

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université de Blida 1
Faculté des Sciences
Département d'informatique



Mémoire de fin d'études en vue de
l'obtention du diplôme Master en Système
Informatique et Réseaux

Système d'Information Géographique
de prévision et vigilance météorologique
routière

Réalisé par :
RABTA MONCEF
SEMSARI MOHAMED EL MAHDI

Encadré par :
Dr. ZAHRA F.ZAHRA
M^r. KEMACHE MOHAMED
SOFIANE

Membres du jury :

Président : Dr. Chikhi Imane
Examineur : Dr. Toubaline Nesrine

Année universitaire : 2024/2025

Résumé

Ce travail aborde la problématique de l'intégration efficace des données météorologiques dans les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour la planification intelligente des transports, en vue d'améliorer la sécurité et l'efficacité des usagers des routes algériennes, avec la création d'un SIG pour planifier les trajets routiers en considérant deux facteurs clés : la distance et les conditions météorologiques. Le but principal est de proposer aux utilisateurs des chemins qui réduisent à la fois le temps de trajet et les risques associés à des conditions climatiques pénibles, comme les tempêtes de sable ou les fortes pluies. Le système que nous proposons intègre un module pouvant collecter et analyser les informations météorologiques, à la fois pour un système de consultation météorologique et pour son intégration dans un modèle de réseau routier, ces données sont ensuite incorporées de manière dynamique dans le calcul des itinéraires, ainsi qu'alerte les citoyens de l'Algérie en cas de risque élevé. Le mode de fonctionnement développé permet ainsi de suggérer des chemins alternatifs plus sécurisés lorsque les circonstances le demandent, sur la base de méthodes d'optimisation multi-objectifs.

Mots-clés : Système d'Information Géographique (SIG), Optimisation d'itinéraires, Conditions météorologiques, Algorithmes multi-objectifs, Sécurité routière, Planification intelligente, Données géospatiales

Abstract

This work addresses the problem of effectively integrating meteorological data into Geographic Information Systems (GIS) for intelligent transportation planning, aiming to improve the safety and efficiency of Algerian road users. It involves creating a GIS for planning road routes that considers two key factors : distance and weather conditions. The primary objective is to propose paths for users that minimize both travel time and risks associated with harsh weather conditions, such as sandstorms or heavy rainfall. The system we propose integrates a module capable of collecting and analyzing meteorological information, both for a weather consultation system and for its integration into a road network model. This data is then dynamically incorporated into route calculations, as well as alerting Algerian citizens in case of high risk. The developed operating mode thus allows for suggesting safer alternative routes when circumstances require it, based on multi-objective optimization methods.

Key-words : Geographic Information System (GIS), Route optimization, Weather conditions, Multi-objective algorithms, Road safety, Intelligent planning, Geospatial data

الملخص

يتناول هذا العمل مشكلة التكامل الفعال للبيانات الجوية في أنظمة المعلومات الجغرافية (GIS) للتخطيط الذكي للنقل، بهدف تحسين سلامة وكفاءة مستخدمي الطرق الجزائرية، من خلال إنشاء نظام معلومات جغرافية لتخطيط الرحلات البرية مع مراعاة عاملين رئيسيين: المسافة والظروف الجوية. الهدف الأساسي هو اقتراح مسارات للمستخدمين تقلل من وقت الرحلة والمخاطر المرتبطة بالظروف المناخية القاسية، مثل العواصف الرملية أو الأمطار الغزيرة. يتضمن النظام المقترح وحدة قادرة على جمع وتحليل المعلومات الجوية، سواءً لنظام استشارة الطقس أو لدمجها في نموذج شبكة الطرق، ثم يتم دمج هذه البيانات بشكل ديناميكي في حساب المسارات، بالإضافة إلى تنبيه المواطنين الجزائريين في حالة وجود خطر عالي. يسمح نمط التشغيل المطور بالتالي باقتراح مسارات بديلة أكثر أماناً عندما تتطلب الظروف ذلك، بناءً على طرق التحسين متعددة الأهداف.

الكلمات المفتاحية: نظام المعلومات الجغرافية، تحسين المسارات، الأحوال الجوية، خوارزميات متعددة الأهداف، سلامة الطرق، التخطيط الذكي، البيانات الجغرافية المكانية

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers Allah. Nous remercions chaleureusement notre encadreur, M. KAMACHE, pour sa disponibilité constante, ses précieux conseils, sa motivation, son écoute attentive, ses encouragements et son orientation qui nous ont grandement aidés tout au long de ce travail. Nous adressons également nos sincères remerciements à notre promotrice, Mme ZAHRA, pour nous avoir offert l'opportunité d'explorer ce domaine de recherche et pour son soutien dans la recherche de solutions adaptées à nos difficultés.

Nous sommes profondément reconnaissants envers nos chers parents, qui nous ont apporté leur soutien indéfectible durant toutes ces longues années d'études. Nos remerciements s'adressent également à nos frères, sœurs et à toute notre famille.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des matières

I	État de l'art	3
I.1	Systèmes d'information géographique	3
I.1.1	Définition des Systèmes d'information géographique . .	3
I.1.2	Domaine des Systèmes d'information géographique . .	4
I.1.3	Données géospatiales	5
I.1.4	Le SIG dans le domaine de Transport et Logistique . .	6
I.2	Les Système d'Alerte	7
I.2.1	Définition d'un Système d'Alerte	7
I.2.2	Système d'Alerte dans le cadre d'un SIG	7
I.2.3	Classification des Système d'Alerte	8
I.2.4	Utilisation des système d'alerte	9
I.3	La Planification	10
I.3.1	Introduction à la Planification	10
I.3.2	Planification pour le transport et logistique	10
I.3.3	Planification de chemin	11
I.4	L'optimisation	11
I.4.1	L'optimisation Mono-Objectif	12
I.4.2	Les Méta-heuristiques	14
I.4.3	Optimisation Multi-Objectif	18
I.4.4	Multi-Objectif par Essaims de Particules (MOPSO) . .	20
I.4.5	Multi-Objectif par algorithme du recuit simulé (MOSA)	20
II	Conception de notre Système	22
II.1	Analyse des besoins	22
II.1.1	Les acteurs du système	22
II.1.2	Fonctionnalité proposer pour les acteurs	24
II.2	L'optimisation multi-objectif pour la planification des trajet avec contraintes météorologique	27
II.2.1	Modélisation mathématique	27
II.2.2	Modélisation algorithmique	28

III Impelementation de notre Système	34
III.1 Outils et environnement de développement	34
III.1.1 Framework Backend et Language	34
III.1.2 Gestion des bases de données	35
III.1.3 Analyse géospatiale	35
III.1.4 Outils supplémentaires	37
III.2 Préparation des données	37
III.2.1 Les couches des wilayas/communes	38
III.2.2 Couche point de prévision météo	39
III.2.3 Procédure d'importation	41
III.3 Phase de test	42
III.3.1 Validation des algorithmes d'optimisation	42
III.3.2 Paramètre initial	42
III.3.3 Premier test	43
III.3.4 Deuxième test	44
III.3.5 Conclusion des tests	44
III.4 Déploiement	44
III.4.1 Présentation des interfaces principales	44
IV Conclusion générale	49
Bibliographie	50

Table des figures

I.1	Figure représentant un système d'information géographique .	4
I.2	données géospatiales	6
I.3	Classification des méthodes d'optimisation.	12
I.4	principe de population (a) et de parcours (b)	15
I.5	Déplacement d'une particule avec algorithme PSO.	17
II.1	diagramme use case du système	23
II.2	diagramme de classe du système	24
II.3	diagramme d'activité de la fonctionnalités (consulter météo) .	25
II.4	diagramme d'activité de la fonctionnalités (planifier trajet) .	26
II.5	Formatage des données météo	29
III.1	Les couches wilaya/commune utiliser	39
III.2	Couche point de prévision météo	40
III.3	Connexion de base de données à QGIS	42
III.4	Page d'accueil	45
III.5	L'interface de consultation météo/vigilance	46
III.6	Interface de planification de trajets	47
III.7	Interface d'administration	47

Introduction générale

Objectif et motivation

Dans un monde où la mobilité est devenue essentielle, l'optimisation des déplacements représente un enjeu majeur tant sur le plan économique qu'environnemental et sécuritaire. Les systèmes de navigation traditionnels se limitent généralement à l'optimisation des itinéraires selon des critères de distance ou de temps de parcours, négligeant souvent un facteur déterminant pour la sécurité et l'efficacité des déplacements : les conditions météorologiques. Les conditions météorologiques extrêmes comme les tempêtes de sable, les inondations, le verglas ou les grandes précipitations de neige peuvent transformer une ordinaire randonnée en aventure mortelle ou impossible. Malgré le grand nombre de données météorologiques dont nous disposons, peu d'alternatives de systèmes d'information géographique (SIG) intègrent ces informations efficacement dans les algorithmes de calcul d'itinéraires optimisés.

Dans le but de combler cette lacune, nous avons collaboré avec l'office national de météorologie qui est l'unique intervenant pour la mise en œuvre de la politique nationale et internationale en matière de météorologie. Il est implanté à travers toute l'Algérie. Son organisation comporte des directions centrales et régionales. Il exploite un réseau d'observations composé de 80 stations d'observation en surface qui constituent le réseau national d'observation météorologique professionnel. Ils ont accepté de nous fournir des données de prévisions et de vigilance réelles, le tout pour développer un système d'information géographique intelligent capable de planifier des itinéraires optimaux en fonction de deux facteurs principaux : la distance et les conditions météorologiques. L'objectif est double : minimiser le temps de parcours tout en réduisant les risques liés aux aléas météorologiques. Nos travaux sont axés sur la problématique suivante : comment définir un système d'alerte et d'optimisation d'itinéraire qui soit apte à intégrer dynamiquement les informations météorologiques aux calculs de trajets pour offrir des parcours qui sont à la fois rapides et sûrs.

Plan du mémoire

Ce travail se décompose en quatre parties complémentaires, chacune contribuant à apporter des éléments de réponse à la problématique posée.

Dans un premier temps, nous établissons les fondements théoriques nécessaires à notre étude. Cette partie explique le fonctionnement des Systèmes d'Information Géographique et leur utilité dans la vie quotidienne, tout en soulignant l'importance cruciale de la planification et de l'optimisation.

Le deuxième chapitre expose la partie conceptuelle de notre solution, où nous avons modélisé la réponse à notre problématique et défini les différents acteurs ainsi que les fonctionnalités de notre système.

La troisième partie présente concrètement notre prototype d'optimisation multi-objectif destiné à réduire les dangers liés aux conditions météorologiques. Cette démonstration s'appuie sur des données réelles fournies par l'Office National de la Météorologie (ONM), notre organisme d'accueil, ce qui confère une dimension pratique et fiable à nos résultats.

Pour conclure, nous faisons le bilan des contributions de ce travail et évoquons les pistes d'amélioration envisageables pour les développements futurs.

Chapitre I

État de l'art

Introduction

Ce chapitre explore les fondements des SIG actuels dédiés à la planification d'itinéraires, les défis liés à l'intégration des données météorologiques, et les approches innovantes permettant d'optimiser les trajets selon ces deux critères essentiels.

I.1 Systèmes d'information géographique

I.1.1 Définition des Systèmes d'information géographique

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont des systèmes informatiques qui effectuent des visualisations associées de données géospatiales, autrement dit, les données inscrites dans l'espace. [1] En outre de la création de visualisations, le SIG est capable de capter, stocker, analyser et gérer des données géospatiales.[2]

L'objectif principal des Systèmes d'Information Géographique (SIG) est de permettre l'analyse et la visualisation des données géospatiales pour faciliter la prise de décision. Plus spécifiquement, les SIG visent à :

1. Analyser les relations spatiales entre différents types de données géographiques
2. Permettre l'identification de modèles, de tendances et de corrélations qui pourraient être difficiles à repérer autrement
3. Aider les organisations à comprendre les phénomènes liés à la localisation

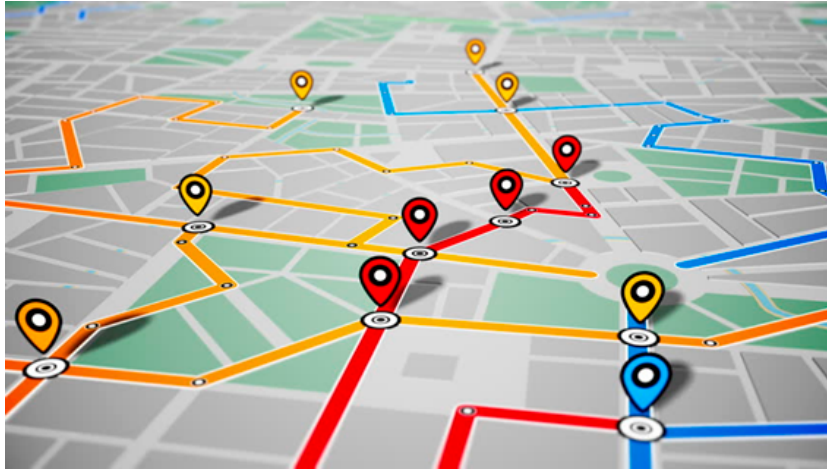


FIG. I.1 : Figure représentant un système d'information géographique

4. Servir de système de gestion d'informations pour toutes les données comportant une composante géographique

La figure I.1 est une illustration qui représente un système d'information géographique.

I.1.2 Domaine des Systèmes d'information géographique

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont largement utilisés dans de nombreux domaines, chacun exploitant ces outils selon ses besoins spécifiques [3] :

- **Urbanisme et aménagement** : planification urbaine, zonage, gestion cadastrale.
- **Environnement** : suivi des écosystèmes, gestion forestière, études d'impact.
- **Risques naturels** : prévention des inondations, incendies, glissements de terrain.
- **Agriculture** : agriculture de précision, gestion des cultures, optimisation des rendements.
- **Transports et logistique** : optimisation d'itinéraires, gestion de flottes, navigation.
- **Santé publique** : épidémiologie spatiale, accès aux soins, cartographie des maladies.

- **Services et réseaux** : gestion des infrastructures d'eau, d'énergie, de télécommunications.
- **Défense et sécurité** : surveillance du territoire, cartographie stratégique, urgences.
- **Commerce et marketing** : géomarketing, implantation de points de vente, analyse de marché.
- **Patrimoine et archéologie** : cartographie des sites, préservation du patrimoine.
- **Sciences marines** : cartographie des fonds, gestion des zones côtières.
- **Télédétection** : suivi des sols, changements environnementaux, climat.
- **Tourisme** : valorisation des sites, cartographie des sentiers, gestion touristique.
- **Services d'urgence** : coordination des secours, évacuations.
- **Immobilier** : évaluation foncière, analyse du marché, développement de projets.

Chaque secteur applique les SIG avec des données et des méthodes adaptées à ses problématiques.[3]

I.1.3 Données géospatiales

Les données géospatiales sont des informations qui incluent une composante géographique ou spatiale. Elles représentent des objets, des événements ou des phénomènes qui possèdent une position spécifique sur la surface terrestre.[2] Elles servent de fondement aux SIG, leur permettant d'analyser les relations spatiales et de générer des visualisations qui facilitent la compréhension des phénomènes liés à l'espace et au territoire.

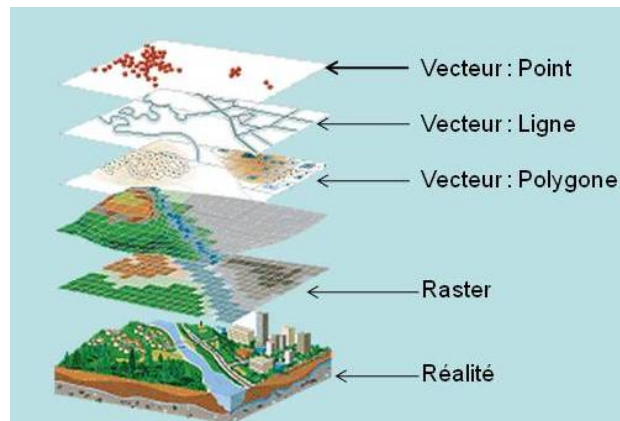


FIG. I.2 : données géospatiales

La figure I.2 nous montre les différents types de données géospatiales [4]. Ces données peuvent être catégorisées en trois types principaux :

- Données vectorielles : Représentent des éléments distincts sous forme de points, lignes et polygones. Par exemple, un point pourrait représenter une adresse, une ligne une route, et un polygone une parcelle de terrain.
- Données matricielles (raster) : Se présentent comme des grilles de cellules ou de pixels contenant des valeurs. Les exemples incluent les images satellite, les photographies aériennes et les modèles numériques d'élévation.
- Données tabulaires : Informations alphanumériques liées à des emplacements géographiques spécifiques, comme des statistiques démographiques associées à des régions.

I.1.4 Le SIG dans le domaine de Transport et Logistique

Le système d'information géographique est un outil précieux pour les entreprises de logistique. Il permet notamment de planifier des itinéraires de livraison de marchandises et aide à la navigation. Le SIG exploite des données géographiques et spatiales, comme les itinéraires possibles ou encore les conditions météo. En croisant ces informations, il peut :

- Déterminer les itinéraires les plus adaptés en tenant compte de la distance, et des contraintes spécifiques.

- Offrir des indications précises aux conducteurs pour éviter les erreurs et les retards.
- En analysant les données géographiques, le SIG aide à améliorer la sécurité des trajets tout en rendant les opérations plus fluides, ce qui se traduit par des économies et une meilleure satisfaction client.

I.2 Les Système d’Alerte

I.2.1 Définition d’un Système d’Alerte

Un système d’alerte est un dispositif conçu pour détecter, surveiller et prévenir rapidement un danger ou un risque imminent, afin de permettre aux personnes concernées de prendre des mesures pour se protéger. Il s’appuie sur la collecte et l’analyse de données, la diffusion rapide d’informations claires et la préparation des populations ou des acteurs concernés à réagir efficacement. Ces outils sont cruciaux pour renforcer la résilience et sauver des vies.[5]

I.2.2 Système d’Alerte dans le cadre d’un SIG

Dans le cadre d’un système d’information géographique (SIG), un système d’alerte peut être utilisé pour :

- Surveiller en temps réel les événements géographiques ou environnementaux (inondations, feux de brousse, accidents industriels, etc.) en utilisant l’intégration des données spatiales et de capteurs
- Analyser les risques et prévoir les zones potentiellement affectées en croisant les données géographiques avec des modèles de prévision.
- Diffuser rapidement des alertes ciblés à la population ou aux unités sur le terrain en utilisant automatiquement des cartes interactives, des alertes mobiles ou des écrans d’informations.
- Contribuer à la prise de décision et à la coordination des interventions en proposant une représentation claire et actualisée des zones à risque et des ressources disponibles.

Par conséquent, un système d’alerte intégré dans un SIG facilite l’amélioration de la gestion des risques grâce à une surveillance plus précise, à une communication plus rapide et à une meilleure préparation face aux situations d’urgence.

I.2.3 Classification des Système d'Alerte

Les systèmes d'alerte peuvent être classés de différentes manières en fonction de divers critères [6] :

A. Niveau d'échelle géographique

- **Locaux** : Gérés par des municipalités ou des communautés, ces systèmes se concentrent sur des risques spécifiques à une zone géographique restreinte.
- **Régionaux** : Ces systèmes couvrent des zones plus larges et sont souvent gérés par des agences régionales ou des organisations intergouvernementales.
- **Nationaux** : Administrés par des gouvernements nationaux, ils donnent l'alerte sur une variété de risques au niveau national.
- **Internationaux** : Gérés par des organisations mondiales, ces systèmes coordonnent les alertes à l'échelle internationale pour des crises transfrontalières.

B. Nature du risque

- **Catastrophes naturelles** : Systèmes spécialisés dans la détection et la gestion des événements naturels comme les tremblements de terre, les inondations, les ouragans, etc.
- **Risques technologiques** : il s'agit des dangers associés aux activités industrielles, incluant notamment les accidents majeurs, les fuites de substances dangereuses, ainsi que les défaillances d'infrastructures techniques ou technologiques.
- **Santé publique** : Systèmes d'alerte pour suivre et répondre aux épidémies, pandémies ou crises sanitaires.
- **Sécurité** : Alertes concernant les menaces à la sécurité publique, comme le terrorisme ou la criminalité.

C. Mode de communication

- **Systèmes automatisés** : Utilisent des technologies pour envoyer des alertes sans intervention humaine.
- **Systèmes manuels** : Reposent sur l'intervention humaine pour transmettre les alertes, elles sont fréquemment utilisées dans des situations nécessitant une communication directe ou en cas d'interruption des réseaux de télécommunication.

- **Systèmes multimédias** : Combinent plusieurs canaux de communication (téléphone, radio, SMS, réseaux sociaux) pour atteindre un public plus large.

D. Fonction

- **Surveillance et détection** : Systèmes qui surveillent en temps réel et détectent les événements à risque.
- **Prévision et modélisation** : Systèmes qui analysent des données pour prévoir des événements futurs et évaluer leur impact potentiel.
- **Diffusion d’alertes** : Systèmes qui se concentrent sur la communication rapide et efficace des alertes au public ou aux autorités concernées.

Ces classifications aident à comprendre les différents rôles que jouent les systèmes d’alerte dans la gestion des risques. En fonction du contexte et des besoins spécifiques, un système d’alerte peut appartenir à plusieurs catégories en même temps. Dans le cadre du transport et de la logistique, un système d’information géographique (SIG) peut être classé principalement comme un système d’alerte précoce et un système de gestion des risques.

I.2.4 Utilisation des système d’alerte

Système d’alerte précoce

Le SIG fonctionne comme un système d’alerte précoce en surveillant les conditions météorologiques. Il permet aux utilisateurs d’être informés rapidement des conditions défavorables, telles que les tempêtes ou les inondations.[5] En cas de catastrophe naturelle ou d’événement imprévu, le SIG peut également fournir des alertes sur les zones affectées.[7]

Gestion des urgences

En tant que système de gestion des risques, le SIG permet d’analyser les données géographiques pour identifier les zones à risque élevé. Cela est essentiel pour la planification logistique, car cela aide à éviter les itinéraires dangereux et à garantir la sécurité des opérations. De plus, en tenant compte des conditions météorologiques, le SIG aide à optimiser les itinéraires de livraison, réduisant ainsi les coûts et améliorant la fiabilité du service.[8]

Outil de Planification et de Décision

Le SIG est un outil précieux pour la planification stratégique car il facilite la prise de décisions . En intégrant le SIG avec d'autres technologies, comme les jumeaux numériques, il est possible d'améliorer la visualisation et la gestion des infrastructures de transport, contribuant ainsi à une meilleure préparation face aux conditions changeantes.[9]

I.3 La Planification

I.3.1 Introduction à la Planification

La planification se présente souvent sous forme de documents ou de systèmes intégrés qui détaillent les itinéraires, les calendriers, les ressources nécessaires, les contraintes et les objectifs à atteindre.[10] [11] Elle inclut aussi l'analyse des besoins du marché, la prévision des volumes à transporter, la sélection des moyens de transport, et l'optimisation des routes et des chargements pour réduire les coûts, les délais et l'impact environnemental.[12]

I.3.2 Planification pour le transport et logistique

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans le domaine du transport et de la logistique sont très étroits. Le SIG est un outil clé qui permet de visualiser, analyser et gérer les données spatiales relatives aux infrastructures de transport, aux réseaux routiers et aux ressources disponibles.[9] Grâce à la cartographie et à l'analyse géospatiale, le SIG aide à :

- Concevoir des itinéraires optimisés en tenant compte des distances, des conditions météorologiques, et des contraintes spécifiques.
- Surveiller les flux de transport et l'état des infrastructures pour ajuster la planification en fonction des événements.
- Améliorer la sécurité en identifiant les zones à risque.

Le Système d'Information Géographique (SIG) améliore la planification des transports en offrant une vision claire, précise et dynamique des réseaux routiers, des conditions de circulation, des ressources disponibles et des contraintes environnementales.

I.3.3 Planification de chemin

La planification de chemins avec l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans le domaine des transports et de la logistique est une approche très performante et stratégique qui révolutionne la manière dont les itinéraires et les opérations sont conçus, gérés et optimisés.[13]

La planification de chemin avec l'utilisation des SIG dans le domaine des transports et de la logistique est une méthode avancée qui apporte une grande valeur ajoutée. Elle améliore l'efficacité opérationnelle, réduit les coûts, augmente la satisfaction client, et permet une gestion plus durable et sécurisée des réseaux de transport. L'intégration des SIG avec d'autres technologies innovantes renforce encore ces bénéfices, faisant des SIG un outil incontournable pour les professionnels du transport et de la logistique modernes.[14]

I.4 L'optimisation

Après avoir vu et défini les concepts de base des SIG et de la planification, passons à présent à la phase d'optimisation . En informatique, l'optimisation consiste à améliorer l'efficacité des programmes en réduisant leur temps d'exécution, leur consommation de ressources et leur impact environnemental. C'est une pratique essentielle qui vise à garantir le bon fonctionnement des systèmes informatiques et, quand on parle d'optimisation, cela nous amène souvent à parler de fonction coût, ou plus connue sous le nom de "fonction objectif", qui a pour but de minimiser ou maximiser une formule mathématique qui est en relation avec notre problème de base.[15]

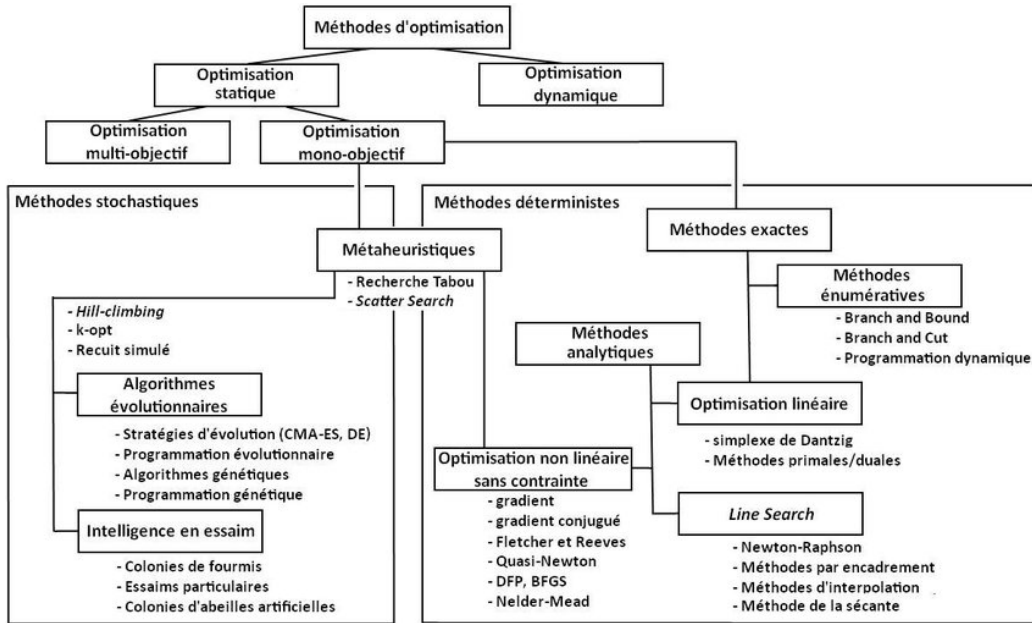


FIG. I.3 : Classification des méthodes d'optimisation.

La figure I.3 représente la classification des méthodes d'optimisation [16].

I.4.1 L'optimisation Mono-Objectif

L'optimisation mono-objectif, comme son nom l'indique, consiste à traiter les problèmes qui visent à optimiser un seul et unique objectif et on peut distinguer deux familles d'optimisation qui sont les suivantes [15] :

Optimisation sans contraintes

L'optimisation sans contraintes consiste à minimiser ou maximiser une fonction $f(x)$ où x est un vecteur de variables dans un espace R^n sans aucune restriction sur ces variables. L'objectif est de trouver un point x^* où $f(x^*)$ représente le minimum ou le maximum global de la fonction.[17]

Cette approche se caractérise par sa relative simplicité conceptuelle, puisque la recherche de l'optimum s'effectue librement dans tout l'espace des solutions possibles. Dans un contexte géométrique, on peut visualiser cette recherche comme la quête du point le plus bas (ou le plus élevé) d'une surface multidimensionnelle.[18] Les méthodes de résolution classiques incluent les techniques de descente de gradient, où l'on progresse itérativement dans la direction opposée au gradient de la fonction pour minimiser sa valeur. D'autres approches comme la méthode de Newton ou les méthodes quasi-newtoniennes

exploitent des informations supplémentaires sur la courbure de la fonction pour accélérer la convergence vers l'optimum.[19] Dans le domaine informatique, l'optimisation sans contrainte trouve de nombreuses applications :

- L'entraînement de modèles d'apprentissage automatique
- L'ajustement de paramètres dans des simulations
- L'optimisation de fonctions de coût en traitement du signal et des images
- La recherche de conformations stables en modélisation moléculaire

Pour notre problématique de planification d'itinéraires, l'optimisation sans contraintes pourrait s'appliquer à une première phase d'exploration des solutions où l'on rechercherait simplement le chemin le plus court sans tenir compte des restrictions liées aux conditions météorologiques ou à d'autres facteurs limitants. En résumé, l'optimisation sans contrainte consiste à chercher la meilleure valeur d'une fonction sur tout l'espace possible, sans restrictions imposées aux variables.[20]

Optimisation sous contraintes

L'optimisation sous contraintes, quant à elle, introduit une dimension supplémentaire de complexité en imposant que les variables de décision respectent certaines conditions restrictives. Ces contraintes peuvent prendre la forme d'égalités ou d'inégalités mathématiques qui délimitent l'espace des solutions admissibles.[21] Formellement, un problème d'optimisation sous contraintes peut s'exprimer comme la minimisation ou maximisation d'une fonction $f(x)$ soumise à un ensemble de contraintes :

- **Contraintes d'inégalité** : $g_i(x) \leq 0$ pour $i = 1, 2, \dots, m$
- **Contraintes d'égalité** : $h_j(x) = 0$ pour $j = 1, 2, \dots, p$

Cette formulation reflète la réalité de nombreuses situations pratiques où les solutions doivent satisfaire des exigences spécifiques. Dans notre contexte de planification d'itinéraires, ces contraintes pourraient représenter :

- Des limitations de temps (durée maximale du trajet)
- Des zones géographiques à éviter absolument (routes fermées, zones inondées)

- Des niveaux de risque météorologique maximaux tolérables
- Des contraintes d'accessibilité (restrictions de certains véhicules)

Les méthodes de résolution des problèmes sous contraintes sont plus sophistiquées que celles de l'optimisation libre. Elles incluent :

1. **La méthode des multiplicateurs de Lagrange :** Elle transforme le problème contraint en introduisant des variables supplémentaires (multiplicateurs) qui permettent d'incorporer les contraintes dans une fonction étendue appelée lagrangien.[22]
2. **Les méthodes de pénalité :** Elles modifient la fonction objectif en y ajoutant des termes qui pénalisent fortement les solutions violant les contraintes.[23]
3. **La programmation linéaire ou quadratique :** Ces techniques spécialisées s'appliquent lorsque la fonction objectif et/ou les contraintes présentent une forme particulière (linéaire ou quadratique).[21]

L'optimisation sous contraintes est cruciale dans de nombreux domaines d'application :

- La gestion des ressources limitées (allocation de mémoire, distribution d'énergie)
- La conception technique soumise à des contraintes physiques
- La planification logistique avec contraintes temporelles et spatiales
- La gestion financière soumise à des contraintes réglementaires

I.4.2 Les Méta-heuristiques

Les méta-heuristiques sont des techniques algorithmiques utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes, en particulier lorsque les méthodes classiques (comme la programmation linéaire ou les méthodes de gradient) sont inefficaces ou inapplicables.[24] Ces dernières sont des algorithmes inspirés de la nature, souvent issus de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle. Ces problèmes sont difficiles à résoudre avec des méthodes classiques, et les méta-heuristiques offrent une approche flexible et générique pour explorer efficacement l'espace de recherche et trouver des solutions proches de l'optimum global.[25]

Les méta-heuristiques sont généralement stochastiques et itératives, ce qui signifie qu'elles utilisent des éléments aléatoires pour explorer l'espace de recherche et améliorer progressivement les solutions trouvées. Elles ne garantissent pas toujours l'optimalité, mais elles sont conçues pour fournir des solutions de bonne qualité dans un laps de temps raisonnable.

Les méta-heuristiques peuvent être classées en plusieurs catégories et cela se fait en fonction de leur approche :

(A) Méta-heuristiques Perturbatives et Constructives

- **Perturbatives** : modifient une solution existante pour en trouver une meilleure. Elles incluent des techniques comme le recuit simulé ou la recherche avec tabous.
- **Constructives** : construisent une solution étape par étape, souvent en utilisant des heuristiques pour guider la construction.

(B) Parcours et Population

- **Parcours** : manipulent une seule solution à la fois, en explorant son voisinage pour améliorer la solution. Les exemples incluent le recuit simulé et la recherche à voisinage variable.
- **Population** : Ces méthodes manipulent un ensemble de solutions simultanément. Les exemples incluent les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaims particulaires.

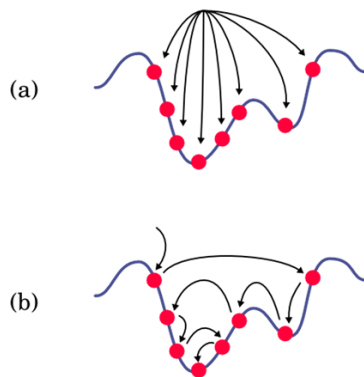


FIG. I.4 : principe de population (a) et de parcours (b)

La figure I.4 montre le principe de parcours et de population [26].

(C) Emploi de Mémoire

- Les méta-heuristiques peuvent utiliser une mémoire pour guider la recherche. Cela peut inclure la mémorisation des solutions visitées récemment ou l'apprentissage à long terme des caractéristiques du problème.

Les méta-heuristiques sont des alliées indispensables pour l'optimisation moderne, offrant des solutions pragmatiques là où les mathématiques traditionnelles montrent leurs limites. Elles incarnent un compromis intelligent entre précision et efficacité pratique. Dans le domaine du transport et de la logistique, cette approche permet la planification optimale des circuits de distribution, réduisant ainsi les coûts opérationnels tout en maximisant l'efficacité des livraisons. Parmi les méta-heuristiques les plus populaires, on peut citer :

Recuit Simulé (Simulated Annealing)

Le recuit simulé (Simulated Annealing, SA) est une méta-heuristique probabiliste utilisée pour l'optimisation globale dans des espaces de recherche complexes et de grande taille, introduite par Kirkpatrick, Gelatt et Vecchi en 1983.[27] Il s'inspire du processus physique de recuit en métallurgie, où un matériau est chauffé puis refroidi lentement afin d'obtenir une structure plus stable et moins énergétique. Par analogie, l'algorithme explore l'espace des solutions en acceptant parfois des solutions moins bonnes pour échapper aux minima locaux et tendre vers un optimum global.[28]

Son fonctionnement repose sur ces principes :

- **Initialisation** : On commence par une solution initiale et une température élevée. Cette solution peut être choisie aléatoirement ou selon une heuristique adaptée au problème.
- **Génération de voisinage** : À chaque itération, une nouvelle solution voisine est générée en modifiant légèrement la solution courante.
- **Critère d'acceptation** : Si la nouvelle solution est meilleure, elle est acceptée. Si elle est moins bonne, elle peut tout de même être acceptée avec une probabilité qui dépend de la différence de qualité (énergie) et de la température actuelle. Cette probabilité décroît au fur et à mesure que la température diminue, permettant à l'algorithme d'explorer largement au début, puis de se concentrer sur les zones prometteuses ensuite.[29]
- **Refroidissement** : La température est progressivement réduite selon un schéma de refroidissement (exponentiel, linéaire, etc.), rendant

l'acceptation de solutions moins bonnes de plus en plus rare au fil du temps.[30]

- **Arrêt** : Le processus s'arrête lorsque la température atteint un seuil minimal ou qu'un nombre maximal d'itérations est atteint.

Le recuit simulé est une méthode d'optimisation robuste et polyvalente, particulièrement efficace pour les problèmes où l'espace de recherche est vaste et complexe, et où il existe de nombreux minima locaux. Sa capacité à échapper aux pièges des solutions locales et sa simplicité de mise en œuvre en font un outil incontournable en optimisation avancée.[31]

Optimisation par Essaims de Particules (PSO)

L'optimisation par essaims de particules est une technique d'optimisation inspirée par le comportement collectif des bancs de poissons ou des troupeaux d'oiseaux. Cette méthode a été développée par James Kennedy et Russell Eberhart dans les années 1990.[32] Elle simule le mouvement des particules dans un espace multidimensionnel pour trouver des solutions optimales à des problèmes d'optimisation. Chaque particule représente une solution potentielle, et les particules se déplacent dans l'espace de recherche en fonction de leur vitesse et de leur position, qui déterminent leur trajectoire dans l'espace de recherche.[33]

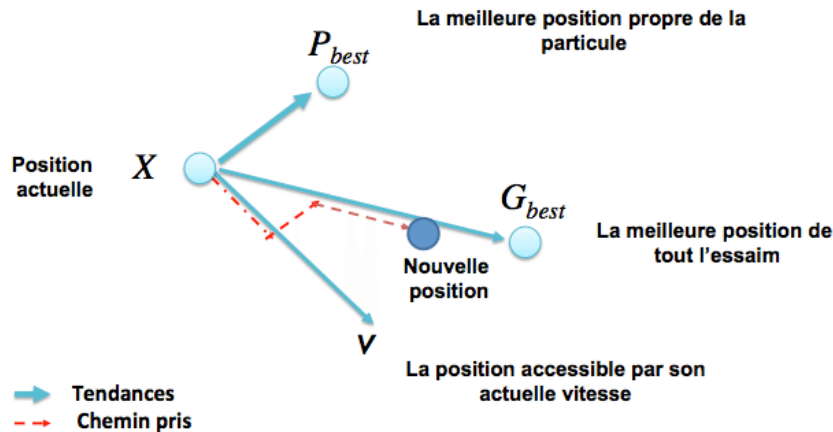


FIG. I.5 : Déplacement d'une particule avec algorithme PSO.

La Figure I.5 montre le déplacement d'une particule avec l'algorithme PSO [34]. Le mouvement des particules est influencé par trois composantes principales :

1. **Composante Inertielle** : La particule tend à maintenir sa vitesse actuelle, ce qui lui permet de poursuivre sa trajectoire actuelle.
2. **Composante Cognitive** : La particule est attirée par sa meilleure position personnelle trouvée jusqu'à présent, ce qui l'incite à revenir vers des zones prometteuses.
3. **Composante Sociale** : La particule est également attirée par la meilleure position trouvée par l'ensemble des particules de l'essaim, ce qui favorise la convergence vers des solutions globales optimales.

Les mises à jour de la position et de la vitesse des particules sont réalisées à l'aide d'équations mathématiques se présentant sous la forme :[34]

Pour la vitesse :

$$v_i^{(t+1)} = \omega \cdot v_i^t + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{(best,i)} - x_i^t) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{best} - x_i^t)$$

Pour la position :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$

Le PSO est particulièrement adapté pour résoudre des problèmes d'optimisation non linéaires et multivariables. Il est souvent utilisé dans des domaines tels que l'optimisation de fonctions, la planification de trajectoires et d'itinéraires, et l'optimisation de systèmes complexes.[35] L'optimisation par essaims de particules est une méthode puissante pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes en simulant le comportement collectif des essaims. Bien qu'elle présente des avantages en termes de simplicité et de robustesse, elle nécessite une calibration soigneuse des paramètres pour éviter la convergence précoce et obtenir des résultats optimaux.

I.4.3 Optimisation Multi-Objectif

"Lorsque plusieurs objectifs sont à optimiser conjointement, nous nous trouvons alors face à un problème d'optimisation multi-objectif." [36] Contrairement à l'optimisation mono-objectif où une solution optimale unique est recherchée, ici il n'existe généralement pas de solution unique qui optimise tous les objectifs à la fois. On cherche alors un ensemble de solutions dites Pareto-optimales ou non dominées, formant un front de Pareto, où aucune amélioration d'un objectif ne peut être obtenue sans détériorer un autre. La notion d'optimalité est donc plus complexe et nécessite des critères comme la non-dominance ou l'optimalité lexicographique. La résolution passe souvent par des méthodes spécifiques (scalarisation, algorithmes évolutionnaires, etc.).[37]

Formule d'optimisation multi-objectif

D'un point de vue formel, le problème d'optimisation multi-objectifs dans sa forme la plus générale, peut être formulé de la manière suivante :[38]

$$\min_x F = [F_1(x), F_2(x), F_3(x), \dots, F_k(x)]^T$$

Sujet aux contraintes :

$$\begin{aligned} g_j(x) &\leq 0, j = 1, 2, 3, \dots, m \\ h_l(x) &= 0, l = 1, 2, 3, \dots, e \\ a_i &\leq x_i \leq b_i \end{aligned}$$

Avec k est le nombre de fonctions à optimiser, m est le nombre de contraintes d'inégalité et e est le nombre de contraintes d'égalité.

Pareto-optimale

Une solution est dite Pareto-optimale (ou optimale au sens de Pareto) si aucune autre solution dans l'espace des solutions admissibles ne la domine, c'est-à-dire qu'il n'existe pas une autre solution meilleure ou égale sur tous les objectifs et strictement meilleure sur au moins un objectif. Autrement dit, on ne peut pas améliorer un critère sans dégrader au moins un autre.[39]

Non dominées

Les solutions non dominées sont donc ces solutions Pareto-optimales qui ne sont surpassées par aucune autre solution selon cette relation de dominance. Elles représentent les meilleurs compromis possibles entre les différents objectifs.[40]

Front de Pareto

Le front de Pareto est l'ensemble des images (dans l'espace des objectifs) de toutes ces solutions non dominées. C'est une surface ou un ensemble de points qui représente la frontière des compromis optimaux : toute solution sur ce front est efficace, et toute solution en dehors est dominée par au moins une solution du front. Par exemple, dans un problème à deux objectifs, le front de Pareto peut être visualisé comme une courbe où chaque point correspond à un compromis différent entre les deux objectifs.[41]

I.4.4 Multi-Objectif par Essaims de Particules (MOPSO)

L'optimisation multi-objectifs par essaim de particules est une extension du PSO présentée auparavant et qui est une méthode puissante, flexible et intuitive qui s'appuie sur la coopération et la compétition entre particules pour explorer efficacement des espaces de solutions complexes. Ses extensions modernes, telles que l'intégration du tri non dominé et des mécanismes de diversité, permettent d'obtenir des ensembles de solutions de haute qualité pour des problèmes multi-objectifs réels.[34]

Le MOPSO conserve l'idée fondamentale du PSO : une population de particules (solutions candidates) se déplace dans l'espace de recherche en s'inspirant de leur propre expérience et de celle des autres. Cependant, dans un contexte multi-objectifs, il n'existe pas de solution unique idéale, mais un ensemble de solutions non dominées. Chaque particule est évaluée en fonction de plusieurs fonctions objectives, et la notion de domination de Pareto est utilisée pour comparer les solutions.

I.4.5 Multi-Objectif par algorithme du recuit simulé (MOSA)

MOSA est une extension multi-objectif de l'algorithme de recuit simulé (Simulated Annealing, SA) proposé par Nam et Park en 2000. Le recuit simulé proprement dit est une méta-heuristique fondée sur un processus inspiré du refroidissement lent des métaux, dans lequel une solution évolue en acceptant parfois des solutions de moindre qualité pour échapper aux minima locaux, avec une probabilité chimérique diminuant avec le temps (température).[42] MOSA décale ce concept pour planifier différents objectifs en parallèle, souvent en conflit entre eux, dans l'objectif de produire un ensemble de solutions de compromis (front de Pareto) au lieu d'une seule solution optimale.

Mécanisme fondamental

L'algorithme MOSA procède par exploration progressive de l'espace des solutions, débutant avec une configuration initiale pour ensuite examiner des alternatives dans son voisinage. Le processus d'acceptation d'une nouvelle solution repose sur une évaluation probabiliste qui intègre à la fois le paramètre de température et l'évaluation multi-critère de la qualité des solutions proposées.

Traitement des objectifs multiples

La comparaison entre solutions s'appuie sur les relations de dominance caractéristiques de l'optimisation multi-objective. L'acceptation d'une solution candidate intervient soit lorsqu'elle contribue à enrichir le front de Pareto, soit selon une probabilité calculée qui préserve la diversité de l'exploration et prévient l'enlisement dans des optimums locaux.

Température et refroidissement

Conformément aux principes du recuit simulé classique, le paramètre de température suit un schéma de décroissance graduelle. Cette diminution progressive réduit la propension à accepter des solutions de moindre qualité, orientant ainsi l'algorithme vers sa phase de convergence.

Conservation des solutions d'élite

Le système maintient une collection dynamique regroupant l'ensemble des solutions non dominées identifiées au cours de l'exploration. Cette archive constitue l'approximation courante du front de Pareto optimal et évolue continuellement avec la découverte de nouvelles solutions performantes.

Avantages de MOSA

- MOSA est une méthode basée sur une seule solution à la fois, contrairement à d'autres méta-heuristiques populationnelles (comme MOPSO ou NSGA-II) qui manipulent un ensemble de solutions simultanément.
- Elle est particulièrement adaptée aux problèmes où l'espace de recherche est très vaste ou complexe, car elle peut explorer efficacement sans nécessiter une population importante.
- MOSA peut être combinée avec d'autres techniques, comme des méthodes hybrides, pour améliorer la qualité des solutions et la vitesse de convergence.

Conclusion

On peut conclure ce chapitre après avoir pris une mise à vue des différents concepts présents dans l'envergure de notre projet. Et pour le prochain chapitre, nous allons présenter les étapes suivies pour concevoir notre système.

Chapitre II

Conception de notre Système

Introduction

Après avoir défini les concepts de base de notre système et les différentes terminologies utilisées, nous allons à présent introduire la solution pour l'optimisation multi-objectifs des trajets dans le cas d'un système géographique avec paramètre de sûreté météorologique.

II.1 Analyse des besoins

II.1.1 Les acteurs du système

Pour définir les besoins du système, il faut d'abord spécifier les acteurs qui interagissent avec le système. De ce qui est des acteurs présents dans le cadre du projet, on trouve deux acteurs majeurs qui sont :

- **Client** : cette acteur va utiliser le système a ces fin personnelle pour faciliter ses déplacements.
- **Admin** : est un acteur qui aura la main sur la gestion des comptes et du bon fonctionnement du système, ce qui inclut les fonctions C.R.U.D (create,read,update,delete).

De ce que nous avons défini, on peut former un diagramme de cas d'utilisation (use case) de notre système II.1.

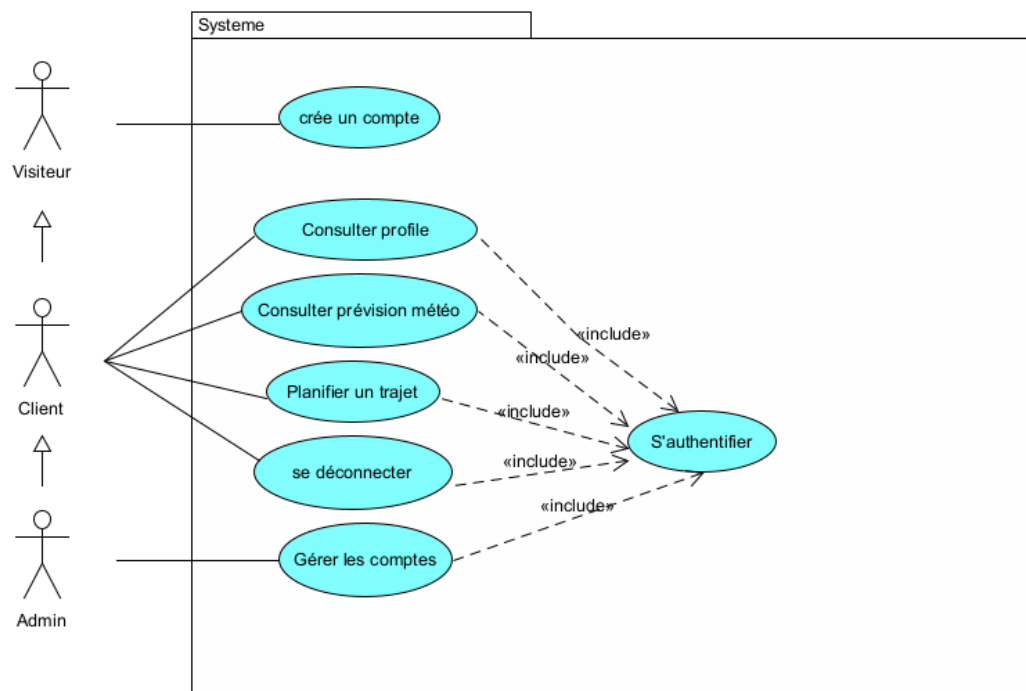


FIG. II.1 : diagramme use case du système

et à la fin, nous terminons par trouver un diagramme de classes de la sorte II.2 :

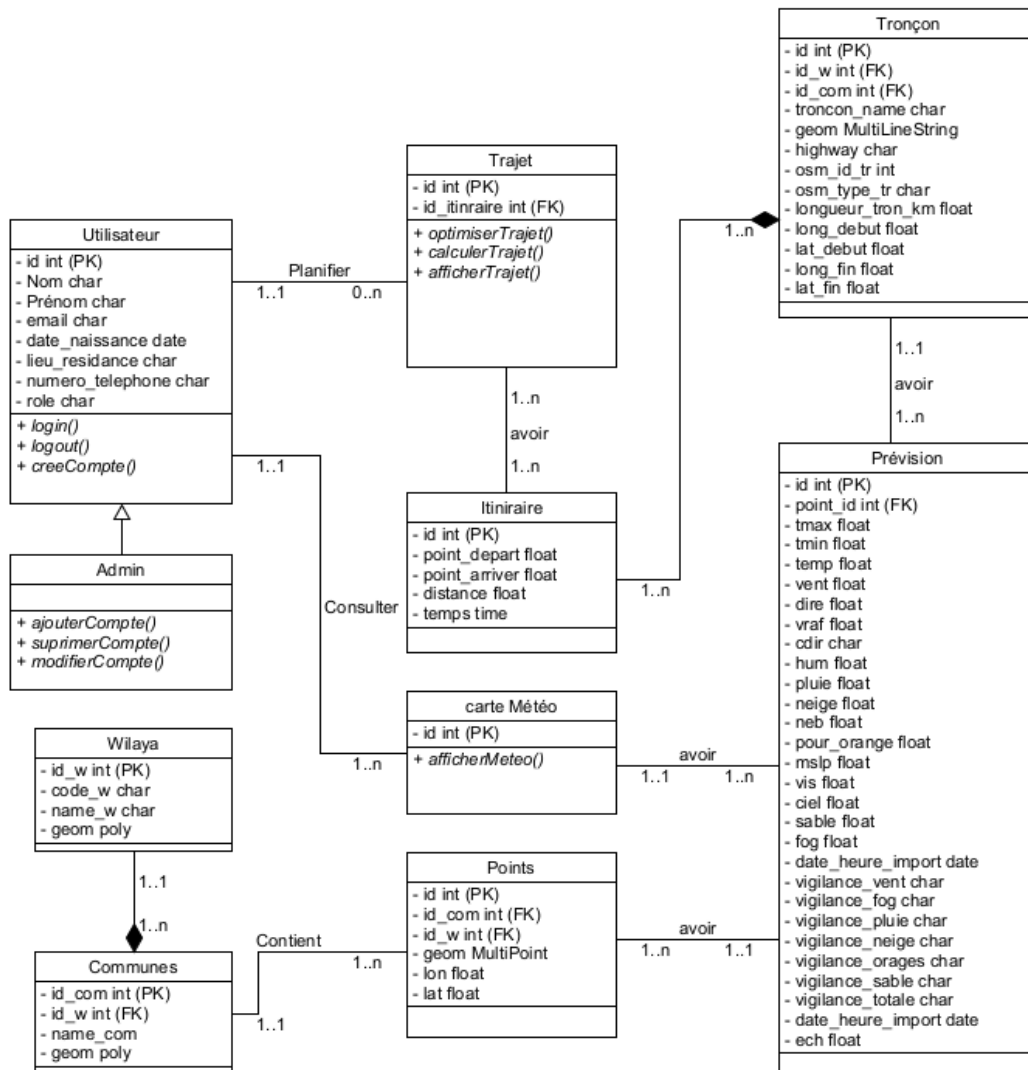


FIG. II.2 : diagramme de classe du système

II.1.2 Fonctionnalité proposer pour les acteurs

Consulter la météo

Puisque notre application repose sur une base de données météo, on peut en profiter pour afficher les prévisions dans tout le pays. On a donc pensé à l'utilisateur en lui offrant la possibilité de consulter la météo soit pour sa wilaya, soit pour sa commune. À partir de là, on peut représenter le fonctionnement de cette fonctionnalité sous forme de diagramme d'activité comme ci-dessous II.3.

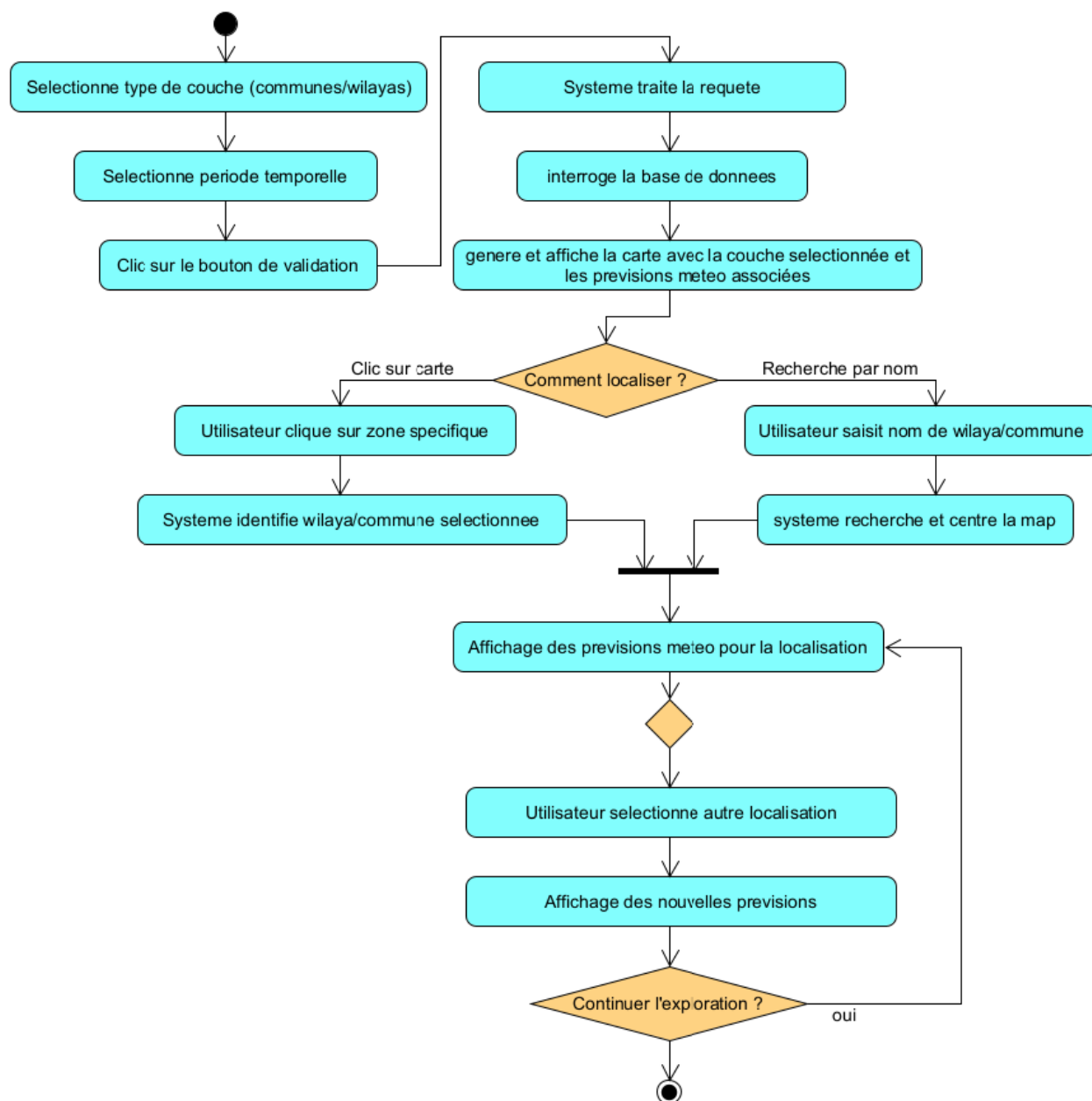


FIG. II.3 : diagramme d'activité de la fonctionnalités (consulter météo)

Planifier un trajet

Notre système a pour objectif principal d'aider les utilisateurs à planifier leur trajet en tenant compte des risques et dangers liés à la météo. Mais aussi d'optimiser les itinéraires possibles, pour trouver la meilleure route à

prendre dans le cas de plusieurs chemins pour une seule destination, avec des calculs de risque afin d'éviter les trajets qui ne sont pas sûrs. Et de cela, nous arrivons à ce diagramme d'activité qui suit II.4 :

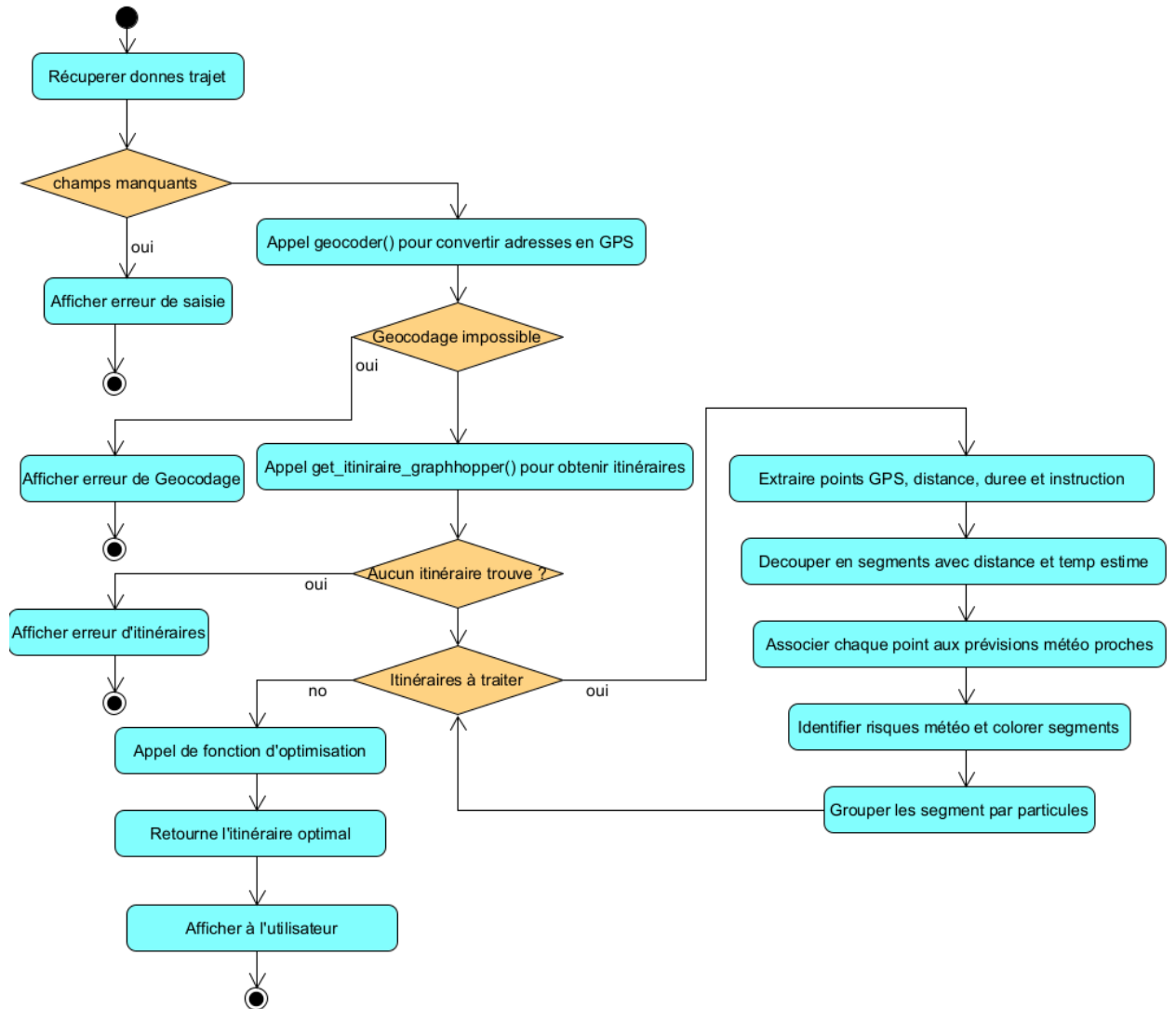


FIG. II.4 : diagramme d'activité de la fonctionnalités (planifier trajet)

II.2 L'optimisation multi-objectif pour la planification des trajets avec contraintes météorologique

L'optimisation des itinéraires en tenant compte des contraintes météorologiques vise à planifier des trajets tout en minimisant le temps de parcours et le risque lié aux conditions météorologiques défavorables (vents violents, tempêtes, etc.). Dans ce contexte, il devient nécessaire d'adopter des approches multi-objectifs, car les solutions à objectif unique se révèlent souvent insuffisantes pour répondre à l'ensemble des exigences.

II.2.1 Modélisation mathématique

Une modélisation mathématique consiste à créer une représentation simplifiée d'un phénomène du monde réel en utilisant des équations, des fonctions, des graphiques ou d'autres outils mathématiques. C'est comme construire une maquette, mais avec des symboles et des formules plutôt qu'avec des matériaux physiques.

Dans notre cas, on peut modéliser notre solution mathématiquement sous forme de formule objective qui suit :

$$\min F(x) = \min [f(x), g(x)]$$

Avec :

x représente un trajet
 $f(x)$ est la distance totale du trajet
 $g(x)$ est le risque totale sur le trajet

le trajet x est composé de plusieurs segments e :

$$x = \{e_1, e_2 \dots e_n\}$$

chaque segment possède des coordonnées géographiques (latitude, longitude), une distance "d" et un risque météo associé "r" et c'est ainsi qu'on obtient :

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum d_i \\ g(x) &= \sum r_i \end{aligned}$$

II.2.2 Modélisation algorithmique

La modélisation algorithmique consiste à décomposer un problème complexe en étapes simples et organisées, puis à traduire cette décomposition en instructions que peut suivre une machine. Il doit être précis, non ambigu et fini.

Nous avons choisi les algorithmes MOPSO et MOSA car ils sont simples à implémenter, efficaces, plus flexibles et mieux adaptés à des structures de données telles que les itinéraires, contrairement à d'autres algorithmes qui requièrent souvent de nombreux réglages précis et préalables. Mais avant de passer directement à la solution, énumérons ensemble les étapes qu'il faut suivre pour mettre en place notre solution. Commençons d'abord par la fonction « convertir_vigilance_en_score », qui permet de transformer les valeurs de vigilance météo associées aux différents segments de nos itinéraires, représentées sous forme de chaînes de caractères (par exemple « GRN », « YAL », « ORG », « RED ») où "GRN" sera transformé en 0 (pas de risque) , "YAL" en 1 (risque faible) , "ORG" en 2 (risque moyen) et "RED" en 3 (risque élevé) . Ces scores numériques seront par la suite utilisés pour le calcul du risque total d'un itinéraire. Ces valeurs proviennent des données de prévisions fournies par l'organisme d'accueil, présentées comme illustré dans la figure suivante.

Fonction convertir_vigilance_en_score(couleur):

Définir les scores associés aux couleurs :

"GRN" → 0

"YAL" → 1

"ORG" → 2

"RED" → 3

Si la couleur est connue :

Retourner le score correspondant

Sinon :

Retourner 0 (par défaut)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
LON	LAT	tmax	tmin	temp	vent	dir	VRAF	cdir	hum	pluie	neige
-2	25	30	30	30	17	90	31	E	22	0	0
-1	25	31	31	31	17	83	30	ENE	21	0	0
0	25	31	31	31	19	74	33	ENE	21	0	0
1	25	32	32	32	19	70	35	ENE	19	0	0
-0,1	25	31	31	31	19	74	33	ENE	21	0	0
-0,2	25	31	31	31	20	75	33	ENE	21	0	0
-0,3	25	31	31	31	20	76	33	ENE	21	0	0
-0,4	25	31	31	31	20	77	33	ENE	21	0	0
-0,5	25	31	31	31	20	78	33	ENE	21	0	0
-0,6	25	31	31	31	20	79	33	ENE	21	0	0
-0,7	25	31	31	31	19	79	32	ENE	21	0	0
-0,8	25	31	31	31	18	80	31	ENE	21	0	0
-0,9	25	31	31	31	18	82	30	ENE	21	0	0
-1,1	25	31	31	31	16	84	29	ENE	21	0	0

(a) Formatage des données partie 1

M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
%pluie	neb	%orage	mslp	vis	ciel	sable	fog	vig-vent	vig-fog	vig-pluie	vig-neige	vig-orage	vig-sable	vig-totale
0	0	0	1017	271	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	30	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	17	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	24	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	18	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	19	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	19	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	21	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	25	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	35	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	47	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	44	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	33	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN
0	0	0	1016	38	1	0	0	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN	GRN

(b) Formatage des données partie 2

FIG. II.5 : Formatage des données météo

Les données depuis la figure II.5 ont été importées vers notre base de données grâce à la fonction suivante :

```

Fonction importer_prevision_et_vigilance():
Définir le dossier contenant les fichiers de prévisions météo
Pour chaque fichier dans ce dossier :
  Si fichier est un Excel (.xlsx) :
    Extraire l'heure du nom du fichier (ex. "_12" → 12h)
    Créer un objet date/heure = maintenant + cette heure
    Lire le fichier Excel dans un tableau
    Nettoyer les noms de colonnes (minuscules, sans espaces)
    compteur = 0
    Pour chaque ligne du tableau :
      Récupérer longitude et latitude

```

```

Chercher un point prévisions dans la base
Si aucun point trouvé :
    Afficher un avertissement, passer à la ligne suivante
Sinon :
    Vérifier si prévision déjà existante pour ce point et cette date
    Si oui :
        Afficher un message, ignorer la ligne
    Sinon :
        Créer une entrée "Prévision"
        Créer une entrée "Vigilance"
        compteur += 1
    Si erreur pour la ligne :
        Afficher l'erreur
Si compteur > 0 :
    Supprimer le fichier
    Afficher succès avec compteur
Sinon :
    Afficher qu'aucune donnée n'a été insérée
Si erreur lors du traitement du fichier :
    Afficher l'erreur

```

Après avoir importé et mis en forme les données météorologiques, nous pouvons à présent présenter en détail les principaux algorithmes qui constituent le cœur de notre solution d'optimisation multi-objectifs, en commençant par le pseudo-code des algorithmes MOPSO et MOSA, respectivement.

Pseudo-code MOPSO

Entrées :

- `particules_initiales` : Population de départ sur laquelle sera appliqué l'algorithme MOPSO.
- `heure_depart` : Heure de départ utilisée pour associer les bonnes données météorologiques aux segments des nouvelles solutions issues des mutations appliquées dans la boucle principale de l'algorithme.
- `n_iterations` : Nombre maximum d'itérations que peut effectuer l'algorithme
- `max_population` : Nombre maximum que peut atteindre la population. Si ce seuil est dépassé, la fonction "réduire_population" est appelée pour limiter la taille de la population de particules
- `max_archive` : Nombre maximum de solutions que peut contenir l'archive. Si l'archive contient un grand nombre de solutions et dépasse sa capacité maximale, la fonction « réduire_archive_crowding » est utilisée pour ne conserver qu'un sous-ensemble diversifié de solutions, en

se basant sur la distance d'encombrement (« crowding distance »), qui mesure la densité locale des solutions afin de préserver la diversité dans l'ensemble conservé.

Sorties :

- L'archive finale représente l'ensemble des solutions optimales obtenues.

Fonction `mopso_optimize(particules_initiales, heure_depart, n_iterations, max_population, max_archive):`

1. Initialisation de la population :
Pour chaque particule initiale :
 - Évaluer son score (distance, risque)
 - Sauvegarder :
 - Sa position actuelle
 - Sa meilleure position personnelle (pbest)
 - Le score de cette meilleure position
 - Ajouter cette particule à la population
2. Création de l'archive Pareto :
 - Extraire les positions + scores des particules qui vont nous former nos solutions initiales
 - Mettre à jour l'archive Pareto avec ces solutions
 - Réduire l'archive pour éviter trop de solutions proches (crowding)
3. Boucle principale (répéter pendant `n_iterations`) :
Pour chaque itération :
 - Initialiser une liste de nouvelles solutions
 - Initialiser un compteur de mises à jour de pbest
 - Pour chaque particule :
 - Sélectionner un guide global (gbest) depuis l'archive
 - Générer une nouvelle position en se rapprochant du gbest
 - Évaluer cette nouvelle position
 - Si cette nouvelle position est meilleure que le pbest actuel :
 - Mettre à jour le pbest de la particule
 - Incrémenter le compteur
 - Ajouter cette solution à la liste des nouvelles solutions
 - Afficher combien de pbest ont été mis à jour
 - Mettre à jour l'archive Pareto avec les nouvelles solutions
 - Réduire à nouveau l'archive si elle dépasse la taille max
 - Si la population devient trop grande :
 - Réduire la taille de la population
4. Retourner l'archive finale (ensemble de solutions optimales)

Pseudo-code MOSA

Entrées :

- `solution_initiales` : La solution de départ sur laquelle sera appliqué l'algorithme MOSA.
- `heure_depart` : Heure de départ utilisée pour associer les bonnes données météorologiques aux segments des nouvelles solutions issues des mutations appliquées dans la boucle principale de l'algorithme.
- `max_iterations` : Nombre maximum d'itérations que peut effectuer l'algorithme
- `temperature_initiale` : est la valeur avec laquelle l'algorithme est lancé ; tant que cette température est élevée, il est probable d'accepter des solutions moins bonnes, et inversement. Lorsque la température atteint 0,001, l'algorithme s'arrête, car ce seuil minimal constitue l'une des conditions d'arrêt de notre méthode.
- `taux_de_refroidissement` : correspond à la valeur par laquelle la température est progressivement diminuée au cours de l'exécution de l'algorithme. Cette diminution progressive permet de réduire la probabilité d'accepter des solutions sous-optimales.

Sorties :

- L'archive Pareto finale représente l'ensemble des solutions optimales obtenues.

Fonction `mosa(solution_initiale, heure_depart, max_iterations, temperature_initiale, taux_de_refroidissement)`:

1. Initialisation :
 - Copier la solution initiale
 - Évaluer son score (distance + niveau de risque)
 - Créer un objet "solution courante" avec segments + score
 - Ajouter cette solution dans l'archive de Pareto (solutions non dominées)
 - Initialiser la température
2. Boucle principale (pendant `max_iterations` fois) :
 - Pour chaque itération :
 - Générer une solution voisine (modification de la solution actuelle)
 - Évaluer son score
 - Créer un objet "solution voisine"
 - Vérifier si cette solution voisine doit être acceptée :

- a. Si elle ****domine**** la solution actuelle
 - b. Sinon, calculer un écart (delta) entre les scores
 - Si l'écart est nul ou négatif → accepter
 - Sinon, calculer une probabilité d'acceptation selon la température
 - Tirer un nombre aléatoire
 - Accepter si ce nombre est inférieur à la probabilité
 - Si acceptée :
 - Remplacer la solution courante par la solution voisine
 - Mettre à jour l'archive de Pareto avec la solution voisine (si elle est non dominée, elle est ajoutée)
 - Afficher la taille actuelle de l'archive
 - Réduire la température (refroidissement)
 - Si la température est très basse → arrêter la boucle (arrêt anticipé)
3. Retourner l'archive Pareto finale

Conclusion

Ce chapitre de conception a établi les fondements techniques et conceptuels de notre système d'optimisation multi-objectifs des trajets intégrant les paramètres météorologiques. La modélisation UML a permis de structurer efficacement notre solution, identifiant les acteurs principaux et leurs besoins. L'implémentation des algorithmes MOSA et MOPSO constitue l'innovation clé de notre approche, permettant de concilier la minimisation des distances et la réduction des risques météorologiques. Cette phase de conception fournit ainsi un cadre robuste et extensible, prêt pour la phase d'implémentation qui suivra.

Chapitre III

Implementation de notre Système

Introduction

Après avoir présenté les démarches suivies pour concevoir notre système ainsi que les besoins identifiés afin d'obtenir un résultat optimal, ce chapitre introduira les différents outils qui nous ont permis d'atteindre cet objectif, tout en illustrant l'apparence de notre solution.

III.1 Outils et environnement de développement

III.1.1 Framework Backend et Language

- **Python** : Python est un langage de programmation facile et puissant. Sa syntaxe est claire et c'est pour cela qu'il est facile à apprendre même pour les débutants, mais il est aussi très utilisé dans des domaines très complexes comme l'analyse de données, le développement web ou l'automatisation. Il s'agit d'un langage interprété, donc il ouvre la voie à tester des idées rapidement, ce qui est très pratique en développement.
- **Django** : Django est un framework web Python relativement complet, qui déjà contient beaucoup de choses comme une gestion des utilisateurs, un interface d'adm, ou même un ORM (Object-Relational Mapping). C'est un outil qui vous laisse créer rapidement des applications web solides et aérées à entretenir, sans qu'il faille tout réécrire soi-même. Grâce à son MTV (Modèle-Gabarit-Vue) architecture, le code

est encore très organisé et clair.

- **Django template** : permettent de générer du HTML dynamique. On peut y insérer du code un peu similaire à Python directement dans le HTML, ce qui permet de créer des pages interactives et personnalisées. Ils facilitent aussi la réutilisation du code avec un système d'héritage et assurent une bonne séparation entre l'apparence et la logique de l'application.
- **GeoDjango** : GeoDjango est un module intégré à Django qui ajoute des fonctionnalités géographiques au framework web. Il permet notamment de gérer des bases de données spatiales comme PostGIS et offre des outils pour le traitement des données géographiques. Grâce à une API de haut niveau, il facilite la manipulation de données géographiques et propose des types de champs géométriques directement utilisables dans les modèles Django.

III.1.2 Gestion des bases de données

- **PostgreSQL** : PostgreSQL est un système de gestion de bases de données relationnelles, open source, reconnu pour sa stabilité et ses performances. Il gère très bien les requêtes complexes, et prend en charge des types de données avancés comme le JSON ou les données spatiales GEOJSON. Il est parfait pour des projets avec beaucoup d'utilisateurs ou de grandes quantités de données.
- **pgAdmin 4** : pgAdmin 4 est une interface web utilisée à des fins d'administration simple d'une base de données PostgreSQL. Grâce à son interface utilisateur graphique, il est possible d'exécuter des requêtes, de montrer les performances ou même à administrer les structures de la base sans avoir besoin de tout faire en ligne de commande.
- **PostGIS** : PostGIS est une extension de PostgreSQL qui ajoute la gestion des données géographiques. Elle permet de stocker, d'indexer et d'analyser directement des informations spatiales dans la base. C'est un outil clé quand on travaille avec des cartes ou des données géolocalisées.

III.1.3 Analyse géospatiale

- **QGIS** : QGIS est un SIG (système d'information géographique) open source qui peut afficher, modifier et analyser des données géospatiales. Il supporte un large éventail de formats et a de solides outils pour la

cartographie et l'analyse spatiale. Malgré le fait qu'il ait beaucoup de fonctions, il reste toujours portatif par une interface assez agréable.

- **GraphHopper** : GraphHopper est un calculateur open source d'itinéraire capable de générer les trajets rapidement et de manière facile pour de multiples modes de transport comme la voiture, le vélo ou la marche. Il peut être utilisé en ligne via une API, mais également hors ligne, ce qui le rend tout particulièrement robuste pour des applications de navigation, de calcul de trajet ou de calcul de distances. Sa structure légère et ses profils de routage personnalisables en font une solution idéale pour l'intégration d'interfaces de navigation complexes dans des applications web sans avoir recours à des services cartographiques plus évolués.
- **Nominatim** : Nominatim est le service de géocodage développé par OpenStreetMap. Il permet d'effectuer des recherches d'adresses ou du géocodage inversé (trouver une adresse à partir de coordonnées) en s'appuyant sur des données géographiques collaboratives. L'un de ses grands avantages, c'est qu'il est entièrement gratuit, sans besoin de clé API ni de limite stricte d'utilisation, ce qui le rend particulièrement intéressant pour les projets open source ou les applications qui ont besoin d'un service de géolocalisation fiable.
- **OpenStreetMap (OSM)** : OpenStreetMap est un projet de cartographie collaboratif et open source, qui repose sur les contributions de millions d'utilisateurs à travers le monde. Il fournit des données géographiques libres d'accès, avec un niveau de détail impressionnant : routes, bâtiments, points d'intérêt, etc. Grâce à sa licence ouverte et à sa couverture mondiale, OSM est devenu une ressource incontournable pour tous les projets qui ont besoin de données géographiques sans contraintes de licence. Dans le cadre de mon projet, OSM joue un rôle central. Nominatim utilise les données OSM pour effectuer le géocodage, GraphHopper s'appuie sur ces mêmes données pour calculer les itinéraires, QGIS permet d'afficher et d'analyser des couches issues d'OSM. Autrement dit, OpenStreetMap forme l'infrastructure de base sur laquelle reposent plusieurs des outils que nous avons utilisés. Intégrer OSM dans ce projet montre aussi une compréhension plus large de l'écosystème open source dans le domaine des données géospatiales. C'est particulièrement pertinent dans un travail qui traite de cartographie, de services de localisation ou d'analyse spatiale.
- **GDAL (Geospatial Data Abstraction Library)** : GDAL est une

bibliothèque open-source puissante dédiée à la lecture, l'écriture et la transformation de données géospatiales, prenant en charge plus de 200 formats raster et vecteur différents. Elle fournit les capacités essentielles de traduction de données qui alimentent de nombreuses applications SIG (Systèmes d'Information Géographique) et constitue une dépendance pour des outils comme QGIS ou GeoDjango. GDAL agit comme un traducteur universel des données géographiques, facilitant l'interopérabilité entre divers systèmes cartographiques et sources de données dans vos projets

III.1.4 Outils supplémentaires

- **Leaflet** : Leaflet est une bibliothèque JavaScript légère pour créer des cartes interactives sur le web. Elle est facile à intégrer, fonctionne bien sur mobile, et permet d'ajouter plein de fonctionnalités grâce à ses plugins. C'est une excellente option quand on veut des cartes personnalisables sans utiliser des outils trop lourds.
- **Bootstrap** : Bootstrap est un framework CSS très pratique pour créer rapidement des interfaces web réactives. Il propose des composants prêts à l'emploi et un système de grille qui s'adapte à tous les écrans. Ça fait gagner beaucoup de temps sur la mise en page et le design, surtout quand on veut un rendu professionnel sans repartir de zéro.
- **psycpg2** : psycpg2 est un adaptateur de base de données PostgreSQL pour Python, jouant le rôle de passerelle entre les applications Django et les bases de données PostgreSQL. Il offre des connexions à la base de données efficaces et sécurisées en multithread, avec un support complet des fonctionnalités avancées de PostgreSQL, notamment les types de données spatiales lorsqu'il est utilisé avec PostGIS. psycpg2 gère la communication bas niveau avec la base, le pool de connexions ainsi que l'exécution des requêtes SQL, ce qui permet à l'ORM de Django d'interagir de manière fluide avec votre base PostgreSQL.

III.2 Préparation des données

Pour la réalisation de notre système d'information géographique (SIG), la première étape a consisté à créer les données correspondant à nos besoins spécifiques. Il s'agissait notamment d'élaborer une carte de l'Algérie intégrant la délimitation des wilayas et des communes, ainsi que les points de prévision météorologique .

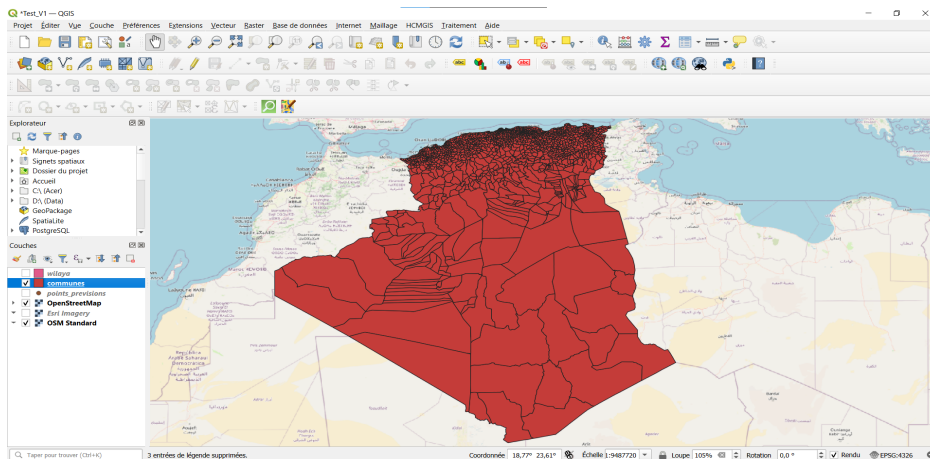
Afin de mener à bien cette tâche, nous avons utilisé le logiciel SIG open source QGIS, qui permet de créer des couches thématiques, de les relier à une base de données et de manipuler ces couches pour organiser et structurer efficacement les informations géographiques.

III.2.1 Les couches des wilayas/communes

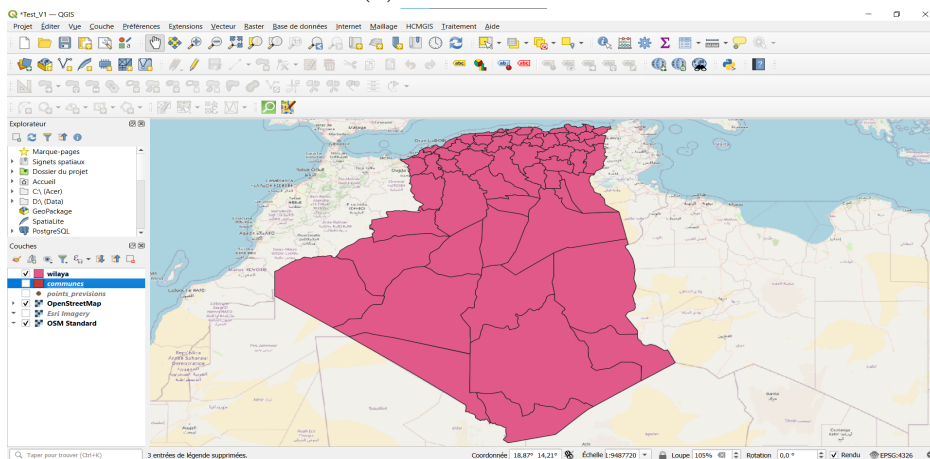
Les couches correspondant aux wilayas et aux communes ont été téléchargées depuis des sites spécialisés(simplemap), puis enrichies et affinées afin de ne conserver que les attributs pertinents pour notre étude. Le processus de préparation de la couche des communes a été réalisé à l'aide de l'outil « joindre les attributs par localisation » dans QGIS. Et pour ce faire, on a spécifié les paramètres suivants :

- Entité à laquelle joindre les attributs,
- Type de jointure, parmi les options disponibles (intersecte, chevauche, à l'intérieur, croise, égale, touche), avec le choix de la jointure par intersection,
- Champ de comparaison,
- Sélection des champs de la deuxième couche à conserver,
- Nom de la couche résultante de la jointure.

Cette méthode a permis d'intégrer spatialement les données tout en optimisant les informations pour notre système. Les résultats de ces jointures nous donnent la figure III.1.



(a) Couche des communes



(b) Couche des wilayas

FIG. III.1 : Les couches wilaya/commune utiliser

III.2.2 Couche point de prévision météo

Le processus de création des points de prévisions météo a été réalisé à l'aide de l'outil « Points réguliers » disponible dans QGIS, accessible via le menu Vecteur > Outils de recherche. Les paramètres suivants ont été spécifiés :

- Limites spatiales définies par des coordonnées précises,
- Espacement entre chaque point,
- Distance de décalage depuis le coin supérieur gauche,

- Système de référence de coordonnées (SCR) de la couche de sortie,
- Nom attribué à la couche générée.

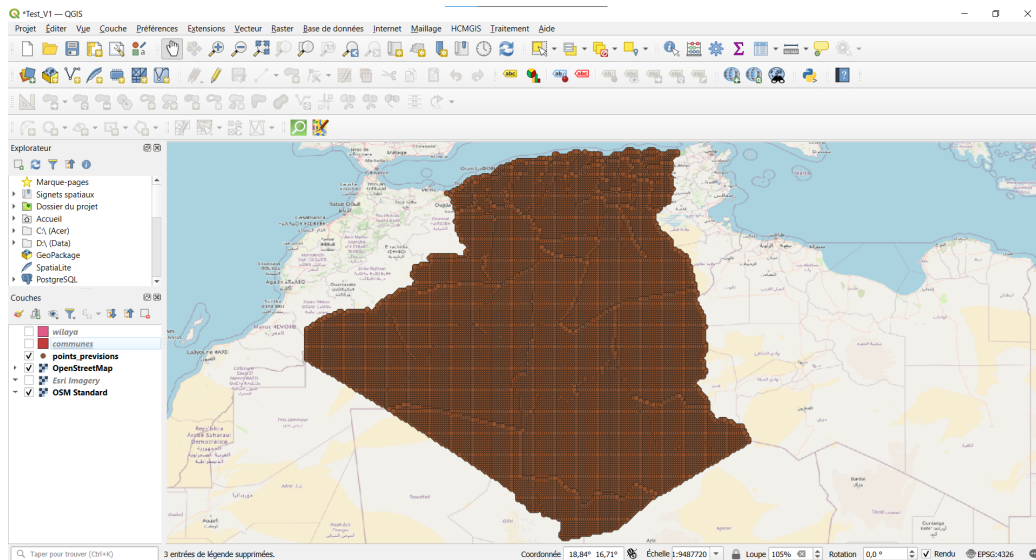


FIG. III.2 : Couche point de prévision météo

Une fois la couche de points réguliers obtenue comme dans la figure III.2, une opération d'intersection a été effectuée avec la couche des wilayas, en utilisant l'outil d'intersection de QGIS. Les paramètres renseignés comprenaient :

- La couche source (points ou wilayas),
- La couche de superposition (points ou wilayas),
- Les champs à conserver pour les deux couches,
- Le nom du fichier de sortie.

Cette étape a permis de ne conserver que les points situés à l'intérieur du territoire national. Enfin, une jointure par localisation a été réalisée entre les points prévisions météo ainsi obtenus et la couche des communes, qui contient les informations relatives aux wilayas et aux communes, afin d'enrichir les données spatiales .

III.2.3 Procédure d'importation

Importation des couches créées

Une fois les couches préparées et prêtes à être intégrées dans la base de données, l'outil Gestionnaire de bases de données représenté dans la figure III.3 (DB Manager) de QGIS permet d'effectuer cette opération de manière efficace. La procédure se déroule selon les étapes suivantes :

1. **Connexion à la base de données :** Nous avons sélectionné la base de données cible puis établi la connexion correspondante via l'interface du Gestionnaire de bases de données.
2. **Lancement de l'importation :** En cliquant sur l'option "Importer une couche ou un fichier", une fenêtre dédiée s'ouvre pour paramétrer l'import.
3. **Paramétrage des champs d'import :** Dans cette fenêtre, les informations suivantes doivent être renseignées :
 - Nom de la couche source,
 - Schéma et nom de la table de destination
 - Clé primaire
 - Colonne de géométrie
 - Création d'un index spatial

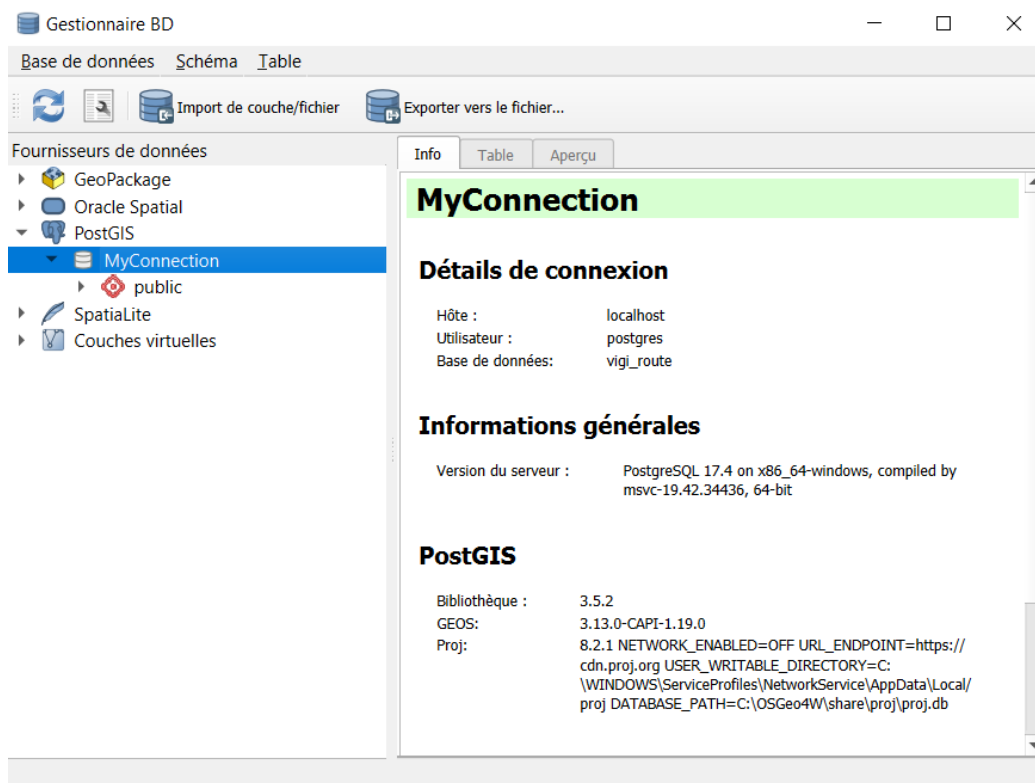


FIG. III.3 : Connexion de base de données à QGIS

III.3 Phase de test

III.3.1 Validation des algorithmes d'optimisation

Afin de déterminer quel algorithme d'optimisation est le plus adapté à notre cas d'utilisation, il est nécessaire de réaliser une série de tests comparatifs. Ces tests permettront d'identifier l'algorithme offrant la meilleure précision dans la prise de décision, ainsi que la plus grande rapidité d'exécution. L'objectif est de proposer aux utilisateurs des trajets présentant à la fois un risque minimal et une distance réduite.

III.3.2 Paramètre initial

Dans nos tests, nous avons initialisé nos algorithmes comme suit :

Pour MOPSO

- Un nombre d'itération de 100
- Population max 100
- Nombre de variantes (routes alternatives) est de 100 sur le trajet court et 50 sur le trajet long

Pour MOSA

- Un nombre d'itération de 250
- Température initiale de 100
- Refroidissement de 0.95
- Nombre de variantes (routes alternatives) est de 100 sur le trajet court et 50 sur le trajet long

III.3.3 Premier test

Pour notre premier test, nous avons choisi un trajet d'environ 7 km, avec un cas où l'itinéraire n'a aucune perturbation météorologique, et un autre cas avec un risque de pluie élevé. On a choisi de représenter la moyenne de nos dix tests sur le tableau qui suit :

Critères	MOSA (sans perturbation)	MOPSO (sans perturbation)
Distance (m)	6125.18	6124.99
Risque	0	0
Temps d'exécution (min)	16,63	240,20

TAB. III.1 : Comparaison des algorithmes MOSA et MOPSO sans perturbations météorologiques sur un trajet court

Critères	MOSA (perturbation météo)	MOPSO (perturbation météo)
Distance (m)	6125.20	6125.00
Risque	73,5	73,5
Temps d'exécution (min)	16,65	250,35

TAB. III.2 : Comparaison des algorithmes MOSA et MOPSO avec perturbations météorologiques sur un trajet court

III.3.4 Deuxième test

Pour notre deuxième test, nous avons choisi un trajet d'environ 80 km, avec un cas où l'itinéraire n'a aucune perturbation météorologique, et un autre cas de deux zones à risque de pluie moyenne et basse. On a choisi de représenter la moyenne de nos dix tests sur le tableau qui suit :

Critères	MOSA (sans perturbation)	MOPSO (sans perturbation)
Distance (m)	80179.16	80177.99
Risque	0	0
Temps d'exécution (min)	133,83	840,20

TAB. III.3 : Comparaison des algorithmes MOSA et MOPSO sans perturbations météorologiques sur un trajet long (Oran-Mostaganem)

Critères	MOSA (perturbation météo)	MOPSO (perturbation météo)
Distance (m)	81383.36042	81368.56
Risque	112,54	113,02
Temps d'exécution (min)	133,33	850,35

TAB. III.4 : Comparaison des algorithmes MOSA et MOPSO avec perturbations météorologiques sur un trajet long (Oran-Mostaganem)

III.3.5 Conclusion des tests

Au vu des résultats obtenus lors de nos deux tests, nous avons constaté que l'algorithme MOSA génère des solutions comparables à celles de l'algorithme MOPSO, tout en offrant un temps d'exécution moyen nettement inférieur. Par conséquent, nous avons opté pour l'utilisation de MOSA comme algorithme d'optimisation multi-objective pour notre système.

III.4 Déploiement

III.4.1 Présentation des interfaces principales

Page d'accueil du système

L'interface d'accueil est la page principale du système avec un design épuré et intuitif.



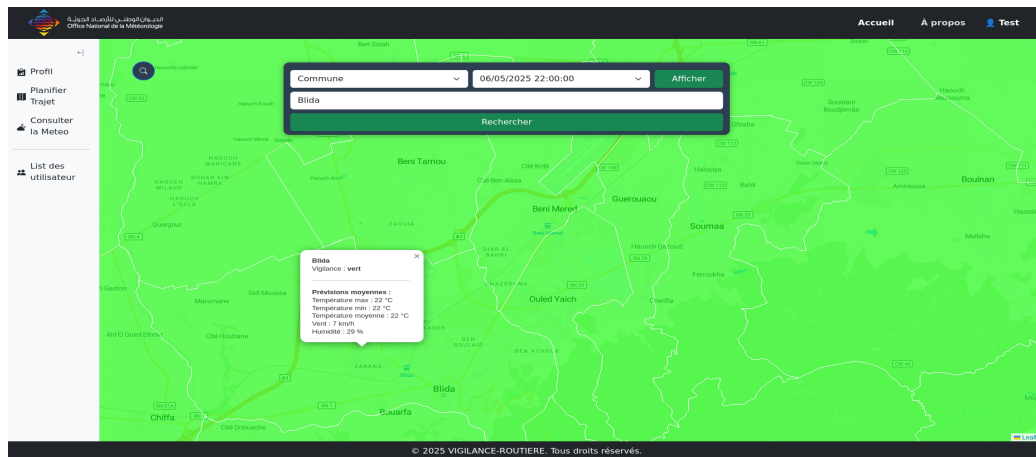
FIG. III.4 : Page d'accueil

La figure III.4 représente la page d'accueil du système avec comme éléments clés :

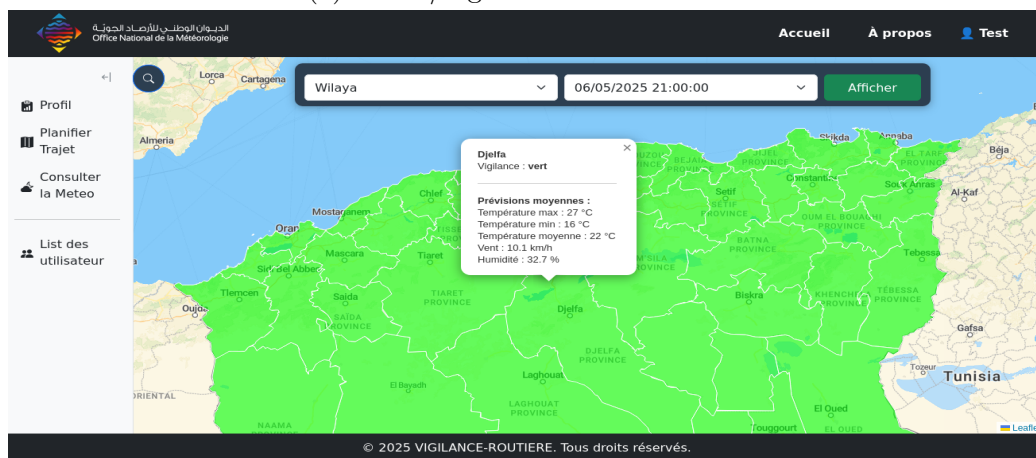
- Menu de navigation principal
- Lien d'authentification utilisateur

Interface de consultation météo

Après que l'utilisateur s'est authentifié avec succès, il aura accès à plusieurs interfaces comme celle-ci. Cette interface permet aux utilisateurs de consulter les prévisions par wilaya ou commune. La figure III.5 présente les interfaces de consultation de météo avec une version pour wilaya et une autre version pour les communes.



(a) météo/vigilance des communes



(b) météo/vigilance des wilayas

FIG. III.5 : L'interface de consultation météo/vigilance

Fonctionnalités déployées :

- Sélection des wilayas/communes sur la carte
- Affichage des prévisions sur 48 heures
- Indicateurs de vigilance météorologique
- Recherche précise d'une wilaya/commune

Interface de planification de trajets

L'interface principale du système permet de planifier des trajets optimisés.

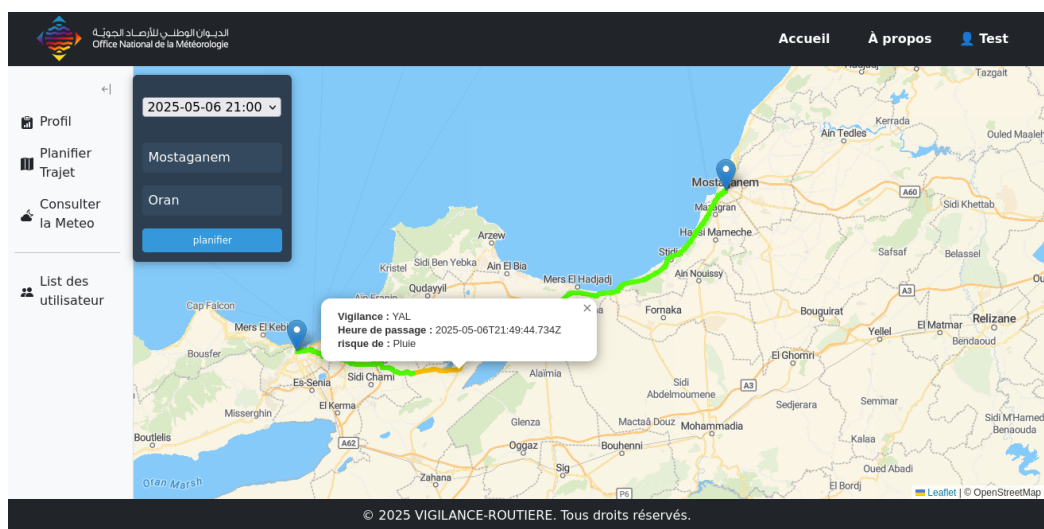


FIG. III.6 : Interface de planification de trajets

Fonctionnalités opérationnelles de l'interface de planification de trajets III.6 :

- Sélection des points de départ et d'arrivée et heure de départ
- Affichage du trajet optimisés avec code couleur selon le risque

Interface d'administration

Interface réservée aux administrateurs pour la gestion du système.

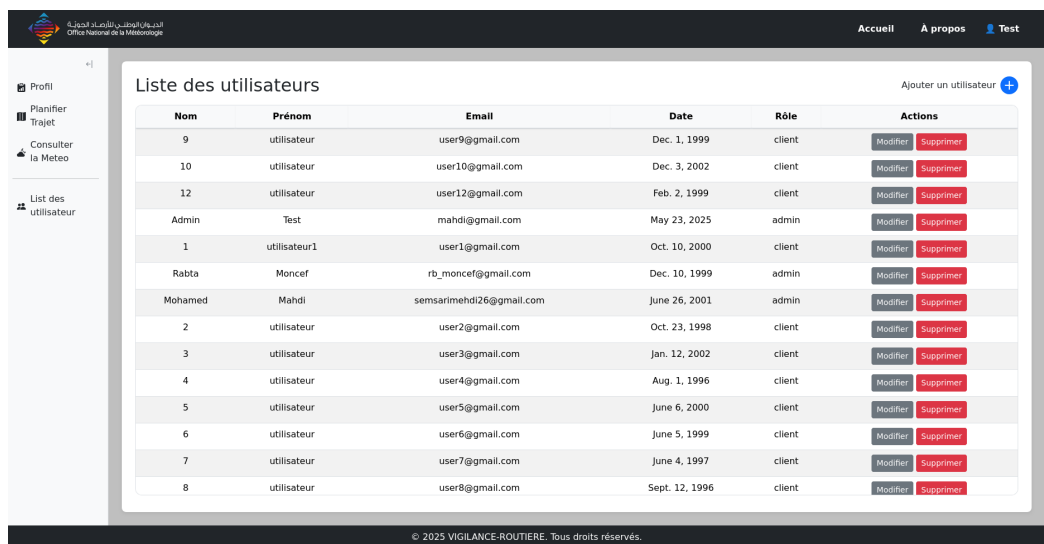


FIG. III.7 : Interface d'administration

Modules administrateur fonctionnels :

- Gestion des utilisateurs et permissions

Conclusion

À la fin de ce dernier chapitre, nous avons présenté et mis en œuvre notre solution en intégrant les différents modules. Nous avons également testé et simulé notre conception, ce que nous avons illustré à travers diverses expérimentations et tests.

Chapitre IV

Conclusion générale

Synthèse des réalisations

L'optimisation des itinéraires routiers, en intégrant à la fois la distance et les conditions météorologiques, constitue une avancée majeure pour la sécurité et l'efficacité des déplacements. Le système développé dans ce mémoire démontre la faisabilité et la pertinence d'un SIG intelligent capable de collecter, analyser et exploiter des données météorologiques afin de proposer des itinéraires optimaux. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation multi-objectifs permet de réduire les risques liés aux aléas climatiques et d'offrir aux usagers des trajets à la fois rapides et sûrs. Ce travail ouvre la voie à de futures recherches sur l'enrichissement des sources de données, l'amélioration des algorithmes d'optimisation, et l'extension du système à d'autres domaines d'application, tels que la gestion des secours ou la logistique urbaine. En conclusion, ce mémoire souligne l'importance d'une approche multidisciplinaire pour répondre aux enjeux contemporains de mobilité, de sécurité et de résilience face aux événements météorologiques extrêmes.

Perspectives

Ce travail ouvre plusieurs pistes d'amélioration et d'extensions :

- **À court terme**, l'optimisation des algorithmes par approche hybride constitueraient les évolutions prioritaires.
- **À moyen terme**, le développement d'une application mobile et un système d'alerte par Notifications push en cas de changement météorologique permettraient d'accroître significativement la valeur du système.

Bibliographie

- [1] Raphaël Parent. Qu'est-ce qu'un sig? *Korem*, <https://www.korem.com/fr/systeme-information-geographique/>, 11 novembre 2024.
- [2] Alexandra Jonker IBM. Qu'est-ce qu'un système d'information géographique (sig)? Technical report, IBM, 20 Novembre 2023.
- [3] smappan. The geospatial revolution. Technical report, smappan, <https://www.smappen.com/geographic-information-system/>, 2025.
- [4] Josée Broussaud. Qu'est-ce qu'un système d'information géoscientifique? *École normale supérieure de Lyon Institut français de l'Éducation*, 25 mars 2008.
- [5] PNUD. Qu'est-ce que les systèmes d'alerte précoce et pourquoi sont-ils importants pour tous?, 28 février 2025.
- [6] la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge. *Systèmes communautaires d'alerte précoce : principes directeurs*. Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge, 2013.
- [7] Nations Unies : Office for Outer Space Affairs UN-SPIDER Knowledge Portal. Systèmes d'alerte précoce. Technical report, Office for Outer Space Affairs UN-SPIDER Knowledge Portal, <https://www.un-spider.org/fr/node/12211>, 2015.
- [8] Biblus Editorial Team. Sig pour les transports : avantages et applications. Technical report, Biblus, <https://biblus.accasoftware.com/fr/sig-pour-les-transports-avantages-et-applications/>, 18 Décembre 2024.
- [9] Gabrielle Olivier. L'utilisation des données des sig pour l'industrie du transport. *Korem*, <https://www.korem.com/fr/donnees-sig-transport/>, 23 novembre 2020.

- [10] Mecalux. Planification logistique. Technical report, Mecalux, <https://www.mecalux.fr/blog/planification-logistique>, 29 avr. 2021.
- [11] FulfillmentHUB USA. L'importance de la planification stratégique dans la logistique d'entreprise. Technical report, FulfillmentHUB USA, 2025.
- [12] Shiptify. Planification transport. Technical report, Maeva Girardot, <https://www.shiptify.com/logtech/planification-transport>, 14 November, 2024.
- [13] Medjadj Tarek Boulkaïbet Aïssa, Bousmaha Ahmed. L'apport des sig dans l'étude de la couverture spatiale du transport en commun. le cas de la ville de skikda. *Algerian Scientific Journal Platform, Bulletin des sciences géographiques de l'INCT Volume 23, Numéro 1, Pages 26-33*, 31 Octobre 2019.
- [14] Guehef Fatma Zahra. Contribution des sig dans la gestion du transport urbain cas d'étude –la ville d'el-oued. Master's thesis, Université Mohamed Khider Biskra, 20 juin 2018.
- [15] Dr. Meche Abdelkrim. Manuel de cours optimisation. Technical report, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), 2021-2022.
- [16] Vincent Gardeux. *Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l'analyse de données de puces à ADN*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Novembre 2011.
- [17] Dr.Bouiaf Naima. *Optimisation Sans Contraintes, aspect théorique et algorithmique*. Université de BATNA 2, 2017.
- [18] Noria Bekkouche. *Optimisation sans contrainte : Cours et exercices*. Université Dr Moulay Tahar Saïda, December Decembre 2022.
- [19] Dr.Amel Berhail. *Optimisation Sans Contraintes*. Université 08 Mai 1945 Guelma, Octobre Octobre 2016.
- [20] Mr AZI Mourad. *SUPPORT DU COURS Module : Optimisation sans contraintes*. Université Abdelhafid Boussouf - Mila, 2020-2021.
- [21] Frédéric de Gournay & Aude Rondepierre. *Introduction à l'Optimisation Numérique*. INSA Toulouse, hiver 2012.

- [22] SOUMARE Mahamadou. *Leçon 2 : Optimisation sous contrainte*. GPE ABIDJAN, 25 avril 2017.
- [23] Abdelkrim Benhammada Aissa boudab. Méthodes d’optimisation avec contraintes. Master’s thesis, Centre Universitaire Abd elhafid boussouf Mila, 2021/2022.
- [24] El-Ghazali Talbi. *Metaheuristics. From Design to Implementation*. John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [25] Hillier/Lieberman. *Introduction to Operations Research*. The McGraw-Hill Companies, 6 mai 2004.
- [26] Guillaume GUERARD. Optimisation combinatoire 101. Technical report, Complex systems and AI, 7 juin 2025.
- [27] S. Kirkpatrick, Jr. C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *SCIENCE*, 13 Mai 1983.
- [28] D. Delamarre and B. Viro. Simulated annealing applied to the hamiltonian problem for cubic graphs. *Laboratoire d’Informatique Fondamentale d’Orléans, Université d’Orléans*, 1998.
- [29] Supatcha Chaimatanan Daniel Delahaye and Marcel Mongeau. Simulated annealing : From basics to applications. *ENAC Toulouse, France*, 8 octobre 2018.
- [30] Dr. Masoud Yaghini. *Simulated Annealing, Advanced concepts*. Iran University of Science and Technology, 2010.
- [31] baeldung. Simulated annealing explained. *baeldung.com*, 25 janvier 2025.
- [32] James Kennedy and Russell Eberhart. Particle swarm optimization. In *Particle Swarm Optimization - Neural Networks*, 1995.
- [33] Maurice Clerc. *Particle Swarm Optimization*. ISTE Ltd, 2006.
- [34] Maria Zemzami, Norelislam Elhami, Abderahman Makhoulfi, Mhamed Itmi, and Nabil Hmina. Application d’un modèle parallèle de la méthode pso au problème de transport d’électricité. *STE Science Publishing, London, UK – openscience.fr*, février 2017.
- [35] Gerardo Beni. Swarm robotics, sab 2004 international workshop, santa monica, ca, usa, july 17, 2004, revised selected papers. In *From Swarm Intelligence to Swarm Robotics*, 17 juillet 2004.

- [36] Geoffrey Pruvost. *Contributions à l'optimisation multi-objectif à base de décomposition*. PhD thesis, Université de Lille, 3 décembre 2021.
- [37] Abdelhakim Cheriet. *Métaheuristique hybride pour l'optimisation multi-objectif*. PhD thesis, Université Mohamed Khider Biskra, 11 juillet 2016.
- [38] Aouadj Wafa. *OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF : ÉTUDES DE CAS*. PhD thesis, Université Batna 2, 23 septembre 2021.
- [39] Safaa Maroua MEGNAFI Ismahen SOUAG. Approche multi-objectif et multi-périodes pour l'optimisation d'un réseau des véhicules de don de sang. Master's thesis, Ecole supérieur en science appliquées - Tlemcen, 29 septembre 2020.
- [40] ILYAS RAHHALI. Aide au choix d'une solution optimale sur un front pareto à l'aide de méthodes de groupement. Master's thesis, POLYTECHNIQUE MONTRÉAL affiliée à l'Université de Montréal, Août 2020.
- [41] Jonathan GUERRA. *Optimisation multi-objectif sous incertitudes de phénomènes de thermique transitoire*. PhD thesis, Université de Toulouse, 20 octobre 2016.
- [42] Dongkyung Nam and Cheol Hoon Park. Multiobjective simulated annealing : A comparative study to evolutionary algorithms. *International Journal of Fuzzy Systems* 2(2), 2000.