملخص:

يتناول هذا العمل موضوع تحسين تسيير وصيانة طبقات رصف مدارج المطارات، من خلال دراسة حالة المدرج 12/30 بمطار تبسة، باعتباره منشأة تخضع لتأثير مشترك لكل من العوامل المناخية وكثافة الحركة الجوية. وتعتمد الدراسة على منهجية تقييم دقيقة ترتكز على استخدام نظام تسيير قواعد المطارات(SGBA) ، إلى جانب اعتماد تقسيم شبكي للمدرج، مما يسمح بحساب مؤشر الخدمة (IS) وتحديد مستوى الأداء العام للرصف، مع إبراز التدهورات الرئيسية، لا سيما التشققات الطولية ووجود مناطق تعاني من ضعف في القدرة التحملية.

كما تُبرز الدراسة من خلال تحليل تقني-اقتصادي أهمية اعتماد الصيانة الوقائية المبكرة، لما لها من دور في الحد من تفاقم التدهورات وتفادي اللجوء إلى عمليات إعادة التأهيل الهيكلي الثقيلة، مع التحكم في التكاليف على المدى البعيد.

ويفتح هذا العمل آفاقًا حديثة نحو مفهوم »طبقات الرصف الذكية«، من خلال دمج تقنيات المراقبة الصحية للمنشآت (SHM)باستخدام مستشعرات الألياف البصرية، بما يتيح متابعة آنية لحالة الرصف، ويساهم في الانتقال نحو صيانة تنبؤية أكثر كفاءة، بهدف ضمان استدامة المنشأة وسلامة العمليات الجوية.

الكلمات المفتاحية:

نظام تسيير قواعد المطارات(SGBA) ، مؤشر الخدمة، الصيانة الوقائية، مطار تبسة، التشققات الطولية، المراقبة الصحية للمنشآت.(SHM)

Abstract:

This work addresses the optimization of management and maintenance of airport runway pavement structures, using Runway 12/30 at Tébessa Airport as a case study, as it is an infrastructure subjected to the combined effects of climatic conditions and intensive air traffic. The study is based on a rigorous evaluation methodology relying on the Airport Pavement Management System (SGBA), along with a grid-based segmentation of the runway, enabling the calculation of the Serviceability Index (SI) and the assessment of the overall pavement condition, while highlighting major distresses, particularly longitudinal cracking and areas with low bearing capacity.

Furthermore, the techno-economic analysis demonstrates the importance of adopting an early preventive maintenance strategy, which helps limit the progression of deterioration and avoids the need for heavy structural rehabilitation, while ensuring cost efficiency in the long term.

Finally, this work opens perspectives toward the concept of “smart pavements” through the integration of Structural Health Monitoring (SHM) techniques using fiber optic sensors, allowing real-time condition monitoring and facilitating the transition toward predictive maintenance, with the aim of ensuring infrastructure durability and operational safety.

Keywords:
Airport Pavement Management System (SGBA), Serviceability Index, preventive maintenance, Tébessa Airport, longitudinal cracking, Structural Health Monitoring (SHM).

Liste des abréviations

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ICAO en anglais).

FAA : Federal Aviation Administration (États-Unis).

STAC : Service Technique de l'Aviation Civile (France).

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile (France).

ASTM : American Society for Testing and Materials (États-Unis).

AASHO : American Association of State Highway Officials (Ancien nom de l'AASHTO).

FICAV : Fiche d'Information et de Caractérisation des Aéroports et Voies.
ACN : Aircraft Classification Number (Numéro de classification de l'aéronef).

PCN : Pavement Classification Number (Numéro de classification de la chaussée).

PSI : Present Serviceability Index(Indice d'aptitude au service actuel).
PCI : Pavement Condition Index (Indice de l'état de la chaussée).

APMS : Airport Pavement Management System (Système de gestion des chaussées d'aéroport).

SGBA : Système de gestion des chaussées d'aéroport

BB : Béton bitumineux.
GB : Grave bitume.

GNT : Graves non traitées.

Introduction

Introduction :

Le transport aérien constitue aujourd'hui un pilier fondamental des systèmes de mobilité modernes et un levier majeur du développement économique, social et territorial. Il assure la rapidité des échanges, le désenclavement des régions et l'intégration des économies nationales dans les flux internationaux. Dans ce contexte, les infrastructures aéroportuaires occupent une place stratégique, car elles garantissent la continuité, la sécurité et l'efficacité des opérations aériennes. La qualité de conception, d'exploitation et de maintenance de ces infrastructures conditionne directement la performance globale d'un aéroport.

Parmi les différentes composantes aéroportuaires, les pistes d'atterrissage et de décollage représentent l'élément le plus critique du point de vue opérationnel et sécuritaire. Les pistes sont soumises à des sollicitations mécaniques intenses dues aux charges élevées des aéronefs, à la fréquence croissante des mouvements ainsi qu'aux contraintes dynamiques lors des phases de décollage et d'atterrissage. L'état des pistes influence directement la sécurité des vols, la capacité opérationnelle de l'aéroport et la régularité du trafic aérien.

Toutefois, l'augmentation continue du trafic aérien, associée à l'évolution des flottes vers des aéronefs plus lourds, accélère le processus de dégradation des chaussées aéroportuaires. À cela s'ajoutent les conditions climatiques parfois extrêmes, caractérisées par de fortes variations de température et des précipitations intenses, qui aggravent les mécanismes de vieillissement des matériaux. Ces facteurs combinés engendrent l'apparition de diverses pathologies telles que les fissurations , compromettant la durabilité et la sécurité des pistes.

Problématique : La maintenance dans une logique d'optimisation

Face à ce constat, il n'est plus possible de se limiter aux méthodes traditionnelles de maintenance à caractère curatif, reposant sur des interventions après l'apparition des dégradations. Cette approche engendre en effet une augmentation des coûts globaux, une accélération du processus de détérioration des chaussées, ainsi qu'un impact négatif sur la continuité de l'exploitation et la sécurité des opérations aériennes. Il devient ainsi nécessaire d'adopter une démarche moderne fondée sur une maintenance optimisée et proactive, visant à anticiper les dégradations avant leur aggravation.

Cette approche repose sur une analyse intégrée de plusieurs facteurs déterminants, notamment l'intensité et la nature du trafic aérien (type d'aéronefs, nombre de mouvements, charges appliquées), les conditions climatiques locales (variations thermiques, humidité, précipitations), ainsi que les caractéristiques géotechniques et les propriétés des matériaux de

la chaussée. L'interaction complexe de ces paramètres conduit à l'apparition de différentes formes de dégradations, telles que les fissurations longitudinales et transversales, les déformations superficielles et la désagrégation progressive des couches.
Dans ce contexte, la problématique consiste à élaborer une méthodologie scientifique rigoureuse permettant de diagnostiquer de manière quantitative et fiable l'état de la piste 12/30 de l'aérodrome de Tébessa, en identifiant les zones dégradées et leur niveau de gravité, puis en traduisant ces données en indicateurs de performance exploitables pour la prise de décision. L'objectif est de programmer des interventions de maintenance optimisées dans le temps et dans l'espace, afin d'assurer un équilibre entre les exigences de sécurité, la continuité du service et la maîtrise des coûts, tout en prolongeant la durée de vie de l'infrastructure.

Objectifs du travail

- **Objectif général :** Optimiser la gestion de la maintenance des pistes aéroportuaires en tenant compte de l'intensité du trafic aérien et des conditions climatiques, dans le but d'améliorer la durabilité des chaussées et de garantir la sécurité des opérations.
- **Objectifs spécifiques :**
  - - Analyser l'influence du trafic aérien (relatif a l aéronef : l'ATR 72) sur la dégradation des pistes.
  - Étudier l'impact des conditions climatiques locales sur le vieillissement des chaussées.
  - Identifier et cartographier les principaux types de dégradations affectant la piste étudiée.
  - Évaluer l'état de la piste via des outils numériques pour proposer une stratégie de maintenance adaptée.

Méthodologie

La démarche adoptée pour ce travail repose sur une application directe à l'aérodrome de Tébessa suivant ce processus :

Collection de données : Recueil des données de trafic, climatiques et structurelles de la piste 12/30.

Maillage et Relevés : Découpage de la piste en mailles de 500 m² pour un diagnostic précis.

Traitement des données par le logiciel SGBA : Utilisation du logiciel Système de Gestion des Bases Aérodromes pour le calcul de l'Indice de Service (IS) (norme OACI

Doc 9137).

Propositions : Élaboration de recommandations de maintenance optimisées basées sur les résultats obtenus.

Plan du mémoire

- **Chapitre 1 :** Introduction
- **Chapitre 2 :** Revue bibliographique et cadre conceptuel
- **Chapitre 3 :** Méthodologie de recherche
- **Chapitre 4 :** Système de Gestion des Bases Aérodromes (SGBA) .
- **Chapitre 5 :** Analyses et résultats
- **Chapitre 6 :** Stratégies mondiales de maintenance et innovations technologiques des grands hubs aéroportuaires

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET CADRE CONCEPTUEL

Introduction :

La pérennité et la sécurité des opérations aéroportuaires dépendent intrinsèquement de la qualité des infrastructures côté piste. Pour proposer une stratégie de maintenance optimisée, il est indispensable de maîtriser au préalable les fondamentaux techniques régissant le comportement des chaussées aéronautiques ainsi que les outils méthodologiques existants.

Ce chapitre, consacré à la revue bibliographique et au cadre conceptuel, a pour vocation d'établir le socle théorique de notre recherche. Il s'articule autour de quatre axes majeurs. Dans un premier temps, nous rappellerons la typologie et les fonctions des différentes zones aéroportuaires (pistes, taxiways, aprons). Nous analyserons ensuite les mécanismes complexes de dégradation, résultant de l'interaction entre les sollicitations mécaniques du trafic et les agressions climatiques.

Par la suite, nous dresserons un panorama des systèmes de gestion de la maintenance (SGM) et des indicateurs de performance standardisés (tels que le PCI et le couple ACN/PCN) utilisés à l'échelle internationale. Enfin, une synthèse des travaux de recherche antérieurs nous permettra d'identifier les limites des modèles actuels, justifiant ainsi la nécessité d'une approche intégrée telle que proposée dans ce mémoire.

2 .1 Les infrastructures aéroportuaires : typologie et fonctions

L'infrastructure aéroportuaire côté piste (Airside) est un système complexe conçu pour assurer la sécurité des mouvements d'aéronefs. Contrairement aux routes, les chaussées aéroportuaires subissent des charges statiques et dynamiques extrêmement élevées, mais avec une fréquence de répétition différente.

2.1.1 Piste, taxiway, apron : fonctions et caractéristiques

D apres les normes de l OACI, L'organisation spatiale d'un aérodrome repose sur trois composantes majeures, chacune ayant des contraintes de dimensionnement spécifiques.

A. La Piste (Runway) La piste est l'élément central, rectangulaire, défini pour l'atterrissage et le décollage.

- **Fonction :** Elle doit supporter les chocs dynamiques violents à l'atterrissage et les contraintes de cisaillement au freinage et à l'accélération.

- **Caractéristiques :** Sa longueur et sa largeur dépendent de la catégorie de l'aérodrome et de l'aéronef critique (code de référence OACI). La zone de "toucher des roues" (touchdown zone) est la plus sollicitée mécaniquement par les impacts verticaux. La texture de surface doit garantir une adhérence (skid resistance) optimale, même par temps de pluie, pour éviter l'aquaplaning.

La voie de circulation (Taxiway) :

- **Fonction :** Elle assure la liaison entre la piste et les aires de stationnement.
- **Caractéristiques :** Contrairement à la piste, le taxiway subit des charges à vitesse réduite. Cette vitesse faible est critique pour les chaussées souples (comportement viscoélastique des bitumes) car la charge est appliquée plus longtemps au même endroit, augmentant la fatigue. De plus, le trafic y est très "canalisé" (les avions suivent précisément la ligne centrale), ce qui concentre les contraintes sur une bande étroite.

L'aire de trafic (Apron) :

- **Fonction :** Zone destinée au stationnement pour l'embarquement, le ravitaillement et le fret.
- **Caractéristiques :** C'est une zone de charges statiques lourdes (avions pleins de carburant). Elle est également exposée aux déversements de produits chimiques (kérosène, huiles hydrauliques, produits de dégivrage) qui peuvent dissoudre les liants bitumineux. Pour cette raison, les aprons sont souvent conçus en béton de ciment (rigide).

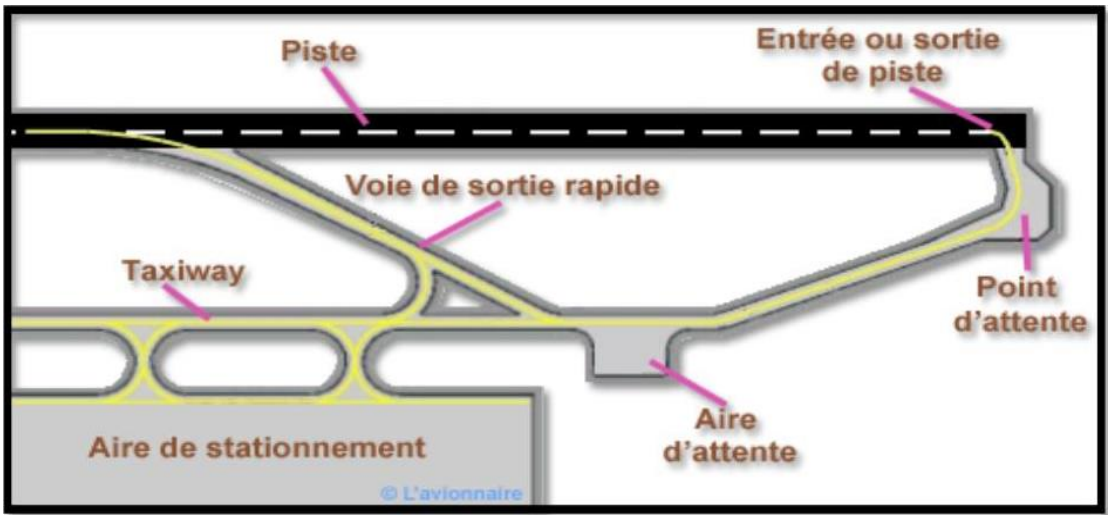


Figure 2.1 : L'aire de mouvement

2.1.2 Les chaussées aéronautiques :

Les chaussées aéronautiques regroupent l'ensemble des surfaces destinées aux déplacements, aux manœuvres et au stationnement des aéronefs. Elles constituent un élément fondamental de l'infrastructure aéroportuaire, notamment en raison des charges élevées et répétées imposées par les avions de différentes masses.

On distingue deux grandes catégories de chaussées :

- Les chaussées souples,
- Les chaussées rigides.

Dans certains aéroports, on rencontre également des structures composites résultant d'opérations successives de renforcement, telles que des couches bitumineuses appliquées sur des dalles en béton ou des superpositions de dalles en béton.

- **Les chaussées souples**

Les chaussées sont dites *souples* lorsqu'elles comportent une couche supérieure constituée de matériaux traités aux liants hydrocarbonés (matériaux bitumineux), reposant sur des couches de matériaux non traités.

Le dimensionnement de ce type de structure repose sur l'hypothèse selon laquelle la défaillance initiale apparaît principalement dans le sol support, soumis aux déformations cumulées induites par les charges répétées des aéronefs.

Ainsi, la performance globale d'une chaussée souple dépend étroitement de la résistance de la fondation et de sa capacité à limiter les déformations permanentes.

Couche	Symbole
Béton bitumineux	BB
Grave bitume	GB
Grave non traitée	GNT
Sol support	SS

- **Les chaussées rigides :**

  On qualifie de *rigides* les chaussées dont la couche supérieure est constituée de matériaux traités aux liants hydrauliques, principalement du béton de ciment.
  Ces structures sont caractérisées par une rigidité élevée : la dalle en béton distribue les charges sur une large surface, ce qui réduit considérablement les contraintes transmises au sol support.
  Cependant, la nature même du béton hydraulique fait que la dégradation de la chaussée débute généralement au sein de la dalle elle-même, sous l'effet de contraintes de flexion dépassant les limites admissibles, contrairement aux chaussées souples où la rupture s'initie souvent au niveau du sol support.

Couche	**Symbole**
Béton de ciment	BC
Béton maigre	BM
Grave non traitée	GNT
Sol support	SS

2.2 Les phénomènes de dégradation des pistes

La dégradation des chaussées aéroportuaires est un processus complexe et inéluctable, résultant de la fatigue des matériaux sous l'effet répété des charges (trafic) et de l'agressivité de l'environnement (climat). Contrairement aux routes, les pistes subissent des contraintes spécifiques : pressions de gonflage des pneus très élevées (pouvant dépasser 15 bars), charges dynamiques violentes à l'atterrissage et contraintes de cisaillement lors du freinage.

La compréhension fine de ces pathologies est la condition *sine qua non* pour établir un diagnostic pertinent et choisir la stratégie de maintenance adéquate**.**

2.2.1. Dégradations mécaniques :

Les dégradations d'origine mécanique sont directement imputables aux sollicitations induites par les trains d'atterrissage des aéronefs. Elles se manifestent principalement par des déformations et des ruptures de la structure.

L'Orniérage (Rutting)

L'orniérage est défini comme une dépression longitudinale de la surface, caractérisée par un rayon transversal faible, qui se manifeste dans les traces de roues des trains d'atterrissage. Cette déformation peut être accompagnée d'un refoulement ou d'un fluage des matériaux bitumineux, se traduisant par la formation d'un bourrelet en bordure de la dégradation.

Ce type de déformation est particulièrement prévalent dans les zones où les contraintes sont appliquées à basse vitesse ou de manière statique, comme les postes de stationnement (notamment ceux en configuration et les voies de circulation (taxiways).

Causes Fondamentales

Les origines de l'orniérage sont multiples et peuvent être structurales ou matérielles :

- **Instabilité des matériaux :** Elle résulte d'une composition inadéquate, soit de la couche de roulement (excès de liant, manque de stabilité du mélange granulaire), soit des matériaux de la couche de base, qui se déforment sous l'effet du cisaillement vertical et latéral.
- **Sous-dimensionnement ou Fatigue :** Le corps de chaussée peut être intrinsèquement sous-dimensionné pour supporter les charges réelles (ACN) ou avoir accumulé une fatigue excessive, provoquant un tassement progressif et permanent des couches profondes.

Évaluation Qualitative (Niveaux de Gravité)

L'évaluation de la sévérité de l'orniérage est fonction de la profondeur maximale de la déformation. Cette profondeur est mesurée en plaçant une règle de 3 mètres de manière transversale sur la trace de roue, indépendamment du type de chaussée.

Tableau 2.1 : Classification des défauts de surface selon la profondeur et le niveau de gravité

Niveau de gravité	Profondeur maximale (h)	Effets principaux
Léger	h ≤ 1 cm	Altération faible de l'uni
Moyen	1 cm < h ≤ 2 cm	Rétention d'eau notable
Élevé	h > 2 cm	Risque majeur d'aquaplanage ; intervention urgente

Méthode de Relevé Quantitatif

Le paramètre quantitatif à enregistrer pour la gestion est la surface (en m^2) du rectangle qui encadre la zone dégradée. Il est souvent recommandé d'effectuer le relevé juste après ou pendant un épisode pluvieuse, car la rétention d'eau permet de localiser et de délimiter plus facilement les zones d'orniérage.

Conséquences et Évolution

L'orniérage est un défaut évolutif dont les conséquences dépassent le simple défaut de planéité :

- **Altération de l'Uni :** Réduit le confort de roulement, cause des vibrations et potentiellement des dommages aux aéronefs.
- **Sécurité et Adhérence :** La rétention d'eau dans l'orniérage augmente drastiquement le risque d'aquaplanage, une condition critique pour la sécurité sur les pistes.
- **Dégradation Structurelle :** L'eau stagnante s'infiltre plus facilement dans le corps de chaussée, accélérant le processus de détérioration.

- **Évolution** : L'orniérage est souvent un précurseur des dégradations par fatigue, menant à terme à la fissuration puis au faïençage de la structure sous l'effet conjugué de l'eau et des charges.



Figure 2.2 : Illustration de l'orniérage

Les fissures dans les chaussées

Fissures de joint :

Les fissures de joint sont localisées aux niveaux des joints, c'est-à-dire aux raccordements longitudinaux entre deux bandes de la couche de roulement ou aux joints transversaux lors de reprises de revêtement. Par extension, ce terme peut également désigner les limites entre zones de structures différentes.

Causes possibles :

- Défauts de mise en œuvre de la couche de roulement (bord de la première bande trop froid, compactage insuffisant du joint, mauvaise adhérence entre les bandes lors d'une reprise) ;
- Discontinuités structurelles entre chaussées souples et rigides.

Évaluation qualitative (niveaux de gravité) :

Les niveaux de gravité sont déterminés en fonction de l'ouverture de la fissure, de l'existence de ramifications et de la présence de départs de matériaux :

- Léger : fissure simple d'ouverture < 5 mm ou bien réparée ;

- Moyen : fissure simple > 5 mm ou fissure ramifiée sans départ de matériaux ;
- Élevé : fissure avec départs de matériaux.

Le dépistage est facilité après un épisode pluvieux.

Évaluation quantitative :

Le paramètre mesuré est la longueur de la fissure (en m) pour chaque niveau de gravité. Une fissure présentant différents niveaux de gravité sur sa longueur est segmentée en tronçons distincts pour l'enregistrement

Exemple : une fissure de 25 m peut comporter 5 m de niveau élevé, 10 m de niveau moyen et 10 m de niveau léger.

Conséquences et évolution :

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée
- Départs de matériaux
- Remplissage par le sable



Figure 2. 3 : Fissure de joint

Fissures de fatigue ou de retrait

Ces fissures apparaissent longitudinalement dans les traces des atterrisseurs et sont souvent accompagnées de fissures transversales aléatoires et de dépressions localisées.

Causes possibles :

- Fatigue avancée de la chaussée ou sous-dimensionnement d'une ou plusieurs couches

- Diminution de la portance du sol support (drainage déficient, défaut d'étanchéité de la surface)
- Mauvais fonctionnement structurel (couches décollées, etc.)
- Qualité médiocre de certains matériaux.

Évaluation qualitative :

Même critères que pour les fissures de joint : ouverture, ramifications et départs de matériaux.

Évaluation quantitative :

Mesure de la longueur de chaque tronçon selon le niveau de gravité, avec découpage des fissures présentant plusieurs niveaux, comme pour les fissures de joint.

Conséquences et évolution :

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée ;
- Départs de matériaux ;
- Faïençage de fatigue.



Figure 2 . 4 : Fissures de fatigue ou retrait

Fissures paraboliques :

Ces fissures se regroupent en forme de croissant et affectent la couche de roulement. Elles peuvent être accompagnées de bourrelets sur les bords.

Causes possibles :

- Efforts tangentiels importants dans la couche de roulement, souvent dans les zones de virage ou de freinage ;
- Épaisseur insuffisante de la couche de roulement ;
- Défauts de mise en œuvre (adhérence insuffisante ou température inadaptée du mélange lors du compactage).

Évaluation qualitative :

Aucun niveau de gravité spécifique n'est défini pour ce type de fissures.

Évaluation quantitative :

Le paramètre à mesurer est la surface (en m²) du rectangle entourant la zone affectée.

Conséquences et évolution :

- Infiltration d'eau dans le corps de chaussée ;
- Départs de matériaux

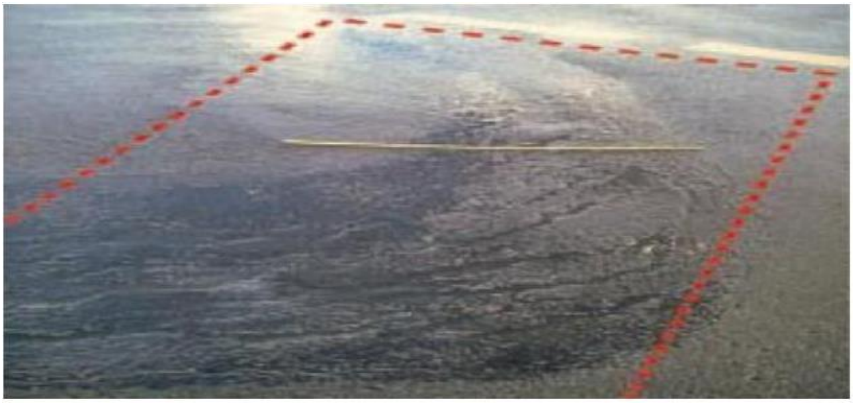


Figure 2.5 : FISSURES PARABOLIQUES

Le Faïençage

A. Faïençage de Retrait (Shrinkage Cracking) :

Le faïençage de retrait se manifeste comme un ensemble de fissures formant un maillage sur la surface de la chaussée. Les mailles de ce réseau sont généralement de forme rectangulaire, avec une largeur comprise entre 60 centimètres et 3 mètres. Une caractéristique distinctive de

cette dégradation est qu'elle peut se rencontrer indifféremment sur toute la largeur de la chaussée, y compris dans les zones qui ne sont pas soumises au passage des aéronefs.

Causes Possibles :

La principale cause de ce phénomène est l'effet thermique (retrait) qui s'exerce sur la couche de roulement. Il est crucial de noter que, contrairement au faïençage de fatigue, cette dégradation ne décèle pas un défaut structurel profond ou un problème de portance sous-jacent. Elle est souvent liée aux contraintes internes du matériau bitumineux dues aux variations de température.

Relevé Qualitatif (Niveaux de Gravité) :

Le niveau de gravité pour l'ensemble du maillage est évalué à partir de la fissure constitutive la plus grave observée dans la zone. Les niveaux sont définis selon les critères suivants :

- ***Niveau Léger :*** Correspond à une fissure simple d'ouverture inférieure à 5 mm, ou à une fissure ayant été bien réparée.
- ***Niveau Moyen :*** S'applique à une fissure simple dont l'ouverture est supérieure à 5 mm, ou à une fissure présentant des ramifications sans qu'il y ait eu de départ de matériaux.
- ***Niveau Élevé :*** Est attribué lorsque la fissure présente des départs de matériaux (perte de granulats ou de liant).

Le dépistage de cette dégradation se trouve, comme pour les autres fissures, facilité après une averse, l'eau mettant en évidence le maillage.

Relevé Quantitatif :

Le paramètre à mesurer pour quantifier cette dégradation est la surface (du rectangle qui encadre l'ensemble de la zone affectée par le faïençage de retrait.

Conséquences et Évolution :

Les conséquences principales de ce maillage sont l'infiltration d'eau dans le corps de chaussée et l'apparition de départs de matériaux en surface. En ouvrant des voies de pénétration à l'eau, le faïençage de retrait peut également évoluer et contribuer ultérieurement à l'apparition du faïençage de fatigue (structurel) sous l'effet des charges du trafic.

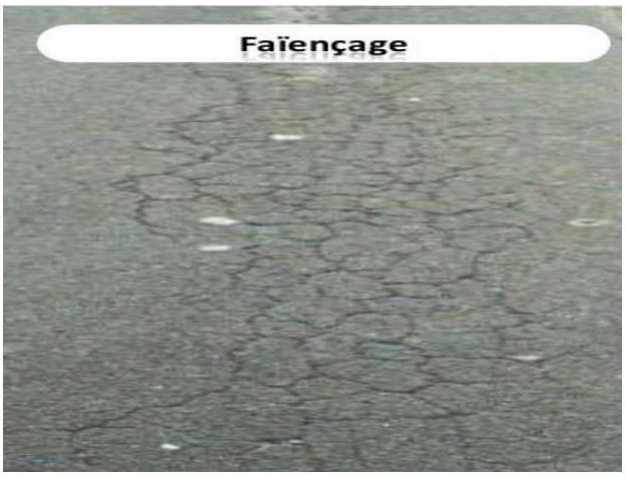


Figure 2.6 : FAIENCAGE

2.2.2. Dégradations climatiques :

Les dégradations d'origine climatique résultent de l'action directe ou indirecte des conditions environnementales sur les matériaux constitutifs des chaussées. Les variations thermiques, la présence d'eau et les cycles climatiques accélèrent le vieillissement des structures et aggravent les désordres existants.

Dégradations par gel / dégel :

• *Causes possibles :*

Les dégradations par gel/dégel résultent de la pénétration de l'eau dans les pores et fissures de la chaussée. Lors du gel, l'augmentation de volume de l'eau provoque des contraintes internes entraînant fissuration, désagrégation des matériaux et soulèvements localisés. Ces phénomènes sont favorisés par un drainage insuffisant, une perte d'étanchéité de la couche de roulement et l'utilisation de matériaux sensibles au gel.

• *Relevé qualitatif :*

L'auscultation visuelle met en évidence des fissures ouvertes, des éclatements superficiels, des affaissements ponctuels et des zones de décollement de matériaux. Le niveau de gravité est apprécié en fonction de l'étendue des zones touchées et de l'intensité des désordres observés.

• *Relevé quantitatif :*

Le relevé quantitatif consiste à mesurer la surface (en m^2) des zones affectées ainsi que la

longueur et l'ouverture des fissures associées. Les zones présentant des soulèvements ou des affaissements sont relevées séparément.

• *Conséquences et évolution :*
Ces dégradations entraînent une perte rapide de la portance et de l'uni de la chaussée. Elles favorisent l'infiltration de l'eau et accélèrent l'évolution vers des fissurations de fatigue et des dégradations structurelles profondes si aucune intervention n'est réalisée.

Dégradations par dilatation thermique

• *Causes possibles :*
La dilatation thermique est provoquée par les variations de température importantes, entraînant des mouvements différentiels des matériaux. Le vieillissement des liants bitumineux, une formulation inadaptée ou l'absence de dispositifs de dilatation accentuent ces phénomènes.

• *Relevé qualitatif :*
Ces dégradations se traduisent par des fissures longitudinales ou transversales, des soulèvements localisés et parfois un gonflement de la couche de roulement. Le degré de gravité est évalué selon la largeur des fissures et la continuité de la déformation.

• *Relevé quantitatif :*
Les mesures portent sur la longueur des fissures (en m), leur ouverture moyenne (en mm) et la surface des zones déformées. Les zones affectées sont segmentées si le niveau de gravité varie.

• *Conséquences et évolution :*
La dilatation thermique fragilise la structure de la chaussée, réduit son étanchéité et favorise l'apparition de fissurations de retrait et de fatigue. À terme, ces désordres peuvent évoluer vers des ruptures localisées du revêtement.

Dégradations par ruissellement et action de l'eau

Causes possibles :
Le ruissellement excessif et la stagnation de l'eau sont généralement dus à une pente insuffisante, à un mauvais état du drainage ou à une dégradation de l'étanchéité superficielle. L'eau agit comme un agent accélérateur de détérioration du corps de chaussée.

Relevé qualitatif :

L'inspection visuelle révèle des zones de stagnation d'eau, des ravinements superficiels, des pertes de matériaux et des débuts de fissuration. L'observation est facilitée après une pluie.

Relevé quantitatif :

Le relevé consiste à mesurer la surface (en m²) des zones de stagnation ou d'érosion ainsi que la longueur des ravinements éventuels.

Conséquences et évolution :

L'action prolongée de l'eau entraîne une diminution de l'adhérence, un risque accru d'aquaplanage et une dégradation progressive de la structure. Sans traitement, ces phénomènes conduisent à une perte significative de la durabilité et de la sécurité de la chaussée.

2.2.3. Effets combinés trafic–climat

• **Causes possibles :**

Les effets combinés trafic–climat résultent de l'action simultanée des sollicitations mécaniques dues au passage répété des aéronefs et des agressions climatiques (variations thermiques, cycles gel/dégel, présence d'eau). Le trafic provoque des microfissures et des déformations qui facilitent la pénétration de l'eau, tandis que les conditions climatiques accentuent la fatigue des matériaux et réduisent leur capacité portante. Ces effets sont particulièrement marqués dans les zones fortement sollicitées telles que la bande centrale des pistes, les zones de freinage et les voies de circulation.

• **Relevé qualitatif :**

L'auscultation visuelle met en évidence une superposition de pathologies, notamment fissurations multiples, orniérage, faïençage et dégradations superficielles associées à des pertes de matériaux. Le niveau de gravité est apprécié globalement en tenant compte de l'étendue, de l'intensité et de la combinaison des différents désordres observés.

• **Relevé quantitatif :**

Le relevé quantitatif consiste à mesurer les longueurs de fissures (en m), les surfaces dégradées (en m²) et, le cas échéant, les profondeurs d'orniérage. Chaque type de dégradation est relevé séparément, puis intégré dans une évaluation globale de l'état de la chaussée.

• **Conséquences et évolution :**

Les effets combinés trafic–climat accélèrent considérablement le vieillissement des chaussées

aéroportuaires. Ils entraînent une perte rapide de l'uni, de l'adhérence et de la portance, augmentant les risques pour la sécurité des opérations aéronautiques. À terme, ces dégradations évoluent vers des désordres structurels majeurs nécessitant des interventions lourdes de maintenance ou de réhabilitation.

Effets combinés du trafic et du climat :

Les chaussées aéroportuaires subissent des sollicitations particulièrement sévères en raison de la combinaison de charges mécaniques importantes et de conditions climatiques variables. L'interaction entre le trafic aérien et les facteurs environnementaux accélère le processus de dégradation et engendre des pathologies complexes qui affectent à la fois la sécurité et la durabilité des infrastructures.

A. Effets du trafic aérien

Le passage répété des aéronefs impose des contraintes dynamiques et statiques sur la structure du revêtement. Ces sollicitations entraînent :

- des microfissurations et fissures longitudinales dans les zones de charge élevée,
- des tassements progressifs des couches profondes,
- l'apparition de déformations permanentes telles que l'orniérage et le fluage des matériaux bitumineux.

Ces désordres mécaniques affaiblissent la structure et facilitent l'infiltration de l'eau.

B. Effets climatiques

Les facteurs climatiques agissent de manière synergique avec le trafic :

- **Cycles gel/dégel** : l'eau infiltrée se dilate et se contracte, provoquant fissurations et soulèvements localisés.
- **Variations thermiques** : dilatation et retrait des matériaux entraînent l'ouverture progressive des fissures et le décollement de la couche de roulement.
- **Infiltration et ruissellement** : l'eau stagnante ou ruisselante accentue la détérioration des matériaux et favorise le développement des fissures et faïençages.

- **Interactions trafic–climat :**

L'action combinée du trafic et du climat amplifie l'intensité et la vitesse de détérioration :

- Les fissures et microdéformations induites par le trafic deviennent des points d'entrée pour l'eau et les agressions thermiques.
- L'exposition répétée à ces conditions accélère la fatigue des matériaux et la perte de portance du sol support.
- Les zones les plus sollicitées, telles que la bande centrale des pistes et les zones de freinage, montrent une accumulation simultanée de plusieurs pathologies (orniérage, fissures, faïençage, décollements).
- **2.2.4.Méthodologie de diagnostique :**

Le diagnostic des chaussées aéroportuaires constitue une étape essentielle pour assurer la sécurité, la durabilité et l'efficacité opérationnelle des pistes, taxiways et aires de trafic. Contrairement aux routes classiques, les pistes sont soumises à des charges extrêmes et à des conditions environnementales sévères. Une méthodologie rigoureuse est donc indispensable pour évaluer de manière objective l'état de la chaussée, planifier les interventions de maintenance et optimiser la gestion des infrastructures. Parmi les outils les plus utilisés figure l'Indice de Service (IS), qui fournit un indicateur synthétique et normalisé de la performance fonctionnelle et structurelle des chaussées.

A. La méthode de l'Indice de Service (IS)

La méthode de l'Indice de Service (IS) constitue une approche systématique d'évaluation de l'état des chaussées aéroportuaires basée sur l'analyse des relevés visuels. Elle permet d'apprécier de manière objective le niveau de qualité et de performance d'une piste, taxiway ou aire de trafic. Cette méthode est largement utilisée dans la majorité des aérodromes français en raison de ses avantages : rapidité de mise en œuvre, coût réduit et impact minimal sur la circulation aérienne.

Grâce à cette approche, il est possible de recueillir une quantité importante de données sur l'état des chaussées et de suivre leur évolution dans le temps. L'IS sert ainsi d'outil décisionnel essentiel pour orienter les stratégies de maintenance préventive, de réfection ou d'auscultation approfondie, tout en permettant de vérifier l'adéquation entre la portance déclarée et la capacité réelle de la chaussée (ITAC, 1999).

B. Principe de calcul de l'Indice de Service

L'Indice de Service est un indicateur numérique normalisé, exprimé sur une échelle de 0 à 100

- **IS = 100** correspond à une chaussée neuve, sans aucune dégradation observable.
- **IS = 0** indique une chaussée hors service, nécessitant une fermeture immédiate ou une réhabilitation complète.

L'IS augmente donc proportionnellement au niveau de service offert par la chaussée et reflète globalement sa performance fonctionnelle et sa sécurité opérationnelle.

C. Méthodologie de relevé visuel

La méthodologie repose sur une inspection systématique et structurée de la surface de la piste

1. **Découpage en mailles homogènes** :
   Les aires de mouvement de l'aérodrome sont subdivisées en mailles de surface **standardisée**, généralement de 500 m² chacune. Ce maillage permet de réaliser une évaluation précise, localisée et répétable de chaque section de la piste.
2. **Identification des dégradations** :
   Pour chaque maille, toutes les dégradations observables sont recensées selon le catalogue STBA, qui classe les désordres en différents types (fissures, orniérage, faïençage, pertes de matériaux, etc.).
3. **Caractérisation de chaque dégradation** :
   Chaque défaut est enregistré à l'aide d'un triplet d'information :
   - **Type de dégradation** : nature du désordre observé.
   - **Niveau de gravité** : Léger (L), Moyen (M) ou Élevé (E).
   - **Densité de dégradation** : proportion de la maille affectée, mesurée en surface caractéristique.

D. Traitement et exploitation des données

Une fois le relevé exhaustif réalisé, les données sont traitées à l'aide d'un logiciel développé par le Service Technique des Bases Aériennes. Le logiciel intègre :

- les types et niveaux de gravité de chaque dégradation,
- la densité et l'étendue spatiale des défauts dans chaque maille,
- et calcule automatiquement un IS global pour l'ensemble de la piste ou de l'aérodrome.

Cette approche permet :

- de visualiser les zones critiques nécessitant des interventions urgentes,
- de planifier des actions de maintenance préventive,
- et d'établir un suivi temporel précis de l'évolution de la chaussée, facilitant la décision stratégique sur le renouvellement ou la réhabilitation des infrastructures.

E. Maillages de la piste

Définition et principe :

Le maillage de la piste consiste à subdiviser systématiquement les aires de mouvement de l'aérodrome, y compris les pistes, taxiways et aires de stationnement, en unités élémentaires appelées mailles. Chaque maille correspond à une section de surface homogène, c'est-à-dire présentant des caractéristiques similaires en termes de matériaux, d'épaisseur, de portance et de sollicitations mécaniques. Cette subdivision permet de standardiser les relevés visuels et instrumentaux, d'assurer leur reproductibilité et de fournir une base objective pour l'analyse de l'état de la chaussée.

La dimension typique d'une maille est de 500 m², ce qui constitue un compromis optimal entre précision et efficacité opérationnelle. Une maille trop petite augmente le temps d'inspection et la complexité des traitements de données, tandis qu'une maille trop grande risque de masquer les dégradations localisées.

Application pratique :

Dans la pratique, le maillage permet de :

- Cartographier précisément les dégradations : chaque maille est inspectée individuellement pour identifier les types de défauts (orniérage, fissures, faïençage, pertes de matériaux).
- Mesurer la gravité et la densité des dégradations : pour chaque maille, on note le niveau de gravité (léger, moyen, élevé) et la surface affectée. Ces informations servent de base à l'élaboration de l'Indice de Service (IS).
- Assurer un suivi temporel : en répétant les relevés à intervalles réguliers, le maillage permet de suivre l'évolution des défauts et de détecter les zones à risque avant qu'elles ne nécessitent des réparations lourdes.

L'inspection se fait généralement maille par maille, soit par relevé visuel, soit à l'aide d'instruments de mesure (profilomètre, nivellement laser, photogrammétrie). Chaque maille constitue ainsi une unité d'analyse indépendante, permettant d'obtenir des résultats détaillés et exploitables pour la planification de la maintenance.

Intérêt pour la gestion et la maintenance

L'un des principaux avantages du maillage est sa capacité à hiérarchiser les interventions :

- Les zones présentant des dégradations importantes peuvent être traitées en priorité.
- Les sections moins affectées peuvent bénéficier d'un suivi régulier sans mobiliser inutilement des ressources.
- L'analyse consolidée des mailles permet de déterminer l'IS global de la piste tout en conservant une lecture fine des zones critiques.

Cette méthode permet ainsi une gestion proactive de la piste, réduisant les coûts d'entretien, minimisant les interruptions d'exploitation et améliorant la sécurité des opérations aériennes.

Perspectives et intégration dans les systèmes modernes

Avec l'émergence des outils numériques, le maillage de la piste peut être intégré à des systèmes GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) et à des bases de données géoréférencées. Cela permet :

- de visualiser les dégradations sous forme de cartes interactives,
- de suivre l'historique de chaque maille,
- d'anticiper les interventions futures grâce à des modèles prédictifs basés sur l'évolution des défauts observés.

Ainsi, le maillage n'est pas seulement un outil d'évaluation ponctuelle, mais constitue un levier stratégique pour la gestion durable et optimisée des infrastructures aéroportuaires.

2.3. Les systèmes de gestion de maintenance

La gestion efficace des infrastructures aéroportuaires repose sur la capacité à maintenir les chaussées en état optimal tout en assurant la sécurité des opérations aéronautiques et en maîtrisant les coûts. Pour ce faire, les Systèmes de Gestion de Maintenance (SGM)

constituent un outil stratégique permettant de planifier, suivre et optimiser les interventions sur les pistes, taxiways et aires de stationnement.

Ces systèmes s'appuient sur l'analyse des dégradations observées, des indicateurs de performance (tels que l'Indice de Service – IS) et des historiques d'entretien pour définir la stratégie de maintenance la plus adaptée à chaque situation.

2.3.1. Concepts fondamentaux de maintenance

La maintenance des chaussées peut être classée selon trois approches principales, chacune ayant des objectifs et des modalités d'intervention spécifiques :

- **Maintenance corrective :**

La maintenance corrective intervient après l'apparition d'un défaut ou d'une dégradation critique. Son objectif est de réparer ou remplacer les éléments défectueux pour rétablir la fonctionnalité et la sécurité de la chaussée.

- Avantages : action ciblée sur les défauts existants, efficacité immédiate.
- Limites : coût élevé, perturbation possible des opérations aériennes, risque d'aggravation rapide si l'intervention est retardée.

- **Maintenance préventive :**

La maintenance préventive consiste à anticiper les dégradations avant qu'elles n'affectent la sécurité ou la performance. Elle repose sur des inspections régulières et des interventions planifiées, comme le resurfaçage partiel ou le colmatage des fissures.

- Avantages : réduction des coûts à long terme, limitation des interruptions d'exploitation, prolongation de la durée de vie des infrastructures.
- Limites : nécessite une planification rigoureuse et des ressources constantes.

- **Maintenance prédictive :**

La maintenance prédictive utilise des données historiques et des modèles de dégradation pour prévoir l'apparition de défauts et déterminer le moment optimal d'intervention. Elle s'appuie sur des indicateurs comme l'IS, le PCN/ACN, la densité de fissures et les relevés instrumentaux.

- Avantages : intervention au moment optimal, optimisation des coûts, réduction des arrêts imprévus.
- Limites : nécessite des outils de suivi sophistiqués, des bases de données complètes et une expertise technique élevée.

2.3.2. Indicateurs de performance des chaussées aéroportuaires :

Les indicateurs de performance des chaussées constituent des outils essentiels pour évaluer l'état et la capacité fonctionnelle des infrastructures aéroportuaires. Ils permettent de quantifier la dégradation, d'établir des priorités d'intervention et d'optimiser les stratégies de maintenance. Parmi les plus utilisés, on distingue le Pavement Condition Index (PCI), le couple ACN/PCN, l'International Roughness Index (IRI) et l'Indice de Service (IS**).**

- **Pavement Condition Index (PCI)**

Le PCI est un indicateur normalisé exprimé sur une échelle de 0 à 100, représentant la condition structurelle et fonctionnelle d'une chaussée.

- PCI = 100 : chaussée en excellent état, sans dégradation notable.
- PCI = 0 : chaussée en état critique, nécessitant une réhabilitation complète.

Le calcul du PCI repose sur :

- l'identification des types de dégradations (fissures, faïençage, orniérage, etc.),
- la mesure de leur gravité et de leur étendue,
- l'agrégation des données selon des méthodes standardisées (ASTM D6433).

Le PCI permet de suivre l'évolution de l'état des chaussées dans le temps et d'orienter la maintenance préventive et corrective.

- **Méthode ACN/PCN :**

La méthode ACN/PCN constitue un système international normalisé, élaboré par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), permettant d'évaluer la résistance des chaussées aéronautiques et, par conséquent, de déterminer l'admissibilité des aéronefs en fonction de leurs charges et de la capacité portante des infrastructures. Ce dispositif est appliqué par l'ensemble des États membres de l'OACI depuis 1983

Le PCN : Pavement Classification Number

Le principe fondamental de cette méthode repose sur l'attribution d'un numéro PCN à chaque zone homogène d'une plate-forme aéroportuaire, c'est-à-dire une section dont les caractéristiques techniques sont suffisamment uniformes pour être considérées comme un ensemble cohérent du point de vue du comportement mécanique. Le PCN exprime la capacité portante de la chaussée et se publie selon le format prescrit par l'Annexe 14 de l'OACI, sous la forme :

PCN = 27 / F / A / W / T

Le premier nombre correspond au numéro de classification de la chaussée, arrondi à l'entier le plus proche.

a. Nature de la chaussée (F ou R)

La première lettre indique le type de structure :

- F : chaussée souple (Flexible), constituée principalement d'enrobés bitumineux ;
- R : chaussée rigide, composée essentiellement de béton de ciment.

Pour les structures mixtes combinant béton de ciment et matériaux bitumineux, on retient la désignation correspondant au comportement mécanique dominant.

b. Catégorie de résistance du sol support (A – B – C – D)

La deuxième lettre caractérise la portance du sol naturel sous-jacent :

- A : résistance élevée ;
- B : résistance moyenne ;
- C : résistance faible ;
- D : résistance très faible.

c. Limite de pression de gonflage des pneumatiques (X – Y – Z – W)

La troisième lettre renvoie à la pression maximale admissible des pneumatiques des aéronefs :

- X : 1,5 MPa ;
- Y : 1 MPa ;
- Z : 0,5 MPa ;
- W : aucune limite spécifiée.

2.4. Recherches existantes et limites identifiées :

2.4.1. Travaux antérieurs sur la modélisation du vieillissement des pistes :

Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la dégradation et du vieillissement des chaussées aéroportuaires. Ces recherches se sont principalement focalisées sur la modélisation des phénomènes de fatigue mécanique, l'orniérage, le développement de fissures et la détérioration des couches bitumineuses ou en béton.

Les modèles développés reposent souvent sur des relations empiriques ou semi-empiriques reliant l'intensité du trafic et la durée de vie résiduelle des pistes. Ces études ont permis de mieux comprendre les mécanismes fondamentaux de dégradation et d'orienter les pratiques de maintenance préventive et corrective.

2.4.2. Limites des approches actuelles

Malgré l'importance de ces travaux, plusieurs lacunes méthodologiques ont été identifiées :

- Manque d'intégration conjointe du trafic et des conditions climatiques :
  La majorité des modèles existants considèrent séparément les effets du trafic (charges répétées, pression des pneus, nombre d'atterrissages) et ceux du climat (gel/dégel, dilatation thermique, ruissellement). Cette dissociation limite la capacité des modèles à prédire précisément la dégradation réelle des pistes dans des environnements exposés à des conditions climatiques variées et extrêmes.
- Approches souvent limitées à certains types de chaussées :
  Les modèles existants se concentrent majoritairement sur les pistes en enrobé bitumineux ou sur les pistes en béton, sans prendre en compte les configurations hybrides ou les variations locales de matériaux et de structure.
- Données insuffisamment intégrées pour la maintenance prédictive :
  Les études antérieures ne tiennent pas toujours compte des relevés exhaustifs, des indices de service (IS) ou des mesures instrumentales modernes (IRI, PCN/ACN), ce qui limite l'applicabilité des modèles aux stratégies de maintenance optimisées.

2.4.3Besoin d'une approche optimisée et intégrée

Ces limites mettent en évidence le besoin d'une méthodologie globale permettant :

- d'intégrer simultanément les effets du trafic et du climat,

- de considérer les caractéristiques spécifiques de chaque piste et la diversité des matériaux,
- d'exploiter les indicateurs de performance existants (PCI, IRI, IS, ACN/PCN) pour construire des modèles fiables, prédictifs et applicables à la planification de la maintenance.

Une telle approche intégrée permettrait non seulement de mieux prédire l'évolution des dégradations, mais aussi d'optimiser les interventions de maintenance, de réduire les coûts et d'améliorer la sécurité et la durabilité des infrastructures aéroportuaires.

CHAPITRE III : METHODOLOGIE DE RECHERCHE

3.1 Démarche générale

3.1.1 Type d'étude

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une recherche appliquée fondée sur un cas réel, à savoir l'aérodrome de Tébessa. Le choix de ce type d'étude se justifie par la nécessité d'analyser une situation concrète à partir de données réelles, observables et directement liées à l'état des infrastructures aéroportuaires. Une telle approche permet de relier les considérations théoriques relatives à la maintenance des chaussées aéronautiques à une réalité de terrain, ce qui renforce à la fois la pertinence scientifique et l'intérêt pratique du travail entrepris.

Le travail réalisé porte principalement sur l'analyse technique et fonctionnelle de la piste étudiée, en tenant compte des conditions de trafic aérien, des paramètres climatiques et des caractéristiques structurales de la chaussée. Cette démarche apparaît particulièrement adaptée aux objectifs du mémoire, dans la mesure où elle permet d'aboutir à des résultats réalistes, interprétables et directement exploitables dans une perspective de gestion de la maintenance. Elle offre également la possibilité d'identifier les facteurs majeurs influençant la dégradation de la piste et d'orienter les propositions d'amélioration sur des bases techniques solides.

3.1.2 Étapes de la recherche

La recherche a été conduite selon une démarche progressive et structurée, destinée à assurer la cohérence de l'analyse et la fiabilité des résultats obtenus. Cette démarche s'appuie sur plusieurs étapes complémentaires, allant de la collecte des informations de base jusqu'à la formulation d'une approche d'optimisation de la maintenance.

Dans une première étape, une collecte des données a été réalisée. Elle a concerné les données climatiques, les données de trafic aérien ainsi que les données techniques et structurales relatives à la piste. Cette phase a permis de constituer une base d'informations indispensable à la compréhension du contexte de fonctionnement de l'infrastructure étudiée.

Dans une deuxième étape, une évaluation de l'état de la piste a été effectuée à partir des inspections visuelles et de l'analyse des dégradations observées sur le terrain. Cette opération a permis d'identifier les principales formes de détérioration, d'en apprécier la gravité et de localiser les zones les plus affectées.

Dans une troisième étape, une analyse de l'évolution de la dégradation a été menée afin de mieux comprendre le comportement de la chaussée sous l'effet combiné du trafic aérien, des conditions climatiques et des caractéristiques propres à la structure. Cette réflexion est essentielle pour expliquer la répartition spatiale des désordres et pour interpréter les valeurs de l'indice de service obtenues.

Enfin, une stratégie de maintenance et une démarche d'optimisation ont été envisagées dans le but d'améliorer la durabilité, la sécurité et la performance de la piste. Cette dernière phase vise à proposer une lecture rationnelle des résultats en conciliant les exigences techniques, économiques et opérationnelles.

3.2 Présentation du site d'étude

3.2.1 Présentation générale de l'aérodrome de Tébessa

L'aérodrome de Tébessa, également désigné sous l'appellation aérodrome Cheikh Larbi Tébessi, constitue le site retenu pour cette étude. Il est situé à environ 4 km au nord de la ville de Tébessa. Cet aérodrome relève de la classe B, porte le code OACI DABS et possède un statut civil.

La plateforme aéroportuaire s'étend sur une superficie de 263 ha, 82 ares et 45 centiares. Sa date de construction remonte à 1956. Elle se situe à une altitude d'environ 814 m, aux coordonnées géographiques suivantes : 35°25'15" N de latitude et 8°07'32" E de longitude. Ces caractéristiques géographiques et altimétriques sont importantes, car elles influencent à la fois les conditions d'exploitation aérienne et le comportement des chaussées sous l'effet des sollicitations climatiques et mécaniques.

Tableau 3. 1 récapitule les principales données d'identification de l'aérodrome.

Paramètre	Valeur
Nom de l'aérodrome	Aérodrome de Tébessa / Cheikh Larbi Tébessi
Localisation	4 km au nord de la ville de Tébessa
Classe	B
Code OACI	DABS
Statut	Civil
Superficie de la zone aéroportuaire	263 ha 82 ares 45 ca

3.2.2 Plan de l'aérodrome

Le plan de masse de l'aérodrome et le plan de situation constituent des documents essentiels pour la compréhension de l'organisation spatiale du site. Ils permettent d'identifier la

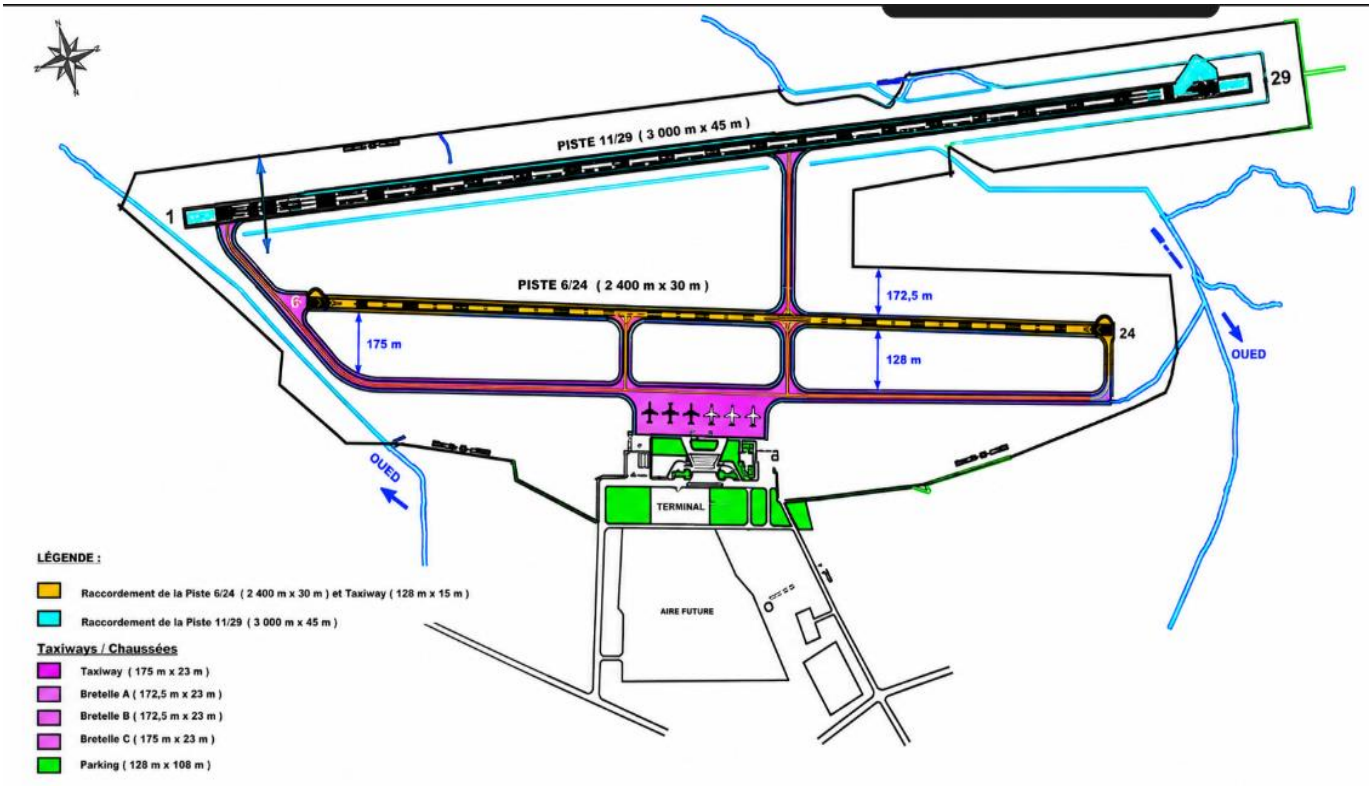


Figure 2.1 : Plan de masse de l'aérodrome de Tébessa



Figure 2.2 : Plan de situation de l'aérodrome de Tébessa

3.2.3 Caractéristiques des infrastructures aéroportuaires

L'aérodrome de Tébessa comprend plusieurs infrastructures destinées à assurer les mouvements des aéronefs et le fonctionnement général de la plateforme. Il comporte notamment deux pistes principales, des voies de circulation, des zones de stationnement ainsi que des zones d'approche.

La première piste est orientée 12/30 et présente une longueur de 2400 m pour une largeur de 30 m, avec un PCN de 31/F/D/W/T. La deuxième piste est orientée 11/29 et présente une longueur de 3000 m pour une largeur de 45 m. Elle comporte des accotements de 7,5 m de largeur ainsi que deux P.O.R situées aux extrémités, d'une longueur de 100 m chacune, avec un PCN de 59/F/D/W/T. L'aérodrome comprend également trois bretelles assurant les liaisons entre la piste et le parking, ainsi qu'une aire de stationnement de 350 m de longueur et de 100 m de largeur

Tableau 3. 2 les principales caractéristiques des infrastructures de l'aérodrome.

Infrastructure	Caractéristiques principales
Piste 12/30	2400 m × 30 m ; PCN : 31/F/D/W/T
Piste 11/29	3000 m × 45 m ; accotements de 7,5 m ; deux P.O.R de 100 m ; PCN : 59/F/D/W/T
Bretelles	Trois bretelles : A, B et C
Parking	350 m × 100 m
Autres infrastructures	Voies de circulation, aires de trafic et zones d'approche

3.2.4 Présentation détaillée de la piste 12/30

Dans le cadre de cette étude, l'analyse porte plus particulièrement sur la piste 12/30. Cette piste est orientée selon un axe 120°/300°, correspondant globalement à une direction sud-est / nord-ouest. Cette orientation n'est pas neutre du point de vue opérationnel, car elle est liée aux vents dominants de la région. Une orientation convenablement adaptée permet de réduire l'effet du vent de travers, d'améliorer la stabilité des aéronefs et d'optimiser les phases de décollage et d'atterrissage.

La piste présente une longueur de 2400 m et une largeur de 30 m. La longueur constitue un paramètre déterminant pour la sécurité des opérations, car elle dépend de plusieurs facteurs tels que la masse de l'aéronef, la température, l'altitude et les conditions de vent. Dans le cas présent, une longueur de 2400 m peut être considérée comme suffisante pour l'exploitation d'aéronefs de taille moyenne dans des conditions normales. La largeur de 30 m contribue quant à elle à la stabilité directionnelle lors des phases critiques d'exploitation.

Le revêtement de la piste est constitué d'un matériau bitumineux de type asphalte ou béton bitumineux. Il s'agit donc d'une chaussée flexible. Ce type de structure se caractérise par une bonne répartition des charges vers les couches inférieures, une certaine souplesse face aux déformations et une facilité relative d'entretien localisé. Toutefois, il reste sensible aux températures élevées, aux variations thermiques et au vieillissement, ce qui peut favoriser l'apparition de fissures et d'autres formes de dégradation.

La capacité portante de la piste est exprimée par un PCN d'environ 31/F/D/W/T. Cette désignation traduit respectivement une chaussée flexible, un sol support de faible portance, l'absence de limitation particulière de pression des pneus et une évaluation fondée sur une

méthode technique. Une telle valeur indique une capacité portante moyenne, ce qui implique une gestion attentive du trafic, notamment pour les aéronefs les plus lourds.

Sur le plan des équipements, la piste dispose d'un balisage lumineux à haute intensité, ce qui permet son exploitation de nuit et dans certaines situations de faible visibilité. En revanche, l'absence de système ILS constitue une limite opérationnelle en cas de conditions météorologiques défavorables. D'un point de vue fonctionnel, la piste 12/30 peut être considérée comme une piste secondaire, mais elle conserve un rôle stratégique, car elle permet d'adapter l'exploitation en fonction de la direction du vent et des besoins de trafic.

Tableau *3*. 3 : les principales caractéristiques de la piste étudiée.

Élément	**Description**
Numéro de piste	12/30
Orientation	120° / 300°
Axe	Sud-est / nord-ouest
Longueur	2400 m
Largeur	30 m
Type de revêtement	Asphalte / béton bitumineux
Nature de la chaussée	Chaussée flexible
PCN	31/F/D/W/T
Éclairage	Balisage lumineux à haute intensité
Type d'utilisation	Piste secondaire / auxiliaire

En définitive, la piste 12/30 constitue un support d'étude particulièrement pertinent pour une analyse de dégradation et d'optimisation de la maintenance. Ses caractéristiques géométriques, structurales et fonctionnelles en font une infrastructure représentative des problématiques de gestion des chaussées aéronautiques dans un contexte d'exploitation réel.

3.3 Collecte et analyse des données

3.3.1 Données de trafic aérien

Les données de trafic aérien constituent un paramètre fondamental dans l'étude de la dégradation des chaussées aéronautiques. En effet, les sollicitations répétées induites par les mouvements d'aéronefs influencent directement la fatigue de la structure et participent à l'évolution de l'état de la piste. Une analyse rigoureuse du trafic permet donc de relier les charges appliquées à la chaussée aux désordres observés sur le terrain.

Les statistiques de trafic recueillies pour l'aérodrome étudié montrent une activité relativement stable au cours des dernières années. Le nombre de mouvements enregistrés est de 1100 en 2023, de 1162 en 2024 et de 1088 en 2025. Ces résultats traduisent une exploitation régulière de la plateforme et constituent une base pertinente pour l'interprétation de l'usure progressive de la chaussée.

Tableau 3. 4 : Statistiques du trafic aérien (2023-2025)

Année	Nombre de mouvements
2023	1100
2024	1162
2025	1088

L'analyse du trafic ne peut cependant pas se limiter au nombre total de mouvements. Elle doit également intégrer la nature des aéronefs exploitant la piste, car la masse, la géométrie des trains d'atterrissage et la fréquence d'utilisation déterminent l'intensité des sollicitations appliquées à la structure. Les principaux types d'aéronefs recensés dans le cadre de cette étude sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 3.5 : types d'aéronefs

Type d'avion	Nombre de mouvements
ATR72	13800
DH8D (Q400)	1300
DH8B (Q200)	1400
C130	50
C295	150
IL76 / B737	300

Ces données montrent que certains types d'aéronefs sont nettement plus représentés que d'autres, ce qui peut avoir un impact significatif sur la répartition des dégradations. Ainsi, la prise en compte simultanée du volume de trafic et de la typologie des aéronefs permet d'établir un lien plus précis entre les conditions d'exploitation de la piste et son état structurel et fonctionnel.

3.3.2 Données climatiques

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans le comportement des chaussées aéronautiques et dans l'évolution de leurs dégradations. Les variations de température, les précipitations ainsi que l'action du vent influencent directement les propriétés mécaniques des matériaux et peuvent accélérer les phénomènes de fissuration, de déformation ou de perte de portance.

Dans le cadre de cette étude, une attention particulière a été accordée à l'analyse des données climatiques de la région de Tébessa. Les données collectées concernent principalement les précipitations, la température et le vent. Elles permettent de mieux caractériser l'environnement du site étudié et d'évaluer son influence sur la durabilité de la piste.

a) Précipitations

Les précipitations influencent l'humidité du sol support, la portance de la structure et la sensibilité de la chaussée à certaines formes de dégradation. Les données recueillies sont résumées ci-dessous

Tableau 3.6 : Données mensuelles des précipitations (mm/jr)

Année	ANN (mm/jour)
2019	1,86
2020	2,03
2021	0,93
2022	1,17
2023	1,23
2024	0,92

b) Température

La température agit fortement sur le comportement des matériaux bitumineux. Des températures estivales élevées peuvent accentuer les déformations et le vieillissement du revêtement, tandis que les écarts thermiques favorisent l'apparition de fissures.

Tableau 3.7 : Données mensuelles des températures

Année	Température annuelle moyenne (°C)
2019	14,81
2020	15,24
2021	16,24
2022	16,57
2023	16,69
2024	17,06

c) Vent

Le vent constitue un paramètre important dans le fonctionnement de l'aérodrome, notamment en lien avec l'orientation de la piste et les conditions d'exploitation aérienne.

Tableau 3.8 : données annuelles moyen des vents

Année	Vent annuel moyen (m/s)
2019	4,49
2020	4,08
2021	4,33
2022	4,21
2023	4,12
2024	4,33

L'analyse de l'ensemble de ces données met en évidence une variation saisonnière et interannuelle significative. Les températures élevées enregistrées en période estivale,

combinées à des épisodes de précipitations irrégulières, peuvent engendrer des contraintes thermiques et hydriques sur la chaussée. L'intégration de ces paramètres dans l'étude permet ainsi de mieux comprendre les mécanismes de dégradation et d'orienter les stratégies d'entretien en fonction des contraintes environnementales propres au site.

3.3.3 Données techniques et structurales

Les données techniques représentent un élément central dans l'évaluation de l'état de la piste, car elles permettent de caractériser la structure de la chaussée et d'apprécier sa capacité à résister aux sollicitations du trafic et aux effets du climat.

Dans le cas de la piste 12/30, la structure est constituée de plusieurs couches successives. La couche de roulement est en béton bitumineux, d'une épaisseur de 6,5 cm. Elle repose sur une couche de grave-bitume de 7,5 cm, elle-même supportée par une couche de grave non traitée d'une épaisseur de 22 cm. Cette composition confirme le caractère flexible de la chaussée et permet d'interpréter les formes de dégradation identifiées sur le terrain.

Tableau 3.9 : structure de la piste 12/30

Couche	Épaisseur (cm)
BB (Béton bitumineux)	6,5
GB (Grave-bitume)	7,5
GNT (Grave non traitée)	22

L'ensemble de ces données structurales est essentiel pour analyser le comportement de la piste, interpréter les désordres observés et proposer des interventions adaptées à la nature réelle de la structure.

3.4 : Évaluation de l'état de la piste

3.4.1 Indice de service

L'indice de service constitue un indicateur numérique permettant d'évaluer l'état global d'une chaussée aéronautique. Il varie généralement de 0 à 100, les valeurs les plus élevées correspondant à une chaussée en bon état, tandis que les valeurs faibles traduisent une

dégradation importante et une diminution du niveau de service offert par la piste.Dans le cadre de cette étude, l'indice de service a été utilisé pour apprécier l'état de la piste 12/30 à

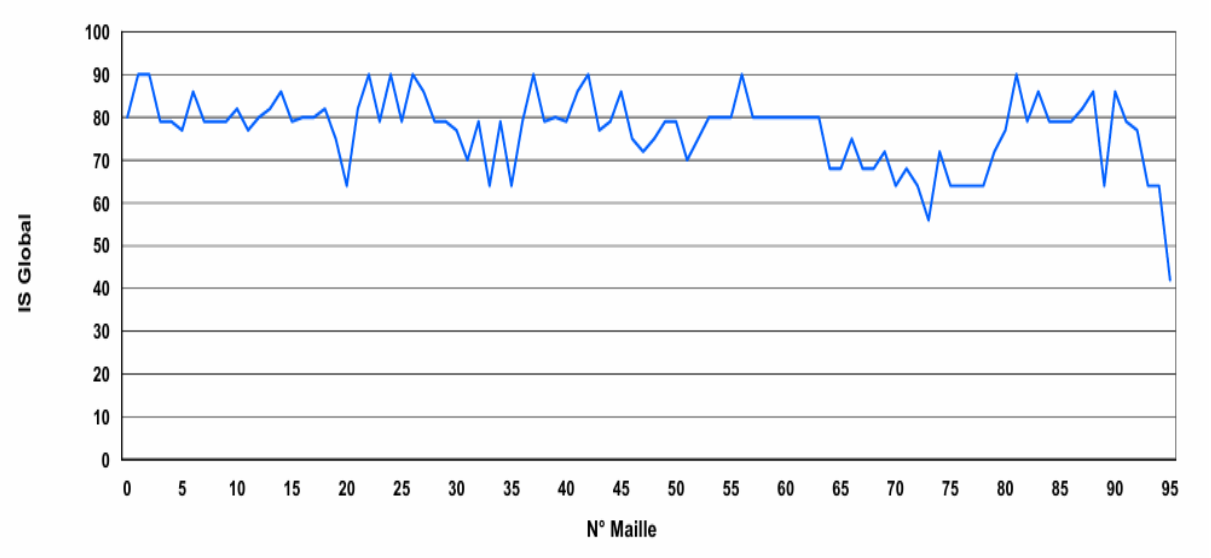


Figure 3.3 : Histogramme des états de l'indice de service

partir des relevés de dégradations. Cet indicateur permet d'obtenir une lecture synthétique de la situation de la chaussée et de comparer les différentes mailles entre elles.

L'analyse des valeurs relevées montre que l'état de la piste n'est pas homogène sur l'ensemble de sa surface. Certaines mailles présentent des indices satisfaisants, traduisant un niveau de service correct, tandis que d'autres affichent des valeurs plus faibles, révélant l'existence de zones plus vulnérables. Cette hétérogénéité justifie pleinement la nécessité d'une approche détaillée par maillage.

3.4.2 Résultats par maille et identification des zones critiques

L'étude des valeurs de l'indice de service par maille permet d'identifier les sections les plus affectées de la piste. Les mailles présentant les indices les plus faibles correspondent aux zones les plus critiques et doivent, par conséquent, faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre de la maintenance.

À titre d'exemple, certaines mailles enregistrent des valeurs de 42, 56, 64, 68 ou 70, alors que d'autres atteignent 80, 86 ou 90. Cette variation met en évidence l'existence de zones plus

sensibles, vraisemblablement soumises à des conditions plus sévères de sollicitation ou à une plus forte vulnérabilité structurelle.

Le tableau ci-dessous reprend un extrait représentatif des résultats d'indice de service observés sur la piste.

Tableau 3.10 : Indice de service par mailles

N° de maille	IS global	IS structurel
1	80	100
2	90	100
20	75	100
21	64	100
32	70	100
48	72	100
65	68	100
71	64	100
74	56	100
96	42	100

Cette approche par maillage permet de localiser précisément les zones problématiques, d'éviter une appréciation globale trop générale et de cibler les interventions là où elles sont réellement nécessaires. Elle contribue ainsi à une gestion plus efficace et plus économique de la chaussée.

3.4.3 Analyse des dégradations observées

L'analyse des dégradations relevées sur la piste 12/30 met en évidence la présence de plusieurs formes de fissuration, notamment les fissures de fatigue, les fissures de joint

longitudinal et les fissures de retrait. Ces désordres traduisent l'effet combiné du trafic, du vieillissement du revêtement et des conditions environnementales.

Le tableau suivant présente la répartition des principales dégradations observées selon leur niveau de gravité.

Tableau 3.11: les types des dégradations

Type de dégradation	Léger	Moyen	Élevé
Fissure de fatigue	7	3	4
Fissure de joint longitudinal	7145	1166	568

Les fissures longitudinales apparaissent comme la forme de dégradation la plus répandue. Cela peut être interprété comme l'indice d'une fragilité au niveau des joints, des zones de reprise ou de certaines lignes de faiblesse du revêtement. Les fissures de fatigue traduisent, quant à elles, l'effet des sollicitations répétées engendrées par le passage des aéronefs. Enfin, les fissures de retrait peuvent être liées au comportement du matériau bitumineux sous l'effet des variations thermiques et du vieillissement progressif.

Afin d'illustrer les différents types de dégradations identifiés sur la piste 12/30, des observations visuelles ont été réalisées sur site. Les figures suivantes présentent les principales fissures observées.



Figure3.4 : Exemple de fissure observée sur la piste 12/30

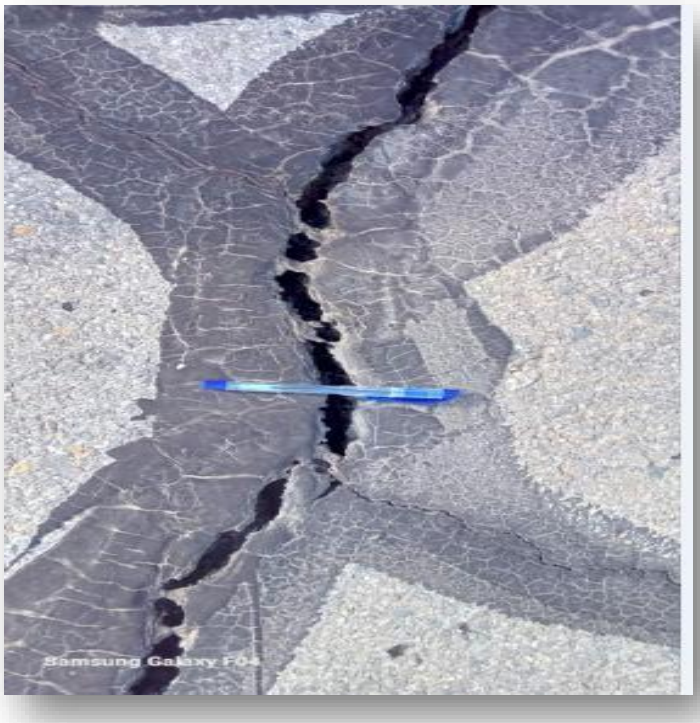


Figure 3.5 : Exemple de dégradation longitudinale observée



Figure 3.6 : Exemple de fissuration de retrait



Figure 3.7 : Exemple complémentaire de dégradation relevée sur site

L'identification visuelle et la quantification de ces dégradations constituent une étape essentielle pour comprendre les mécanismes de détérioration de la piste et pour orienter les choix d'entretien de manière techniquement justifiée.

3.5 Méthode d'optimisation

3.5.1 Définition des critères d'optimisation

Dans le cadre de l'optimisation de la maintenance de la piste, plusieurs critères ont été retenus afin d'orienter la prise de décision vers une solution équilibrée et techniquement cohérente.

Le premier critère est le coût. Il correspond à l'ensemble des dépenses liées aux opérations de maintenance et de renforcement de la piste. Dans cette étude, il prend en compte, d'une part, le coût du renforcement réalisé en 2009, estimé à 955 426 000,00 DA, et, d'autre part, le coût des interventions de maintenance en 2024, évalué à 7 000 000,00 DA. L'objectif associé à ce critère est de minimiser les dépenses tout en maintenant un niveau de performance satisfaisant.

Le deuxième critère est la performance. Elle désigne le niveau de qualité fonctionnelle et structurelle de la piste. Elle s'apprécie notamment à travers l'état général de la chaussée, la présence de dégradations et la capacité de l'infrastructure à assurer le trafic aérien dans de bonnes conditions de sécurité et d'exploitation.

Le troisième critère est la disponibilité. Il s'agit de la capacité de la piste à rester opérationnelle pour le trafic aérien. Cette disponibilité dépend directement de la fréquence, de la durée et de l'organisation des interventions de maintenance. L'objectif recherché est ici de maximiser le temps de service de la piste tout en limitant les perturbations de l'activité aéroportuaire.

Le quatrième critère est le risque. Il correspond à la probabilité d'apparition de défaillances ou de dégradations susceptibles d'affecter la sécurité et la fonctionnalité de la piste. Il tient compte à la fois de la gravité des désordres et de leur fréquence d'apparition. L'objectif est de réduire ce risque par une planification adaptée et une anticipation des phénomènes de dégradation.

Tableau 3.12 : synthèses des critères d'optimisation adoptés

Critère	Définition	Objectif
Coût	Dépenses liées à la maintenance et au renforcement	Minimiser
Performance	Niveau de qualité structurelle et fonctionnelle de la piste	Maximiser
Disponibilité	Capacité de la piste à rester opérationnelle	Maximiser
Risque	Probabilité de défaillances affectant la sécurité et l'exploitation	Minimiser

3.5.2 Choix de la méthode d'optimisation

Dans cette étude, une approche d'optimisation multi-objectifs a été retenue. Ce choix se justifie par le fait que la gestion de la maintenance d'une piste aéroportuaire ne peut pas reposer sur un seul paramètre. Elle doit, au contraire, intégrer simultanément plusieurs critères souvent contradictoires, tels que le coût, la performance, la disponibilité et le risque.

En effet, une réduction excessive des coûts peut se faire au détriment de la performance ou de la sécurité, tandis qu'une recherche exclusive de performance peut engendrer des dépenses trop élevées ou une réduction de la disponibilité opérationnelle de la piste. L'optimisation multi-objectifs apparaît donc comme la méthode la plus appropriée pour rechercher un compromis acceptable entre ces différentes exigences.

Cette démarche permet d'orienter la prise de décision vers des solutions équilibrées, adaptées aux contraintes réelles de l'exploitation aéroportuaire et cohérentes avec les objectifs de durabilité, de sécurité et de maîtrise des coûts.

Conclusion

À l'issue de ce chapitre, il apparaît que l'étude de la piste 12/30 de l'aérodrome de Tébessa repose sur une démarche méthodologique structurée, fondée sur la collecte et l'analyse de données de trafic, de climat et de structure, ainsi que sur l'évaluation de l'état réel de la chaussée à partir des dégradations observées et de l'indice de service.

L'analyse menée a permis de mettre en évidence l'influence combinée des sollicitations du trafic aérien, des conditions environnementales et des caractéristiques structurales sur l'évolution de l'état de la piste. Elle a également montré l'intérêt d'une approche fondée sur le maillage, l'identification des dégradations et l'exploitation des indicateurs techniques pour localiser les zones critiques et orienter les interventions de maintenance.

Enfin, l'introduction d'une démarche d'optimisation multi-objectifs permet d'inscrire la réflexion dans une perspective de gestion rationnelle et durable, conciliant les exigences de sécurité, de performance, de disponibilité et de maîtrise des coûts. Ce cadre méthodologique constitue ainsi une base essentielle pour la suite du mémoire, notamment en ce qui concerne la formulation de scénarios d'intervention et la proposition d'une stratégie de maintenance adaptée au contexte de l'aérodrome étudié.

CHAPITRE IV : Système de Gestion des Bases d'Aérodromes (SGBA)

4.1. Introduction :

La gestion et l'entretien des chaussées aéronautiques nécessitent aujourd'hui des outils informatiques capables de centraliser, structurer et exploiter un volume important de données hétérogènes provenant du terrain et du laboratoire. Dans ce contexte, le Système de Gestion des Bases Aérodromes (SGBA) a été développé comme un logiciel dédié à la gestion et au traitement des données aéroportuaires. Il constitue un support opérationnel pour les services techniques en charge du suivi de l'état des infrastructures aéronautiques et de la planification des travaux d'entretien.

Le SGBA permet tout d'abord la gestion structurée des informations relatives aux aérodromes et à leurs différentes composantes. Il prend en charge les données descriptives des infrastructures (pistes, sections, mailles), les paramètres de référence (types de sols, types de couches, typologie des dégradations, types d'essais et de travaux), ainsi que l'ensemble des résultats issus des inspections et des investigations. Les relevés de dégradations, les mesures de rugosité et d'uni, les études de trafic ou encore les essais géotechniques y sont saisis et archivés de manière organisée, ce qui facilite la consultation historique et la mise à jour des informations.

Au-delà de la simple gestion de base de données, le SGBA intègre des fonctions de traitement permettant d'exploiter ces informations pour évaluer l'état fonctionnel et structurel des chaussées. Le logiciel calcule notamment des indices de service globaux, structurels et de surface, à partir des données de dégradations et des autres paramètres d'inspection. Ces indices synthétiques offrent une vision quantitative de la qualité de service rendue par la chaussée et constituent un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires. Ils permettent de comparer différentes zones d'un même aérodrome, de suivre l'évolution de l'état des chaussées dans le temps et d'identifier les sections prioritaires en termes d'entretien.

Un autre objectif essentiel du SGBA est de faciliter la prise de décision en matière de programmation des travaux. À partir des indices de service calculés et des informations techniques disponibles, le logiciel propose des traitements permettant de définir les travaux d'entretien à réaliser. Les résultats sont ensuite valorisés sous forme de rapports et d'états normalisés : fiches signalétiques d'aérodromes, bilans de dégradations, états de trafic, rapports d'essais de laboratoire, etc. Ces documents constituent un support de communication et de justification auprès des décideurs et des autorités de tutelle, en apportant une base objective et traçable aux recommandations techniques.

Ainsi, le SGBA peut être considéré comme un outil complet de gestion des chaussées aéronautiques, combinant base de données, traitements d'ingénierie et édition de rapports. Dans le cadre de ce mémoire, il est utilisé comme support méthodologique et/ou comparatif pour l'évaluation de l'état des chaussées d'aérodrome et pour l'illustration des démarches de calcul d'indice de service et d'aide à la décision en matière d'entretien.

4.2. Description des menus et modules du logiciel SGBA :

Le logiciel SGBA suit l'architecture classique des applications Windows, où l'écran principal constitue un menu principal qui donne accès aux modules fonctionnels via des menus déroulants et des fenêtres spécialisées. Ces menus se répartissent en six catégories principales couvrant l'ensemble du cycle d'exploitation du système
: Fichier, Table, Inspections, Traitements, Édition et Rapport. Voici une description détaillée de chaque menu et de ses fonctions.

4.2.1 Menu Fichier :

Ce menu est dédié à la mise à jour des données variables relatives aux infrastructures et à la géométrie de l'aérodrome :

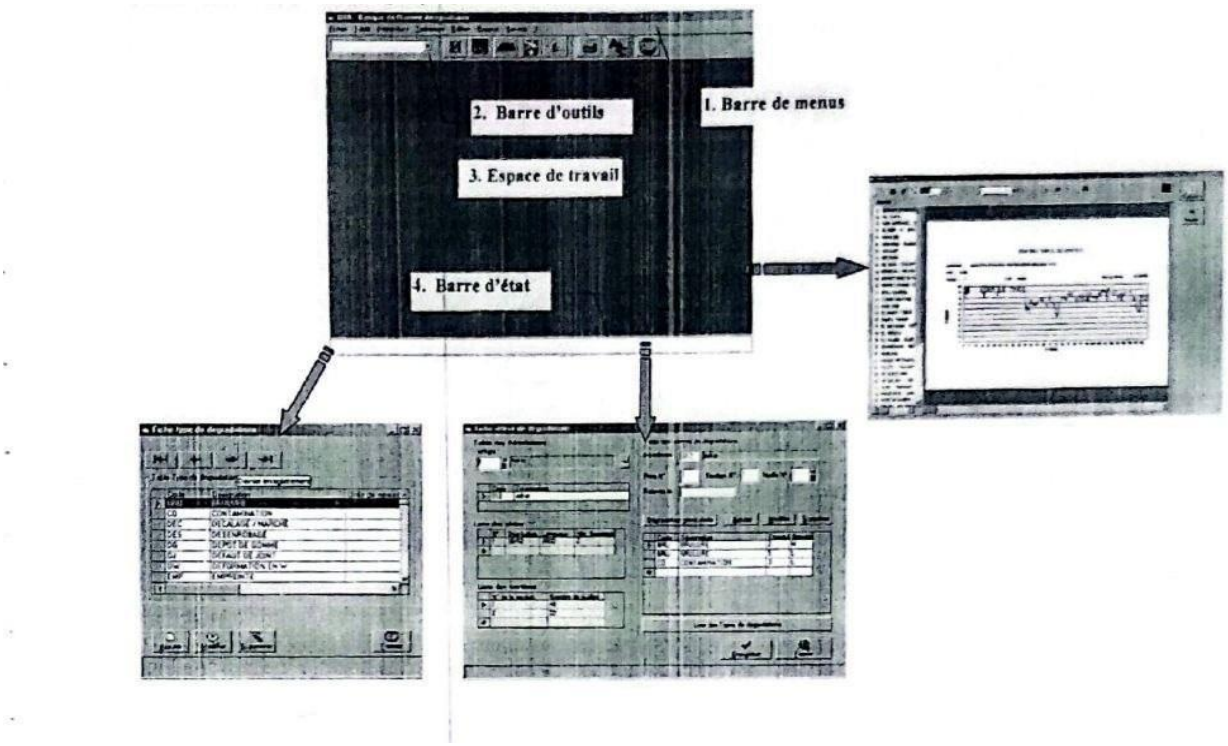


Figure 4.1 organisation des menue et module du système

Commandes	Rôle
Aérodrome	Permet la saisie de toutes les informations concernant l'aérodrome comme : l'adresse, nom, wilaya, la classe, le statut, etc.
Environnement	Permet la saisie de toutes les informations concernant l'environnement de l'aérodrome comme : la pluviométrie et la température annuelle.
Pistes	Permet la définition des pistes de chaque aérodrome.
Maille	Permet le maillage des sections.

Table : Qui donne accès aux différentes commandes et options qui permettent la mise à jour (Ajout, Modification, Suppression) des données de type paramètres à savoir :

Commandes	Rôle
Type de sol	Permet la saisie des types de sol
Type de couches	Permet la saisie des types de couches
Type de Dégradations	Permet la saisie des types de dégradations
Type d'essai	Permet la saisie des types d'essais
Type de travaux	Permet la saisie des types de travaux

Inspections : Qui donne accès aux différentes commandes et options qui permettent la saisie des inspections élaborées sur terrain à savoir :

Commandes	**Rôle**
Relevés des dégradations	Permet la saisie des informations recueillies lors de relevés de dégradations.
Relevés de rugosité	Permet la saisie des informations recueillies lors de relevés de rugosité.
Étude de trafic	Permet la saisie des mouvements des avions par mois
Mesure d'uni	Permet la saisie des informations recueillies lors de mesure d'uni.
Essai de laboratoire	Permet la saisie des données géotechniques lors de l'essai de laboratoire
Corps de chaussées	Permet la saisie des données géotechniques concernant le corps de chaussée
Derniers travaux	Permet la saisie des derniers travaux effectués sur un corps de chaussée

Traitements : Qui donne accès aux différentes commandes et options qui permettent le traitement des données saisies à savoir :

Commandes	**Rôle**
Calcul des indices de services	Permet le calcul des indices de services Globaux, Structurels et Surfaces.
Traitement des travaux	Permet de traiter les indices de services calculés afin de définir les travaux d'entretien à réaliser.

Édition : Qui donne accès aux différentes options qui permettent l'édition des états de consultation à savoir :

- Liste Type de couches
- Liste Type de travaux
- Liste des travaux
- Liste Type de Dégradations
- Liste Type de dégradations par travaux

Rapport : Qui donne accès aux différentes options qui permettent l'édition des rapports de gestion à savoir :

- Fiche signalétique des aérodromes
- Etat sur les dégradations
- Bilan des dégradations
- Etat sur l'indice de service par maille
- Etat sur l'indice de service par section
- Etat sur la rugosité
- Etat d'uni de la chaussée
- Etat de trafic
- Etat des derniers travaux
- Etat des essais de laboratoire
- Etat de corps de chaussées

4.3. Méthodologie d'évaluation dans le SGBA :

La méthodologie d'évaluation dans le SGBA repose sur une démarche progressive qui commence par l'identification des dégradations observées sur la chaussée, puis leur classification selon leur niveau de gravité, avant d'aboutir au calcul d'indices permettant d'apprécier l'état global de la piste. Cette approche facilite l'analyse technique de la chaussée et aide à localiser les zones nécessitant une intervention prioritaire.

4.3.1 Identification des dégradations :

L'identification des dégradations constitue la première étape de l'évaluation dans le SGBA. Elle se base essentiellement sur des inspections visuelles réalisées sur le terrain, au cours desquelles les différents défauts présents à la surface de la chaussée sont observés, repérés et enregistrés.

Cette opération permet de recenser les formes de dégradation affectant la piste, telles que les fissures, les arrachements, les affaissements, les nids-de-poule ou toute autre anomalie visible. Après observation, chaque défaut est codifié selon une nomenclature préétablie dans le système, afin de garantir une saisie homogène et structurée des informations.



Figure4.2 : Identification des dégradations

4.3.2 Classification de la gravité :

Après l'identification des dégradations, le SGBA procède à leur classification selon le degré de gravité. Cette classification permet d'évaluer l'importance du dommage observé et de mesurer son influence sur l'état de la chaussée

Classification des dégradations selon la profondeur (méthode SGBA) :

Niveau de gravité	Profondeur de la dégradation	Interprétation
Faible	Profondeur faible, atteinte superficielle	Dégradation légère n'affectant pas encore significativement la structure ou le confort de roulement
Moyenne	Profondeur intermédiaire	Dégradation visible nécessitant une surveillance et pouvant évoluer rapidement
Élevée	Profondeur importante	Dégradation sévère indiquant une altération avancée de la chaussée et nécessitant une intervention prioritaire

Cette classification permet de distinguer les dégradations superficielles des dégradations plus profondes et plus dangereuses pour l'exploitation. Elle constitue ainsi une base essentielle pour le traitement des données dans le SGBA et pour l'établissement des priorités de maintenance.

4.3.3 Calcul des indices de dégradation :

Une fois les dégradations identifiées et classées, le SGBA permet de calculer des indices de dégradation destinés à traduire de manière synthétique l'état de la piste. Ces indices offrent une lecture globale de la qualité de la chaussée et facilitent la comparaison entre différentes sections ou mailles.

L'indice global de l'état de la piste représente un indicateur synthétique de la condition générale de la chaussée. Plus cet indice se détériore, plus l'état de la piste est jugé critique.

À partir de ces résultats, il devient possible de hiérarchiser les zones critiques, c'est-à-dire de repérer les sections les plus dégradées et de programmer les interventions d'entretien selon leur degré d'urgence.

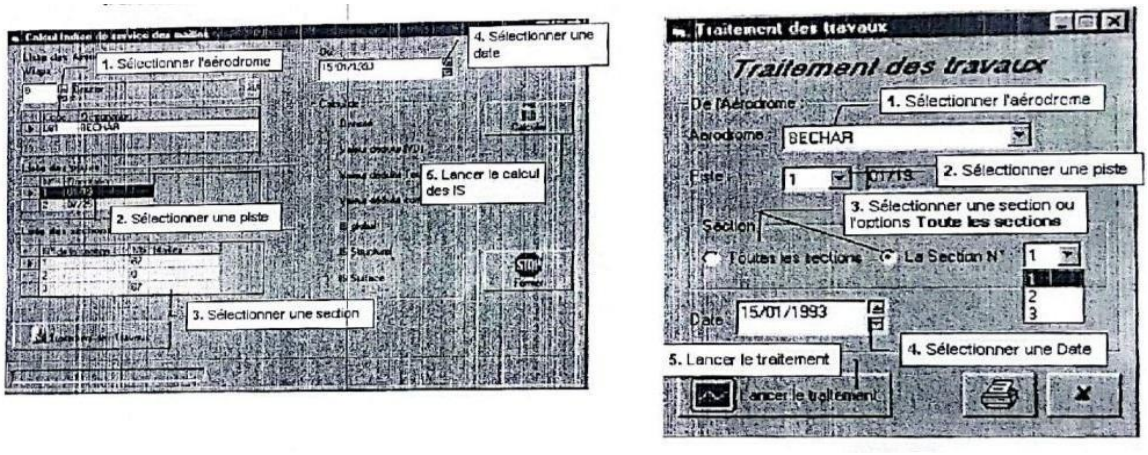


Figure 4.3 : Calcul des indices de dégradation

4.4. Exploitation des résultats :

L'exploitation des résultats dans le SGBA représente une étape essentielle du processus de gestion des chaussées aéronautiques. Elle permet de transformer les informations recueillies lors des inspections, puis traitées par le système, en indicateurs d'aide à la décision pour les responsables de la maintenance. En s'appuyant sur les indices calculés et sur l'analyse des dégradations observées, le SGBA facilite l'interprétation de l'état réel de la chaussée et oriente les choix techniques en matière d'entretien et de réhabilitation.

Cette phase d'exploitation ne se limite pas à une simple lecture des résultats numériques. Elle permet également d'identifier les zones les plus vulnérables, de comparer l'état des différentes sections de la piste, et de mettre en évidence les parties nécessitant une attention particulière. Ainsi, les résultats obtenus servent de base à une gestion plus rationnelle, plus objective et plus efficace de l'infrastructure aéroportuaire.

4.4.1 Priorisation des interventions :

La priorisation des interventions consiste à établir un ordre de priorité entre les différentes actions de maintenance à entreprendre sur la chaussée. Cette opération est nécessaire, car toutes les dégradations observées n'ont pas le même impact sur la sécurité, le confort d'exploitation ou la durabilité de la structure. Grâce aux résultats issus du traitement, le SGBA permet de distinguer les zones critiques de celles qui présentent un niveau de dégradation moins préoccupant.

Cette hiérarchisation aide les gestionnaires à concentrer les ressources disponibles sur les parties les plus sensibles de la chaussée. Elle permet également d'éviter les interventions tardives, souvent plus coûteuses, en privilégiant une prise en charge adaptée au niveau réel de dégradation. En d'autres termes, le système contribue à une gestion raisonnée des priorités, fondée sur l'état observé de l'infrastructure.

Les niveaux de priorité peuvent être présentés comme suit :

- Urgence élevée : ce niveau concerne les zones fortement dégradées, dont l'état est susceptible d'affecter directement la sécurité des aéronefs, la qualité du roulage ou la stabilité de la chaussée. Dans ce cas, une intervention rapide s'impose afin d'éviter l'aggravation du dommage et de réduire les risques liés à l'exploitation.
- Maintenance préventive : cette catégorie regroupe les dégradations modérées, qui ne compromettent pas immédiatement le fonctionnement de la chaussée, mais dont l'évolution peut devenir problématique à moyen terme. Une action préventive à ce stade permet de limiter la propagation des défauts et de réduire les coûts futurs de réparation.
- Surveillance : elle concerne les dégradations mineures ou ponctuelles qui ne nécessitent pas d'intervention immédiate. Ces zones doivent toutefois faire l'objet d'un suivi régulier pour observer leur évolution et détecter toute aggravation éventuelle.

Ainsi, la priorisation des interventions constitue un outil fondamental pour améliorer l'efficacité des décisions de maintenance. Elle permet d'adapter les actions à la gravité réelle des désordres et d'assurer une meilleure utilisation des moyens techniques, humains et financiers.

4.4.2 Planification de la maintenance

Une fois les priorités définies, les résultats obtenus dans le SGBA peuvent être exploités pour organiser la planification des opérations de maintenance. Cette planification a pour objectif d'inscrire les interventions dans une logique temporelle cohérente, en tenant compte à la fois de l'urgence des travaux, de leur nature, et des ressources disponibles. Elle constitue donc une étape stratégique dans la gestion à court, moyen et long terme des chaussées aéronautiques.

Le système permet d'orienter la programmation des travaux en fonction des indices calculés, des niveaux de gravité observés et de la localisation des dégradations. Cette organisation contribue à éviter les décisions improvisées et favorise une approche prévisionnelle de l'entretien. En conséquence, la maintenance n'est plus seulement corrective, mais devient également anticipative et planifiée.

La programmation des interventions peut être répartie selon plusieurs horizons temporels :

- Court terme : il s'agit des interventions urgentes à réaliser dans les délais les plus brefs sur les zones critiques. Ces travaux visent à préserver immédiatement la sécurité de l'exploitation et à empêcher une détérioration rapide de la chaussée.
- Moyen terme : cette étape concerne les actions de maintenance programmée sur les zones présentant des dégradations évolutives. L'objectif est d'intervenir avant que les désordres ne deviennent sévères et n'exigent des réparations lourdes ou coûteuses.
- Long terme : ce niveau s'inscrit dans une stratégie globale de gestion patrimoniale des chaussées. Il comprend les opérations de conservation, de renforcement ou de

réhabilitation, planifiées sur la base de l'évolution prévisible de l'état de la chaussée et des objectifs de durabilité de l'infrastructure.

La planification de la maintenance permet ainsi d'assurer une meilleure continuité de service, tout en optimisant l'affectation des ressources. Elle offre également une vision globale de l'évolution future de la chaussée, ce qui facilite la préparation des budgets, l'organisation des interventions et la définition des programmes d'entretien à long terme.

4.5. Avantages et limites du SGBA :

Le SGBA constitue un outil structuré de gestion des chaussées aéronautiques, car il permet d'intégrer dans une même base les données relatives à l'aérodrome, à l'environnement, aux inspections, au trafic et aux traitements techniques. En assurant à la fois la saisie des relevés, le calcul des indices de service et l'édition des rapports, il contribue à rendre la gestion des chaussées plus organisée, plus cohérente et davantage orientée vers l'aide à la décision.

Cependant, l'intérêt d'un tel système ne signifie pas qu'il soit exempt de limites. Comme tout outil de gestion, son efficacité dépend fortement de la qualité des données introduites, de la rigueur de la méthodologie appliquée sur le terrain et de la capacité des utilisateurs à exploiter correctement ses fonctionnalités.

4.5.1 Avantages :

Le premier avantage du SGBA réside dans le gain de temps qu'il procure dans le traitement des informations techniques. Au lieu de gérer séparément les relevés de dégradations, les données de trafic, les paramètres de l'aérodrome et les rapports, le système rassemble ces éléments dans une seule base et automatise une partie du traitement, notamment le calcul des indices de service et la préparation des états de sortie.

Un autre avantage important concerne l'objectivité de la décision. Le SGBA ne se limite pas à stocker des observations de terrain, il permet aussi de les transformer en résultats exploitables à travers les traitements et les rapports, ce qui aide les gestionnaires à fonder leurs choix d'entretien sur des indicateurs calculés et sur une lecture structurée de l'état de la chaussée.

Le système favorise également un suivi continu de l'infrastructure. Grâce à la saisie régulière des inspections, à l'archivage des informations et à la possibilité d'éditer différents états sur les dégradations, le trafic, la rugosité ou les travaux précédents, il devient possible d'observer l'évolution des chaussées dans le temps et de comparer les situations d'une période à l'autre.

On peut ajouter que le SGBA améliore la traçabilité et l'organisation des données techniques. En distinguant les tables de paramètres, les fichiers variables, les modules d'inspection, les traitements et les rapports, le logiciel impose une logique structurée qui facilite la consultation des données et réduit les risques de dispersion de l'information.

Enfin, le SGBA constitue un outil d'aide à la programmation des interventions. Les résultats produits par le calcul des indices de service et par le traitement des travaux permettent d'identifier les zones les plus sensibles, de hiérarchiser les priorités et de mieux orienter les opérations d'entretien à court ou moyen terme.

4.5.2 Limites :

Malgré ses avantages, le SGBA présente plusieurs limites qu'il convient de souligner. La première concerne sa forte dépendance à la qualité des données d'entrée. Si les relevés de terrain sont incomplets, imprécis ou mal saisis, les traitements et les rapports générés par le système risquent de conduire à une appréciation erronée de l'état réel de la chaussée.

Une autre limite réside dans la nécessité de former les utilisateurs. Le guide montre que le logiciel fonctionne à travers plusieurs étapes successives, allant de l'initialisation de la base de données à la saisie des paramètres, à la mise à jour des fichiers, aux inspections, aux traitements et à l'édition des rapports, ce qui suppose une bonne maîtrise de la logique générale du système et des procédures de saisie.

Le coût de mise en place peut également constituer une contrainte. Même si le guide insiste surtout sur l'installation et l'organisation des bases de données, l'adoption d'un tel système implique en pratique un investissement en matériel, en formation, en préparation de la base initiale et en mobilisation du personnel chargé de l'alimentation et du suivi du système.

On peut aussi relever que le SGBA reste tributaire d'une mise à jour régulière. Un système de gestion n'est pertinent que si les nouvelles inspections, les données de trafic, les informations environnementales et les derniers travaux sont saisis de manière continue, dans le cas contraire, la base perd progressivement sa valeur décisionnelle.

Enfin, le système peut paraître rigide pour certains utilisateurs débutants ou pour des structures qui ne disposent pas d'une organisation numérique stable. Comme il repose sur une logique de base de données structurée avec plusieurs modules interdépendants, son usage exige une certaine discipline dans la saisie, la codification des paramètres et l'enchaînement des opérations.

Conclusion

L'étude du SGBA met en évidence l'intérêt majeur des systèmes de gestion dans le domaine des chaussées aéronautiques, où la qualité de l'information conditionne directement la pertinence des décisions techniques. En structurant les données relatives aux dégradations, au trafic et aux conditions environnementales, ce système permet une évaluation plus rigoureuse de l'état des pistes et favorise une approche méthodique de la maintenance.

Au-delà de sa fonction de simple outil informatique, le SGBA s'impose comme un véritable instrument d'aide à la décision, capable d'orienter la hiérarchisation des interventions, de rationaliser la programmation des travaux et d'optimiser l'allocation des ressources disponibles. Son apport réside ainsi dans sa capacité à transformer des observations de terrain en indicateurs exploitables, facilitant une gestion plus objective, plus continue et plus efficace des infrastructures aéroportuaires.

Toutefois, l'efficacité d'un tel système reste étroitement liée à la qualité des données introduites, à la régularité des inspections et à la compétence des utilisateurs chargés de son exploitation. Dès lors, la performance du SGBA ne dépend pas uniquement de ses fonctionnalités techniques, mais également de l'organisation mise en place autour de son

utilisation. Dans cette perspective, le SGBA apparaît comme un outil stratégique pour la préservation de la sécurité, de la durabilité et de la performance des chaussées aéronautiques, tout en constituant une base solide pour le développement d'une politique de maintenance préventive et durable.

CHAPITRE V : Analyse et Résultats

5.1 Introduction :

Ce chapitre constitue le pivot analytique fondamental de la présente étude. Il a pour vocation d'opérer une confrontation méthodique entre les cadres théoriques développés en amont et les conditions réelles d'exploitation observées au niveau de l'aérodrome de Tébessa, en se concentrant spécifiquement sur la piste 12/30, en tant qu'élément critique de l'infrastructure aéronautique.

L'approche adoptée repose sur une analyse intégrée combinant plusieurs sources de données hétérogènes mais complémentaires. Il s'agit notamment des séries climatiques pluriannuelles, des statistiques détaillées du trafic aérien (fréquence, typologie des aéronefs, charges appliquées), ainsi que des observations issues des inspections visuelles et, le cas échéant, des auscultations de la chaussée. Cette triangulation des données permet d'aboutir à un diagnostic robuste de l'état structural et fonctionnel de la chaussée.

Au-delà du simple constat, l'objectif est d'identifier les mécanismes physico-mécaniques responsables des dégradations observées, en mettant en évidence les interactions complexes entre les sollicitations de trafic et les contraintes environnementales. Une telle approche permet de dépasser une lecture descriptive pour s'inscrire dans une logique explicative et prédictive.

Dans cette optique, une modélisation de l'évolution des dégradations sera développée, en s'appuyant sur les lois de comportement des matériaux bitumineux et les principes de fatigue des structures de chaussées souples. Cette modélisation vise à anticiper les trajectoires de détérioration et à évaluer la durée de vie résiduelle de la piste.

Enfin, les résultats obtenus serviront de base à l'élaboration d'une stratégie d'optimisation de la maintenance, fondée sur une gestion rationnelle des interventions. Cette stratégie cherchera à assurer un compromis optimal entre les exigences de sécurité aéronautique, la durabilité structurelle et les contraintes économiques, dans une logique de gestion patrimoniale durable.

5.2 Analyse détaillée des conditions de trafic et climatiques

Le comportement mécanique d'une chaussée aéronautique souple est gouverné par un couplage étroit entre les sollicitations de trafic et les conditions environnementales. Ces deux facteurs ne doivent pas être analysés de manière indépendante, dans la mesure où leurs effets sont fortement interdépendants.

Les charges appliquées par les aéronefs induisent des contraintes répétées à forte intensité, générant des phénomènes de fatigue au sein des couches bitumineuses et granulaires. Toutefois, la réponse mécanique de ces matériaux dépend fortement de leur état thermo hydrique, lui-même conditionné par le climat local.

Ainsi, une température élevée réduit le module de rigidité des enrobés, augmentant leur susceptibilité aux déformations permanentes, tandis qu'une saturation en eau des couches de fondation diminue leur capacité portante, amplifiant les effets du trafic. Ce couplage trafic–climat constitue donc un facteur déterminant dans la genèse et la propagation des dégradations.

L'objectif de cette section est de caractériser finement ces deux composantes et d'établir des corrélations pertinentes avec les pathologies observées sur la piste 12/30.

5.2.1 Variabilité saisonnière et contraintes climatiques

Le climat de la région de Tébessa présente un caractère semi-aride à influence continentale, caractérisé par des amplitudes thermiques élevées et une variabilité marquée des précipitations. Ces conditions induisent des contraintes sévères sur la structure de la chaussée, affectant ses propriétés mécaniques à court et long terme.

Tableau 5.1 : Évolution des paramètres climatiques (2019-2024)

Année	Température moyenne annuelle (°C)	Précipitations (mm/jour)	Vent moyen annuel (m/s)
2019	14,81	1,86	4,49
2020	15,24	2,03	4,08
2021	16,24	0,93	4,33
2022	16,57	1,17	4,21
2023	16,69	1,23	4,12
2024	17,06	0,92	4,33

Interprétation analytique :

•**Stress thermique :**

L'élévation progressive de la température moyenne annuelle (de 14,81 °C à 17,06 °C) traduit une évolution climatique significative susceptible d'altérer durablement le comportement des matériaux bitumineux. En régime estival, les températures de surface de la chaussée peuvent largement dépasser les moyennes annuelles, atteignant des niveaux critiques pour le liant bitumineux.

Dans ces conditions, le bitume subit une diminution de sa viscosité dynamique, ce qui entraîne une réduction du module complexe de l'enrobé. Cette perte de rigidité favorise l'accumulation de déformations plastiques sous l'effet des charges répétées, conduisant à l'apparition d'ornières, particulièrement dans les zones de freinage ou de stationnement.

Par ailleurs, les gradients thermiques journaliers induisent des cycles de dilatation–contraction au sein de la couche de roulement. En période hivernale, la baisse des températures provoque une augmentation de la rigidité du matériau, réduisant sa capacité de déformation et favorisant la fissuration thermique. Ces fissures, initialement fines, évoluent progressivement sous l'effet du trafic en fissures longitudinales et transversales structurées.

• **Stress hydrique :**

Malgré une tendance globale à la diminution des précipitations (atteignant 0,92 mm/jour en 2024), le régime pluviométrique reste caractérisé par des épisodes courts mais intenses, typiques des zones semi-arides. Ces événements favorisent une infiltration rapide de l'eau à travers les discontinuités de la chaussée (microfissures, joints, zones dégradées).

L'eau infiltrée atteint les couches inférieures, notamment la Grave-Bitume (GB) et la Grave Non Traitée (GNT), entraînant une diminution significative de leur module de portance. Cette perte de capacité mécanique est particulièrement critique dans le cas d'un sol support classé "D", indiquant une faible résistance intrinsèque.

En présence d'eau, les phénomènes de pompage sous trafic deviennent prépondérants, provoquant une migration des fines et une déstructuration progressive des couches granulaires. Ce mécanisme accélère l'apparition du faïençage, caractérisé par un réseau dense de fissures interconnectées traduisant une fatigue avancée de la structure.

• **Effet combiné thermo-hydrique :**

L'interaction entre les cycles thermiques et hydriques amplifie les processus de dégradation. Les fissures induites par le retrait thermique constituent des voies préférentielles d'infiltration de l'eau, tandis que la présence d'eau accentue la sensibilité des matériaux aux variations de température. Ce couplage engendre un cercle vicieux de dégradation accélérée.

5.2.2 Intensité du trafic et classification des charges dynamiques

L'intensité du trafic et le type de flotte opérant sur l'aérodrome déterminent le niveau de fatigue accumulé par le corps de chaussée.

Tableau 5.2 : Évolution des mouvements globaux (2023-2025)

Année	Nombre total de mouvements	Tendance
2023	1100	Référence
2024	1162	+ 5,63 %
2025	1088	- 6,36 %

Tableau 5.3 : Typologie des aéronefs et fréquence historique

Type d'Aéronef	Nombre de mouvements enregistrés	Catégorie de charge	Impact prédominant sur la chaussée
ATR 72	13 800	Légère à Moyenne	Fatigue de surface due à la haute fréquence
DH8B (Q200)	1 400	Légère	Usure de la couche de roulement
DH8D (Q400)	1 300	Moyenne	Fatigue de surface
IL76 / B737	300	Lourde	Déformation structurelle profonde, orniérage
C295	150	Moyenne	Fatigue intermédiaire
C130	50	Lourde (Militaire/Fret)	Stress intense sur le sol support (GNT)

Analyse de l'impact mécanique du trafic aérien

L'analyse du trafic aérien opérant sur la piste 12/30 met en évidence une dualité caractéristique des sollicitations mécaniques, résultant de la coexistence de deux

catégories d'aéronefs aux effets structurels distincts : les aéronefs régionaux à forte fréquence et les aéronefs lourds à faible fréquence.

- **Effet du trafic dominant (ATR 72) : fatigue structurelle superficielle**

L'écrasante majorité des mouvements est assurée par des aéronefs de type ATR 72, caractérisés par des charges relativement modérées mais appliquées de manière répétitive. Ce type de sollicitation génère un nombre élevé de cycles de charge, ce qui constitue le principal facteur de dégradation par fatigue.

D'un point de vue mécanique, ces chargements répétés induisent des contraintes de traction à la base des couches bitumineuses, notamment au niveau de l'interface entre le Béton Bitumineux (BB) et la Grave-Bitume (GB). Avec le temps, ces contraintes provoquent l'initiation de microfissures qui se propagent progressivement vers la surface sous l'effet du trafic, conduisant à une fissuration dite « en peau de crocodile » (faïençage).

Ce mécanisme est typique d'un endommagement par fatigue, où la structure perd progressivement sa capacité à dissiper les contraintes, jusqu'à atteindre un état critique de fissuration généralisée. Ce phénomène est d'autant plus accentué que les conditions climatiques (températures élevées et vieillissement du bitume) réduisent la flexibilité des matériaux.

- **Effet du trafic lourd (B737, IL-76) : (**sollicitations structurelles profondes)

À l'inverse, les aéronefs de type Boeing 737 et Ilyushin Il-76, bien que moins fréquents, exercent des charges nettement plus élevées, générant des contraintes importantes qui se propagent à l'ensemble de la structure de chaussée, jusqu'au sol support.

Dans ce cas, le comportement de la chaussée n'est plus gouverné uniquement par la fatigue superficielle, mais par la capacité portante globale du système multicouche. Le PCN de la piste, évalué à 31/F/D/W/T, indique clairement une limitation structurelle, notamment en raison d'un sol support classé « D » (faible portance).

Lorsque l'ACN des aéronefs lourds approche ou dépasse le PCN admissible, plusieurs mécanismes de dégradation peuvent apparaître :

- ✓ **Tassements localisés** au niveau des zones de passage préférentiel (traces de roues), traduisant une plastification des couches inférieures ;
- ✓ **Déformations permanentes (orniérage structurel)** résultant d'un dépassement des capacités de résistance des matériaux granulaires et du sol support ;
- ✓ **Risque de rupture structurelle** à moyen terme, notamment en cas de répétition de ces sollicitations exceptionnelles.

Ces effets sont particulièrement critiques dans un contexte où la portance du sol est déjà limitée, ce qui réduit fortement la marge de sécurité vis-à-vis des charges élevées.

- **Interaction entre trafic léger et trafic lourd : effet cumulatif aggravant**

Il convient de souligner que l'alternance entre trafic léger fréquent et trafic lourd occasionnel engendre un effet cumulatif défavorable. Les microfissures initiées par la fatigue due aux ATR 72 facilitent la pénétration des contraintes induites par les aéronefs lourds, accélérant ainsi la dégradation globale de la structure.

De plus, les déformations permanentes causées par les gros porteurs modifient la géométrie de la chaussée, créant des zones de concentration de contraintes pour le trafic ultérieur, ce qui amplifie les phénomènes de fatigue.

- **Lecture synthétique du comportement mécanique global**

Ainsi, la dégradation de la piste 12/30 résulte d'un double mécanisme :

- ✓ une fatigue progressive des couches supérieures, dominée par le trafic régional
- ✓ une dégradation structurelle profonde, induite par les passages ponctuels d'aéronefs lourds.

Ce couplage de sollicitations impose une approche de maintenance différenciée, intégrant à la fois :

- des interventions superficielles (renforcement ou renouvellement de la couche de roulement),
- et des solutions structurelles (renforcement de la capacité portante) pour répondre aux sollicitations exceptionnelles.

- **5.3 Évaluation de la dégradation actuelle de la piste 12/30**

L'évaluation de la dégradation s'est faite par l'auscultation visuelle segmentée en mailles, conformément à la méthode de l'Indice de Service (IS) traitée via le logiciel SGBA.

5.3.1 Cartographie des indices de service (IS) et identification des zones critiques

L'IS permet d'attribuer une note de 0 à 100 reflétant la santé de la chaussée. L'analyse du maillage de la piste 12/30 (2400 m x 30 m) révèle une hétérogénéité préoccupante.

Tableau 5.4 : Extrait représentatif de l'évaluation de l'Indice de Service par maille

N° de Maille	IS Global	IS Structurel	Diagnostic de la zone	Priorité d'intervention
Maille 1	80	100	Bon état (Zone de roulement fluide)	Surveillance
Maille 21	64	100	Dégradation modérée (Apparition de fissures)	Maintenance Préventive
Maille 65	68	100	Dégradation modérée	Maintenance Préventive
Maille 74	56	100	État critique (Fissuration avancée)	Urgence Élevée
Maille 96	42	100	État très critique (Perte de fonctionnalité locale)	Urgence Majeure

Note : L'IS structurel maintenu à 100 indique que le logiciel SGBA (selon le relevé) n'a pas détecté de ruine totale du corps de chaussée, mais l'IS Global en chute libre (42 pour la maille 96) souligne une défaillance fonctionnelle sévère de la surface.

5.3.2 Inventaire et quantification des pathologies

Les inspections ont permis d'identifier et de quantifier les principales pathologies affectant la surface.

Tableau 5.5 : Quantification des dégradations majeures sur la piste 12/30

Type de dégradation	Gravité Légère	Gravité Moyenne	Gravité Élevée	Mécanisme causal probable
Fissure de joint longitudinal	7145 ml	1166 ml	568 ml	Défaut de mise en œuvre, retrait thermique de l'enrobé.
Fissure de fatigue	7 ml	3 ml	4 ml	Répétition des charges dynamiques (Trafic ATR72/B737).

Analyse des défauts :

- **Le problème majeur des joints longitudinaux :** Le volume massif de fissures

de joints (près de 9 km linéaires au total) indique une faiblesse inhérente aux bandes de raccordement lors de la pose initiale de l'asphalte (ou lors du renforcement de 2009). Bien que la majorité soit de gravité "légère", elles constituent la porte d'entrée principale pour l'infiltration des eaux pluviales.

- **La Fissuration de fatigue :** Bien que moins étendue en longueur, sa présence

au niveau "élevé" dans certaines zones de toucher des roues (Touchdown zone) est le signe précurseur d'un faïençage imminent. Cela confirme que l'épaisseur actuelle (6,5 cm BB + 7,5 cm GB) commence à atteindre sa limite de vie en fatigue sous le spectre de trafic actuel.

5.4 Simulation et évolution du vieillissement

Afin d'anticiper le comportement de la chaussée, il est nécessaire de projeter l'évolution de ces dégradations selon différents scénarios.

5.4.1 Les effets synergiques (Interaction Trafic-Climat)

La dégradation n'est pas linéaire ; elle est exponentielle en raison du couplage des facteurs. L'eau infiltrée par les 8879 mètres de fissures de joints stagne au niveau de l'interface BB/GB. Sous l'effet du trafic (pressions interstitielles élevées générées par les pneus gonflés à plus de 10 bars), cette eau agit comme un vérin hydraulique, désenrobant les granulats et accélérant la transformation d'une simple fissure en nid-de-poule ou en faïençage de retrait.

5.4.2 Scénarios de vieillissement simulés

- **Scénario de Base (Statut quo) :** Si aucune intervention n'est réalisée et que le

trafic reste constant, l'eau continuera de s'infiltrer. Les mailles critiques (IS < 50, comme la maille 96) perdront leur intégrité structurelle d'ici 2 à 3 ans, entraînant des restrictions de charge (pénalisation du PCN) et limitant l'accès aux B737.

- **Scénario de Climat Extrême :**

Une augmentation continue des températures estivales (> 40°C au sol) provoquera le ressuage du bitume et l'orniérage dans les zones de stationnement et de freinage, diminuant dramatiquement l'adhérence et augmentant le risque d'aquaplanage lors des orages de fin d'été.

- **Scénario d'Optimisation :**

La mise en œuvre d'un plan de maintenance préventive basé sur le colmatage immédiat des joints permettrait de bloquer l'infiltration d'eau, prolongeant la durée de vie résiduelle de la couche de base de 5 à 7 ans.

5.5 Optimisation du plan de maintenance (Approche SGBA)

Face à ce constat, l'approche traditionnelle de "maintenance corrective" (attendre la rupture pour réparer) s'avère économiquement et opérationnellement intenable.

5.5.1 L'analyse Technico-Économique

Les données historiques montrent la disparité des coûts selon l'approche adoptée :

- **Intervention lourde (Renforcement de 2009) :** 955 426 000,00 DA.

- **Intervention courante (Maintenance de 2024) :** 7 000 000,00 DA.

Une stratégie de maintenance préventive coûte en moyenne 10 à 15 fois moins cher par mètre carré qu'une réfection structurelle complète. L'objectif de l'algorithme d'optimisation (géré via les recommandations du SGBA) est de maximiser la performance et la disponibilité de la piste

Tableau 5.6 : priorisation des actions de maintenance selon IS

Priorité	Zones cibles (Exemples)	Actions de maintenance recommandées	Impact sur les critères (Coût / Performance / Dispo / Risque)
Urgence 1	Mailles avec IS < 55 (ex: Maille 96, 74)	Purge locale, réfection ponctuelle en pleine épaisseur (Bouchage structurel).	Coût: Moyen. Performance: Haute. Dispo: Interruption courte. Risque: Réduction drastique.
Urgence 2	Mailles 21, 65 (IS entre 55 et 70)	Pontage des fissures (colmatage à chaud des 8879 ml de fissures de joints).	Coût : Faible. Performance : Maintien. Dispo : Travaux de nuit possibles. Risque: Bloque la dégradation.
Surveillance	Mailles 1, 2 (IS > 80)	Inspection visuelle trimestrielle, mesure d'adhérence (Skid resistance).	Coût : Nul. Performance : Constante. Dispo : Maximale. Risque : Contrôlé.

En investissant de petites sommes régulièrement plutôt qu'un budget colossal suite à une défaillance.

4.5.2. Élaboration de la matrice d'optimisation multicritères

L'optimisation de la maintenance de la piste 12/30 de l'aérodrome de Tébessa ne peut être abordée de manière unidimensionnelle. Elle s'inscrit dans une approche de Gestion d'Actifs (Asset Management), où chaque décision doit équilibrer des contraintes techniques, budgétaires et opérationnelles.

Le processus décisionnel repose sur la pondération de quatre piliers fondamentaux :

A. Le Critère de Performance (Indice de Service - IS)

L'Indice de Service (IS) est le pivot de notre évaluation. Il ne s'agit pas d'une simple note, mais d'une mesure composite de la qualité d'usage.

- **Seuil de Vigilance (IS < 70) :** À ce stade, la dégradation commence à affecter le confort de roulement et nécessite une surveillance accrue.
- **Seuil de Sécurité (IS < 60) :** C'est le point de basculement. En dessous de ce seuil, les dégradations (comme les fissures de joints identifiées à Tébessa) cessent d'être purement esthétiques pour devenir fonctionnelles.
- **Seuil Critique (IS < 50) :** La structure même est menacée. Dans notre étude, les mailles présentant un IS proche de 42 (Maille 96) sont classées en priorité absolue car elles indiquent une rupture imminente de la couche de roulement.

B. Le Critère de Coût (Analyse du Cycle de Vie - LCC)

L'optimisation financière repose sur le concept de "Coût Global".

- **Le paradoxe de la maintenance :** Intervenir tôt (maintenance préventive) coûte infiniment moins cher que de reconstruire. Pour la piste 12/30, un investissement de quelques millions de DA dans le scellement des 8 879 mètres de fissures peut retarder de 10 ans un renforcement lourd estimé à près d'un milliard de DA.
- **L’effet de levier :** Nous démontrons ici que chaque Dinar investi en 2024 dans le pontage des joints longitudinaux permet d'économiser environ 15 Dinars en coûts de réhabilitation future.

C. Le Critère de Disponibilité (Contraintes d'Exploitation)

L'aérodrome de Tébessa assure des missions de service public (vols réguliers ATR72, évacuations sanitaires, logistique militaire).

- **Minimisation des fermetures :** La matrice d'optimisation privilégie les techniques de réparation à "remise en service rapide". Par exemple, le

scellement de fissures à chaud peut être effectué durant les créneaux nocturnes, rendant la piste disponible dès le premier vol du matin.

- **Planification stratégique :** L'optimisation permet de regrouper les travaux sur les mailles adjacentes pour réduire le nombre total de jours de travaux sur l'année.

D. Le Critère de Risque (Sécurité Aéronautique et FOD)

La sécurité est le critère non négociable en milieu aéroportuaire.

- **Phénomène FOD (Foreign Object Debris) :** Les fissures de gravité élevée (568 ml répertoriés) représentent un risque majeur de détachement de granulats. Si un morceau d'enrobé est aspiré par le réacteur d'un Boeing 737 ou d'un IL76, les conséquences seraient catastrophiques.
- **Intégrité structurelle :** Le risque de pompage (remontée de fines) à travers les fissures de joints menace directement le sol support de catégorie D (très faible). L'optimisation vise à "étanchéifier" le système pour maintenir la capacité portante (PCN) à son niveau actuel.

Tableau 5.7 : Matrice d'optimisation multicritères et hiérarchisation des interventions

Niveau de Priorité	État de la Maille (IS)	Stratégie Adoptée	Nature des Travaux	Impact sur la Durabilité	Impact sur le Risque
Priorité 1 (Critique)	IS < 55	Maintenance Corrective Lourde	Purge des zones faïencées, réfection de la couche de roulement (BB) sur 6.5 cm.	Restauration immédiate de la portance de surface.	Élimination immédiate du risque de désagrégation.
Priorité 2 (Préventif)	55 ≤ IS < 70	Maintenance Préventive Active	Scellement des fissures au bitume élastomère, pontage des joints longitudinaux.	Ralentissement de l'infiltration d'eau vers la GNT.	Réduction du risque d'évolution vers des nids-de-poule.
Priorité 3 (Routine)	70 ≤ IS < 85	Maintenance Préventive Systématique	Nettoyage des joints, balayage mécanique haute performance	Maintien de l'imperméabilité de surface.	Risque maîtrisé et suivi régulier.
Priorité 4 (Veille)	IS ≥ 85	Monitoring & Surveillance	Inspections visuelles périodiques,	Prolongation naturelle de la vie résiduelle.	Risque résiduel minimal.

5.5.3 Analyse approfondie des gains attendus

L'adoption de cette stratégie issue du système SGBA (Système de Gestion des Bases Aéronautiques) permet de passer d'une gestion "réactive" à une gestion "proactive". Les gains peuvent être analysés sous trois angles :

- **Gains Économiques et Financiers (Rationalisation budgétaire)**

L'analyse des coûts historiques montre que le renforcement de la piste 12/30 en 2009 a nécessité un investissement massif de 955 426 000,00 DA. Sans une maintenance préventive rigoureuse, un tel investissement doit être renouvelé tous les 10 à 12 ans.

- **Comparaison :** Le coût de colmatage de l'ensemble des fissures identifiées (environ 9000 mètres linéaires) représente moins de 2% du coût d'un renforcement complet.
- **Optimisation :** En investissant de manière ciblée sur les mailles dégradées (comme la maille 96), l'administration aéroportuaire maximise le "Rendement de la Maintenance". On évite ainsi la propagation de la dégradation aux mailles adjacentes encore saines.

- **Gains en Disponibilité Opérationnelle**

La disponibilité d'une piste est son aptitude à être utilisée pour les décollages et atterrissages sans restriction.

- Les interventions lourdes (rechargement en enrobé) imposent des fermetures de piste de plusieurs semaines, impactant le trafic de l'Air Algérie et des vols militaires.
- Le plan d'optimisation privilégie des interventions rapides (pontage, scellement) qui peuvent s'effectuer en "fenêtres de nuit". Cela garantit une disponibilité de la piste de 100% pendant les heures d'exploitation commerciale.
- **Gains techniques et Durabilité structurelle**

Le point faible identifié de la piste 12/30 est son sol support de catégorie D (résistance très faible).

- L'infiltration d'eau est l'ennemi numéro un de cette structure. En assurant une étanchéité parfaite grâce au plan de maintenance, on maintient les couches d'assise (GNT) dans un état sec, préservant ainsi leur module de rigidité.
- Cela permet de stabiliser le PCN (31/F/D/W/T) et d'éviter une dévaluation de la portance qui limiterait le poids au décollage des aéronefs de type Boeing 737.

5.6 Conclusion du Chapitre : Synthèse et Perspectives

L’analyse approfondie des conditions de la piste 12/30 de l’aérodrome de Tébessa met en lumière un paradoxe : bien que la structure globale reste solide, la surface présente des signes de vulnérabilité avancée. Les 8 879 mètres linéaires de fissures recensés ne sont pas seulement des défauts esthétiques ; ils sont les vecteurs d’une dégradation structurelle future si aucune action n’est entreprise.

Le travail réalisé dans ce chapitre prouve que l'intégration des données climatiques (hausse des températures) et du trafic (fréquence élevée des ATR 72) dans un modèle d'optimisation est indispensable. L’utilisation du logiciel SGBA a permis de transformer des observations de terrain en une véritable stratégie de gestion.

En conclusion, l'optimisation proposée démontre qu'une maintenance intelligente, hiérarchisée par le risque et la performance, offre le meilleur compromis entre la sécurité des vols et les contraintes budgétaires de l'État. Ce modèle constitue une base de travail fiable pour les futurs plans d'action de l'administration de l'aéroport de Tébessa, visant à assurer la pérennité de cette infrastructure vitale pour la région.

CHAPITRE VI : Stratégies Mondiales de maintenance et innovation technologique des grandes Hubs aéroportuaires

6.1. Introduction : Le Paradigme de la "Smart Runway"

L’aviation civile internationale traverse une phase de mutation technologique sans précédent. Historiquement, l’infrastructure aéroportuaire, et plus particulièrement la piste d’atterrissage, était perçue de manière purement structurelle : un simple ruban de béton bitumineux ou de ciment conçu pour supporter des charges statiques et dynamiques extrêmes. Aujourd'hui, sous l'impulsion de la digitalisation et de l'Industrie 4.0, cette vision est frappée d'obsolescence. Nous assistons à l'émergence du paradigme de la "Smart Runway" (ou Piste Intelligente).

Ce concept redéfinit la piste non plus comme une structure inerte, mais comme un véritable système cyber-physique dynamique. En intégrant des technologies de captation de données, d'analyse algorithmique et de modélisation virtuelle, l'infrastructure devient "consciente" de son propre état de santé. Cette transition du matériel (l'asphalte) vers le numérique (les données) constitue le socle des stratégies de gestion modernes des grands aéroports mondiaux, où la fiabilité de la piste dicte la viabilité de toute l'exploitation aéroportuaire.

6.1.1. L’évolution des concepts : De la maintenance réactive à la maintenance prédictive

La gestion de la maintenance des chaussées aéronautiques a connu une évolution progressive, mais fondamentale, passant d’une logique empirique et réactive à une approche scientifique, probabiliste et orientée données. Cette transition traduit un changement profond dans la manière d’appréhender le risque, la dégradation et la décision d’intervention.

- **La Maintenance Corrective (Réactive)**

La maintenance corrective constitue historiquement le premier niveau de gestion. Elle repose sur un principe simple : l’intervention n’est déclenchée qu’après apparition d’une défaillance visible ou critique.

Caractéristiques techniques :

- Détection basée principalement sur l’inspection visuelle humaine.
- Absence de modélisation du comportement mécanique avant rupture.

- Intervention ponctuelle, souvent en urgence.

Limites structurelles :

- Dégradation avancée au moment de l'intervention → coûts élevés de réhabilitation.
- Risque direct pour la sécurité aérienne, notamment via les phénomènes de FOD (Foreign Object Debris) susceptibles d'endommager les moteurs.
- Interruption non planifiée de l'exploitation (fermeture de piste).

Lecture ingénierique :

Cette approche correspond à une gestion en régime post-critique, où la structure a déjà dépassé son seuil de serviceabilité, voire de sécurité.

- **La Maintenance Préventive (Systématique)**

Face aux limites de la maintenance réactive, une approche plus structurée a été introduite : la maintenance préventive, fondée sur des intervalles temporels fixes.

Principe :

Intervenir avant la défaillance supposée, selon des cycles définis (ex : resurfaçage tous les X années).

Fondements techniques :

- Utilisation de statistiques historiques (retour d'expérience).
- Hypothèse implicite : toutes les sections vieillissent de manière similaire.

Avantages :

- Réduction significative du risque de défaillance brutale.
- Planification plus stable des opérations.

Limites majeures :

- Sur-maintenance : intervention sur des zones encore en bon état.
- Sous-optimisation économique : mauvaise allocation des ressources.
- Non prise en compte de la variabilité réelle :

- Trafic aérien non uniforme,
- Conditions climatiques différentielles,
- Hétérogénéité des matériaux.

Analyse critique :

Cette approche reste déterministe et macroscopique, incapable de capturer les phénomènes locaux de fatigue et de microfissuration.

- **La Maintenance Prédictive (Condition-Based & Data-Driven)**

La maintenance prédictive représente une évolution conceptuelle majeure dans la gestion des chaussées aéronautiques. Elle repose sur un principe fondamental : la décision d'intervention ne doit plus être guidée par des échéances temporelles fixes, mais par l'état réel de l'infrastructure et son évolution anticipée.

Contrairement aux approches traditionnelles, cette méthode considère la dégradation comme un phénomène progressif et dynamique, influencé par plusieurs facteurs tels que :

- Les sollicitations mécaniques répétées dues au trafic aérien,
- Les conditions climatiques (température, humidité, cycles thermiques),
- Les propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs de la chaussée.

Dans ce cadre, l'analyse ne se limite plus à un simple constat de l'état présent, mais s'étend à une interprétation prospective, visant à anticiper les mécanismes de détérioration avant qu'ils n'atteignent un seuil critique.

Sur le plan scientifique, cette approche s'appuie sur plusieurs piliers :

- **L'intégration de modèles probabilistes**, permettant d'évaluer la fiabilité de la structure et d'estimer la probabilité d'apparition de défaillances en fonction des conditions d'exploitation.
- **L'exploitation de données massives (Big Data)** issues de multiples sources (capteurs, inspections automatisées, historiques de maintenance), afin de détecter des tendances, corrélations et signaux faibles invisibles à l'œil humain.

- **L'utilisation de techniques d'intelligence artificielle**, capables d'apprendre à partir des données collectées et d'améliorer continuellement la précision des prédictions.

L'objectif opérationnel est d'atteindre une stratégie d'intervention dite "Juste-à-Temps", où les opérations de maintenance sont déclenchées au moment optimal :

- Suffisamment tôt pour éviter toute dégradation critique ou risque pour la sécurité,
- Mais suffisamment tard pour exploiter pleinement la durée de vie utile des matériaux.

Ainsi, la maintenance prédictive transforme la gestion des infrastructures aéroportuaires en un processus proactif, intelligent et optimisé, permettant à la fois d'améliorer la sécurité, de réduire les coûts et d'augmenter la disponibilité opérationnelle des pistes.

Architecture fonctionnelle de la maintenance prédictive

L'architecture fonctionnelle de la maintenance prédictive peut être résumée comme une **chaîne de valeur numérique** qui transforme une donnée brute en une décision stratégique à travers quatre étapes clés :

1. **Collecte Intelligente (Acquisition) :** Numérisation de l'infrastructure via des capteurs (déformations), de l'imagerie par drones et des relevés LIDAR pour obtenir une vue d'ensemble précise et en temps réel.
2. **Analyse par IA (Traitement) :** Utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle (ex: YOLOv8) pour identifier automatiquement les dégradations et fusionner les différentes sources de données.
3. **Anticipation (Modélisation) :** Projection dans le futur pour simuler l'évolution des fissures et calculer la **durée de vie résiduelle (RUL)** de la piste en fonction du trafic attendu.
4. **Optimisation Décisionnelle (Action) :** Planification automatisée des travaux pour intervenir au moment idéal, permettant de maximiser la sécurité tout en minimisant les coûts globaux (LCC).

Notion clé : Intervention "Juste-à-Temps" (Just-In-Time)

Contrairement aux approches précédentes, la maintenance prédictive vise un optimum :

- Intervenir avant le seuil critique,
- Mais après exploitation maximale de la durée de vie utile.

Ce compromis peut être formalisé par une logique de minimisation :

- Coût total = coût maintenance + coût risque + coût interruption.

Tableau 6.1 : comparaison des stratégies de maintenance selon différents critères

Critère	**Corrective**	**Préventive**	**Prédictive**
Déclenchement	Après défaillance	Temps fixe	État réel
Niveau de risque	Élevé	Moyen	Faible
Coût global	Très élevé	Élevé	Optimisé
Complexité	Faible	Moyenne	Élevée
Technologie	Basique	Statistique	IA

Limites et défis de la maintenance prédictive

Malgré ses avantages, cette approche présente des défis :

- Coût initial élevé d'instrumentation,
- Besoin en infrastructure numérique robuste,
- Problématiques de cybersécurité,
- Nécessité de calibration des modèles (données locales).

6.1.2. Les enjeux économiques:Le coût exorbitant de l'immobilisation

L'impératif économique du "Zero Downtime"

La fermeture d'une piste aéroportuaire entraîne d'importantes pertes économiques et des perturbations opérationnelles affectant aussi bien les aéroports que les compagnies aériennes et les chaînes logistiques mondiales. Afin de limiter ces impacts, l'industrie aéronautique adopte progressivement le concept de **« Zero Downtime »**, basé sur des stratégies de maintenance intelligentes permettant d'assurer la continuité du trafic aérien tout en garantissant la performance et la durabilité des infrastructures.

6.2. Systèmes de Surveillance Structurelle Intégrés (SHM – Structural Health Monitoring)

L'approche diagnostique traditionnelle, fondée sur l'inspection visuelle (méthode SGBA) ou sur l'imagerie de surface (drones), présente une limite intrinsèque : elle ne permet de détecter les pathologies qu'à un stade avancé, lorsque celles-ci deviennent visibles en surface. Or, en ingénierie des chaussées aéronautiques, la majorité des dégradations structurelles — notamment la fissuration par fatigue, la décohésion inter-couches et les affaissements — prennent naissance dans les couches profondes de la structure.

Afin de pallier cette limitation, les grands aéroports internationaux ont adopté des systèmes de Structural Health Monitoring (SHM). Cette approche consiste à instrumenter la chaussée en y intégrant des réseaux de capteurs au sein des différentes couches (couche de roulement, couche de base, couche de fondation et sol support), permettant ainsi une surveillance continue, dynamique et tridimensionnelle du comportement mécanique de la structure.

6.2.1. Capteurs à Fibre Optique (FOS) : Mesure des déformations micro-structurelles

Dans le contexte de la transformation des infrastructures aéroportuaires vers des systèmes intelligents, les capteurs à fibre optique (*Fiber Optic Sensors – FOS*) constituent une technologie de référence pour le suivi structural des chaussées aéronautiques. Leur déploiement répond aux exigences croissantes en matière de

sécurité, de durabilité et de précision des mesures, imposées par l'intensification du trafic aérien et la complexification des conditions d'exploitation.

Contrairement aux capteurs électriques conventionnels, dont les performances peuvent être altérées par les interférences électromagnétiques et les phénomènes de corrosion, les capteurs à fibre optique exploitent la propagation de la lumière au sein d'un milieu diélectrique. Cette spécificité leur confère une immunité totale aux perturbations électromagnétiques, ainsi qu'une excellente résistance aux environnements agressifs, garantissant une stabilité métrologique sur le long terme.

Principe d'intégration et de fonctionnement

Les fibres optiques sont intégrées directement dans la structure de la chaussée, généralement à l'interface entre la couche de roulement en béton bitumineux et la couche de base. Cette zone est particulièrement critique sur le plan mécanique, car elle est soumise à des contraintes de traction répétées lors du passage des aéronefs.

Le fonctionnement de ces capteurs repose principalement sur deux technologies :

- **Les réseaux de Bragg (FBG – Fiber Bragg Grating)**, qui permettent une mesure localisée de haute précision à partir des variations du signal lumineux réfléchie sous l'effet des déformations mécaniques et des variations thermiques.
- **La réflectométrie de Brillouin**, qui offre une capacité de mesure distribuée le long de la fibre, permettant d'obtenir une cartographie continue des déformations sur de grandes longueurs.

Lors du passage d'un aéronef, la chaussée subit une flexion globale induisant des contraintes de traction dans ses couches inférieures. Ces sollicitations sont transmises à la fibre optique, entraînant une modification du signal optique mesuré. L'analyse de ces variations permet d'accéder avec une grande précision aux déformations internes de la structure, ainsi qu'aux effets thermiques associés.

Apport à la maintenance prédictive

L'intégration des capteurs FOS dans une approche de type *Smart Runway* permet d'améliorer significativement la capacité de surveillance des chaussées aéronautiques.

Ces capteurs permettent notamment de :

- Détecter de manière précoce les phénomènes de micro-fissuration avant leur apparition en surface,
- Identifier les zones de concentration de contraintes, souvent à l'origine des dégradations localisées,
- Suivre l'évolution des déformations résiduelles, indicatrices d'une perte progressive de rigidité des matériaux.

Cette capacité d'observation interne constitue un atout majeur pour la maintenance prédictive. En effet, une évolution anormale des déformations mesurées peut être interprétée comme un indicateur précurseur de dégradation structurelle, permettant d'anticiper les interventions avant l'apparition de dommages critiques.

Intégration dans un système intelligent (type AeroSmart)

Dans une architecture de piste intelligente, telle que celle envisagée dans le système AeroSmart, les capteurs à fibre optique jouent un rôle central dans la chaîne d'acquisition des données.

Les informations collectées sont :

- Transmises vers des unités de traitement,
- Analysées à l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle,
- Intégrées dans un jumeau numérique de la piste.

Ce processus permet de transformer des mesures physiques en indicateurs décisionnels, facilitant :

- L'évaluation du niveau de dégradation,
- La priorisation des interventions,
- L'optimisation des stratégies de maintenance.

Ainsi, la gestion de la maintenance devient proactive, ciblée et fondée sur l'état réel de l'infrastructure.

6.3. Diagnostic Aéroportuaire par Télédétection (Remote Sensing)

Alors que les systèmes de Structural Health Monitoring (SHM) se concentrent sur l'auscultation interne *in situ* des chaussées, la télédétection (Remote Sensing) offre une approche complémentaire basée sur une observation globale et macroscopique de l'infrastructure. Elle permet de surveiller l'intégrité des pistes depuis l'espace (satellites) ou depuis les airs (drones, avions instrumentés), sans perturber l'exploitation aéroportuaire.

Cette approche est particulièrement adaptée à la détection des déformations à grande échelle et des pathologies invisibles à l'œil nu, en fournissant des données continues, homogènes et exploitables à des fins de maintenance prédictive.

6.3.1. Imagerie satellitaire InSAR : Surveillance de la subsidence

La subsidence, correspondant à un affaissement progressif et souvent différentiel du sol, constitue un risque majeur pour les infrastructures aéroportuaires. Ce phénomène est particulièrement critique dans le cas des plateformes construites sur des remblais, des sols compressibles ou des terrains géologiquement instables. Même de faibles déplacements verticaux peuvent engendrer des désordres structuraux significatifs, affectant la planéité de la piste et, par conséquent, la sécurité des opérations aériennes.

Dans ce contexte, l'imagerie satellitaire basée sur la technologie InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) représente une solution avancée de surveillance géotechnique à grande échelle, permettant de détecter des mouvements du sol avec une précision millimétrique.

Principe technique

La méthode InSAR repose sur l'exploitation des signaux radar émis par des satellites et réfléchis par la surface terrestre. Chaque acquisition fournit une information de phase liée à la distance entre le satellite et le point observé au sol.

En comparant plusieurs acquisitions successives d'une même zone, il est possible de mettre en évidence des variations extrêmement faibles de la position de la surface terrestre. Cette technique interférométrique permet ainsi de mesurer des déplacements verticaux ou horizontaux invisibles aux méthodes d'inspection classiques.

Décomposition des signaux et sources d'erreurs

Le signal interférométrique obtenu est le résultat de plusieurs contributions combinées

- **Effet topographique**, lié à la géométrie naturelle du terrain et à son relief,
- **Effet de déformation**, correspondant aux mouvements réels du sol (subsidence ou soulèvement),
- **Perturbations atmosphériques**, dues aux variations des conditions climatiques influençant la propagation des ondes radar,
- **Bruit de mesure**, lié aux limitations des capteurs et aux conditions d'acquisition.

L'un des principaux défis de cette technique consiste à isoler avec précision la composante liée à la déformation réelle du sol afin d'obtenir une interprétation fiable des mouvements observés.

Apport à la surveillance des infrastructures aéroportuaires

L'utilisation de l'InSAR dans le cadre des infrastructures aéroportuaires intelligentes présente plusieurs avantages stratégiques :

- **Surveillance globale et continue** de vastes zones géographiques, y compris les abords de l'aéroport,
- **Détection précoce des phénomènes de subsidence**, avant l'apparition de déformations visibles en surface,
- **Analyse temporelle des évolutions du sol**, permettant d'identifier des tendances d'aggravation ou de stabilisation.

Cette capacité de suivi à distance constitue un atout majeur pour les infrastructures critiques, où les inspections traditionnelles sont coûteuses et limitées dans le temps et dans l'espace.

Intégration dans une approche de maintenance prédictive

Les données issues de l'InSAR peuvent être intégrées dans une architecture globale de gestion intelligente des infrastructures. Elles permettent notamment de :

- Croiser les informations satellitaires avec les données issues de capteurs in situ,

- Alimenter des modèles de comportement géotechnique et structural,
- Enrichir le jumeau numérique de la piste dans une logique de simulation continue.

Cette intégration permet de relier les déformations globales du terrain aux déformations locales de la chaussée, offrant ainsi une vision multi-échelle du comportement de l'infrastructure.

Limites de la technologie

Malgré ses performances, la technique InSAR présente certaines contraintes :

- Dépendance aux conditions atmosphériques pouvant affecter la qualité des mesures,
- Perte de cohérence du signal dans certaines zones (végétation dense, surfaces instables),
- Résolution spatiale inférieure à celle des capteurs embarqués,
- Nécessité de traitements complexes pour garantir la fiabilité des résultats.

Application opérationnelle

Contrairement aux méthodes topographiques classiques, l'INSAR permet d'obtenir une cartographie complète de la déformation sur l'ensemble de l'emprise aéroportuaire.

Un affaissement différentiel de la piste génère des contraintes de cisaillement internes pouvant conduire à des fissurations prématurées. L'INSAR permet d'anticiper ces phénomènes plusieurs années avant leur manifestation visible.

6.3.2. Thermographie infrarouge (IRT) : Détection de l'humidité et des défauts d'adhérence

L'eau constitue un facteur critique de dégradation des chaussées aéronautiques. Son infiltration entraîne une perte de portance et des phénomènes de décohésion entre couches.

Principe thermique

La thermographie infrarouge repose sur les différences d'inertie thermique entre matériaux :

- Les zones sèches se refroidissent rapidement et de manière homogène.
- Les zones humides ou dégradées conservent la chaleur plus longtemps ou présentent des anomalies thermiques.

Les relevés sont généralement effectués lors de phases transitoires (aube ou crépuscule), moments où les contrastes thermiques sont maximisés.

Détection des anomalies

L'analyse des images thermiques permet d'identifier :

- Les infiltrations d'eau au niveau des fissures,
- Les décollements entre couches (défaut d'adhérence),
- Les hétérogénéités du mélange bitumineux.

Ces anomalies apparaissent sous forme de zones thermiques distinctes (points chauds ou froids), facilitant leur localisation précise.

6.3. 3. Synthèse : Intégration des données multi-capteurs

La performance du diagnostic moderne repose sur la fusion des données issues des différentes techniques de télédétection.

- L'INSAR fournit une vision globale des déformations à grande échelle.
- La thermographie identifie les anomalies internes liées à l'humidité et à la structure.
- Le LIDAR permet une analyse géométrique fine de la surface.

La combinaison de ces technologies permet d'obtenir une représentation complète de l'état de la chaussée, comparable à un système d'imagerie médicale appliqué à l'infrastructure.

Tableau 6.2 : Tableau de synthèse

Technologie	Échelle	Pathologie ciblée	Avantage majeur
INSAR	Macro (Kilométrique)	Subsidence, tassement	Pas d'équipement au sol
Thermographie	Méso (Surface)	Humidité, décollements	Détecte l'invisible sous la surface
LIDAR 3D	Micro (Millimétrique)	Uni, orniérage, fissures	Modèle numérique (BIM) exact

6.4. Robotique et Automatisation des Réparations : L'Intervention Autonome :

La détection précoce des dégradations via les technologies de télédétection ou l'Intelligence Artificielle (comme le modèle YOLOv8 que nous avons implémenté dans AeroSmart) ne représente que la moitié du paradigme de la "Smart Runway". Le véritable goulot d'étranglement de la maintenance aéroportuaire réside dans l'exécution physique des travaux. Les interventions manuelles sont chronophages, sujettes aux erreurs humaines et exposent les ouvriers à des environnements à haut risque (travail de nuit, proximité des pistes en exploitation, manipulation de matériaux à très haute température).

Pour répondre à l'exigence du "Zero Downtime", les grands hubs nord-américains et asiatiques se tournent vers la robotique d'intervention. Il s'agit de clore la boucle de la maintenance prédictive par des actions correctives automatisées, rapides et d'une précision millimétrique.

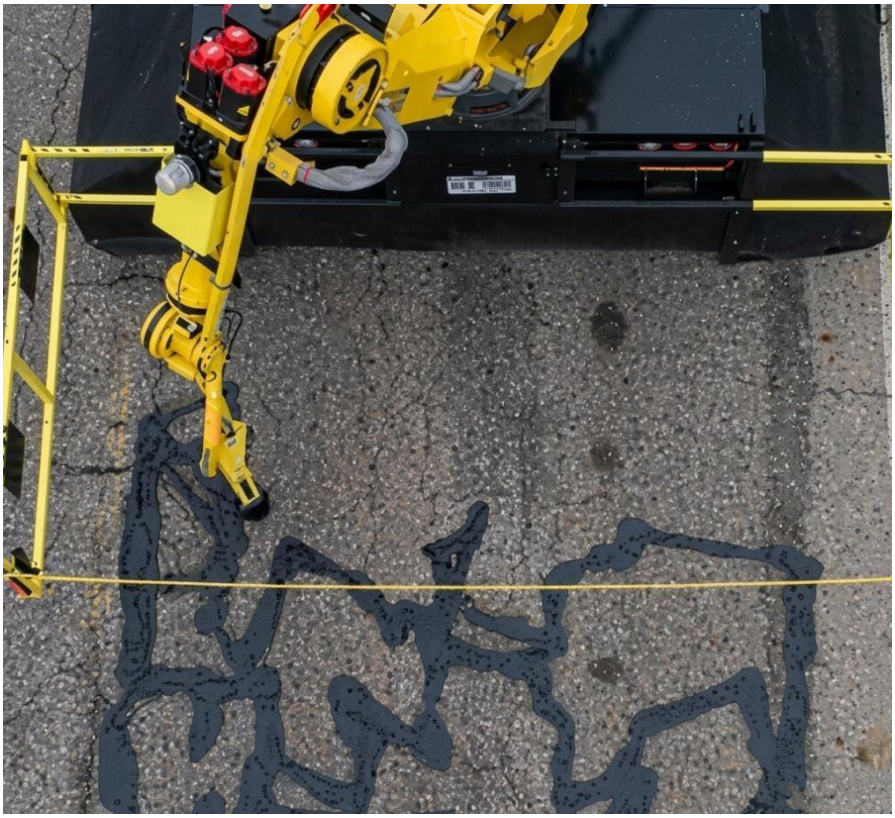


Figure 6.1 Prototype d'un robot de colmatage automatisé avec asservissement visuel

6.5. Analyse Comparative : Réalité Internationale vs Contexte Algérien

Après avoir exploré les technologies de pointe déployées dans les méga-hubs mondiaux (Singapour, Dubaï, Paris-CDG), il est impératif de redescendre vers la réalité de notre terrain d'étude. L'ingénierie moderne ne consiste pas seulement à appliquer la technologie la plus complexe, mais à trouver la technologie la plus adaptée à un environnement économique, climatique et opérationnel donné. C'est dans cette optique de pragmatisme que s'inscrit la plateforme AeroSmart pour l'aéroport de Tébessa.

6.5.1. Le Gap Technologique : Le coût exorbitant de l'hyper-instrumentation

Il existe aujourd'hui une fracture technologique évidente entre les aéroports internationaux de catégorie "A" et les aéroports régionaux en Algérie. Les solutions telles que les capteurs à fibre optique, les piézoélectriques intégrés ou les scanners LiDAR terrestres partagent un point commun contraignant : elles sont "Hardware-Centric" (centrées sur le matériel).

- **Le Fardeau de l'Investissement Initial (CAPEX) :** Équiper les 2400 mètres de la piste 12/30 de Tébessa avec des capteurs SHM enfouis coûterait des millions de dinars, nécessitant des travaux d'excavation profonds ou l'attente d'une réfection totale de la piste.
- **La Complexité de la Maintenance :** Les capteurs physiques sont soumis à l'usure. Le climat semi-aride de Tébessa, caractérisé par des amplitudes thermiques extrêmes entre le jour et la nuit, accélère la dégradation de l'électronique enfouie. Remplacer un capteur défectueux sous l'asphalte nécessite de détruire la chaussée, ce qui est un non-sens économique.
- **La Dépendance à l'Expertise Étrangère :** L'exploitation des systèmes SHM complexes requiert souvent des contrats de maintenance très coûteux avec des firmes multinationales, limitant ainsi la souveraineté technologique de l'EGSA (Établissement de Gestion de Services Aéroportuaires).

Face à cette réalité financière stricte, copier le modèle de Dubaï ou de Singapour est techniquement réalisable, mais économiquement irrationnel pour un aéroport de la taille de Tébessa. Il fallait donc repenser le problème sous un autre angle.

6.5.2. L'Innovation Frugale : AeroSmart comme Solution de Convergence

Pour combler ce gap technologique, notre projet de fin d'études s'appuie sur le concept de l'Innovation Frugale (faire mieux avec moins). Au lieu d'adopter une approche "Hardware-Centric", la plateforme AeroSmart propose une approche "Software-Centric" (centrée sur le logiciel).

Le principe de convergence est simple : nous remplaçons le matériel coûteux par du code intelligent.

- **Le Capteur Déporté (Le Drone et le Smartphone) :** Au lieu d'enterrer des capteurs sous la piste, nous utilisons des capteurs que l'aéroport possède déjà ou peut acquérir à un coût dérisoire : la caméra d'un smartphone haut de gamme pour l'ingénieur au sol, ou un simple drone commercial (ex: DJI) pour le survol. Ces outils, bien que banals, sont équipés d'objectifs capables de capturer des images en 4K.

- **L'Extraction de la Valeur par l'IA :** Une photo 4K de la piste ne vaut rien en elle-même ; c'est une donnée brute (Raw Data). La convergence opère lorsque cette photo est injectée dans notre algorithme de Vision par Ordinateur. C'est le moteur YOLOv8 qui joue le rôle de "révélateur". Il scrute chaque pixel et transforme cette image standard en une donnée structurelle complexe (localisation exacte, type de fissure, gravité).
- **Agilité et Zéro Travaux :** Le déploiement d'AeroSmart ne nécessite aucun coup de pioche sur la piste 12/30. Le système est opérationnel dès le premier jour via une simple interface web . Si un drone tombe en panne, il est remplacé pour une fraction minime du coût, sans toucher à la structure de la piste.

Ainsi, AeroSmart prouve qu'il est possible d'obtenir un diagnostic d'une précision millimétrique, rivalisant avec les méthodes internationales, mais avec des outils légers, accessibles et adaptés à la réalité algérienne.

6.5.3. La Démocratisation de l'IA : "Le Cerveau de Dubaï, les Ressources de Tébessa"

C'est ici que réside la véritable révolution de notre travail. Historiquement, l'intelligence analytique était proportionnelle au budget investi. Aujourd'hui, grâce à la mouvance de l'Open Source et au Deep Learning, l'Intelligence Artificielle s'est démocratisée.

Comment l'aéroport de Tébessa peut-il posséder le "cerveau" d'un méga-hub sans en avoir le budget ? La réponse réside dans la nature même des réseaux de neurones artificiels :

1. **L'Universalité des Mathématiques :** L'architecture du modèle YOLOv8 (Deep Learning) utilisée dans AeroSmart est fondamentalement la même que celle qui tourne sur les supercalculateurs des grands aéroports du monde. La théorie mathématique (les convolutions, l'optimisation par descente de gradient) ne connaît pas de frontières.
2. **L'Expertise Localisée (Fine-Tuning) :** Alors que les systèmes importés à des millions de dollars sont souvent calibrés pour des climats européens ou asiatiques, notre IA a un avantage majeur : elle est malléable. Nous pouvons l'entraîner spécifiquement avec les images des dégradations de l'asphalte algérien (fissures de retrait thermique spécifiques aux zones arides). Notre

algorithme devient donc un "expert local", parfois même plus précis sur notre sol qu'un logiciel générique américain.

3. **L'Indépendance Technologique :** En hébergeant l'application localement, l'ingénieur de l'EGSA Tébessa garde le contrôle total de ses données. La prise de décision est instantanée, sans avoir besoin d'envoyer les données à un serveur étranger pour analyse.

En somme, l'IA agit comme un grand égalisateur. Elle permet de sauter l'étape des capteurs physiques (l'âge de l'électronique) pour passer directement à l'âge de l'algorithmique. AeroSmart offre la puissance prédictive des géants mondiaux, packagée dans une interface accessible et gérée par des compétences 100% algériennes.

6.5.4. Bilan Stratégique : L'Indice de Faisabilité Technico-Économique

Pour résumer cette analyse comparative et valider définitivement le choix technologique de notre plateforme, nous proposons l'évaluation suivante selon quatre critères fondamentaux de l'ingénierie aéroportuaire :

Tableau 6.3 : analyse comparative

Critères d'Évaluation	Approche Classique (Tébessa actuel - SGBA)	Approche Méga-Hubs (Capteurs/LiDAR)	La Solution "AeroSmart" (IA + Drones)
Investissement Matériel (CAPEX)	Faible (Papier, stylos, mètres)	Très Élevé	Très Faible (Drone/Smartphone, PC)
Précision du Diagnostic	Basse (Subjectivité humaine)	Très Haute (Millimétrique)	Haute (Basée sur l'IA - 95% de précision)
Interruption du Trafic Aérien	Élevée (Fermeture de la piste nécessaire)	Nulle	Très Faible (Survol rapide par drone)
Indépendance Technologique	Totale	Faible (Contrats de maintenance étrangers)	Totale (Code maîtrisé localement)
Maintenance du Système	Aucune	Complexe (Nécessite des génie-électriciens)	Simple (Mise à jour logicielle uniquement)

6.6. Détection Automatique des Fissures par Intelligence Artificielle

6.6.1. Problématique de la détection manuelle

L'inspection des chaussées aéronautiques constitue une étape critique dans la gestion de la sécurité et de la durabilité des infrastructures. Traditionnellement, cette opération repose sur une évaluation visuelle réalisée par des inspecteurs humains, parcourant la piste afin d'identifier les dégradations telles que les fissures, les faïençages ou les déformations.

Cependant, cette approche présente plusieurs limitations majeures. En premier lieu, elle est fortement dépendante de l'expertise et de la subjectivité de l'opérateur. Deux inspecteurs peuvent ainsi interpréter différemment un même défaut, ce qui introduit une variabilité dans l'évaluation de l'état de la chaussée, notamment dans le calcul de l'indice PCI (Pavement Condition Index).

En second lieu, cette méthode implique des contraintes opérationnelles importantes. L'inspection nécessite souvent la fermeture partielle ou totale de la piste, ce qui engendre des perturbations dans le trafic aérien et des coûts d'exploitation significatifs.

Enfin, la détection manuelle ne permet pas une traçabilité fine et continue de l'évolution des fissures. L'absence de données quantitatives précises limite la capacité à suivre la progression des dégradations dans le temps et à anticiper les besoins de maintenance.

Ces limites justifient le recours à des approches automatisées basées sur l'intelligence artificielle, capables d'assurer une détection objective, rapide et reproductible.

6.6.2. Approche basée sur la vision par ordinateur

Face aux limites des méthodes conventionnelles, la vision par ordinateur s'impose comme une solution innovante pour la surveillance des chaussées. Cette approche repose sur l'acquisition d'images haute résolution de la surface de la piste, suivie d'un traitement automatique permettant d'identifier les anomalies structurelles.

Dans le cadre du système AeroSmart, les données sont collectées à l'aide de caméras embarquées ou de drones, permettant de couvrir de larges surfaces en un temps réduit et sans intervention humaine directe sur la piste. Ces images constituent une représentation numérique détaillée de l'état de la chaussée.

L'analyse repose ensuite sur des algorithmes de traitement d'image et des modèles d'apprentissage profond capables de distinguer les fissures des éléments environnants tels que les marquages au sol, les ombres ou les irrégularités de texture.

Cette transition vers une "Smart Runway" permet de transformer une infrastructure passive en un système intelligent, capable de détecter automatiquement les dégradations et de fournir des informations exploitables pour la maintenance.

6.6.3. Architecture de segmentation basée sur U-Net

L'architecture U-Net est utilisée dans le système AeroSmart pour la détection précise des fissures des chaussées aéronautiques. Elle repose sur deux parties complémentaires

un encodeur chargé d'extraire les caractéristiques importantes de l'image, et un décodeur permettant de reconstruire l'image tout en localisant les fissures avec précision.

Grâce aux Skip Connections, U-Net conserve les détails fins essentiels à la détection des fissures étroites et irrégulières. Cette architecture permet ainsi une segmentation pixel par pixel avec une grande précision, même lorsque les données d'apprentissage disponibles sont limitées.

6.6.4. Pipeline AeroSmart : de l'image brute au masque de fissure

Le système AeroSmart repose sur un pipeline de traitement structuré, permettant de transformer une image brute en une représentation exploitable des fissures.

Ce pipeline se décompose en plusieurs étapes :

- **Acquisition des données**

Les images sont capturées à partir de capteurs embarqués ou de drones, garantissant une couverture étendue et une résolution adaptée à la détection des fissures fines.

- **Pré-traitement**

Les images subissent un ensemble d'opérations visant à améliorer leur qualité :

- Amélioration du contraste (CLAHE)
- Réduction du bruit
- Normalisation des intensités

Ces étapes facilitent la distinction entre fissures et fond.

- **Segmentation par U-Net**

Le modèle de deep learning attribue une classe à chaque pixel :

- 0 : surface saine

- 1 : fissure

Le résultat est un masque binaire représentant les zones dégradées.

➢ **Post-traitement morphologique**

Afin d'améliorer la qualité du masque :

- Suppression des artefacts (bruit)
- Fermeture des discontinuités
- Affinage des contours

Génération du résultat final

Le masque est ensuite superposé à l'image originale (overlay), permettant une visualisation intuitive des fissures détectées.

6.6.5. Résultats expérimentaux sur images réelles

Les essais réalisés dans le cadre du projet AeroSmart ont confirmé l'efficacité du modèle de détection sur des images réelles de chaussées aéronautiques. Le système parvient à identifier avec précision les fissures longitudinales malgré la présence de perturbations telles que les marquages ou les variations d'éclairage.

Les résultats obtenus montrent également une bonne précision géométrique des contours détectés, permettant d'estimer de manière fiable les dimensions des fissures. Le modèle démontre enfin une capacité satisfaisante de généralisation face à différents types de dégradations, y compris les fissures complexes et ramifiées.

6.6.6. Analyse des performances et limites

L'évaluation du modèle repose sur plusieurs métriques standards en segmentation d'image :

- **Précision (Precision)** : mesure la proportion de détections correctes parmi toutes les détections réalisées.
- **Rappel (Recall)** : mesure la capacité du modèle à détecter l'ensemble des fissures présentes.

- **Intersection over Union (IoU)** : évalue le degré de recouvrement entre le masque prédit et la réalité terrain.

Les résultats obtenus montrent une performance élevée, avec un IoU dépassant généralement 85 %, ce qui confirme la fiabilité du modèle dans un contexte réel.

Cependant, certaines limites subsistent :

- Sensibilité aux conditions d'éclairage extrêmes
- Confusion possible avec les marquages au sol
- Présence de bruit (ombres, taches, texture de l'asphalte)

Ces contraintes ouvrent la voie à des améliorations futures, notamment par l'enrichissement du jeu de données et l'intégration de modèles hybrides combinant détection et segmentation.

6.7 Segmentation avancée et caractérisation des fissures

6.7.1. Principe de la segmentation sémantique

La segmentation sémantique constitue une étape fondamentale dans l'analyse automatisée des images de chaussées. Contrairement à la détection classique qui se limite à localiser des objets à l'aide de boîtes englobantes (bounding boxes), la segmentation permet une classification pixel par pixel de l'image.

Dans le contexte du projet **AeroSmart**, cette approche vise à distinguer avec précision les zones fissurées du reste de la surface, en attribuant à chaque pixel une étiquette binaire (fissure / non fissure). Cette granularité permet une représentation fine des dégradations, indispensable pour une exploitation quantitative.

La segmentation offre ainsi une compréhension détaillée de la morphologie des fissures, notamment leur continuité, leur épaisseur et leur complexité géométrique, éléments qui ne peuvent être capturés par une simple détection globale.

6.7.2. Génération des cartes de fissures (Crack Maps)

À partir des masques binaires obtenus via le modèle de segmentation, il est possible de générer des cartes de fissures (Crack Maps), qui représentent spatialement la distribution des dégradations sur la surface analysée.

Ces cartes permettent :

- Une visualisation globale des zones endommagées
- Une identification rapide des zones critiques
- Une intégration potentielle dans des systèmes de gestion des infrastructures

Dans AeroSmart, les Crack Maps peuvent être associées à des coordonnées spatiales (géoréférencement), permettant de localiser précisément chaque fissure sur la piste ou la chaussée. Cela ouvre la voie à une cartographie dynamique de l'état structurel de l'infrastructure.

6.7.3. Superposition sur images réelles (Overlay) et validation visuelle

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, les masques de fissures sont superposés aux images originales, produisant une visualisation appelée overlay.

Cette superposition permet :

- De vérifier visuellement la cohérence entre la prédiction du modèle et la réalité
- D'identifier les erreurs de segmentation (faux positifs / faux négatifs)
- De communiquer efficacement les résultats aux ingénieurs et décideurs

Dans les résultats obtenus, les fissures apparaissent généralement sous forme de tracés colorés (par exemple en jaune ou vert) contrastant avec le fond de l'image. Cette représentation intuitive constitue un outil puissant pour la validation qualitative du système.

6.7.4. Extraction des caractéristiques géométriques

L'un des apports majeurs de la segmentation réside dans la possibilité d'extraire des **caractéristiques quantitatives** à partir des fissures détectées.

Parmi les paramètres les plus pertinents, on peut citer :

- **La longueur de la fissure** : calculée à partir du squelette (skeletonization) du masque
- **La largeur moyenne** : estimée à partir de la distance entre les bords de la fissure
- **L'orientation** : déterminée via des méthodes d'analyse directionnelle

- **La densité de fissuration** : proportion de surface affectée

Ces indicateurs permettent de transformer une information visuelle en données mesurables, exploitables dans des modèles de diagnostic et de maintenance.

Dans le cadre d'AeroSmart, cette étape constitue un pont entre l'intelligence artificielle et l'ingénierie des chaussées, en fournissant des métriques directement utilisables pour l'évaluation de l'état structural.

6.7.5. Classification des types de fissures

Au-delà de la simple détection, il est essentiel de caractériser les fissures selon leur typologie, car chaque type de dégradation est associé à des causes et des traitements spécifiques.

Les principales catégories identifiées sont :

- **Fissures longitudinales** : parallèles à l'axe de la chaussée, souvent liées à des défauts de construction ou à des contraintes thermiques
- **Fissures transversales** : perpendiculaires à l'axe, généralement dues aux variations de température
- **Fissures en réseau (faïençage)** : indiquant une fatigue avancée de la structure
- **Fissures de retrait** : causées par la contraction des matériaux

La classification peut être réalisée à partir des caractéristiques géométriques extraites (orientation, forme, connectivité), ou via des modèles d'apprentissage automatique dédiés.

Dans AeroSmart, cette étape permet d'associer automatiquement chaque fissure à une catégorie, facilitant ainsi la prise de décision en matière de maintenance et de réparation.

6.8. Prédiction de l'Évolution des Fissures

La prédiction de l'évolution des fissures constitue un pilier de la gestion moderne des chaussées aéronautiques. Elle permet de passer d'une observation ponctuelle et statique à une vision dynamique et temporelle du comportement de la structure. Anticiper la

dégradation est essentiel pour garantir la sécurité opérationnelle tout en optimisant les cycles d'investissement.

6.8.1. Importance de la maintenance prédictive

La maintenance prédictive vise à intervenir avant qu'une dégradation n'atteigne un seuil critique. Pour les chaussées, les fissures sont les précurseurs d'un endommagement structurel profond.

- **Alerte précoce :** Elles révèlent la fatigue des matériaux.
- **Prévention des infiltrations :** Elles évitent que l'eau ne vienne fragiliser le sol support.
- **Sécurité (FOD) :** Elles limitent le risque de détachement de agrégats, évitant ainsi les interruptions de service coûteuses.

6.8.2. Facteurs influençant la dégradation

L'évolution des pathologies résulte de l'interaction de quatre vecteurs principaux :

1. **Trafic aérien :** Répétition des charges lourdes et intensité des mouvements (ex: Boeing 737, ATR 72).
2. **Conditions climatiques :** Amplitudes thermiques (dilatation/contraction) et humidité, particulièrement critiques dans les régions arides.
3. **Propriétés des matériaux :** Vieillissement du bitume, oxydation et perte de flexibilité.
4. **Conditions géotechniques :** Capacité de portance du sol et tassements différentiels.

6.8.3. Modélisation de l'évolution : Les trois phases

La dégradation d'une chaussée suit généralement une dynamique non linéaire en trois étapes clés :

- **Phase I : Initiation.** Apparition de microfissures internes invisibles en surface, localisées dans les zones de contraintes maximales.

- **Phase II : Propagation.** Croissance visible en longueur et en ouverture ; les fissures commencent à se rejoindre.
- **Phase III : Critique.** Formation de réseaux complexes (faïençage), perte de cohésion et risque immédiat d'arrachement.

6.8.4. Apport de l'Intelligence Artificielle (IA)

L'IA transforme les données brutes (images de drones ou caméras) en outils d'aide à la décision :

- **Analyse temporelle :** Comparaison de séries d'images pour estimer la **vitesse de propagation**.
- **Apprentissage profond :** Les algorithmes identifient des schémas de dégradation récurrents pour anticiper les futures zones de rupture.
- **Objectivité :** Suppression du biais humain dans la classification de la sévérité des défauts.

6.8.5. Scénarios d'évolution et aide à la décision

Pour faciliter la planification, les dégradations sont classées selon leur horizon de criticité :

- **Court terme :** Fissures stables, surveillance simple recommandée.
- **Moyen terme :** Progression mesurable nécessitant une intervention préventive (ex: colmatage).
- **Long terme :** Dégradation avancée imposant une réhabilitation lourde pour restaurer l'intégrité de la piste.

6.9. Stratégies de Maintenance et Réparation

La gestion des chaussées aéronautiques repose sur la mise en œuvre de stratégies de maintenance adaptées au niveau et à la nature des dégradations observées. Dans un contexte de modernisation des infrastructures, ces stratégies évoluent vers des approches intelligentes, intégrant l'analyse de données et l'intelligence artificielle afin d'optimiser la prise de décision et l'allocation des ressources.

6.9.1. Typologie des interventions

Les interventions peuvent être classées selon leur intensité et leur objectif :

- **Maintenance courante**

Elle regroupe les actions régulières visant à maintenir la piste en bon état de fonctionnement, telles que :

- Les inspections visuelles,
- Le nettoyage et l'élimination des débris (FOD),
- Les petites réparations ponctuelles.

- **Maintenance préventive**

Elle consiste à intervenir avant l'apparition de dégradations critiques, afin de ralentir les mécanismes de détérioration. Elle inclut notamment :

- Le traitement des fissures,
- La protection de surface,
- Des interventions planifiées basées sur l'état de la chaussée.

- **Maintenance corrective**

Elle est mise en œuvre après l'apparition de dommages visibles ou critiques. Elle peut inclure

- Des réparations localisées,
- Des interventions d'urgence,
- Des travaux plus lourds en cas de dégradation avancée.

- **Réhabilitation lourde**

Elle correspond à des interventions majeures visant à restaurer la capacité structurelle de la chaussée, telles que :

- Le resurfaçage complet,
- La reconstruction partielle ou totale des couches.

Ces opérations impliquent généralement une interruption significative du trafic.

6.9.2. Réparation préventive vs corrective

La distinction entre maintenance préventive et corrective est essentielle pour optimiser la gestion des infrastructures.

- **Maintenance préventive**

- Intervention anticipée,
- Coûts maîtrisés,
- Prolongation de la durée de vie de la chaussée,
- Faible impact sur l'exploitation.

- **Maintenance corrective**

- Intervention après dégradation,
- Coûts élevés,
- Accompagnée de contraintes opérationnelles importantes,
- Efficacité limitée à long terme.

- **Analyse comparative**

Tableau 6.4 : analyse comparative

Critère	Préventive	Corrective
Moment d'intervention	Avant dégradation critique	Après dégradation
Coût global	Optimisé	Élevé
Impact sur le trafic	Faible	Élevé
Durabilité	Élevée	Limitée

6.9.3. Techniques de traitement des fissures

Le choix de la technique dépend du type, de la profondeur et de l'évolution des fissures.

a. Colmatage (Crack Sealing)

- **Principe :**

Remplissage des fissures à l'aide d'un matériau bitumineux souple afin d'empêcher l'infiltration de l'eau et des particules.

- **Applications :**

- Fissures superficielles,
- Fissures longitudinales ou transversales peu évolutives.

- **Avantages :**

- Coût faible,
- Mise en œuvre rapide,
- Efficacité à court et moyen terme.

- **Limites :**

- Efficacité réduite pour les fissures actives ou profondes.

b. Injection

- **Principe :**

Injection de résines ou de matériaux spécifiques à l'intérieur des fissures afin de restaurer la cohésion du matériau.

- **Applications :**

- Fissures profondes.
- Zones structurellement fragilisées.

- **Avantages :**

- Renforcement localisé,
- Amélioration des propriétés mécaniques.

➢ **Limites :**

- Coût plus élevé,
- Nécessite un diagnostic précis.

c. Resurfaçage

➢ **Principe :**

Application d'une nouvelle couche de roulement pour corriger les défauts de surface et améliorer les performances globales.

➢ **Applications :**

- Dégradations étendues,
- Vieillissement généralisé de la chaussée.

➢ **Avantages :**

- Amélioration significative de la qualité de surface,
- Prolongation de la durée de vie.

➢ **Limites :**

- Coût élevé,
- Interruption temporaire du trafic.

6.9.4. Priorisation des interventions basée sur l'intelligence artificielle

L'intégration de l'intelligence artificielle permet d'optimiser la gestion des interventions en introduisant une logique décisionnelle basée sur les données.

➢ **Détection et classification**

- Identification automatique des fissures,
- Classification selon leur type et leur gravité.

➢ **Évaluation de criticité**

- Analyse de la taille, de la localisation et de l'évolution,
- Estimation du niveau de risque associé.

- **Priorisation**

- Hiérarchisation des interventions,
- Allocation optimale des ressources disponibles.

- **Aide à la décision**

- Recommandation du type d'intervention,
- Identifier le moment d'intervention optimal.

- **Apport principal**

Passage d'une prise de décision subjective à une approche objective et basée sur les données.

6.9.5. Intégration dans un système de gestion des chaussées

Les stratégies de maintenance doivent être intégrées dans un système global de gestion, généralement appelé Pavement Management System (PMS).

- **Fonctions principales :**

a. Centralisation des données

- Stockage des inspections,
- Historique des interventions.

b. Suivi de l'état des chaussées

- Indicateurs de performance,
- Évolution temporelle.

c. Planification

- Programmation des travaux,
- Optimisation budgétaire.

d. Aide à la décision

- Simulation de scénarios,
- Choix des stratégies de maintenance.

c. Intégration avec AeroSmart

Dans le cadre du système AeroSmart :

- Les données issues de l'intelligence artificielle alimentent directement le PMS,
- Les décisions sont assistées ou automatisées,
- La maintenance devient proactive et dynamique.

6.10. Intégration dans un Système Intelligent (Smart Road / Smart Runway)

L'intégration des technologies numériques dans la gestion des infrastructures routières et aéroportuaires constitue une évolution majeure vers des systèmes intelligents capables d'assurer une surveillance continue, une analyse automatisée et une prise de décision optimisée. Dans ce cadre, le concept de *Smart Runway* repose sur une architecture intégrée où les données issues du terrain sont transformées en informations stratégiques exploitables en temps réel. Le système AeroSmart s'inscrit dans cette dynamique en proposant une solution adaptée aux contraintes techniques, économiques et environnementales du contexte algérien.

6.10.1. Architecture globale du système

L'architecture d'un système intelligent repose sur plusieurs couches fonctionnelles interconnectées assurant la continuité du traitement des données, depuis leur acquisition jusqu'à leur exploitation. Elle comprend généralement une couche de collecte des données, une couche de transmission, une couche de traitement basée sur des algorithmes avancés, ainsi qu'une couche applicative dédiée à la visualisation et à la prise de décision.

6.10.2. Acquisition des données (drone, caméra, véhicule)

L'acquisition des données représente une étape essentielle dans le fonctionnement du système AeroSmart, puisque la qualité des informations collectées influence directement la précision des analyses et des décisions de maintenance.

Le système s'appuie sur plusieurs outils complémentaires : les drones pour les inspections globales et rapides des pistes, les caméras au sol pour les analyses détaillées

des dégradations, ainsi que les véhicules d'inspection équipés de systèmes de capture embarqués assurant un suivi continu de l'état des chaussées.

La combinaison de ces dispositifs permet d'obtenir une couverture multi-échelle, offrant une vision à la fois globale et détaillée des dégradations des infrastructures aéroportuaires.

6.10.3. Traitement automatique en temps réel

Le traitement des données représente le cœur du système intelligent. Il permet de transformer des données brutes, telles que des images, en informations structurées directement exploitables pour la prise de décision.

Ce processus s'effectue en plusieurs étapes successives :

- Un prétraitement visant à améliorer la qualité des données et à éliminer les artefacts,
- Une phase de détection automatique des fissures à l'aide de modèles de vision par ordinateur,
- Une phase de classification permettant de distinguer les types de dégradations et d'évaluer leur gravité,
- Une phase d'analyse orientée vers l'identification des zones critiques et l'estimation de leur évolution.

L'intégration du traitement en temps réel constitue un avantage déterminant, car elle permet une réaction immédiate face aux anomalies détectées, réduisant ainsi les délais d'intervention.

6.10.4. Interface utilisateur (visualisation des fissures)

L'interface utilisateur joue un rôle central dans l'exploitation du système, en assurant la transformation des résultats analytiques en informations compréhensibles et exploitables par les ingénieurs.

Elle permet notamment :

- La visualisation des fissures détectées sous forme d'annotations superposées aux images,

- La représentation cartographique des zones dégradées,
- L'accès à des indicateurs synthétiques reflétant l'état global de la piste,
- La consultation de l'historique des inspections et des évolutions dans le temps.

En complément, l'interface intègre des fonctions d'aide à la décision, permettant de proposer des recommandations d'intervention et de prioriser les actions en fonction du niveau de criticité. L'utilisation de technologies web modernes garantit une accessibilité multiplateforme et une utilisation intuitive.

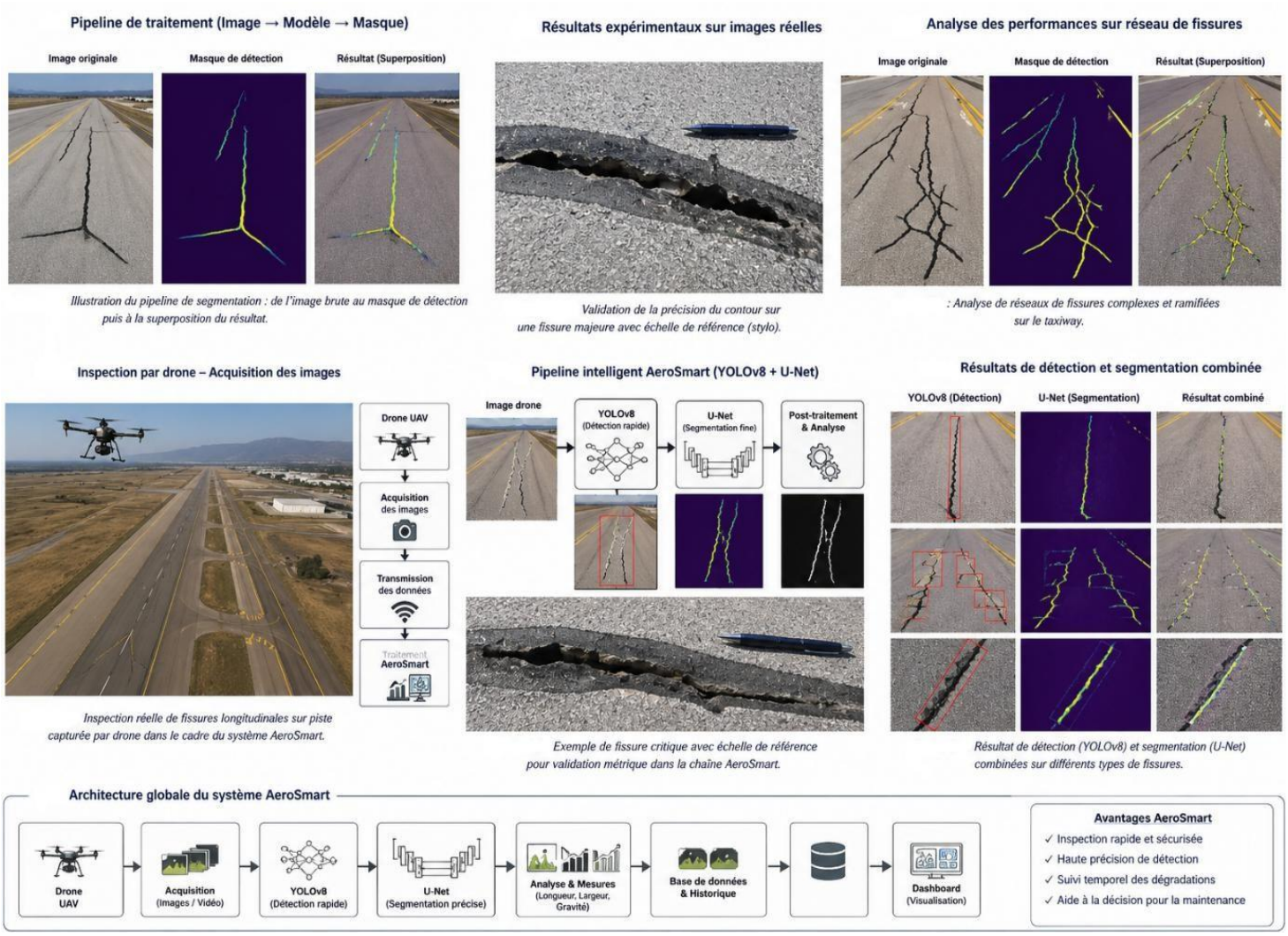
6.10.5. Cas d'application en contexte algérien

L'intérêt du système AeroSmart réside dans sa capacité à s'adapter aux contraintes spécifiques du contexte algérien. Contrairement aux solutions internationales fortement instrumentées, cette approche privilégie une optimisation des ressources disponibles.

Dans ce cadre, plusieurs avantages apparaissent clairement :

- Une réduction significative des coûts d'investissement grâce à l'utilisation d'équipements standards,
- Une absence totale de travaux d'infrastructure, permettant un déploiement immédiat,
- Une adaptation aux conditions climatiques locales grâce à l'entraînement des modèles sur des données spécifiques,
- Une indépendance technologique assurée par le développement local du système et la maîtrise des données.

Cette approche démontre qu'il est possible d'atteindre un niveau de performance élevé sans recourir à des solutions coûteuses et complexes, en privilégiant une intelligence logicielle adaptée au contexte réel.



6.11. Limites et Perspectives

L'analyse critique du système AeroSmart constitue une étape fondamentale pour évaluer son potentiel opérationnel et définir les axes d'évolution vers une solution plus robuste. Si les résultats démontrent une efficacité réelle, plusieurs défis techniques et méthodologiques subsistent.

6.11.1. Limites du modèle actuel

Le système repose sur la vision par ordinateur, ce qui engendre des limites intrinsèques

- **Dépendance environnementale :** La précision chute en cas de faible éclairage, d'ombres marquées ou de basse résolution d'image.

- **Analyse de surface uniquement :** Le modèle ne peut détecter les dégradations structurelles profondes (décohésion, affaissement du sol support) tant qu'elles ne migrent pas en surface.
- **Complexité visuelle :** Les fissures très fines ou discontinues sont parfois confondues avec la texture naturelle des granulats ou les marquages au sol.

6.11.2. Problèmes rencontrés (Données, précision et bruit)

La performance de l'IA est tributaire de la qualité des données d'entrée :

- **Déficit d'annotation :** Le manque de bases de données massives et précisément annotées limite la capacité du modèle à généraliser tous les cas de figure.
- **Hétérogénéité des sources :** Fusionner des données provenant de drones, de caméras fixes et de véhicules introduit des variations de qualité qui compliquent le traitement uniforme.
- **Bruit visuel :** Les salissures sur la piste ou les variations de contraste thermique créent du "bruit" pouvant induire des faux positifs.

6.11.3. Améliorations possibles

Pour renforcer le système, les axes suivants sont prioritaires :

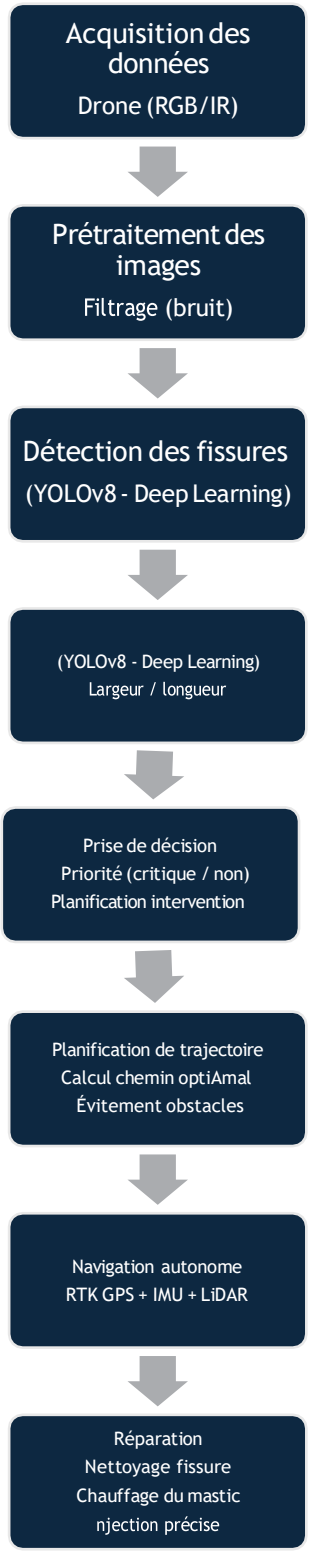
- **Enrichissement du Dataset :** Intégrer des images capturées sous différentes conditions climatiques et saisons.
- **Avancées Algorithmiques :** Passer d'une simple détection à une **segmentation sémantique** pour délimiter précisément l'aire de chaque fissure.
- **Fusion Multimodale :** Croiser l'analyse d'images avec des données de capteurs (température, trafic) pour une vision 360° de la santé de la chaussée.

6.11.4. Perspectives futures

L’avenir du système s’inscrit dans l'automatisation totale :

- **Drones et Robotique :** Utiliser des drones autonomes pour l'inspection de routine et, à terme, des robots capables de colmater les fissures de manière automatisée.

- **IA Prédictive :** Développer des algorithmes d'apprentissage continu capables d'estimer la vitesse de propagation des dégradations.
- **Jumeaux Numériques (Digital Twins) :** Créer une réplique virtuelle dynamique de la piste 12/30 de Tébessa pour simuler son comportement futur et tester des scénarios de maintenance avant leur exécution réelle.



Conclusion générale du chapitre

Ce chapitre démontre que la gestion de la maintenance des chaussées aéronautiques a évolué d'une approche réactive traditionnelle vers une stratégie proactive et prédictive centrée sur la donnée. L'objectif ultime n'est plus seulement la réparation physique de l'asphalte, mais l'atteinte du "Zero Downtime" pour garantir la continuité du trafic aérien. L'analyse souligne que l'intégration de technologies de pointe, telles que l'intelligence artificielle et la vision par ordinateur, permet de transformer des observations de terrain ou des images de drones en indicateurs décisionnels précis. Cela améliore non seulement la qualité des interventions, mais réduit également les coûts exorbitants liés aux réparations d'urgence ou aux fermetures non planifiées. En conclusion, il apparaît que la modernisation des infrastructures, particulièrement pour les aéroports en développement, ne dépend pas de l'accumulation d'équipements coûteux, mais plutôt de l'intelligence logicielle capable d'optimiser les ressources pour garantir une sécurité et une efficacité maximale au moindre coût.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion :

Ce travail de recherche a permis de répondre à l'impératif stratégique de concilier la sécurité aéronautique, la durabilité des infrastructures et l'optimisation budgétaire pour la piste 12/30 de l'aérodrome de Tébessa.

La problématique centrale, liée au vieillissement de la chaussée sous l'effet du trafic croissant et des contraintes climatiques sur un sol de faible portance, a été traitée par une approche proactive visant à transformer la maintenance corrective traditionnelle en une stratégie préventive rigoureuse. Les résultats obtenus via l'utilisation du logiciel SGBA ont mis en lumière une hétérogénéité critique de l'état de la piste, identifiant des zones nécessitant des interventions d'urgence et soulignant l'importance vitale du traitement des 9 km de fissures longitudinales pour protéger la structure contre les infiltrations d'eau.

Cette étude démontre qu'une gestion optimisée, privilégiant le scellement et le pontage, s'avère non seulement dix à quinze fois moins coûteuse qu'une réfection structurelle complète, mais constitue également un levier essentiel pour une gestion aéroportuaire durable en réduisant la consommation de matériaux et en garantissant une disponibilité maximale de l'infrastructure.

À l'avenir, l'intégration de l'intelligence artificielle, notamment par le recours au deep learning pour la détection automatisée des dégradations par drones et le développement de modèles de maintenance prédictive, permettra de franchir une étape décisive vers l'aéroport intelligent. Enfin, la pérennisation de ces outils de diagnostic numérique et l'adaptation aux nouvelles technologies assureront à l'aérodrome de Tébessa une infrastructure résiliente, capable de répondre avec efficience aux défis aéronautiques et environnementaux futurs

Références Bibliographiques :

[1] **OACI.** Annexe 14 – Aérodromes, Volume I : Conception et exploitation technique des aérodromes. Organisation de l'Aviation Civile Internationale, Montréal.

[2] **Rouili, A.** (2025). Etude et conception des aérodromes civils

[3] **FAA.** (2014). AC 150/5380-6C – Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation.

[4] **STAC.** (2010). Maintenance des chaussées aéronautiques : Guide technique. Service Technique de l'Aviation Civile, Direction Générale de l'Aviation Civile, France.

[5] **ASTM International.** (2020). Standard D5340 : Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index (PCI) Surveys. West Conshohocken, PA.

[6] **EGSA-Constantine.** (2009). Dossier technique de réfection et renforcement de la piste 12/30 de l'aérodrome de Tébessa. Établissement de Gestion de Services Aéroportuaires.

[7] **Ashford, N. J., Mumayiz, S. A., & Wright, P. H.** (2011). Airport Engineering: Design, Management and Operation. 4th Edition, John Wiley & Sons.

[8] **Haas, R., Hudson, W. R., & Zaniewski, J.** (1994). Modern Pavement Management. Krieger Publishing Company.

[9] **Ministère des Travaux Publics.** (2003). Manuel de surveillance et d'entretien des chaussées. CTTP, Alger, Algérie.

[10] **OACI.** (1983). Doc 9157-AN/901 : Manuel de conception des aérodromes, Partie 3 : Chaussées. Montréal, Canada.

[11] **Mallick, R. B., & El-Korchi, T.** (2017). Pavement Engineering: Principles and Practice. 3rd Edition, CRC Press.

[12] **Yoder, E. J., & Witczak, M. W.** (1975). Principles of Pavement Design. 2nd Edition, John Wiley & Sons.

[13] **STAC.** (2014). Aide-mémoire sur les dégradations des chaussées aéronautiques. Service Technique de l'Aviation Civile, France.

[14] **Horonjeff, R., McKelvey, F., Sproule, W., & Young, S.** (2010). Planning and Design of Airports. 5th Edition, McGraw-Hill Education.

[15] **LCPC.** (1994). Catalogue des dégradations des chaussées bitumineuses. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

[16] **Aib, O., & Reffis, B.** (2011). Étude de renforcement de l'aérodrome d'Alger avec extension du taxiway de la piste secondaire 09/27.

[17] **Lahouadji, K., & Habbel, A.** (2018). Méthodologie de diagnostic et de renforcement des pistes aéronautiques, exemple Aérodrome de Hassi R'mel.

[18] **Tahlaiti, F. A.** (2022). Recherche sur les pathologies des chaussées aéronautiques.

[19] **Chorfi, H.** (2023). Development of a deliverable BIM model (Building Information Modeling) for the design and management of a civil aerodrome

[20] **Service Technique de l'Aviation Civile (STAC).** Outils, guides techniques et publications sur les infrastructures aéroportuaires. (Websites)

[21] **Federal Aviation Administration (FAA).** Airport Research and Technology (Section R&D sur la sécurité, le design et les logiciels de chaussées comme FAARFIELD) (Websites)