

# République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

## Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE d'ORAN Mohamed Boudiaf



Faculté des sciences  
Département d'informatique



Spécialité : *Informatique*

Option : M.O.E.P.S

### Mémoire Présenté par :

Mr : MOUILAH Cheikh

Pour l'obtention du diplôme de Magister en informatique

Thème :

## Les méta-heuristiques et le Système d'Information Géographique (S.I.G)

Soutenu le : 15/01/2013 à : 14h : 00 dans la salle de soutenance

Devant la commission d'examen composée de :

<u>Qualité</u>	<u>Nom et Prénoms</u>	<u>Grade</u>	<u>Etb d'origine</u>
Président :	BENYETTOU Mohamed	Professeur	USTO(MB)
Rapporteur :	BELKADI Khaled	M.conf. A	USTO(MB)
Examineur :	SADOUNI Kaddour	M.conf. A	USTO(MB)
Examinatrice :	CHOURAQUI Samira	M.conf. A	USTO(MB)

Année universitaire : 2012/2013

## Remerciements

Nous sommes incapable d'exprimer notre gratitude envers notre encadreur : M<sup>r</sup> : Khaled BELKADI et le moins que nous pouvons traduire c'est une profonde reconnaissance pour l'aide scientifique et pédagogique qu'il nous a apporté durant l'élaboration de ce projet.

Nous remercions le président et les membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Nous exprimons notre reconnaissance à nos enseignants et le personnel du département d'informatique qui grâce à leurs services ont participé activement à la bonne marche de nos travaux.

## *Dédicace*

Je dédie ce travail à mes très chers parents.

Je dédie ce fruit de tant d'effort à mes sœurs et mes frères (Aicha, Fatima, Souhila, Hakima, Youcef et Boualem).

Je dédie ce mémoire de magister à mes amis sans exception, sans oublier le défunt mon maître *OUAN Zouaoui*, que notre dieu le porte dans sa clémence.

*Mr: MOUILAH Cheikh*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Le système d'information géographique</b>	
1. Introduction	3
2. Géographie	4
3. Pourquoi la géographie ?	4
4. Géomatique	4
5. Normalisation de la géomatique	5
6. L'information géographique	6
7. Caractéristiques de l'information géographique	7
8. Notion du système d'information	8
9. Système d'information géographique	9
10. Historique du SIG	10
11. Les fonctionnalités du SIG	10
12. La représentation de l'information géographique	11
13. Domaines d'application	14
14. Présentation des principaux logiciels de SIG	15
15. Conclusion	17
<b>Chapitre II : La modélisation des réseaux routiers urbains</b>	
1. Introduction	18
2. Définition de l'urbain	19
3. Définition de la rue	19
4. Définition du réseau routier	20
5. La distinction entre le terme « Route » et « Rue »	20
6. Modélisation des données géographiques	20
7. Modélisation du réseau routier	24
7.1. Présentation du réseau routier	24
7.2. Localisation des rues dans un milieu urbain	24
7.3. Gestion du réseau routier	29
7.4. Modèle conceptuel des données	34
7.5. Modèle logique des données	38
7.6. Modèle physique des données	40
7.7. Codification proposée	40
8. Conclusion	42
<b>Chapitre III : Les métaheuristiques et le problème de plus court chemin multi objectifs</b>	
1. Introduction	43
2. Définitions	44
3. Les chemins optimaux dans un graphe valué	44
3.1. Présentation	44
3.2. Le plus court chemin dans un graphe statique déterministe	44
3.3. Le plus court chemin dans un graphe dynamique	46
3.4. Le problème du plus court chemin stochastique	47
4. Limite d'application des algorithmes	48
4.1. Plus court chemin statique	48
4.2. Chemin le plus rapide en fonction du temps	48
4.3. Chemin de moindre coût dépendant du temps	48

4.4. Prise en compte des grilles horaires	49
4.5. Chemin de moindre coût	50
5. Problème d'optimisation combinatoire multi-objectif	50
5.1. Définition	50
5.2. Notion de dominance	51
5.3. Optimalité de Pareto	51
5.4. Résolution d'un problème multi-objectif	52
6. Les métaheuristiques et le problème multi-objectifs	53
6.1. Définition	53
6.2. Classement des métaheuristiques	53
6.3. Les métaheuristiques et le problème d'optimisation multi-objectifs	54
6.4. Les métaheuristiques et le problème de plus court chemin multi-objectifs	54
7. Le chemin le plus court dans un réseau routier urbain	55
8. Conclusion	58

## Chapitre IV : Le chemin optimal dans un milieu urbain

1. Introduction	59
2. Présentation de la solution classique	60
3. Démarche de la solution choisie	60
3.1. Définitions	60
3.2. Principe	60
3.3. Organigramme de la solution choisie	62
4. La zone de recherche	62
5. Les algorithmes de la colonie de fourmis	71
5.1. Définition	71
5.2. Comportement des fourmis	72
5.3. Méthode usuelle d'optimisation avec l'ACO	73
5.4. Description de l'algorithme de base « Ant system » (AS)	73
5.5. La complexité	75
5.6. Variantes	76
6. Application de la colonie de fourmis sur le réseau routier urbain	77
6.1. Présentation	77
6.2. L'Algorithme de Colonie de fourmis pour le Problème de plus Court Chemin Multi-objectifs (MOSPACO)	78
7. Conclusion	80

## Chapitre V : Implémentation

1. Introduction	81
2. Présentation de l'application	82
2.1. Principe et objectifs	82
2.2. Aspect physique et logiciels	84
2.3. Estimation de la base des données	85
3. Résultats et interprétations	86
3.1. Présentation du lieu d'implémentation	86
3.2. Paramétrage de l'algorithme de MOSPACO	87
3.3. Le plus court chemin de l'école primaire Colonel Mejdoub et la bibliothèque régionale d'Oran	89
3.4. Le plus court chemin multi-objectifs	90
4. Interfaces Utilisateurs	92
5. Conclusion	95
<b>Conclusion Générale et perspectives</b>	<b>96</b>
<b>Bibliographie</b>	

**Introduction générale :**

L'environnement fait, actuellement débat et suscite les inquiétudes du grand public. Sa gestion est devenue une affaire de survie quotidienne. La croissance urbaine importante a souvent engendré des problèmes de maîtrise et de gestion technique de l'environnement urbain. Cependant, elle devient de plus en plus primordiale, faisant appel à des approches scientifiques pour apporter des solutions aux problèmes qui menacent notre environnement et par conséquent notre vie.

Le développement des systèmes d'information géographique (S.I.G) a été particulièrement important dans le domaine de l'aménagement du territoire cette dernière décennie. Un S.I.G facilite la modélisation spatiale des réseaux (par exemple, des réseaux routiers), offrant des algorithmes de recherche et d'analyse. Les réseaux spatiaux sont modélisés avec des graphes. Dans le cas des réseaux routiers, les arcs des graphes correspondent à des segments de rue tandis que les nœuds correspondent aux intersections des rues.

Le transport urbain est un sujet très complexe à traiter et il possède différentes facettes. Une de ces facettes est le problème de l'optimisation du transport urbain qui concerne le choix de l'itinéraire. En effet, pour un automobiliste ou un chauffeur de camion, un choix judicieux de l'itinéraire peut représenter une économie financière et un gain de temps importants. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail. Plusieurs chercheurs se sont penchés sur la problématique du calcul d'un itinéraire optimal entre deux points d'un réseau routier depuis plusieurs années. Néanmoins ce sujet est toujours un thème de recherche d'actualité.

Les critères environnementaux, organisationnels pris en compte dans notre étude sont la « distance », le « temps », le « trafic », le « nombre des ralentisseurs », le « nombre des feux tricolores », la « hauteur autorisée », le « poids autorisé ». L'objectif de notre étude est de développer un système d'aide à la décision au choix d'un chemin dans un système de transport permettant de réduire ces impacts. Le coût et le temps de transport ne sont donc plus les seuls critères de choix d'un chemin. Dans ce cas, l'aspect environnemental n'est plus intégré en tant qu'une contrainte, mais en tant qu'un objectif à atteindre. Le système proposé devra guider le décideur au choix d'un itinéraire de voyage (succession de nœuds et de chemins) avec le meilleur compromis organisationnel-environnemental et économique possible.

Au vu du nombre de critères à prendre en compte, nous modéliserons notre problème sous la forme d'un problème de plus court chemin multiobjectif. Pour ce faire, nous mettrons en place un algorithme d'optimisation permettant de trouver un compromis entre les différents critères considérés. Notre problématique se concentre sur la mise en place d'un algorithme de

colonies de fourmis multi-objectif permettant de prendre en compte le caractère d'un réseau routier urbain étudié ainsi que la multiplicité des critères étudiés.

Nous avons ciblé ces objectifs à cause de leurs influences sur le coût de transport, de la sécurité routière et d'environnement, par exemple : L'organisation de mobilité belge Touring constate dans un communiqué du 13 août que les rejets de gaz carbonique triplent lorsque les véhicules sont bloqués dans des files créées par des feux de signalisation non synchronisés [ROS, 1997] . Et une liste non exhaustive des remarques et recommandations pratiques montre que le problème des ralentisseurs mal conçus ou inadaptés, et donc inefficaces, n'est pas mince et peut être un vrai danger public. Dans le domaine du transport routier, Le transport des marchandises dans les milieux urbains nécessite généralement une étude préalable et il doit faire l'objet d'une autorisation administrative. Il impose un itinéraire particulier (prendre en compte la hauteur, largeur et le poids autorisé), l'emploi de véhicules adaptés et des conditions de circulation particulières, notamment pour les horaires.

Dans la suite, ce mémoire s'organise de la manière suivante :

Le chapitre 1 définit l'information géographique, sa représentation et ses caractéristiques, puis nous présenterons le système d'information géographique, ses fonctionnalités et son domaine d'application.

Dans le chapitre 2 : nous modélisons un réseau routiers urbain d'une commune algérienne avec la méthodologie de Merise. L'objectif de ce travail est de réaliser un système d'information géographique capable de gérer la voirie urbaine, où on va appliquer notre algorithme d'optimisation.

Le chapitre 3 : nous représenterons le problème de plus court chemin avec des différents types de graphes, nous expliquerons comment ce problème classique deviendra un problème d'optimisation combinatoire qui exige des outils algorithmiques précis pour le résoudre, nous montrerons que les métaheuristiques sont des outils puissants pour résoudre le problème de plus court chemin multi-objectifs.

Dans le chapitre 4 : nous nous intéresserons par la mise en œuvre d'un système d'information géographique sur le réseau routier urbain avec ses contraintes temporelles et non temporelles et par l'application d'un algorithme de colonie de fourmis de plus court chemin multi-objectifs (MOSPACO) sur une zone de travail limitée et calculée.

Et enfin, le dernier chapitre est dédié à l'implémentation de la solution choisie, et les outils nécessaires pour la mise en application.

**Chapitre I :**  
*Le Système d'Information Géographique*  
*(S.I.G)*

« Le S.I.G se définit comme des ensembles de données repérées dans l'espace et structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles»

Jean DENEGRÉ, François SALGE (DEN, 1996)

---

## **1. Introduction :**

L'environnement fait, actuellement débat et suscite les inquiétudes du grand public. Sa gestion est devenue une affaire de survie quotidienne. La croissance urbaine importante a souvent engendré des problèmes de maîtrise et de gestion technique de l'environnement urbain. Cependant, elle devient de plus en plus primordiale, faisant appel à des approches scientifiques pour apporter des solutions aux problèmes qui menacent notre environnement et par conséquent notre vie [DJA, 2004].

Une bonne gestion de l'environnement passe par une exploitation poussée des systèmes d'information modernes. Aujourd'hui il n'est plus nécessaire de présenter l'utilisation de l'informatique standard dans la gestion de base de données alphanumériques et dans la présentation graphique. Elle est devenue omniprésente et à la portée des utilisateurs concernés par l'environnement partout dans le monde, y compris dans les pays en développement. Il semble plus important d'examiner les développements nouveaux concernant les systèmes d'information et l'aide à la décision qui concernent les paramètres fondamentaux de l'environnement, comme les dimensions spatiales et plus généralement, géographiques [BRE, 1996].

Les systèmes d'information géographique (S.I.G), sont en pleine expansion et ne cessent de demander, de plus en plus, des données fiables provenant de sources diverses, leur mise en correspondance, leur comparaison et leur intégration. L'acquisition d'information géographique à partir d'images aériennes ou d'images satellitaires d'observation de la terre représente un potentiel important.

L'objectif de ce chapitre est de définir l'information géographique et ses caractéristiques, de présenter les principales fonctionnalités des systèmes d'information géographiques (S.I.G) et son domaine d'application, et de citer les principaux logiciels de S.I.G disponibles sur le marché international.

## 2. Géographie :

La géographie est la description de la terre : c'est ce que signifie son nom, est formé de deux mots grecs (du grec ancien γεωγραφία - geographia, composé de "η γη" (hê gê) la Terre et "γραφειν" (graphein) graver).

Cette science fait le tableau de la terre, et représente ses différentes parties selon l'ordre où elles se trouvent : elle détermine la figure des terres et des mers, trace les cours des rivières, elle distingue les divers pays et elle fait connaître les avantages dont ils jouissent et les peuples qui les habitent [GUT, 1819]. On peut la considérer sous trois points de vue, et en conséquence la diviser en géographie astronomique, physique (ou naturelle) et politique.

- La géographie astronomique est la description de la terre considérée par rapport au ciel ; elle fait connaître la correspondance qui existe entre les parties de la terre et les parties du ciel, les effets qui en résultent et les divisions qu'on en a déduites [BEN, 1835] ;
- La géographie physique fait connaître la surface de la terre sous ses trois formes de terre, de mer et d'atmosphère, et dans ses rapports aux minéraux, aux végétaux, aux animaux et à l'homme ;
- La géographie politique s'occupe des états et de tout ce qui est sur la terre et l'ouvrage des hommes [CON, 1831].

## 3. Pourquoi la géographie ?

La géographie, en raison de son ancienneté et donc de son long rapport à la présence des hommes dans le territoire, est porteuse d'une part de la logique du monde (car une part de la logique du monde est inscrite dans la logique de nos discours géographiques sur le monde), elle est aussi porteuse d'un renouvellement de l'ontologie et donc d'une meilleure définition de la place de l'homme dans le monde (car une part de la sagesse des hommes compose ce qu'il est légitime de désigner comme contrat géographique) [BOR, 2004].

## 4. Géomatique :

- La géomatique est une science de l'acquisition, du traitement et de la diffusion des données à référence spatiale. Elle vise à produire une chaîne numérique continue de la production de données sur le territoire à l'aide de la topométrie, la photogrammétrie, la géodésie, le positionnement par satellite, la télédétection, les systèmes d'information géographique et la cartographie [GAR, 1975];
- [...] la géomatique, c'est le portrait de la réalité de haute précision à partir de ce plan de base on peut travailler sur les projets, et essayer de corriger les erreurs du passé, ..., c'est le portrait exact du territoire avec toutes les informations nécessaires [ROC, 2000];

- L'utilisation généralisée des ordinateurs personnels, qui sont de plus en plus puissants et conviviaux, est à l'origine du foisonnement de logiciels de traitement des données à référence spatiale. Entre autres, on en arrive à pouvoir traiter simultanément et de façon automatisée l'ensemble des données à référence spatiale d'un territoire, dont celles provenant de la télédétection. Cette approche est maintenant désignée sous terme de géomatique [PRO, 2007];
- La géomatique désigne l'ensemble des utilisations techniques de l'informatique en géographie : les outils et méthodes d'observation et de représentation des données géographique, ainsi que la transformation de ces mesures en informations utiles à la société [NOV, 2009];
- La géomatique a pour objet la gestion de données à référence spatiale et fait appel aux sciences et aux technologies liées à leur acquisition, leur stockage et leur traitement. Le nom « géomatique » (Fig. 1.1), proposé en 1968 par le géomètre français Bernard Dubuisson [GUE, 2009], provient de la contraction de « géographie » et « informatique », mais les disciplines recouvertes par ce terme incluent aussi la cartographie, la géodésie, la topographie, le positionnement par satellite et le traitement d'images numériques. Les systèmes d'information géographique (S.I.G), qui sont des systèmes informatiques permettant l'intégration, la gestion et l'analyse de données géographiques, constituent l'outil de base du géomaticien, spécialiste de la géomatique.

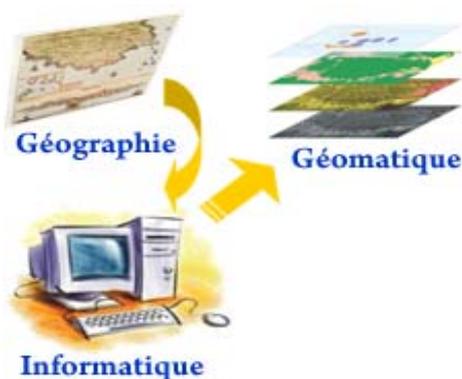


Figure 1.1: La géomatique.

## 5. Normalisation de la géomatique :

### 5.1. Introduction :

En 1994, le comité technique 211 (TC 211) de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) a été formé pour définir un ensemble de normes dans le domaine de l'information géographique (ISO 19100). Ces normes touchent les méthodes, les outils et les services pour l'acquisition, la gestion, le traitement, l'analyse, l'accès, la présentation et l'échange des données géographiques. Elles s'appliquent aux différents aspects de la géomatique incluant la photogrammétrie, la télédétection, le positionnement géodésique (ex. GPS), les systèmes d'information géographique, etc.

## 5.2. Pourquoi des normes en géomatique?

Les normes en géomatique sont essentiellement mises en place pour :

- Mieux comprendre et utiliser l'information géographique;
- Accroître la disponibilité, l'accès, l'intégration et le partage de l'information géographique, i.e. permettre l'interopérabilité des données géo-spatiales et des systèmes;
- Promouvoir l'utilisation efficiente, efficace et économique de l'information géographique et des systèmes qui y sont associés;
- Faciliter la mise en place d'infrastructures de données géo-spatiales à tous les niveaux (du local au global);
- Contribuer à une approche unifiée pour aborder les problèmes de façon globale (ex. problèmes écologiques et humanitaires);
- Contribuer au développement durable [BRO, 2003].

## 5.3. Normes qui fournissent l'infrastructure de base à l'ISO/TC 211 pour développer la famille de normes ISO19100 :

- ISO19101 : Modèle de référence ;
- ISO19103 : Langage du schéma conceptuel ;
- ISO19104 : Terminologie ;
- ISO19105 : Conformité et essais ;
- ISO19106 : Profils ;
- ISO19120 : Normes fonctionnelles ;
- ISO19135 : Procédures pour l'enregistrement d'items d'information géographique ;
- ISO19140 : Amendements techniques aux normes ISO191\*\*<sup>[1]</sup> relatives à l'information géographique pour des fins d'harmonisation et d'amélioration.

## 6. L'information géographique :

L'information géographique peut être définie comme :

- Les aspects qualitatifs déterminent l'essentiel des possibilités d'un système d'information, la quantité des informations se définit au travers de trois critères. Elle peut se formaliser aisément

---

<sup>[1]</sup> Ce projet de norme devait aborder la mise en place d'amendements techniques pour la suite des standards géographiques ISO 191\*\*, notamment pour traiter les problèmes de cohérences, de références croisées, de terminologie, de modèles de données et de présentation. Aucun standard n'a été publié, les travaux d'harmonisation identifiés sont en fait menés au sein du Programme Maintenance Group.

dans le référentiel à trois dimensions ci-dessous. Une fois définis ces critères, il reste à mettre en place une chaîne de collecte, de traitement et de représentation [BRO, 1996] ;

- Une information géographique renvoie à un objet localisé sur la surface terrestre et qui comporte plusieurs attributs. On le localise à l'aide d'un système de références dans l'espace ; par la localisation relative, on peut comparer cet objet par rapport à d'autres objets. L'une des caractéristiques d'une information géographique est d'être tridimensionnelle (Fig. 1.2) selon la fonction suivante (équation 1):

$$Z=f(X,Y) \quad (1.1)$$

Avec  $Z$ = attribut et  $X,Y$  = paire de coordonnées par rapport à un système de référence.

L'objet est associé à une localisation représentée par une paire de coordonnées. Cette information géographique peut être aussi multidimensionnelle [GUM, 2000]. Dans ce cas, on associe plusieurs attributs à l'endroit (un lieu) suivant (équation 2):

$$Z_1, Z_2, \dots, Z_n = f(X, Y) \quad (1.2)$$

Avec  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  = attributs et  $X, Y$  = paires de coordonnées par rapport à un système de référence.

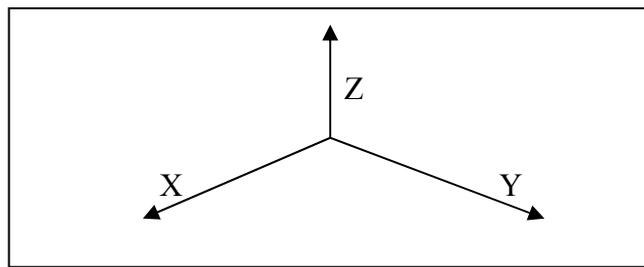


Figure 1.2 : Matrices géographiques.

## 7. Caractéristiques de l'information géographique :

L'individu statique en géographie peut être :

- Une unité spatiale provenant du découpage d'un espace continu. Ce découpage spatial peut être administratif, politique ou correspondre à une réalité physique (vallée, plaine, etc.).
- Une entité ou un objet dans l'espace : cela peut être un ménage, une entreprise ou une exploitation agricole ou, à une autre échelle géographique, l'îlot, le quartier, la ville, etc.
- Un flux ou un échange entre deux lieux géographiques. Ce flux peut être un flux migratoire, des flux de marchandises, d'informations, etc. Géométriquement, cette information peut être :
  1. Ponctuelle : un sujet ou un objet localisé dans l'espace ;
  2. Linéaire : un flux, un réseau entre deux ou plusieurs points.

## 8. Notion du système d'information :

Partons de la définition la plus large et la plus générale du système, le système d'information est un ensemble d'éléments (des composants de traitement de l'information et de communication) en relation les uns les autres et formant un tout, organisé dans le but d'accomplir des fonctions de traitement de l'information. D'autres définitions sont plus précises pour ce système comme :

- Le système d'information est un ensemble de moyens matériels et humains organisés permettant la collecte, le traitement et la diffusion des informations. Ce système n'est que l'un des éléments permettant à l'entreprise de mener à bien sa mission. Il est nécessaire, afin de coordonner les activités de tous les éléments, de stocker les informations nécessaires à chacun et de préparer ainsi la prise de décision [ALD, 2003] ;
- ... Le système d'information servira à recueillir et à préserver les données, à effectuer des traitements sur celles-ci, et à diffuser les résultats aux systèmes de pilotage et opérant [BIG, 2006].

Nous pourrions schématiser la place du système d'information de la manière suivante : (Fig. 1.3):

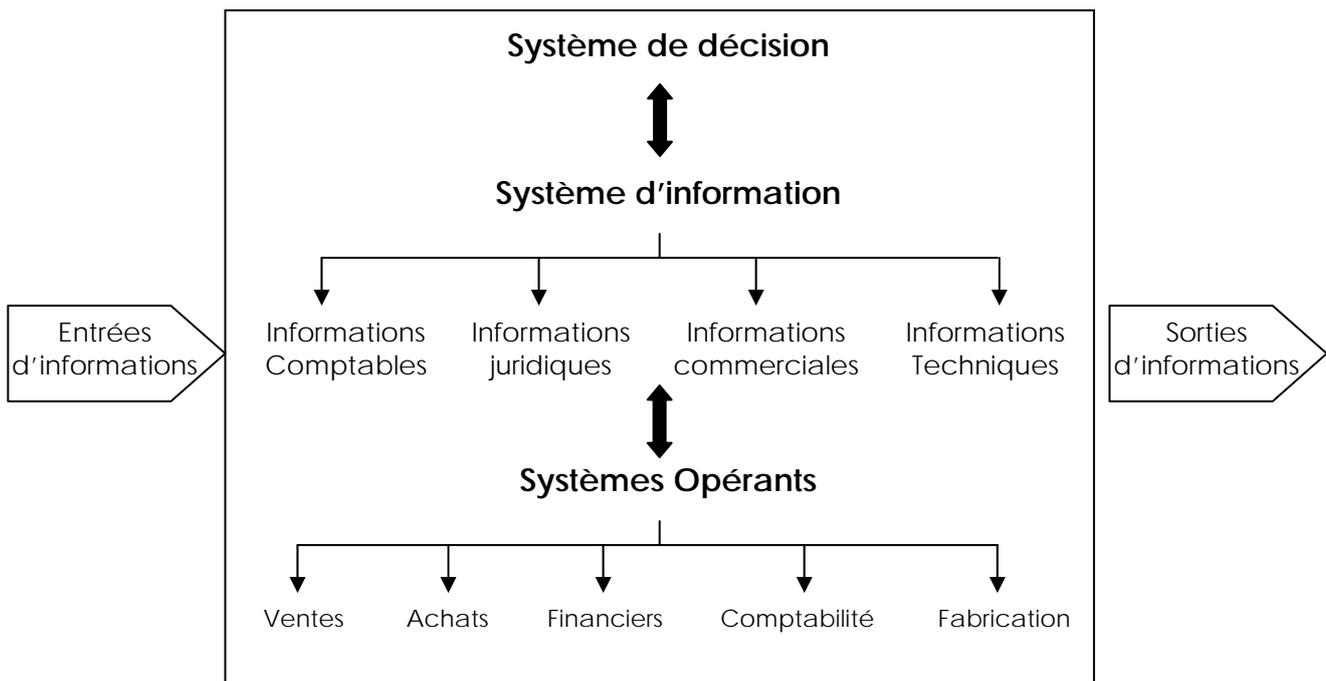


Figure 1.3 : Schéma de la mise en place du système d'information.

Tout système d'information, quel que soit son objet, peut s'analyser comme une réponse spécifique à quelques questions essentielles, à savoir :

- Que veut-on faire ?
- De quelle information a-t-on besoin ?
- Quelles données à collecter ?
- Avec quelle régularité ?

- Comment les collecter, les vérifier, ...etc. ?
- Comment les classer, les associer, les répertorier en vue de leur utilisation optimale ?
- Quels traitements leur appliquer ? quelles transformations éventuelles leur faire subir ? quels calculs à effectuer ?
- Comment les communiquer ? à qui ? sous quelle forme ? à quel moment ?

### **9. Système d'information géographique :**

Le système d'information qui a recours à une base de données spatiales pour trouver une réponse à des requêtes de nature géographique au moyen de diverses manipulations, telles que le tri, la recherche sélective, le calcul, l'analyse spatiale et la modélisation. Il est connu par abréviation S.I.G (système d'information géographique) ou SIT (Systèmes d'Information du Territoire) et il définit :

- Le système d'information géographique (S.I.G) se définit comme étant un système d'acquisition, de gestion, d'analyse et de représentation des données. Il est spécifiquement conçu pour traiter des entités géographiquement référencées, c'est-à-dire dont on connaît les coordonnées  $x$ {longitude},  $y$ {latitude}, voire  $z$ {altitude} selon une projection donnée {Lambert, etc.} ;
- ..... le S.I.G est une méthode d'enregistrement, de gestion et d'extraction d'information relative à l'environnement terrestre et ayant une forme structurée. Cette information est définie, entre autre, par ses paramètres de localisation spatiale permettant de la manipuler et de la cartographier de plusieurs manières [BON, 1994].

Le terme de « système d'information à référence spatiale » (SIRS) a été proposé comme étant plus générique, il s'est notamment largement répandu au Canada. Mais, le terme « système d'information du territoire » (SIT) est généralement utilisé dans les domaines du cadastre et de l'aménagement du territoire [KNO, 2005].

Qu'il soit dénommé SIG, SIRS ou SIT, le système d'information géographique est un ensemble organisé de matériels informatiques, de logiciels, de données géographiques et de personnels capables de saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter toutes formes d'informations géographiquement référencées.

Un système d'information est un objet artificiel greffé sur un objet naturel pouvant être une organisation. Il est conçu pour mémoriser un ensemble d'images de l'objet réel à différents moments de sa vie. Il constitue ainsi une extension de la mémoire humaine, qui amplifie la capacité de la mémorisation des acteurs et facilite leur prise de décision [CEM, 2000].

## 10. Historique du S.I.G :

### a. Période des précurseurs (années 60) :

- Développement "aléatoire";
- Travaux pionniers des laboratoires de calcul (USA principalement) [BEL, 2007];
- Applications pilotes (USA Bureau of the Census, militaires).

### b. Expérimentation (années 70) :

- Arrivée des unités graphiques, informatique des spécialistes ;
- Apparition des premières compagnies de logiciels de S.I.G ;
- ESRI 1969, Intergraph, Computer Vision, Synercom.

### c. Mise en oeuvre (années 80) :

- Développement des applications;
- Diffusion des outils (Ex: ArcInfo 1982<sup>[1]</sup>);
- Essor de la recherche, mise en place des programmes d'enseignement;
- Emergence d'une communauté d'utilisateurs.

### d. Maturité (années 90) :

- Généralisation des applications et élargissement des thématiques;
- Multiplication des outils, apparition du Desktop GIS;
- Apparition d'un marché commercial;
- S.I.G sur internet.

### e. Diffusion (années 2000) :

- S.I.G Mobile (Geolocation based services);
- Interopérabilité [RIE, 2001].

## 11. Les fonctionnalités du S.I.G :

Le système d'information est défini par Burrough [BUR, 1986] en fonction des opérations que permet cet outil informatique :

- La saisie (numération) des données ;
- Le stockage (base de données graphiques et attributaire) ;
- L'analyse (requête, modélisation, simulation) ;
- La sortie (production de cartes, tableaux et graphiques, exportation et transfert de fichiers).

Le S.I.G offre cinq fonctionnalités, plus connues sous le terme des «5A» (Abstraction, Archivage, Analyse, Affichage et Acquisition) [DEN, 1996] (Fig. 1.4).

---

<sup>[1]</sup> En 1982, Esri lance ARC/INFO son premier S.I.G commercial. Cette même année voit la naissance de PC ARC/INFO solution S.I.G autonome sur PC.

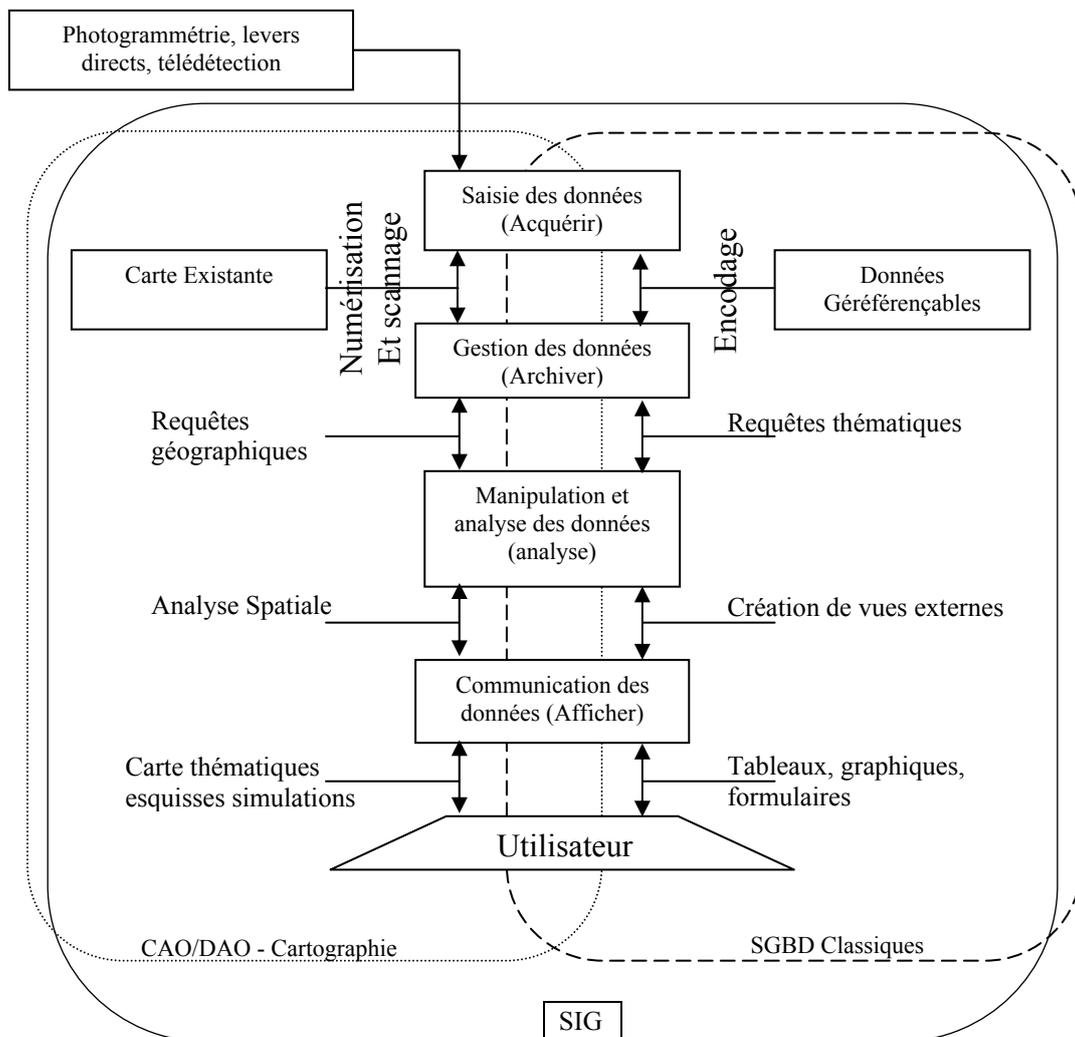


Figure 1.4: Les fonctionnalités du S.I.G [NOT, 2002].

Les fonctionnalités sont :

- L'acquisition des données localisées dans une base d'information géographique ;
- L'archivage des informations sous forme de plans thématiques, permettant un accès rapide ;
- L'accessibilité aisée à l'ensemble des informations par un affichage des couvertures ou par un accès direct aux fichiers informatiques ;
- L'analyse des informations par divers traitements spatiaux basés sur une ou plusieurs couches (s), et conduisant à produire une information inédite ;
- La valorisation des résultats sous différentes formes : tableaux, cartes et consultations à l'écran [AUG, 2004].

## 12. La représentation de l'information géographique :

### 12.1. Classification des informations géographiques :

Toute tentative de classification des informations nous conduit à une représentation dans un système quadripolaire comprenant :

- Les informations dites « topographiques », comme les cartes de base, les plans cadastraux, ...etc;
- Les informations dites « thématiques », comme les plans de secteur, les plans d'aménagement, les cartes pédologiques, géologiques, ...etc. ;
- Les informations dites « modèle numériques », comme les modèles numériques de terrain (MNT);
- Les informations dites « images », comme les ortho-photos numériques, les données satellitaires fournies par « Landsat »<sup>[1]</sup> ou « Spot »<sup>[2]</sup> par exemple.

Dans un environnement informatique graphique, l'unité formelle de ces quatre pôles prend un format bipolaire dite la « Dualité Raster -Vecteur ».

- Le domaine vectoriel recouvre les informations « topographique », « thématique » et « modèles numériques » ;
- Le domaine Raster (image numérique) recouvre les informations « topographiques », « thématiques » et « image ». Il comprend à la fois des données à traiter qualitativement (photos, pour certaines applications) et quantitativement (images classées, cartes thématiques).

### 12.2. Dualité Raster - Vecteur :

- Le mode Raster représente l'espace étudié par une grille régulière de cellules pour former une image constituée des lignes et des colonnes (Fig. 1.5 et 1.6). Le mode Raster que Collet [COL, 1992] propose de nommer en français mode image, consiste à poser sur la carte à saisir une grille à mailles petites et carrées puis à enregistrer sous forme matricielle la nature du sol dans chaque surface élémentaire ainsi définie [LEG, 1996]. Les données de ce mode ont l'avantage d'être exhaustives, mais l'inconvénient est de générer des fichiers de taille importante [ZWA, 2000] ;
- Le mode vecteur présenté sur les Fig. 1.5 et 1.6, utilise les concepts géographiques de point, lignes et polygones pour représenter chacune des entités de l'espace géographique. Ce mode de stockage de l'information est adapté aux données discrètes, comme des positions de silos (points), un réseau hydrographique (lignes) ou encore des limites de parcelles (polygones). L'intérêt particulier de ces données est que l'on réalise ainsi une cartographie thématique en ne choisissant que ce que l'on souhaite avoir dans sa base de données. Mais très vite se pose la question de la structuration plus compliquée de la base de données.

---

<sup>[1]</sup> Le programme Landsat est un des plus anciens programmes américains d'observation par satellite de la surface terrestre. Sept satellites Landsat ont été lancés depuis le 23 juillet 1972. Le dernier, Landsat 7, a été lancé le 15 avril 1999.

<sup>[2]</sup> SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre ou Satellite Pour l'Observation de la Terre) est une famille de satellites de télédétection français civils d'observation de la terre. Cinq exemplaires ont été lancés entre 1985 et 2002. Deux nouveaux satellites devraient être lancés à compter de 2013.

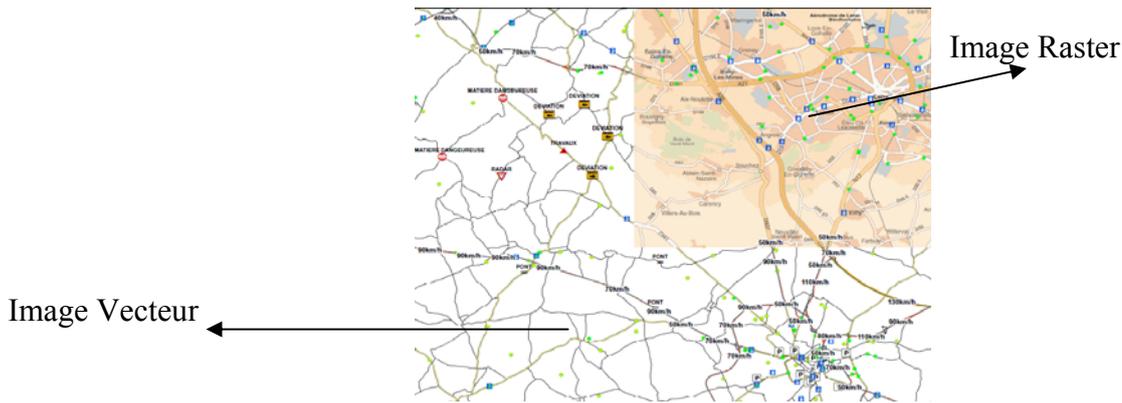


Figure 1.5 : Mode Raster et Vecteur.

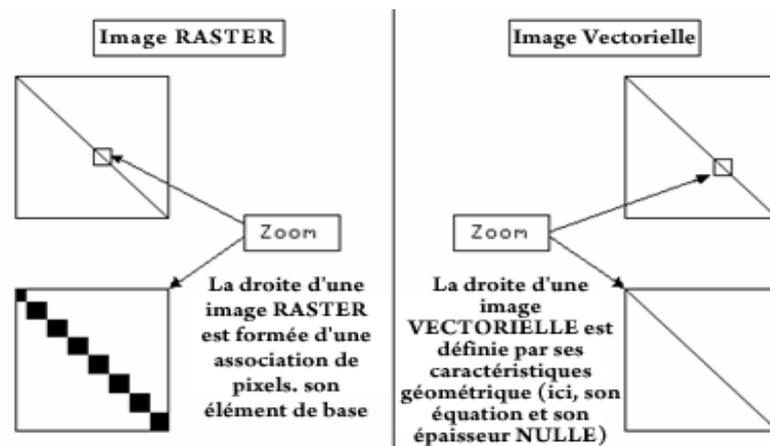


Figure 1.6 : Représentation des images Raster et Vecteur.

Ces deux représentations exigent des moyens d'acquisition des données bien distincts. On peut citer les moyens suivants :

- En vectoriel :
  - Table de numérisation ;
  - Restituteurs analytiques<sup>[1]</sup>;
  - Logiciels de vectorisation d'une image Raster.
- En matriciel :
  - Caméras métriques fournissant les photos à numériser ;
  - Scanner (multispectral digital, ...etc.) ;
  - Caméra vidéo à sortie numérique;
  - Logiciels de Rastring à partir d'une base vectorielle.

Les domaines « vecteur et Raster », se sont développés séparément. Les données vectorielles possédaient une structuration minimale (possibilité d'identification) complétées ensuite par une structure topologique afin de traiter les données surfaciques et les réseaux donnant naissance aux premiers S.I.G.

<sup>[1]</sup> Les restituteurs analytiques permettent une meilleure rapidité de mise en place et d'exploitation des clichés.

Les données Raster sont développées dans l'environnement de la télédétection par les logiciels des corrections géométrique, radiométrique et de classification [MAR, 1988].

La dualité Raster –vecteur modifie considérablement le paysage de l'information géographique en créant un système fermé. Cette possibilité est un élément essentiel à une cartogénèse<sup>[1]</sup> car il permet de reproduire, par des algorithmes précis, différents documents intermédiaires évitant ainsi la création de redondances.

La dualité Raster – vecteur permet une articulation entre deux logiques : une logique locale pour les vecteurs et une logique globale pour les images numériques.

Elle conduit à une extension du concept S.I.G vers une intégration des données adaptée à :

- La transformation de données d'origines différentes, de natures différentes;
- La mise à jour de données sous différentes formes;
- L'extraction d'information;
- La gestion cohérence d'un ensemble de multicouches de données en évitant les redondances;
- La superposition (ou croisement) de données de couches différentes.

La base de données qui est le moteur central de ce système, est un outil d'aide à l'organisation et à l'interrogation. Le croisement peut être réalisé sous forme vectorielle ou Raster. Les deux démarches sont complémentaires, offrant une plus grande souplesse de traitement, et mieux adaptées à la recherche d'une solution bien spécifique.

Le croisement doit être considéré comme une technique générale incluant :

- Les algorithmes de classification (télédétection).
- La théorie de morphologie mathématique.

Et combinant des données vectorielles et Raster via des tables de décision appliquées à des domaines thématiques et paramétriques.

### **13. Domaines d'application :**

Les domaines d'application des S.I.G sont aussi nombreux que variés (Fig. 1.7). Citons cependant:

- Les applications touchant l'environnement (météorologie, océanographie, changement climatique) ;
- L'aménagement du territoire (ex. urbanisme, agriculture de précision et sylviculture <sup>[2]</sup>)
- La prospection (ex. pétrole, gaz) ;
- La prévention et la gestion des catastrophes naturelles ;

---

<sup>[1]</sup> Processus qui permet de comprendre l'organisation d'un objet dans un paysage. Elle est basée sur l'élaboration de modèles issus de la chorologie (une science issue de la biogéographie qui étudie la répartition géographique des espèces vivantes).

<sup>[2]</sup> Ensemble des techniques permettant la création et l'exploitation rationnelle des forêts tout en assurant leur conservation et leur régénération.

- La surveillance des traités [OCD, 2004] (ex. environnement, désarmement (C3R)<sup>[1]</sup>).

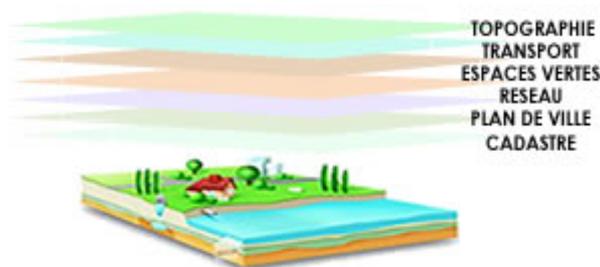


Figure 1.7 : Domaines d'application du SIG.

## 14. Présentation des principaux logiciels de S.I.G :

Il existe plusieurs produits sur le marché, on peut le diviser en deux classes :

### 14.1. Logiciels en mode vectoriel :

- **ArcGIS**

Il est conçu par la société ESRI. ArcGIS 9x est constitué de différents éléments :

- ArcGIS Desktop : suite intégrée d'applications S.I.G professionnelles;
- ArcGIS Engine : composants pouvant être incorporés par des développeurs afin de personnaliser des applications S.I.G;
- Applications S.I.G pour serveur : ArcSDE®, ArcIMS® et ArcGIS Server;
- Applications S.I.G nomades : ArcPad®, ainsi qu'ArcGIS Desktop et ArcGIS Engine pour les tablettes PC.

ArcGIS Desktop comprend une suite d'applications intégrées: ArcCatalog, ArcMap, ArcGlobe, ArcToolbox ainsi que ModelBuilder. Il est vendu sous trois niveaux incluant plus ou moins de fonctionnalités : ArcView, ArcEditor et ArcInfo.

- ArcMap : application centrale qui effectue toutes les tâches associées aux cartes, y compris la cartographie, l'analyse spatiale et la mise à jour ;
- ArcCatalog : organisation et gestion des données ;
- ArcToolBox et ModelBuilder : géotraitement ;
- ArcGlobe : visualisation 3D dynamique.

<sup>[1]</sup> D'un point de vue militaire, l'observation de la terre est un élément vital de ce que l'on appelle le C3R (commandement, communication, conduite et renseignement), notamment en ce qui concerne le renseignement et la conduite des opérations. Ainsi, elle offre un moyen unique de suivre le déploiement de forces hostile et de disposer en temps réel d'une image de l'évolution de la situation sur un théâtre d'opérations donné. L'observation de la terre s'est également révélée un outil efficace pour surveiller l'application des traités de désarmement [OCD, 2004]

L'une des suites logicielles les plus complètes du marché, ArcGIS propose également de nombreuses extensions tels que Spatial Analyst (module raster) et 3D Analyst.

- **MapInfo**

Mapinfo est un logiciel S.I.G qui présente une inter-opérabilité importante, en raison d'un convertisseur de formats intégrés. Sur le plan des fonctions disponibles, il est moins complet qu'ArcGIS mais s'avère toutefois suffisant pour de nombreuses applications. Afin de pouvoir effectuer des calculs raster, il est nécessaire de lui adjoindre le module additionnel Vertical Mapper.

- **Géoconcept**

Il est développé par une société française, ce logiciel se démarque de la majorité de ses concurrents en proposant une organisation basée sur un modèle "objet" et non sur une association table/entité.

- **APIC**

D'une conception française, ce logiciel fonctionne également en mode objet et il est particulièrement adapté pour la gestion des réseaux. Basé sur un langage de programmation en français, il est caractérisé par une adaptabilité élevée. Issu du monde UNIX, son application Windows est relativement austère, ce qui limite en partie sa diffusion.

- **Geomedia**

La suite logicielle Geomedia comprend une gamme importante de logiciels :

- GeoMedia Professional : digitalisation, analyse, présentation cartographique etc.;
- GeoMedia Terrain : création et analyse de MNT;
- GeoMedia Image : traitement d'images;
- GeoMedia Grid : analyse de données raster;
- GeoMedia : version allégée de GeoMedia Professional;
- GeoMedia WebMap : applications Web SIG;
- Ainsi que Image Station Stereo for GeoMedia, GeoMedia Fusion, GeoMedia Transaction Manager, GeoMedia VPF.

- **StarGIS**

La société belge « STAR Informatic » propose une gamme variée de logiciels SIG:

- STAR GIS est une plate-forme S.I.G bureautique conçue pour interroger et mettre à jour des bases de données, produire des rapports, réaliser des analyses thématiques etc ;
- STAR NeXt est une plate-forme S.I.G par Internet;
- WinSTAR est un S.I.G professionnel.

- **Manifold** : il est proche de MapInfo, ce logiciel est d'une diffusion actuellement anecdotique en France.

- **Savane** : Il s'agit d'une suite logicielle particulièrement complète. Ce logiciel souffre d'une interopérabilité très limitée et d'une architecture complexe, ce qui explique sa diffusion limitée au monde universitaire.
- **Jump** : c'est un logiciel S.I.G vectoriel gratuit, il intègre toutes les fonctionnalités de base nécessaires à la gestion d'un S.I.G de taille réduite.

#### 14.2. Logiciels en mode RASTER :

- **IDRISI** : est un S.I.G en mode image, ainsi qu'un système puissant de traitement d'images, développé par l'université américaine de Clark.
- **SAGA** : il s'agit d'un logiciel modulaire libre. SAGA propose de nombreuses potentialités, notamment en ce qui concerne l'analyse topographique.
- **Grass** : c'est un logiciel libre et très complet. Grass offre une interopérabilité importante et présente l'avantage de pouvoir fonctionner sous Linux.
- **Visualiseurs** : il est gratuit et il permet de lire un nombre très important de formats S.I.G propriétaires.

#### 15. Conclusion :

L'information géographique peut être définie comme l'ensemble de la description d'un objet et de sa position géographique (coordonnées X, Y, Z) à la surface de la terre. Ces informations géographiques peuvent être gérées dans des Systèmes d'Information Géographique (S.I.G).

Qu'il soit dénommé SIG, SIRS ou SIT, le système d'information géographique s'appuie sur les technologies de base de données en lui ajoutant des capacités de description et d'analyse spatiales.

Aujourd'hui, les systèmes d'information géographiques représentent un marché de plus d'un milliard d'euros sur le territoire français. Les utilisateurs de S.I.G dépensent parfois chaque année des centaines de milliers d'euros en conseil, logiciels, matériels, données, formation et développement.

Les systèmes d'information géographiques jouent un rôle prépondérant puisqu'ils combinent les fonctions d'intégration, de gestion, d'analyse et de visualisation des données spatiales. Certains auteurs [KLE, 2001] vont jusqu'à affirmer que l'innovation à laquelle donnent lieu les systèmes d'information géographiques dans la société et les sciences, correspond au premier stade d'une révolution scientifique, technologique et intellectuelle aussi profonde que la révolution provoquée par l'imprimerie.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la modélisation des entités géographiques d'un réseau routier urbain des communes algériennes, pour pouvoir concevoir un système d'information géographique capable de gérer la circulation routière et les itinéraires de voyage.

**Chapitre II :**  
*La modélisation des réseaux routiers urbains*

« Réseau routier national est Constitué de 112 696 Km et 4 910 ouvrages d'arts, le réseau routier assure plus de 90% du volume des échanges, dont le plus important est enregistré sur le réseau économique de base. Cela reflète la prédominance du mode de transport routier par rapport aux autres modes. ».

Le site officiel du ministère des travaux publics algérien [MTP, 2012]

---

## 1. Introduction :

« De toutes les voies de communication, les routes sont celles dont le perfectionnement est le plus urgent, car ce sont les plus fréquentées. » [WAL, 1974].

La route est censée participer au processus de développement socio-économique. Ce qui lui vaut une attention toute particulière par l'état, qui la perçoit comme un instrument de sa stratégie territoriale, dans le dessein d'acquérir la maîtrise de son espace. La solidité du réseau routier est indispensable pour la bonne circulation des biens et des personnes.

Le réseau routier, tant en milieu rural qu'urbain, constitue un patrimoine public traversé par les citoyens et les visiteurs. Ces espaces communs sont les plus précieux d'une communauté, les espaces publics par excellence, ceux qui permettent d'accéder à tous les paysages.

De nos jours, se déplacer est devenu un aspect essentiel de la vie quotidienne : qu'il s'agisse de transports en commun ou de véhicules personnels, le vaste réseau formé de ces moyens de locomotion est immensément complexe à gérer. Sa gestion recouvre l'ensemble des techniques humaines et automatisées permettant d'assurer la surveillance des transports, au mieux un gain de performance dans l'acheminement des différents flux.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modulation du réseau routier national en milieu urbain, à la conception et à la réalisation d'un système d'information géographique, qui prend en charge la voirie routière ainsi que son évolution.

La base de données géographique est l'association entre une schématisation de la réalité et les objets décrivant cette réalité. Afin de réaliser cette schématisation, on va utiliser une conception basée sur la démarche de Merise qui est bien adaptée à la conception de S.I.G, dont la principale caractéristique est la modélisation relationnelle de la réalité, permettant ainsi de présenter les objets et leurs comportements ou leurs relations dans le monde réel.

Ce chapitre a pour objectif de répondre aux questions suivantes : Quelles sont les composantes d'un réseau routier urbain d'une commune algérienne ? Comment les modéliser ? Avec quelle méthodologie ? Et comment se localiser dans un milieu urbain ? Les réponses à ces questions forment le centre d'intérêt de ce chapitre.

## 2. Définition de l'urbain :

- Selon le dictionnaire, c'est « ce qui se rapporte à la ville, à l'agglomération humaine concentrée dans la cité, par opposition à ce qui est rural » [HAC, 2000].
- Autre définition de l'urbain : « agglomération d'une certaine importance, à l'intérieur de laquelle la plupart des habitants ont leur travail dans le commerce, l'industrie ou l'administration. » [ABI, 2006].

## 3. Définition de la rue :

Voie de circulation routière aménagée à l'intérieur d'une agglomération, habituellement bordée de maisons, d'immeubles, de propriétés closes.

La rue se distingue des autres voies urbaines (voirie) comme les allées, les cours ou les boulevards et avenues par sa relative faible largeur notamment, et par l'absence de contre-allées. Une rue particulièrement étroite peut être qualifiée de ruelle. Une rue ne possédant qu'un point d'entrée est une impasse ou un cul-de-sac. La (ou les) voie(s) permettant d'accéder à l'entrée d'une rue sont ses tenants; la (ou les) voie(s) situées à l'autre extrémité de la rue sont ses aboutissants.

Il peut y avoir une séparation des flux de circulation par type d'utilisateurs :

- Trottoirs pour les piétons, ou rue dédiée : rue piétonne ;
- Aménagement cyclable pour les vélos ;
- Chaussée pour les véhicules motorisés, éventuellement scindée en voies réservées aux bus et voies non réservées ;
- Rails pour le tramway.



Figure 2.1 : Le réseau routier de la commune d'Oran.

#### **4. Définition du réseau routier :**

Le réseau routier est l'ensemble des voies de circulation terrestres permettant le transport par véhicules routiers, et en particulier, les véhicules motorisés (automobiles, motos, autocars, poids lourds...).

#### **5. La distinction entre le terme « Route » et « Rue » :**

La distinction entre ces deux mots tient compte de différence contextuelle, La route est « une voie de communication terrestre aménagée, plus importantes que le chemin, située hors d'une agglomération ou reliant une agglomération à une autre » (opposé à rue), alors qu'une rue est une « voie bordé, au moins en partie, de maisons dans une agglomération » [ROB, 2007].

#### **6. Modélisation des données géographiques :**

##### **6.1. Présentation :**

Afin d'explicitier la notion de système d'information géographique, on peut partir de celle, plus générale, de système d'information (SI) qui est définie par la norme internationale ISO (5127-1-1983) de la manière suivante : « un système d'information est un système de communication permettant de communiquer et traiter l'information ». Nous pouvons donc en conclure qu'un S.I.G est, par définition, un système permettant de communiquer et traiter l'information géographique.

A partir de cette définition, nous constatons que l'élément essentiel d'un S.I.G est l'information géographique qu'il contient. Celui-ci peut alors être défini comme un ensemble reliant :

- Une information relative à un objet ou un phénomène du monde terrestre, décrit plus ou moins complètement par sa nature, son aspect et ses attributs; de plus cette description peut inclure des relations avec d'autres objets ou phénomènes ;
- Sa localisation sur la surface terrestre, décrite dans un système de référence explicite (référentiel géodésique).

##### **6.2. La définition des termes essentiels :**

- *Un modèle de données géographiques* : décrit des entités géographiques telles que les habitations, des unités administratives ou le réseau routier et les relations entre ces entités. Dans les modèles de données orientées objet, la définition inclut aussi habituellement les opérations effectuées sur les unités. Un modèle de données est indépendant de tout logiciel particulier. L'utilisateur peut donc mettre en œuvre le modèle de données dans n'importe quel logiciel de S.I.G Complet.
- *La structure de données géographiques* : met en œuvre un modèle de données particulier. Elle consiste en structures particulières de fichier qui sont utilisées pour représenter différents types d'entités. Par exemple, des unités administratives ou des étendues d'eau (ou le réseau routier) seront

représentées sous la forme de polygones c'est-à-dire une série de coordonnées dans laquelle la première est la même que la dernière. Une structure de données autorise des opérations logicielles qui définissent les relations entre les entités géographiques. Par exemple, une route peut coïncider avec une partie de périmètre d'un polygone qui définit une unité administrative.

- *Le format de données* : est un terme plus général généralement appliqué à un ensemble spécifique de structures de données dans le cadre d'un logiciel. Certains formats de données commerciaux ont été utilisés si couramment qu'ils sont devenus une norme de fait. Le format DXF (Drawing eXchange Format) par exemple a été élaboré initialement pour le logiciel AutoCAD. Il est maintenant pris en charge par la quasi-totalité des logiciels commerciaux de S.I.G.
- *Un dictionnaire de données* : est un document maître qui décrit le modèle de données en détail, ainsi que les codes éventuellement utilisés pour identifier les entités et leurs attributs ;
- *Un schéma de base de données* : est une description des relations logiques entre les règles d'intégrité qui définissent une base de données spatiales complète et détaillée [NUN, 2004].

### **6.3. Les méthodes de conception pour les applications géomatiques :**

Deux approches méthodologiques proposent des visions différentes pour modéliser la réalité. La première apporte une approche relationnelle, tandis que la deuxième est orientée « objet ». La méthode de développement rapide de l'application (RAD) supporte ces deux formalismes. Les méthodologies les plus connues sont :

- MERISE, la Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprise, est une méthode complète, qui ne propose pas que des formalismes, mais aussi un processus et une démarche. C'est une méthode de conception, de développement et de réalisation des projets de système d'information. Une partie importante est la modélisation des traitements et la modélisation des données.
- UML, Unified Modeling Language ou « langage de modélisation unifié », langage de modélisation objet unifié est une démarche orientée objet. Elle est née de la fusion de trois méthodes Orientées Objet Design (OOD)<sup>[1]</sup> de Grady BOOCH, OMT (Object Modeling Technique)<sup>[2]</sup> de James

---

<sup>[1]</sup> La méthode OOD (Object Oriented Design) fut conçue à la demande du ministère de la défense des Etats-Unis. Il avait mis en point des diagrammes de classe et d'objet, des diagrammes d'état-transition, et d'autres diagrammes de processus, pour mieux visualiser les programmes pendant l'exécution. Ces diagrammes devaient accompagner et améliorer l'organisation et la structure de programmes écrit en ADA et c++ [HUG, 2011].

<sup>[2]</sup> La méthode OMT (*Object Modeling Technique*) permet de couvrir l'ensemble des processus d'analyse et de conception en utilisant le même formalisme. L'analyse repose sur les trois points de vue: statique, dynamique, fonctionnel. donnant lieu à trois sous-modèles.

RUMBAUGH et OOSE (Object Oriented Software Engineering)<sup>[1]</sup> de Ivar JACOBSON. Couramment utilisé dans les projets logiciels, il peut être appliqué à toutes sortes de systèmes ne se limitant pas au domaine informatique.

- D'autres approches alternatives sont utilisées pour les conceptions de S.I.G et qui se basent sur l'une des deux premières méthodes (Merise ou UML) ou les deux en même temps. citons par exemple :
  - La modélisation en HBDS (Hypergraph Based Data Structure ) est due à F. Bouillé, présente une modélisation reposant sur la théorie des graphes et des hypergraphes, ainsi que sur la théorie des ensembles. Cette modélisation concerne « d'une part la structure des données, leur gestion, leur archivage, leur mise à jour, et d'autre part la structuration de l'information spatiale et aspatiale (thématique).
  - Le modèle MADS «Modélisation d'Applications à Données Spatio-temporelles» est un modèle conceptuel spatio-temporel, enrichi par un modèle dynamique : modèle des processus spatio-temporels. Cette extension est basée sur une analyse et une classification des processus spatio-temporels.
  - La méthode POLLEN «Procédure d'observation et de Lecture de L'environnement» a été développée dans le but d'intégrer des informations de nature différente dans un même système d'information. Elle a privilégié la représentation de l'espace et du temps indépendamment de tout système ou logiciel. Les techniques de conception de la méthode Pollen peuvent être utilisées par des non-informaticiens. La méthode Pollen apporte un certain nombre de notions originales telles que la désagrégation, les objets opaques et les liens fonctionnels. Elle s'appuie sur une vision globale et abstraite du système d'information. Elle s'appuie, d'une part, sur des concepts théoriques de représentation du temps et de l'espace, et d'autre part, sur le formalisme de la méthode OMT «Object Modeling Technique»
  - Le formalisme CONGOO introduit certains points intéressants comme la distinction entre attributs logiques et attributs graphiques. Les attributs logiques sont les caractéristiques des objets du monde réel tels que : identifiant, nom, prénom, etc. Les attributs graphiques concernent les caractéristiques visuelles de la représentation de l'objet à l'écran tels que : couleur, forme "carto"-graphique, etc.

---

<sup>[1]</sup> Object Oriented Software Engineering (OOSE) est un langage de modélisation objet créé par Ivar Jacobson. OOSE est une méthode pour l'analyse initiale des usages de logiciels, basée sur les « cas d'utilisation » et le cycle de vie des logiciels.

#### 6.4. Choix du formalisme :

Dans la structuration de notre modèle S.I.G, on s'appuiera sur la méthode MERISE employée dans l'élaboration des bases de données. Ainsi, on réalisera un inventaire des données disponibles (le dictionnaire de données) pour établir les relations qu'elles entretiennent via le modèle conceptuel de données (MCD), puis le modèle logique de données (MLD) et enfin le modèle physique de données (MPD) qui est l'image la plus proche des exigences du système informatique.

Notre choix s'est porté néanmoins sur MERISE, car on a considéré qu'il correspondait à notre besoin :

1. Son approche relationnelle correspond à l'élaboration de notre structure des données sous un SGBDR comme SQL-96, Access, ...etc;
2. On ne doit gérer que des éléments spatiaux simples (objets ponctuels). On n'a pas d'objets plus complexes (comme par exemple : polyligne, polygone...). Ainsi on ne doit pas gérer de règles topologiques (connexion, superposition, intersection...etc.) entre nos points. Nos suivis génèrent des positions ou des relevés « discrets dans le temps et dans l'espace ». On ne modélise pas de phénomènes continus, ni d'évolution d'objet. Donc notre modèle est relativement simple ;
3. De plus l'adaptation d'un formalisme comme UML aurait demandé plus de réflexion et donc plus de temps. Or on a considéré que dans notre cas même si on choisit une approche relationnelle ou une approche orientée objet, on n'aura pas de différence fondamentale aux résultats.

#### 6.5. Phases de la modélisation :

Pour modéliser les données au sein d'un S.I.G, on a recours à trois étapes successives :

1. *Le modèle conceptuel* : est indépendant des aspects logiciels et matériels. Il s'agit d'identifier les entités qui seront représentées et les relations qui les relient. On établit des liens logiques entre les entités de la base de données et cela permet souvent une première analyse par les différents intervenants concernés par la mise en place du S.I.G, même si ce ne sont pas des spécialistes en géomatique ;
2. *Le modèle logique* : permet d'établir les liens entre les thèmes étudiés. C'est la seconde phase de modélisation d'un SIG. Il inclut le choix de la structure de base de données (hiérarchique, réseau, relationnelle ou orientée-objet). Dans notre cas, le modèle relationnel est choisi ;
3. *Le modèle physique* : est la phase ultime, plus technique, concernant l'implantation dans l'ordinateur des concepts évoqués aux étapes précédentes.

Le tableau suivant résume l'architecture des trois niveaux du cycle d'abstraction :

Niveau	Préoccupation	Données	Traitements
1	Qui ? Que veut-on faire ?	Conceptuel	Conceptuel
2	Qui ? Quand ? Où ? comment ?	Logique	Organisationnel
3	Avec quels moyens ?	Physique	Opérationnel

Tableau 2.1 : Architecture des trois niveaux cycle d'abstraction [SEB, 2003].

## 7. Modélisation du réseau routier :

### 7.1. Présentation du réseau routier :

Les données spatiales de base pour le réseau routier contiennent des intersections et les segments de la route. Ils forment le cadre pour la définition d'autres caractéristiques. Les intersections sont codées en fonction du type de l'intersection (en forme de croix, en forme de T, en forme de Y, en forme de rond-point) et du type de dispositif de contrôle de la circulation actuelle (ex. panneaux de signalisation et gestion du trafic). Les segments de la route constituent le cadre pour un certain nombre d'autres caractéristiques géographiques définies en utilisant les systèmes des routes. Les noms de rues, par exemple, sont définis comme des routes. Le long de ces zones, la zone de vitesse et les signes de limitation de vitesse sont comptabilisés comme des événements linéaires ou ponctuels, respectivement.

Le réseau routier est en fait un gigantesque graphe dont les sommets sont les intersections et les arrêtes sont les segments de la route. Le routage est la recherche d'un chemin optimal, au sens d'un critère, pour relier un point de départ à un point d'arrivée. Le critère pourra être le chemin le plus court, le plus rapide ou le plus économique.

Ce qui suppose que les différents segments du graphe soient connus avec leurs longueurs, leurs plaques de signalisation, leurs positions GPS ou coordonnées géographiques de départ et d'arrivée et le cas échéant leurs coûts de péage [LAU, 2009].

### 7.2. Localisation des rues dans un milieu urbain :

#### 7.2.1. Introduction :

Pour se localiser sur la terre, il est nécessaire d'utiliser un système géodésique duquel découlent les coordonnées géographiques figurant sur les cartes. Celles-ci peuvent être exprimées soit sous la forme de longitude et latitude (coordonnées dites géographiques), soit en représentation cartographique plane (coordonnées dites en projection).

### 7.2.2. Les systèmes géodésiques :

Il existe trois systèmes pour exprimer une coordonnée sur terre : les systèmes de coordonnées cartésiennes, géographiques et projetées. Le système de coordonnées cartésiennes est très peu utilisé, il consiste à exprimer une position en X, Y, Z par rapport au centre O de la terre. Intéressons-nous donc au deux autres systèmes très répandus.

#### 7.2.2.1. Le système des coordonnées géographiques :

Ayant pour référence le centre O du système géodésique utilisé, les coordonnées sont déclinées sous forme de 2 angles : latitude et longitude. L'angle 0 de la latitude correspond à l'équateur, et l'angle 0 de la longitude au Méridien<sup>[1]</sup> de Greenwich<sup>[2]</sup>.

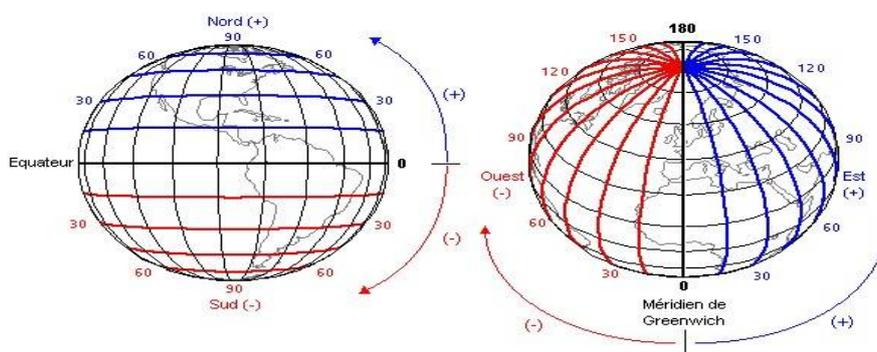


Figure 2.2 : Le système de coordonnées géographiques.

Plusieurs unités d'angle peuvent être utilisées mais les 2 principales sont les degrés décimaux et les degrés sexagésimaux (degré, minute, seconde).

#### 7.2.2.2. Le système des coordonnées projetées :

Comme chacun le sait la terre est ronde (ou presque...) et les cartes papiers sont plates ! Pour représenter une surface courbe sur une surface plate il y a une formule mathématique qui, une fois appliquée permet d'exprimer une position dans un repère 2D (o,x,y) en unités de longueurs (mètres...).

Ce système est très pratique à utiliser avec une carte car il permet de calculer très facilement des distances. Le type de projection plane de la terre utilisé couramment est la projection cylindrique de Mercator<sup>[3]</sup>, d'où découle le système de coordonnées UTM<sup>[1]</sup> (Universal Transverse Mercator). Celui-ci est notamment retenu pour le système GPS. Voici la grille mondiale correspondante :

<sup>[1]</sup> En géographie, un méridien est un demi grand cercle imaginaire tracé sur le globe terrestre reliant les pôles géographiques. Tous les points de la terre situés sur un même méridien ont la même longitude. On parle également d'arc de méridien entre deux latitudes.

<sup>[2]</sup> Un méridien où la longitude est définie comme égale à 0°. Il passe à travers l'Observatoire royal de Greenwich, à Greenwich (banlieue de Londres), au Royaume-Uni. Avec le 180° méridien qui lui est directement opposé, il définit les hémisphères est et ouest.

<sup>[3]</sup> La projection de Mercator est une projection cylindrique tangente à l'équateur du globe terrestre sur une carte plane formalisée par Mercator en 1569.

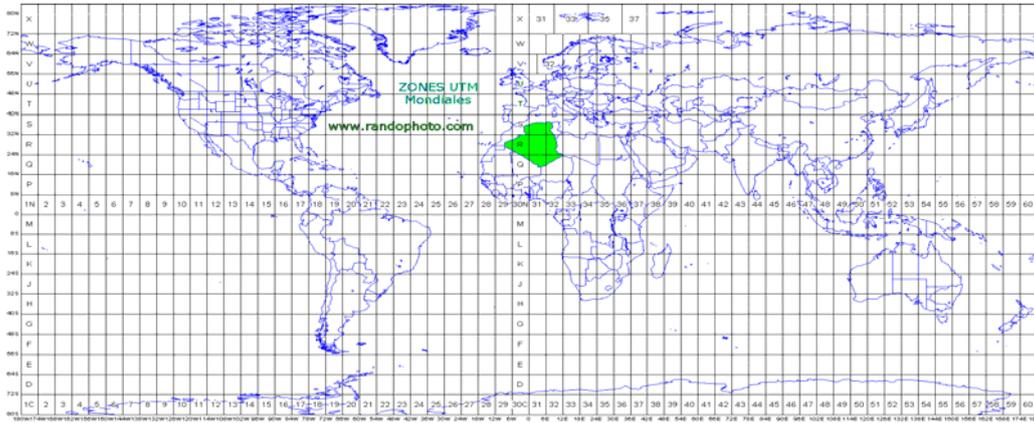


Figure 2.3 : Le découpage UTM planétaire (Il commence au parallèle 80° au Sud et se termine au parallèle 84° au Nord. Les zones polaires ne sont donc pas couvertes par la projection UTM).

L’Algérie est situé sur 4 fuseaux UTM Nord (Fig. 2.4) : entre le fuseau 29 et le fuseau 32. La wilaya d’Oran se trouve couverte par la zone UTM 30S.

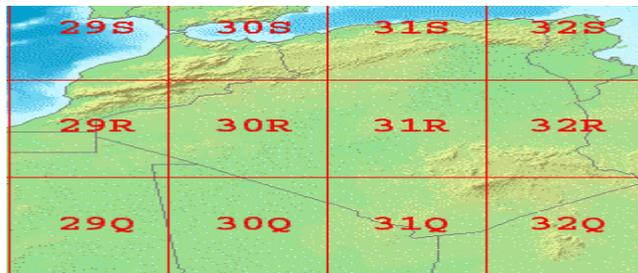


Figure 2.4 : Carte de l’Afrique et grille UTM (compatible GPS).

Plusieurs sites sur le net permettent de convertir les coordonnées géographiques aux coordonnées UTM et l’inverse, on se basant sur des formules mathématiques en géodésie.

Les coordonnées géographiques de l’université de USTO sont :  $+35^{\circ} 42' 27.35''$ ,  $-0^{\circ} 34' 46.02''$  ( $35.707597$ ,  $-0.579450$ ) UTM (standard zone 30, Central Meridian = -3, X, m = 718981.846194372 ; Y,m = 3954218.1530291).

Les coordonnées géographiques des entrées principales (Fig. 2.5) de l’université USTOMB Oran sont:

- La première rentrée principale :  $+35.704084$   $-0.577426$  ; (N :  $35^{\circ} 42' 14.702''$ , W  $0^{\circ} 34' 38.734$ ).
- La deuxième rentrée :  $+35.711036$   $-0.58143$ , (N :  $35^{\circ} 42' 39.73''$  W  $0^{\circ} 34' 53.148''$ ).

<sup>[1]</sup> UTM est un type de projection conforme de la surface de la terre. Cette projection est une projection cylindrique où l’axe du cylindre croise perpendiculairement l’axe des pôles de l’ellipsoïde terrestre au centre de l’ellipsoïde. L’UTM est également un système de référence géospatiale permettant d’identifier n’importe quel point sur notre planète.



Figure 2.5 : Les entrées principales de l’université USTOMB, Oran.

La distance vol d’oiseau mesurée entre deux points dont on connaît les coordonnées {lat1, lon1} et {lat2, lon2} est donnée par :

$$d = a \cos(\sin(lat1) \times \sin(lat2) + \cos(lat1) \times \cos(lat2) \times \cos(lon1 - lon2)) \quad (2.1)$$

Une formule, mathématiquement équivalente, mais moins sujette aux erreurs d’arrondis pour les courtes distances est :

$$d = 2 \times a \sin \sqrt{\sin\left(\frac{lat1 - lat2}{2}\right)^2 + \cos(lat1) * \cos(lat2) * \sin\left(\frac{lon1 - lon2}{2}\right)^2} \quad (2.2)$$

La valeur de d est obtenue dans une unité correspondant au rayon de la sphère terrestre (R = 6366 km). Si l’arc cosinus rend une valeur en radian (ce qui le cas dans la plupart des tableurs), il suffit de multiplier le résultat par R pour obtenir la valeur de d en km.

### 7.2.3. Localisation des segments :

Nous avons défini la rue comme une voie de circulation bordée de maisons dans une agglomération. La rue est connue par son appellation et composée d’un ensemble des segments. Un segment réunit tous les immeubles appartenant à un même îlot et situés en bordure d’une même rue, d’une même avenue ou d’une place [GRA, 1991]. Chaque segment est connu par sa longueur, sa largeur, la voie (monodirectionnel ou bidirectionnel) et ses panneaux de signalisation (Fig. 2.6).



Figure 2.6 : Les segments d’une rue dans un milieu urbain.

La route est organisée en réseau. Un réseau est un "ensemble de lignes connectant des nœuds pour la desserte d'un territoire, géré par un opérateur" [PUM, 1997]. Les lignes sont représentées par les routes

et les chemins qui desservent les lieux du territoire, les nœuds étant les intersections et l'opérateur, se localisent par des coordonnées géographiques (C.G) et GPS<sup>[1]</sup> (Fig. 2.7, 2.8, 2.9

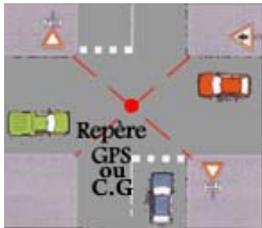


Figure 2.7: La position GPS et/ou la coordonnée géographique (C.G) est une donnée commune entre les quatre segments (Forme +).

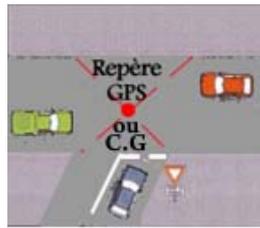


Figure 2.8: La position GPS et/ou la coordonnée géographique (C.G) est une donnée commune entre les trois segments (Forme Y).



Figure 2.9: Les quatre Positions GPS et/ou coordonnées géographiques dans un Rond point.

Dans un segment monodirectionnel, la position GPS (ou C.G) de départ (Nœud de départ) est une position GPS (ou C.G) d'arrivée pour le segment voisin (Fig. 2.10), mais dans un segment bidirectionnel la même position GPS (Nœud) joue le bi-rôle « du départ » et « d'arrivée » en même temps (Fig. 2.11).

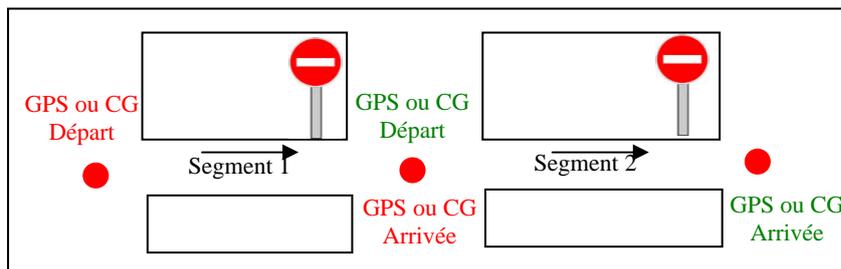


Figure 2.10 : Les segments monodirectionnels.

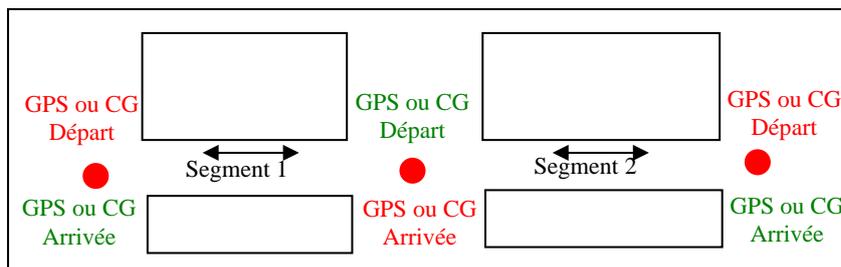


Figure 2.11: Les segments bidirectionnels.

<sup>[1]</sup> GPS (*Global Positioning System*). Système de géolocalisation par satellite. Il permet de déterminer les coordonnées géographiques de n'importe quel point situé à la surface du globe. Sa précision peut atteindre 1 mètre. Le GPS s'utilise en association avec une carte pour se repérer et se positionner : randonnées, voile, trek...

### **7.3. Gestion du réseau routier:**

#### **7.3.1. Présentation :**

Les systèmes de gestion des réseaux routiers assurent deux types de gestion qui sont :

- La gestion de circulation: vise uniquement à intervenir directement sur le comportement de chaque usager en présence d'une difficulté.
- La gestion du trafic: cherche à déplacer ou à modifier des flux de circulation, parfois à longue distance des problèmes rencontrés, pour optimiser globalement le gestion du réseau routier [CEU, 1994].

#### **7.3.2. La gestion de la circulation :**

La gestion de la circulation routière est une activité aujourd'hui largement répondue. Sa nécessité est en effet reconnue par la majorité des collectivités dans le monde. En réalité partout où circulent des automobiles. Pour l'homme « de la rue », précisément, son visage prend les traits d'une panoplie d'objets et de procédés familiers : panneaux de signalisation, marques au sol, règles de conduite inscrites dans le code de la route, aménagements routiers, réglementations relatives aux véhicules automobiles, ...ect [LAN, 2003].

La signalisation routière est composée de panneaux, du marquage au sol et des feux. Elle permet d'informer l'usager des règles en vigueur et de l'orienter dans ses déplacements. Bien conçue et réalisée, elle réduit les causes d'accident et facilite la circulation.

Les panneaux de signalisation routière sont des éléments de la signalisation routière. Ils désignent à la fois le dispositif sur lequel est implanté un signal routier et le signal proprement dit.

Placés sur le côté des routes, ils ont pour fonction :

- De rendre plus sûre la circulation routière en informant les usagers d'éventuels dangers qu'ils peuvent rencontrer;
- De faciliter cette circulation, en indiquant par exemple les directions à suivre;
- D'indiquer ou de rappeler diverses prescriptions particulières de police;
- De donner des informations relatives à l'usage de la route.

Les panneaux de signalisation routière forment un code de communication qui permet aux usagers de circuler en toute sécurité. Ce code repose sur trois fonctions : avertir en cas de danger, imposer une action- par exemple interdiction de tourner à droite ou obligation d'allumage des feux- et pour finir, conseiller ou guider les usagers.

La forme et la couleur indiquent la fonction du panneau. Cette première indication est précisée par un symbole. Si nécessaire, un panneau blanc fixé sous le panneau fournit des indications complémentaires [ACT, 2008].

Notre système d'information géographique est basé sur la distance des rues, et la vitesse de déplacement entre eux, et comme la gestion de la circulation influence directement sur cette vitesse, on va étudier quelques panneaux de signalisation qui contrôlent le déplacement du trafic.

- *Limitations de vitesse* : La vitesse est par définition limitée à 50 km/h en agglomération. Par conséquent, cette limitation (qui entre en vigueur à partir de panneau d'entrée d'agglomération) n'est pas toujours signalée par un panneau d'interdiction. La vitesse maximale peut être ponctuellement relevée à 70 km/h sur les routes importantes traversant les villes (rocares, rues sans habitation, etc.). La vitesse maximale autorisée est alors signalisée par un panneau d'interdiction indépendant (Fig. 2.12).



Figure 2.12: Limitation de vitesse, ce panneau indique la vitesse à ne pas dépasser.

- *Ralentisseur* : Le terme ralentisseur désigne exclusivement soit le ralentisseur de type dos d'âne (Fig. 2.13), soit le ralentisseur trapézoïdal (Fig. 2.14). Tous deux sont des surélévations de chaussée de 10 cm, qui règnent sur la largeur totale de la chaussée et font environ quatre mètres de long. Les ralentisseurs et les autres aménagements similaires sont placés en agglomération aux endroits où la circulation des véhicules à plus de 30 km/h présenterait un danger pour les autres usagers, surtout pour les piétons.



Figure 2.13: Ralentisseur de type dos-d'âne.



Figure 2.14: Ralentisseur de type trapézoïdal, cassis ou dos-d'âne.

- *Les feux tricolores* : règlent la circulation aux intersections. Ces feux sont implantés à droite de la chaussée. Ils sont répétés à gauche lorsque la voie est à sens unique, et au-dessus de la chaussée si la visibilité pose problème. Lorsque l'existence d'un feu risque de surprendre les usagers, le feu est annoncé par un panneau de danger (Fig. 2.15). Les feux tricolores s'allument alternativement dans l'ordre suivant : vert – jaune - rouge, et ainsi de suite.

- Le feu vert donne l'autorisation de passer si l'intersection est libre. En effet il est interdit de s'engager dans une intersection si la circulation ne permet pas d'en sortir avant que le feu passe de nouveau au rouge ;
- Le feu jaune ordonne de s'arrêter car il annonce le feu rouge. Sa durée est de 3 à 5 secondes et l'arrêt est obligatoire : le franchissement du feu est toléré uniquement si le véhicule est trop près du feu lorsque celui-ci passe au jaune et que l'arrêt brutal risque de provoquer un accident ou une perte de contrôle du véhicule ;
- Le feu rouge interdit de passer. Attention, le véhicule doit être arrêté avant l'aplomb du feu ou le marquage au sol existant : passage protégé ou ligne d'effet du feu.



Figure 2.15: Annonce de feux tricolores.

- *Passage de train et de tramway* : Lorsque le passage à niveau n'est pas protégé par des barrières, son emplacement est désigné par un signal de position. Ce signal est différent selon le passage à niveau concerne une ou plusieurs voies. Les conducteurs doivent céder le passage aux trains et par conséquent, il faut impérativement vérifier que la voie est libre avant de franchir le passage (Fig. 2.16-2.17). Les lignes de tramways traversent parfois les voies de circulations. Les conducteurs doivent céder le passage aux tramways. Ils sont donc informés par un panneau de danger (Fig. 2.18).



Figure 2.16: Passage à niveau muni de barrières à fonctionnement manuel ou automatique lors du passage des trains.



Figure 2.17: Passage à niveau sans barrière ni demi-barrière. Ce panneau peut être complété par le panneau "feux clignotants" ou par le panneau "stop"



Figure 2.18: Traversée de voies de tramways.

- *Autres panneaux de circulation* : Quelques panneaux avertissent des situations dangereuses et fournissent des informations sur les conditions du passage, par exemple : le poids autorisé (Fig. 2.19), la hauteur autorisée (Fig. 2.20), des travaux (Fig. 2.21), ...etc.



Figure 2.19: Accès interdit aux véhicules, aux véhicules articulés, trains doubles ou ensemble de véhicules dont le poids autorisé en charge ou le poids total roulant autorisé excède le nombre indiqué.



Figure 2.20: Accès interdit aux véhicules dont la hauteur, chargement compris, est supérieure au nombre indiqué.



Figure 2.21: Travaux. Ce panneau impose aux usagers le respect d'une règle élémentaire de prudence consistant à prévoir la possibilité d'avoir à adapter leur vitesse aux éventuelles difficultés de passage.

### 7.3.3. Le trafic routier :

#### 7.3.3.1. Définitions :

- (anglicisme) Circulation de nombreux véhicules sur un itinéraire, un réseau [HAC, 2003].
- est le déplacement de véhicules automobiles sur une route.

#### 7.3.3.2. Présentation :

Une particularité du trafic automobile est essentiellement liée à la conception de l'infrastructure qui est conçue, selon une demande projetée, pour répondre à un optimum collectif mais que chaque individu réalise son déplacement en cherchant à atteindre son optimum individuel, ce qui est souvent antagoniste avec l'optimum collectif. Les deux définitions ci-dessous montrent bien le double aspect individuel et collectif du trafic, l'aspect individuel étant représenté par le fait que le trafic est formé par différents véhicules et l'aspect collectif par le fait que le trafic est interprété comme un fluide (i.e. un flux de véhicules) [ESP, 2002].

La modélisation du trafic routier est un sujet relativement ancien, puisque les premiers travaux sur le sujet remontent à 1935 [GRE, 1935]. Ces travaux ont été à l'origine menés essentiellement par des ingénieurs soucieux de mieux maîtriser et optimiser les flux de trafic s'écoulant sur les grands réseaux routiers, soucieux également de mieux dimensionner les infrastructures nouvelles par une meilleure prévision des flux et des capacités.

#### 7.3.3.3. Variables et paramètres mis en jeu dans la modélisation du trafic :

L'élaboration de la théorie du trafic a permis de mieux comprendre et prévoir les interactions inter véhiculaires ainsi que le mouvement global du flux au niveau des réseaux autoroutiers. Chaque niveau de détail est caractérisé par des variables et des paramètres spécifiques. Lorsque les variables sont

utilisées pour décrire le véhicule individuel et pour exprimer le comportement de chaque conducteur, on parle des variables microscopiques. La description du comportement global du flux de véhicules fait appel à des variables dites macroscopiques.

1. *Variables microscopiques du trafic* : se sont des variables liées à un véhicule individuel et sont interaction avec son environnement. Ces variables sont exprimées pour chaque véhicule et sont étroitement liées à sa dynamique. (exp. Espace inter – véhicule, Temps inter – véhiculaire, Vitesse du véhicule, Accélération instantanée).
2. *Variables macroscopiques du trafic* : ces variables permettent de décrire l'état du flux de trafic d'une manière agrégée. (ex. Débit du trafic, La densité moyenne (appelée concentration), Taux d'occupation, Vitesse moyenne du flux de trafic).

#### **7.3.3.4. Instruments de mesures des variables de trafic :**

Dans le domaine du trafic, plusieurs technologies ont été mises en œuvres pour la mesure des variables donnant naissance à plusieurs types de capteurs. Parmi ces outils de mesure, on cite quelques unes :

- Boucle magnétiques : ont été introduite dans le domaine du trafic depuis 60 et sont à ce jour, les capteurs les plus utilisés principalement dans la commande du trafic en temps réel.
- Système de détection à tube pneumatique : la capteur consiste en un tuyau situé le long de la section de route, utilisé pour la mesure du débit. Le passage d'un véhicule est détecté par l'écrasement du tube pneumatique qui actionne un relais via un manomètre. Il est alors possible de compter le nombre d'essieux passant sur le capteur en cumulant les impulsions dans un compteur. Ceci permet d'estimer le débit du trafic et la vitesse des véhicules (à condition d'utiliser deux tubes distants d'un mètre). L'avantage d'un tel capteur est qu'il est facile à installer et à déplacer.
- Caméra vidéo : est placée sur une section d'autoroute. Les images récupérées sont envoyées à une unité de traitement qui permet l'extraction des paramètres désirés en utilisant des algorithmes de reconnaissances d'images. Cependant, bien que les technologies des caméras soient très avancées, ce type de capteurs reste encore très cher. L'exactitude des mesures est étroitement liées aux conditions météorologiques qui peuvent altérer la visibilité, par exemple en cas de mauvais temps, mais aussi selon le choix de son emplacement [IOR, 2006].

#### **7.3.3.5. La modélisation du trafic routier:**

Les comptages routiers permettent de mesurer la densité de flux du trafic routier. Les informations mesurées concernent le nombre de véhicules (poids lourd, véhicules légers), et parfois la vitesse moyenne pratiquée. Les données sont exprimées en Trafic Moyen Journalier - Annuel (TMJ/A) pour l'ensemble des véhicules et pour les poids lourds. Le trafic tous véhicules correspond à la moyenne

journalière de la fréquentation de tous les véhicules confondus circulant en un point de comptage donné pour tous les jours de l'année. Le trafic poids lourds, quant à lui, est une moyenne journalière de la fréquentation des véhicules de plus de six mètres de long en un point de comptage donné.

Pour avoir un modèle de flux routiers représentatif de la réalité, il faut disposer de nombreux comptages routiers aux différentes heures de la journée. Il est également utile de constituer des séries chronologiques (en TMJA) sur une période d'une vingtaine d'années de manière à pouvoir connaître les tendances d'évolution du trafic routier.

#### 7.4. Modèle conceptuel des données :

**7.4.1. Définition :** Un Modèle Conceptuel de Données est la formalisation de la structure et de la signification des informations décrivant des objets et des associations perçus d'intérêt dans le domaine étudié, en faisant abstraction des solutions et contraintes techniques informatiques d'implantation en base de données.

Remarque : avant de passer à cette l'étape, il faut d'abord créer le dictionnaire des données et un graphe de dépendances fonctionnelles (selon la méthodologie de MERISE), mais nous se limitons dans ce contexte que par le modèle conceptuel des données et les recensements des individus et des relatons.

#### 7.4.2. Formalismes :

Le formalisme présenté ci-dessus est une représentation conceptuelle des points (postes) de comptage, utilisés pour calculer le débit de trafic dans notre réseau routier. Ce MCD décrit les relations (points) de comptage entre les individus « segment » et « appareils de mesure ». (Fig. 2.22)

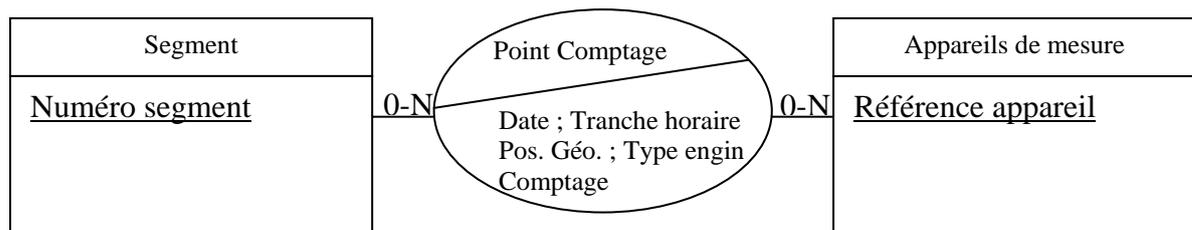


Figure 2.22: Modèle conceptuel relationnel de données "comptages routiers".

Le modèle suivant (Fig. 2.23) représente une vision globale de la gestion de circulation d'un réseau routier urbain, ce dernier est composé de :

- Les segments avec leurs vecteurs des sommets (ce vecteur est un ensemble des positions géométriques utilisées pour tracer des polygones sur la carte géographique) ;
- Les nœuds ou les intersections ;
- Les partitions administratives (wilaya, commune, quartier) ;

- Les feux tricolores et leurs temps d'attente ;
- Les ralentisseurs, leurs types et leurs temps de ralentissement;
- Les plaques de limitation des vitesses ;
- Les passages de train et de tramway, les horaires de passage et temps d'attente du passage prévu;
- Intégration d'autres contraintes importantes dans la table « segment », comme la hauteur autorisée, le poids autorisé, le niveau, la distance du segment, la voie, ...ect.
- Calcul le débit du trafic sur chaque segment routier.

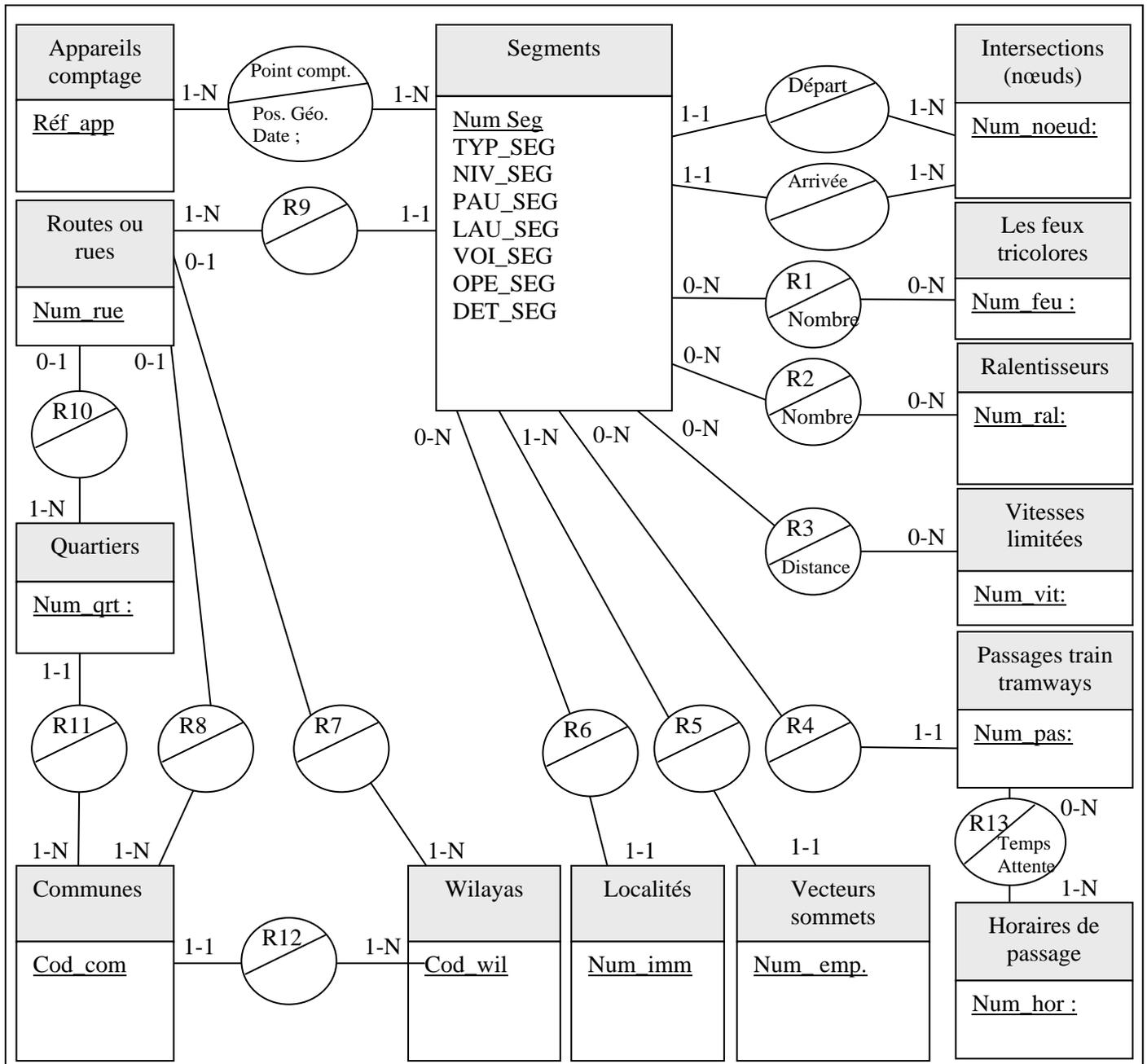


Figure 2.23: Modèle conceptuel des données (M.C.D).

### 7.4.3. Recensement des relations et des individus :

**7.4.3.1. Recensement des relations :** ce tableau ci-dessous recense toutes les relations entre les individus utilisés dans le modèle conceptuel des données validé. Les cardinalités sont le nombre des occurrences autorisées entre l'individu et la relation. Quelques relations possèdent leurs propres entités.

N°	Relations	Individus	Cardinalités	Entités
1	Noeud départ	Segments	1-1	
		Nœuds	1-N	
2	Nœud Arrivée	Segments	1-1	
		Nœuds	1-N	
3	R1	Segments	0-N	Nombre des feux
		Feux tricolores	0-N	
4	R2	Segments	0-N	Nombre des ralentisseurs
		Ralentisseurs	0-N	
5	R3	Segments	0-N	Distance de la vitesse limitée
		Vitesses	0-N	
6	R4	Segments	0-N	
		Passage train tramway	1-1	
7	R5	Segments	1-N	
		Vecteurs sommets	1-1	
8	R6	Segments	0-N	
		Localité	1-1	
9	R7	Routes ou rues	0-1	
		Wilayas	1-N	
10	R8	Routes ou rues	0-1	
		Communes	1-N	
11	R9	Segments	1-1	
		Routes ou rues	1-N	
12	R10	Routes ou rues	0-1	
		Quartiers	1-N	
13	R11	Communes	1-N	
		Quartiers	1-1	
14	R12	Communes	1-1	
		Wilayas	1-N	
15	R13	Passage train tramway	0-N	Temps d'attente nécessaire
		Horaire de passage	1-N	
16	Point de comptage	Segment	0-N	Date ; tranche horaire ; position géographique ; type engin ; comptage
		Appareil comptage	0-N	

Tableau 2.2 : Recensement des relations.

**7.4.3.2. Recensement des individus :** chaque individu est connu par son identifiant qui est unique et non vide. Les propriétés de chaque individu sont codées sur sept lettres (les trois premières lettres représentent le code de la propriété, un blanc souligné et les autres représentent le code de l'individu).

N°	Les individus	Les identifiants	Les propriétés	Observation
1	Segments	NUM_SEG	NUM_SEG TYP_SEG NIV_SEG PAU_SEG LAU_SEG VOI_SEG OPE_SEG DET_SEG	Numéro segment Type de segment Niveau Poids autorisé Longueur autorisée Voie : Opérationnel Longueur du segment.
2	Routes ou rues	NUM_RUE	NUM_RUE APP_RUE	Numéro de la rue Appellation
3	Quartiers	NUM_QRT	NUM_QRT APP_QRT	Numéro du quartier Appellation
4	Communes	COD_COM	COD_COM APP_COM	Code commune Appellation
5	Wilayas	COD_WIL	COD_WIL APP_WIL	Code wilaya Appellation
6	Localité	NUM_LOC	NUM_LOC TYP_LOC PRO_LOC DNA_LOC NBA_LOC	Numéro localité Type localité Nom et prénom ou raison sociale Date naissance : Numéro acte :
7	Vecteur sommets	NUM_EMP	NUM_EMP PCX_EMP PCY_EMP	Numéro d'emplacement Position carte x Position carte y
8	Horaire de passage	NUM_HOR	NUM_HOR JOU_HOR TDP_HOR	Numéro horaire Le jour : Temps début de passage du train.
9	Passage de trains ou tramway	NUM_PASS	NUM_PAS TPA_PAS TBA_PAS NGA_PAS	Numéro passage. Type du passage. Type de barrière. Nom du gardien.
10	Vitesse limitée	NUM_VIT	NUM_VIT VLI_VIT TEN_VIT	Numéro de vitesse. Vitesse limitée. Type d'engin.
11	Ralentisseur	NUM_RAL	NUM_RAL TYP_RAL TPR_RAL	Numéro de ralentisseur. Type. Temps prévu de retard.
12	Les Feux tricolores	NUM_FEU	NUM_FEU TYP_FEU TPA_FEU	Numéro de feu rouge. Type : Temps prévu d'attente.
13	Nœuds	NUM_NOEUD	NUM_NOEUD CGX_NOEUD CGY_NOEUD CGY_NOEUD CAX_NOEUD CAY_NOEUD	Num_noeud Noeuds.x Noeuds.y Noeuds.y Carte_x Carte_y
14	Appareil de comptage	REF_APP	REF_APP NIV_APP TYP_APP DAF_APP SER_APP	Référence appareil Numéro inventaire : Type : Date affectation : Service :

Tableau 2.3 : Recensement des individus.

## 7.5. Modèle logique des données :

### 7.5.1. Définition :

Le modèle relationnel est le modèle logique utilisé pour la construction d'une base de données utilisant un système de gestion de base de données (SGBD) relationnel. Au niveau logique, la relation est de type mathématique et correspond à une entité ou une relation telles que définie au niveau conceptuel. De façon plus pragmatique, une relation logique peut être vue comme un tableau à  $n$  colonnes (appelées « attributs ») qui jouent un rôle sémantique précis. Une ou plusieurs colonnes jouent le rôle de « clé » (c'est l'identifiant). Dans le formalisme couramment utilisé, la relation est représentée par un schéma qui est défini par le nom de la relation suivi de la liste des attributs dans laquelle on souligne le ou les attributs qui jouent le rôle de « clé » [PRE, 1995].

Remarque : selon la méthodologie de MERISE, avant de passer au niveau logique, il faut valider le MCD brut avec le modèle externe, pour avoir le MCD validé. Et nous passerons du Modèle Conceptuel des Traitements (MCT) au Modèle Organisationnel des Traitements (MOT). Dans notre cas, Nous présenterons seulement le MCD validé et les règles de passage du MCD au modèle logique des données.

### 7.5.2. Le passage du modèle conceptuel des données au modèle logique des données - relationnel (MLD-R) :

Il existe six règles de passage du modèle conceptuel des données au modèle logique des données relationnel (MLDR) :

1. Une entité se transforme en une relation (table) : Toute entité du MCD devient une relation du MLDR, et donc une table de la base de donnée. Chaque propriété de l'entité devient un attribut de cette relation, et dont une colonne de la table correspondante. L'identifiant de l'entité devient la clé primaire de la relation (elle est donc soulignée), et donc la clé primaire de la table correspondante.
2. Relation binaire aux cardinalités  $(X,1) - (X,n)$ ,  $X=0$  ou  $X=1$  : La clé primaire de la table à la cardinalité  $(X,n)$  devient une clé étrangère dans la table à la cardinalité  $(X,1)$  :
3. Relation binaire aux cardinalités  $(X,n) - (X,n)$ ,  $X=0$  ou  $X=1$  : Il y a création d'une table supplémentaire ayant comme clé primaire une clé composée des identifiants des 2 entités. On dit que la clé primaire de la nouvelle table est la concaténation des clés primaires des deux autres tables. Si la relation est porteuse de donnée, celles ci deviennent des attributs pour la nouvelle table.
4. Relation n-aire (quelles que soient les cardinalités) : Il y a création d'une table supplémentaire ayant comme clé primaire la concaténation des identifiants des entités participant à la relation. Si la relation est porteuse de donnée, celles ci deviennent des attributs pour la nouvelle table.
5. Association Réflexive. Il y a deux cas possibles :

- a. Premier cas : cardinalité (X,1) - (X,n), avec X=0 ou X=1 : la clé primaire de l'entité se dédouble et devient une clé étrangère dans la relation ou nouvelle table. Exactement comme si l'entité se dédoublait et était reliée par une relation binaire (X,1) - (X,n) (règle 2).
- b. Deuxième cas : cardinalité (X,n) - (X,n), avec X=0 ou X=1 : de même, tout se passe exactement comme si l'entité se dédoublait et était reliée par une relation binaire (X,n) - (X,n) (règle 3). Il y a donc création d'une nouvelle table.

6. Relation binaire aux cardinalités (0,1) - (1,1) : La clé primaire de la table à la cardinalité (0,1) devient une clé étrangère dans la table à la cardinalité (1,1).

**7.6.3. Formalisme :**

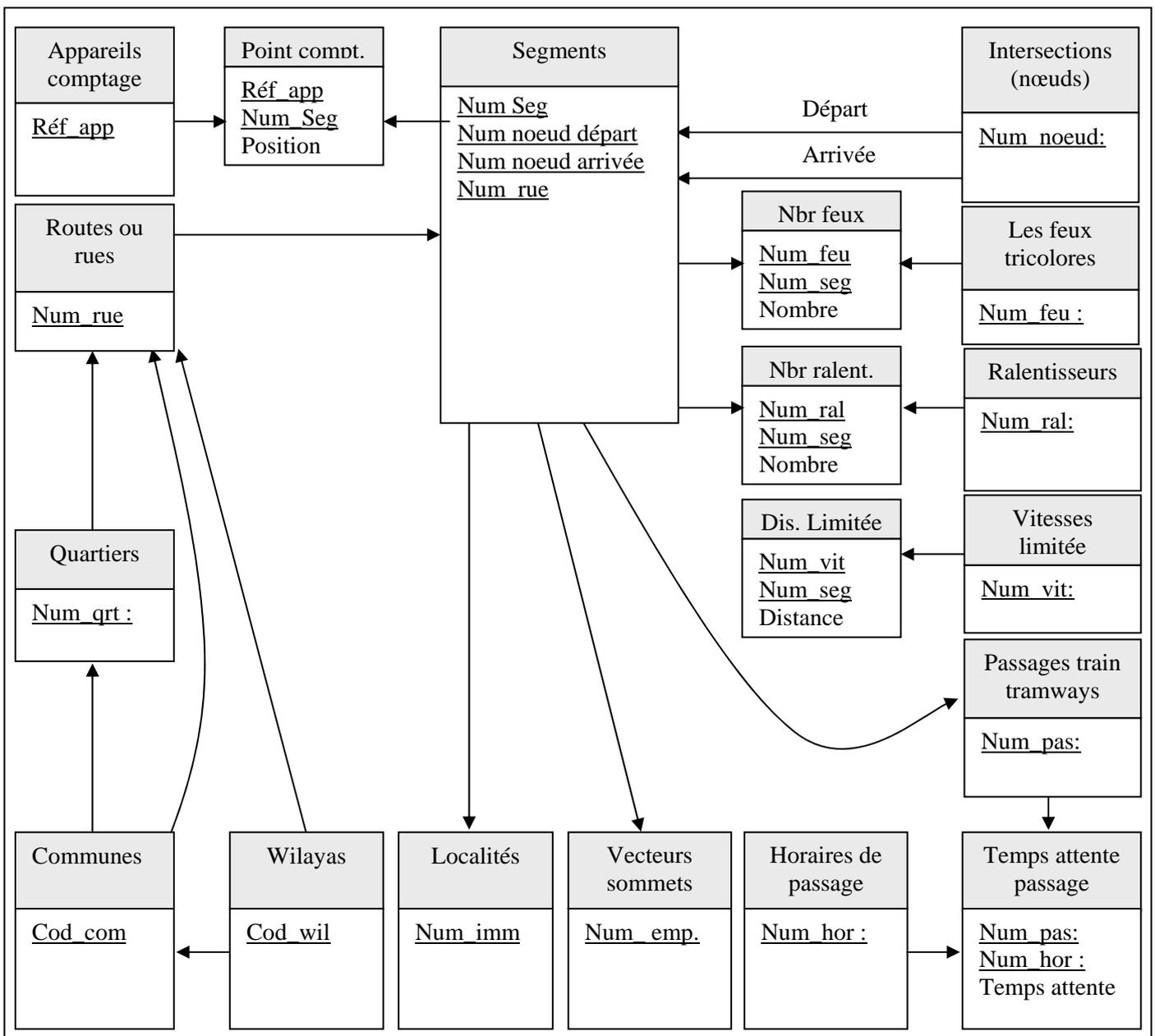


Figure 2.23: Modèle logique des données (M.L.D).

## 7.6. Modèle physique des données :

**7.6.1. Définition :** Cette étape consiste à implémenter le modèle dans le SGBD, c'est-à-dire le traduire dans un langage de définition des données. Le modèle physique des données (MPD) est propre à une base de données et permet de générer automatiquement les scripts (requêtes) de création des tables. Il contient les noms des tables. L'ensemble des champs (qui s'appelaient « attribut » dans le MCD) avec leurs types et précision. Les contraintes d'intégrités référentielles, les index, etc [NAV, 2010]. Le langage généralement utilisé pour ce type d'opération est le SQL, et plus spécialement le langage de définition de données du SQL.

### 7.6.2. Recensements des fichiers :

- Segments (NUM\_SEG, NUM\_NOEUD\_DEPART, NUM\_NOEUD\_ARRIVEE, TYP\_SEG, NIV\_SEG, PAU\_SEG, LAU\_SEG, VOI\_SEG, OPE\_SEG, DET\_SEG).
- Routes\_ou\_rues (NUM\_RUE, APP\_RUE, APA\_RUE, COD\_COM, COD\_WIL, NUM\_QRT).
- Quartiers (NUM\_QRT, APP\_QRT, APA\_QRT, COD\_COM).
- Communes (COD\_COM, APP\_COM, APA\_COM, COD\_WIL).
- Wilayas (COD\_WIL, APP\_WIL, APA\_WIL).
- Localité (NUM\_LOC, TYP\_LOC, PRO\_LOC, DNA\_LOC, NBA\_LOC, NUM\_SEG).
- Vecteur\_sommets (NUM\_EMP, , PCX\_EMP, PCY\_EMP, NUM\_SEG).
- Horaire\_de\_passage (NUM\_HOR, JOU\_HOR, TDP\_HOR).
- Passage\_de\_trains\_ou\_tramway (NUM\_PAS, TPA\_PAS, TBA\_PAS, NGA\_PAS, NUM\_SEG).
- Vitesse\_limitée (NUM\_VIT, VLI\_VIT, TEN\_VIT).
- Ralentisseur (NUM\_RAL, TYP-RAL, TPR\_RAL).
- Les\_Feux\_tricolores (NUM\_FEU, TYP\_FEU, TPA\_FEU).
- Nœuds (NUM\_NOEUD, CGX\_NOEUD, CGY\_NOEUD, CGY\_NOEUD, CAX\_NOEUD, CAY\_NOEUD).
- Nombre\_des\_Feux (NUM\_FEU, NUM SEG, NOMBRE).
- Nombre\_des\_ralentisseurs (NUM\_RAL:, NUM SEG, NOMBRE).
- Distance\_Limitée (NUM\_VIT, NUM SEG, DIS\_DLI).
- R13 (NUM\_HOR, NUM\_PAS, TPA\_R13).
- Appareils\_mesure(REF\_APP, APP\_APP, TYP\_REF, NIV\_APP).
- Point\_comptage (NUM\_SEG, REF\_APP, NUM\_POI, DAT\_POI, THO\_POI, PGE\_POI, TYP\_POI, COM) ;

## 7.7. Codification proposée :

1. Code Wilaya (Cod\_Wil), Table : Wilaya, Taille : 2

  X   XX : Numéro Série.

2. Code Daira (Cod\_Dai), Table : Dairas, Taille : 4

W W X X WW : Code Wilaya ; XX : Numéro Série.

3. Code Commune (Cod\_Com), Table : Communes, Taille : 4

W W X X WW : Code Wilaya ; XX : Numéro Série.

4. Code Quartier (Cod\_Quar), Table : Quartiers, Taille : 6

W W C C X X WW : Code Wilaya ; CC : Code Commune ; XX : Numéro Série.

5. Code Rue (Cod\_Rue), Table : Rues, Taille : 9

W W C C O O X X X WW : Code Wilaya ; CC : Code Commune ; QQ : Code Quartier; XXX : Numéro Série.

6. Code Segment (Cod\_Seg), Table : Segments, Taille : 13

W W C C O O R R R X X X X WW : Code Wilaya ; CC : Code Commune; QQ : Code Quartier; RRR : Code Quartier; XXXX : Numéro Série.

7. Code Local (Cod\_Loc), Table : Locaux, Taille : 15

W W C C O O R R R S S S S X X WW : Code Wilaya ; CC : Code Commune ; QQ : Code Quartier; RRR : Code Quartier; SSSS : Numéro Segment ; XX : Numéro Série.

8. Code Feu Tricolore (Cod\_Feu), Table : Feu\_Tricolore, Taille : 2

X X XX : Numéro Série.

9. Code Ralentisseur (Cod\_Ral), Table : Ralentisseurs, Taille : 3

X X X XXX : Numéro Série.

10. Code Passage de Train ou Tramway (Cod\_Pass), Table : Passage\_Train, Taille : 14

W W C C O O R R R S S S S X WW : Code Wilaya ; CC : Code Commune ; QQ : Code Quartier; RRR : Code Quartier; SSSS : Numéro Segment ; X : Numéro Série.

11. Code Vitesse Limité (Cod\_Vit), Table : Vitesse\_Limitee, Taille : 2

X X XX : Numéro Série.

12. Noeuds (Cod\_Noeud), Table : Noeuds, Taille : 10

W W C C X X X X X X WW : Code Wilaya ; CC : Code Commune ; XXXXXX : Numéro Série

13. Numéro Emplacement (Cod\_Emp), Table : Vecteur\_Emplacement, Taille : 13

W W C C O O R R R S S S S X WW : Code Wilaya ; CC : Code Commune ; QQ : Code Quartier; RRR : Code Quartier; SSSS : Numéro Segment ; X : Numéro Série.

## 8. Conclusion :

Un réseau est un ensemble de points géographiques reliés entre eux par des voies de transport. On fait ici référence au réseau routier (ensemble de lieux reliés entre eux par des voies routières).

La gestion du trafic cherche à déplacer ou à modifier des flux de circulation par contre La gestion de circulation vise à intervenir sur le comportement de chaque usager en présence d'une difficulté. Les deux types de gestion sont assurés par le système de gestion des réseaux routiers.

Un S.I.G fait appel à une connaissance technique et à divers savoir-faire. Et pour concevoir un produit « S.I.G », on doit mobiliser des compétences en géodésie (connaissance des concepts de système de référence et de système de projection), en analyse des données, des processus et de modélisation (analyse Merise, langage UML par exemple), en traitement statistique ou graphique.

La modélisation des systèmes d'information géographique (S.I.G), est une tâche rigoureuse qui demande beaucoup de précision quand à l'organisation des données, leur nature et leur forme de représentation.

MERISE est une méthode complète, qui ne propose pas que des formalismes, mais aussi un processus et une démarche. Mais, elle n'est pas adaptée à la modélisation d'une dynamique spatio-temporelle des objets. Notre choix s'est porté néanmoins sur MERISE, car on a considéré qu'elle correspondait à notre besoin.

Pour modéliser les données au sein d'un S.I.G, on a recours à trois étapes successives :

- Le modèle conceptuel ;
- Le modèle logique ;
- Le modèle physique.

Dans le chapitre qui suit, nous représenterons le problème de plus court chemin dans des différents types de graphes. Nous expliquerons comment ce problème classique deviendra un problème d'optimisation combinatoire qui exige des outils algorithmiques précis pour le résoudre. Nous montrerons que les métaheuristiques sont des outils puissants pour résoudre le problème de plus court chemin multi-objectif. Et nous finirons par un tableau comparatif entre les approches existantes pour résoudre ce type des problèmes.

**Chapitre III :**  
*Les métaheuristiques et le problème de plus  
court chemin multi objectifs*

« Quiconque désire trouver le meilleur moyen de faire quelque chose peut se trouver devant ce que les mathématiciens appellent un problème d'optimisation. Souvent, cela signifie avoir à déterminer quelle est la meilleure stratégie face à un grand nombre de possibilités... »

Arturo Sangalli, [SAN, 2001].

---

## 1. Introduction :

La théorie des graphes et l'algorithmique qui lui est liée est un des outils privilégiés de modélisation et de résolution de problèmes dans un grand nombre de domaines allant de la science fondamentale aux applications technologiques concrètes.

L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématique discrète et en informatique. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation et d'autre part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire. Bien que les problèmes d'optimisation combinatoire soient souvent faciles à définir, ils sont généralement difficiles à résoudre.

En effet, la plupart de ces problèmes appartiennent à la classe des problèmes NP-difficiles et ne possèdent donc pas à ce jour de solution algorithmique efficace valable pour toutes les données [GAR, 1979].

En général, la représentation utilisée pour modéliser un réseau de transport est un graphe  $G=(V,A)$  où l'ensemble des arcs  $A$  représente les chemins possibles du réseau et l'ensemble des noeuds  $V$  représente les intersections entre ces chemins; en d'autres termes, les noeuds représentent des intersections des rues dans une agglomération et les arcs sont les segments qui relient ces intersections entre elles; ces chemins peuvent être des routes, rues, boulevards, autoroutes,..etc.

La particularité des réseaux de transport et la diversité des objectifs de ses usagers rendent la modélisation du réseau plus complexe et le nombre de données à traiter devient très important; d'où la nécessité d'utiliser des algorithmes capables de gérer ces données importantes, de les traiter dans un temps acceptable, et de résulter des itinéraires optimales qui répondent aux exigences des usagers du réseau.

Dans ce chapitre, nous débuterons avec la représentation du problème de plus court chemin dans de différents types de graphes. Nous expliquerons comment ce problème classique deviendra un problème d'optimisation combinatoire qui exige des outils algorithmiques précis pour le résoudre. Nous montrerons que les métaheuristiques sont des outils puissants pour résoudre le problème de plus court chemin multi-objectifs. Et nous finirons par tableau récapitulatif des approches existantes pour résoudre ce type de problèmes.

## 2. Définitions :

- L'optimisation est une branche des mathématiques, cherchant à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer le meilleur élément d'un ensemble, au sens d'un critère quantitatif donné. Ce mot vient du latin optimum qui signifie le meilleur.
- L'optimisation consiste à construire des algorithmes pour calculer le minimum d'une fonction sur un ensemble [BID, 2000].
- Une fonction objective est une fonction qui modélise le but à atteindre dans le problème d'optimisation sur l'ensemble des critères. Il s'agit de la fonction qui doit être optimisée. Elle est notée  $F(x)$ . De manière générale,  $F(x)$  est un vecteur  $F(x) = (F_1(x); F_2(x); \dots ; F_l(x))$ .
- Le but d'un problème d'optimisation est de trouver une solution maximisant (resp. minimisant) une fonction objectif donnée. A chaque problème d'optimisation on peut associer un problème de décision dont le but est de déterminer s'il existe une solution pour laquelle la fonction objectif soit supérieure (resp. inférieure) ou égale à une valeur donnée.
- Un problème d'optimisation combinatoire est un problème de maximisation ou de minimisation spécifié par l'ensemble des ses instances [ROS, 1991].
- Un problème d'optimisation combinatoire est un problème qui peut se mettre sous la forme :

$\underset{x \in X}{\text{Max}} f(x)$  où  $X$  est un ensemble fini et où  $f$  est une fonction à valeur entière positives ou nulles [SER, 2002].

## 3. Les chemins optimaux dans un graphe valué :

### 3.1. Présentation :

Les problèmes de cheminement sont des problèmes classiques de la théorie des graphes. L'objectif est de calculer une route entre des sommets d'un graphe qui minimise ou maximise une certaine fonction économique.

Le problème le plus classique consiste à chercher le chemin qui minimise la somme des valuations des arêtes traversées. Il existe des algorithmes polynomiaux pour résoudre ce problème, comme l'algorithme de Dijkstra. En revanche, lorsqu'on ajoute des contraintes supplémentaires comme des fenêtres de temps, le problème devient NP-difficile.

### 3.2. Le plus court chemin dans un graphe statique déterministe :

Soit  $G = (N; A)$  un graphe orienté et pondéré.  $G$  est dit graphe statique déterministe si le poids de chaque arc est une valeur constante. (Fig. 3.1) présente un exemple d'un tel graphe.

Le problème du plus court chemin pour les graphes statiques déterministes a fait l'objet de nombreuses études. Il est devenu un problème classique de la théorie des graphes. L'objectif est de calculer le plus court chemin entre deux noeuds d'un graphe statique déterministe. Dans cette optique, les notions de fonction de coût d'un chemin et du plus court chemin sont définies.

*Définition 1 :* Soit  $G = (N, A)$  un graphe statique déterministe. La fonction de coût d'un chemin dans  $G$ , notée  $C$ , est définie comme suit

$$C((u_0, u_1, \dots, u_n)) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{n-1} p(u_k, u_{k+1}) & \text{Si } n > 0 \text{ et } \forall k, (u_k, u_{k+1}) \in A \\ 0 & \text{Si } n = 0 \\ \infty & \text{Sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

*Définition 2:* Soit  $G = (N, A)$  un graphe statique déterministe. Le plus court chemin de  $i \in N$  à  $j \in N$  est noté  $PCC(i, j)$ .  $PCC(i, j) = Ch(i, j)$  avec  $C(Ch(i, j)) = \min_{P \in ECh(i, j)} \{C(P)\}$ . Dans le cas où il existe plusieurs chemins avec un coût minimal, un parmi eux est choisi aléatoirement [HIZ, 2008].

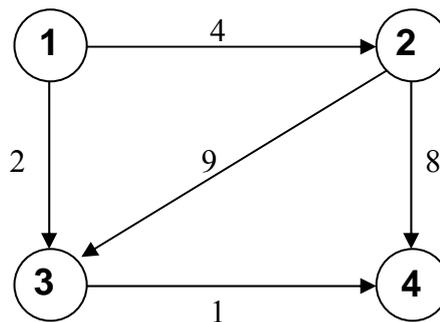


Figure 3.1: un graphe statique déterministe.

Où  $ECh(i, j) = \{Ch(i, j)\}$  : L'ensemble des chemins entre le nœud  $i$  à  $j$ .

De nombreux algorithmes ont été proposés pour résoudre ce problème [CHE, 1996] [GAL, 1988]. Néanmoins, l'algorithme le plus célèbre et le plus utilisé est l'algorithme proposé par E.W. Dijkstra [DIJ, 1959]. Le principe de l'algorithme de dijkstra est relativement simple, A partir du départ l'algorithme explore tous les arcs liant celui considéré à d'autres nœuds. Un registre est tenu, il contient le numéro du nœud considéré et la distance cumulée qui le sépare de l'origine et le numéro du nœud précédent. De proche en proche, parcourant toutes les trajectoires possibles, on rejoint le nœud d'arrivée. Le trajet le plus « court » est identifié par la distance cumulée la plus court. Il suffit maintenant de remonter le tableau suivant les liaisons « numéro nœud et parcours » [CAL, 2011]. Si le principe paraît simple, sa mise en œuvre est évidemment plus complexe pour faire converger rapidement l'exploration du réseau routier couvrant un espace géographique étendu, un pays entier voire un continent. L'algorithme de dijkstra est très connu, depuis sa publication en 1959, des améliorations et des variantes

ont été proposées et programmées. Si le graphe possède  $m$  arcs et  $n$  nœuds, en supposant que les comparaisons des poids d'arcs soient à temps constant, et que le Tas soit binomial, alors la complexité de l'algorithme de dijkstra est :  $\sigma[(m+n) \times \ln(n)]$ . L'utilisation de tas de Fibonacci donne un meilleur temps d'exécution amorti :  $\sigma[m+n \times \ln(n)]$ .

L'Algorithme A\* est autre algorithme déterministe utilisé pour la recherche du plus court chemin dans un graphe, il est beaucoup plus rapide à condition d'avoir une bonne fonction heuristique, et dont l'optimalité n'est garantie que sous certaines conditions. En pratique, l'algorithme A\* est un bon compromis entre coût de calcul et optimalité de la solution [SCH, 2008b].

### 3.3. Le plus court chemin dans un graphe dynamique :

Un graphe dynamique est un graphe en évolution dans le temps. Ainsi, il nous semble incontournable de considérer que le processus de l'évolution du graphe est l'un des éléments de sa définition, tout autant que la base temporelle dans laquelle ce processus s'exécute.

Soit  $G = (N, A)$  un graphe orienté et pondéré.  $G$  est dit graphe dynamique déterministe si le poids d'un arc est une valeur déterministe mais qui dépend du temps. Par conséquent, le poids d'un arc  $(i,j) \in A$  est décrit par la fonction  $p(i,j,t)$  avec  $t$  la date de départ du nœud  $i$ . Pour ce type de graphes, le temps peut être considéré continu ou discret. Cependant, pour simplifier le problème, le temps est généralement supposé discret ou il est supposé continu avec  $p$  une fonction constante par intervalles par rapport au temps.

*Définition 3 :* Soit  $G = (N,A)$  un graphe dynamique déterministe. Soit  $CD$  la fonction de coût d'un chemin dans  $G$ .  $CD^{t_0}((u_0,u_1, \dots ,u_m))$  indique le coût du chemin  $(u_0,u_1, \dots ,u_m)$  en partant du nœud  $u_0$  à  $t_0$ . La valeur de  $CD^{t_0}((u_0, \dots ,u_m))$  est définie comme suit :

$$\begin{cases} CD^{t_0}((u_0, \dots, u_{m-1})) + p(u_{m-1}, u_m, CD^{t_0}((u_0, \dots, u_{m-1}))) & \text{Si } m > 0 \\ t_0 & \text{Si } m = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

*Définition 4 :* Soit  $G = (N,A)$  un graphe dynamique déterministe. Le plus court chemin de  $i \in N$  à  $j \in N$  en partant de  $i$  à l'instant  $t_0$  est noté  $PCC^{t_0}(i,j)$ .  $PCC^{t_0}(i,j) = Ch(i,j)$  avec  $CD^{t_0}(Ch(i,j)) = \text{Min}^{P \in ECh(i,j)} \{CD^{t_0}(P)\}$ . Au cas où plusieurs chemins avec un coût minimal existent, un parmi eux est choisi aléatoirement.

Le problème du calcul du plus court chemin dynamique pour une date de départ fixée a été prouvé comme étant NP-Difficile [ORD, 1990]. Néanmoins, il a été prouvé qu'il est polynomial pour la classe

des graphes FIFO. Dans ce dernier cas, un algorithme de Dijkstra adapté au contexte dynamique peut être utilisé et le résultat qu'il retourne est optimal [AHN, 1991] [KAU, 1993].

### 3.4. Le problème du plus court chemin stochastique :

La notion de chemin optimal pour le problème du plus court chemin stochastique a été définie de différentes manières dans la littérature. La définition la plus simple à traiter dans le cas d'un graphe statique est celle qui décrit l'optimalité d'un chemin par rapport au coût espéré du chemin [JAM, 2006].

Dans ce cas, pour calculer le plus court chemin, il faut calculer l'espérance mathématique du poids de chaque arc. Ensuite, il suffit de dérouler un algorithme de calcul du plus court chemin pour les graphes déterministes comme l'algorithme de Dijkstra en considérant les espérances mathématiques calculées comme étant les poids des arcs.

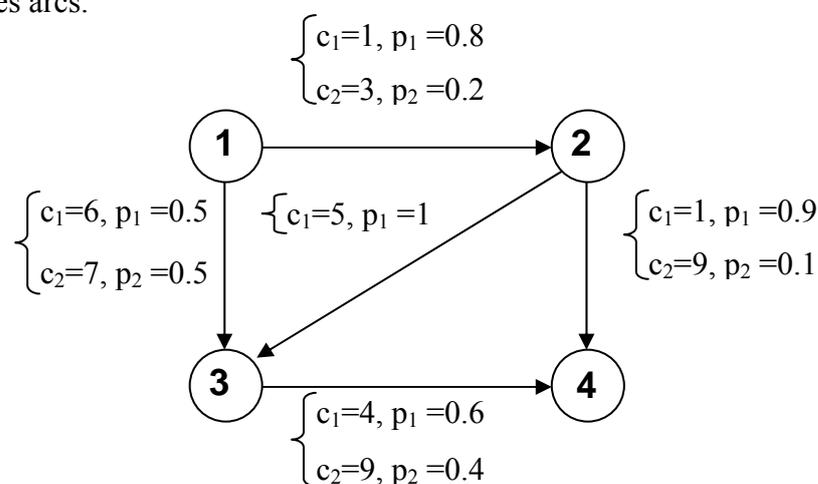


Figure 3.2 : un graphe statique stochastique.

R.W. Hall est le premier auteur à avoir traité les graphes dynamiques stochastiques [HAL, 1986]. Il a étudié le problème du calcul d'un chemin entre deux nœuds avec un coût espéré minimal. Le problème s'est avéré plus compliqué que dans le cas des graphes statiques stochastiques à cause de la nature stochastique et dynamique du graphe.

Dans la majorité des travaux, la stratégie de routage est basée uniquement sur les temps d'arrivées au niveau des nœuds de décision et les distributions des poids des arcs sont supposées indépendantes [HAL, 1986] [BAN, 2002]. Deux stratégies de référence existent.

La première se base sur le concept DOT (Decreasing Order of Time) [GAO, 2006]. Ce concept, développé par I. Chabini [CHA, 1998], implique l'affectation des labels aux nœuds dans un ordre décroissant par rapport au temps. La deuxième stratégie se base sur un algorithme à correction de label développé par E.D. Miller-Hooks et H.S. Mahmassani [MIL, 1998] [MIL, 2000] et qui représente une évolution de l'algorithme qu'ils ont proposé pour le calcul d'un chemin optimal a priori.

#### 4. Limite d'application des algorithmes :

##### 4.1. Plus court chemin statique :

Il est courant, lorsque l'on cherche à se rendre d'un point à un autre dans un réseau routier, de chercher le plus court chemin, c'est-à-dire, celui dont la longueur est la plus petite. Si le nombre de trajets possibles entre le point de départ et le point d'arrivée est faible, il suffira de calculer les longueurs de chacun des trajets - en additionnant la longueur des liens qui le composent - et de comparer directement les longueurs obtenues. Mais une telle solution exhaustive devient rapidement impraticable si le nombre de trajets possibles est grand.

##### 4.2. Chemin le plus rapide en fonction du temps :

Lorsque le coût représente le temps, les fonctions ont toujours la forme

$$f^t(t) = t + p(t)$$

où  $p(t)$  est le temps de parcours de l'arc. Puisque ce temps de parcours est positif, la fonction est strictement croissante et tend vers l'infini.

Il est donc possible d'utiliser l'algorithme de Dijkstra dépendant du temps à condition que le temps de parcours d'un arc soit strictement positif.

##### 4.3. Chemin de moindre coût dépendant du temps :

Lorsque le coût dépend du temps, les conditions sur les fonctions de coût sont plus restrictives. En effet, en plus de la complexité théorique (problème NP-difficile), la solution peut être un chemin de longueur infinie, même si tous les coûts sont strictement positifs.

La (Fig. 3.3) est un exemple directement inspiré de Orda, Rom [ORD, 1991] où les auteurs donnent un exemple simple où le chemin de moindre coût est de longueur infinie.

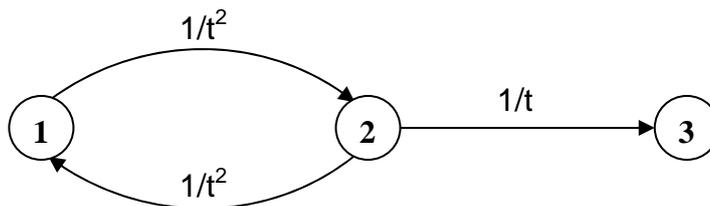


Figure 3.3 : Chemin de moindre coût de longueur infinie. A chaque parcours d'un arc,  $t$  est incrémenté de 1. Le chemin de moindre coût bouclera une infinité de fois entre 1 et 2.

Le temps pour parcourir un arc est toujours de 1. Les coûts en fonction du temps sont indiqués sur chaque arc. Le chemin le plus court du nœud 1 au nœud 3 est celui qui boucle infiniment entre les nœuds 1 et 2 avant d'emprunter l'arc (2,3). Le coût optimal est donc de :

$$\sum_{t=1}^{t=+\infty} \frac{1}{t^2} = \frac{\pi}{6} \quad (3.3)$$

Les auteurs donnent des conditions suffisantes pour que le chemin de moindre coût soit fini :

- le coût de chaque arc a une borne inférieure strictement positive à partir d'un instant  $t$  ;
- le coût d'attente à un noeud tend vers  $+1$  avec le temps.

#### 4.4. Prise en compte des grilles horaires

Pour modéliser un réseau de transports en commun, ou un réseau routier dont on voudrait prendre en compte les feux de circulation, il est indispensable de pouvoir modéliser l'attente à un noeud. Il n'est donc pas possible d'utiliser directement l'approche vue précédemment.

**4.4.1 Contrainte FIFO :** La contrainte FIFO *First In, First Out* est particulièrement importante. Il est nécessaire qu'emprunter un arc  $(u, v)$  au plus tôt garantisse le fait d'arriver en  $v$  au plus tôt. On peut citer un exemple est possible où cette contrainte n'est pas respectée est celui d'un bus dépassant un autre entre deux arrêts. Il aurait été plus optimal d'attendre le deuxième bus pour arriver plus tôt à destination. Il s'agit d'un cas où la fonction de coût associée à l'arc n'est pas croissante partout.

**4.4.2 Modèle *Time-expanded* :** Habituellement dans un graphe, un noeud correspond à une position géographique. Ce modèle dédouble les noeuds et les associe à un instant précis. Le graphe généré est appelé graphe *espace-temps (time-space graph)*. Dans ce graphe chaque noeud est en fait un couple entre un noeud du graphe initial et un instant. Les arcs définissent les possibilités de passer d'un noeud à un autre dans l'intervalle de temps défini par les deux instants associés aux noeuds. Le poids associé à chaque arc est la différence de temps entre les instants correspondant aux deux noeuds.

**4.4.3 Modèle *Time-dependent* :** Ce modèle modifie les fonctions de coût des arcs : plutôt que de correspondre à la durée de parcours, les fonctions renvoient l'instant d'arrivée au plus tôt au noeud cible. La taille du graphe reste donc constante, mais nécessite l'utilisation de l'algorithme de Dijkstra modifié. Toutes ces fonctions sont non-décroissantes et tendent vers l'infini. De ce fait un algorithme de Dijkstra dépendant du temps reste optimal. Il s'agit probablement de l'approche la plus performante actuellement existante en termes de temps de calcul dans le cas très précis de l'itinéraire multimodal le plus rapide.

#### 4.5. Chemin de moindre coût :

Lorsque la fonction de coût à optimiser n'est pas le temps mais qu'elle dépend du temps, il n'est plus possible d'utiliser l'algorithme de Dijkstra. Il est peu probable qu'il existe un algorithme en temps polynomial : ce problème est en effet NP-difficile puisqu'il permet de résoudre le problème de plus court chemin avec des contraintes de ressources.

Les auteurs de cet article [ORD, 1991] montrent que le chemin de moindre coût peut être de longueur infinie. Un algorithme est proposé pour résoudre ce problème avec des conditions particulières sur les fonctions de coût pour que le chemin optimal soit de longueur finie. L'exécution de l'algorithme s'arrêtera, mais rien ne garantit qu'il se termine en temps polynomial.

La différence entre les deux types d'objectifs est développée dans Ahuja, [AHU, 2002] où les auteurs étudient le chemin le plus rapide et celui de moindre coût dans un réseau routier prenant en compte les feux et démontrent la différence de complexité.

Cependant dans certains cas, le problème de moindre coût a une complexité polynomiale.

Il s'agit des graphes dit *cost-consistent*. Cette contrainte supplémentaire stipule que quitter un noeud plus tôt ne coûte pas plus cher que le quitter plus tard. Cette notion est présentée dans Pallottino, Scutella [PAL, 1998]. Les auteurs présentent également l'adaptation de leur algorithme *Chrono-SPT* pour calculer le chemin de moindre coût sur de tels graphes.

Un résultat intéressant est celui présenté dans Chabini [CHA, 1998]. Les auteurs présentent un algorithme très simple pour calculer le chemin de moindre coût de *tous* les noeuds vers *une* destination à *tous* les intervalles de temps. Le temps est discrétisé et le temps de parcours des arcs doit être entier de manière à correspondre exactement à un intervalle de temps.

### 5. Problème d'optimisation combinatoire multi-objectif:

#### 5.1. Définition :

- Aussi connue sous le nom d'optimisation multicritère ou d'optimisation multi-attribut, est un processus qui consiste à optimiser simultanément deux ou plusieurs objectifs, soumis à certaines contraintes.
- L'optimisation multi-objectif consiste donc à optimiser simultanément plusieurs fonctions. La notion de solution optimale unique dans l'optimisation uni-objectif disparaît pour les problèmes d'optimisation multi-objectif au profit de la notion d'ensemble de solutions Pareto optimales.
- Un problème d'optimisation combinatoire multi-objectif (PMO) (multi-objective combinatorial optimization problem) peut être défini par :

$$(PMO) \begin{cases} \text{Optimiser } F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ \text{sous } x \in D \end{cases} \quad (3.4)$$

où  $n$  est le nombre d'objectifs ( $n \geq 2$ ),  $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  est le vecteur représentant les variables de décision,  $D$  représente l'ensemble des solutions réalisables et chacune des fonctions  $f_i(x)$  est à optimiser, c'est-à-dire à minimiser ou à maximiser. Sans perte de généralité nous supposons par la suite que nous considérons des problèmes de minimisation.

Contrairement à l'optimisation mono-objectif, la solution d'un problème multi-objectif n'est pas unique, mais est un ensemble de solutions non dominées, connu comme l'ensemble des solutions Pareto Optimales (PO) [DHA, 2005].

## 5.2. Notion de dominance

*Définition 5 :* Une solution  $y = (y_1, \dots, y_m)$  domine faiblement une solution  $z = (z_1, \dots, z_m)$

$$\text{Ssi } \forall i \in 1, \dots, m. f_i(y) \leq f_i(z)$$

Si la solution  $y$  domine faiblement la solution  $z$  nous allons noter  $y \preceq z$

*Définition 6 :* Une solution  $y = (y_1, \dots, y_m)$  domine une solution  $z = (z_1, \dots, z_m)$

$$\text{Ssi } \forall i \in 1, \dots, m. f_i(y) \leq f_i(z) \text{ et } \exists j \in 1, \dots, m \text{ tq } f_j(y) < f_j(z)$$

Si la solution  $y$  domine la solution  $z$  nous notons alors  $y \prec z$

Notons que pour toute paire de solutions  $y$  et  $z$  un et un seul des cas suivants peut se présenter :

- $y$  domine  $z$ .
- $y$  est dominé par  $z$ .
- $y$  et  $z$  sont équivalentes au sens de la dominance.

Les solutions équivalentes au sens de la dominance sont appelées dans ce qui suit, solutions équivalentes au sens de Pareto ou solutions Pareto équivalentes ou, encore, solutions non-dominées [ALA, 2009].

## 5.3. Optimalité de Pareto :

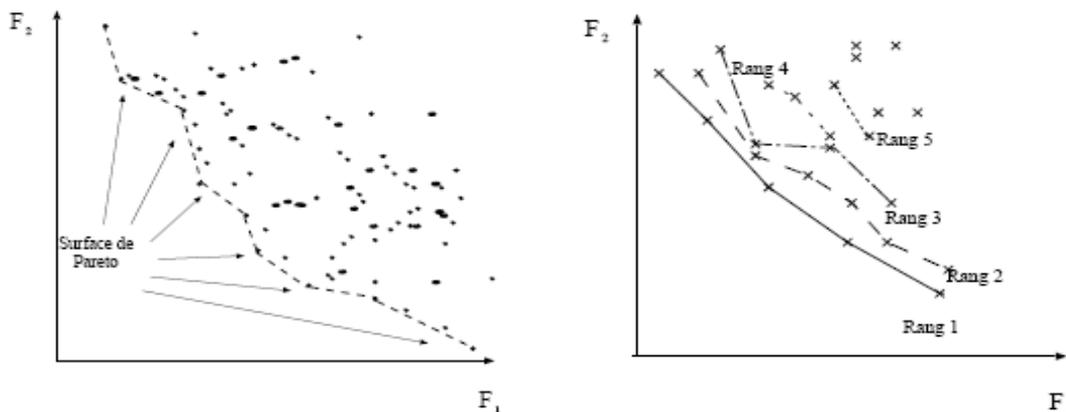
Dans un problème multi-critère dans lequel on cherche à optimiser plusieurs objectifs contradictoires, on appellera front de Pareto du problème l'ensemble des points de l'espace de recherche tels qu'il n'existe aucun point qui est strictement meilleur qu'eux sur tous les critères simultanément. Il s'agit de l'ensemble des meilleurs compromis réalisables entre les objectifs contradictoires, et l'objectif de l'optimisation va être d'identifier cet ensemble de compromis optimaux entre les critères. Plus formellement, soient  $J_1, \dots, J_n$  les objectifs dont on suppose qu'on cherche à les minimiser sur l'espace de recherche  $\Omega$ .

*Définition 7* : Soient  $x$  et  $y$  deux points de  $\Omega$ . On dira que  $x$  domine  $y$  au sens de Pareto, noté  $x \succ y$  si :

$$\forall i \in [1, n], J_i(x) \leq J_i(y)$$

$$\exists j \in [1, n], J_j(x) < J_j(y)$$

La (Fig. 3.4 (a)) donne un exemple de front de Pareto : l'ensemble de l'espace de recherche est représenté dans l'espace des objectifs, et les points extrémaux pour la relation de dominance au sens de Pareto forment le front de Pareto du problème (notez que l'on n'est pas toujours dans une situation aussi régulière que celle présentée (Fig. 3.4 (b)), et que le front de Pareto peut être concave, discontinu, . . . )



(a) Les points extrémaux de l'ensemble de l'espace de recherche forment le front de Pareto du problème.

(b) Une population donnée est partiellement ordonnée par la relation de dominance au sens de Pareto.

Figure 3.4: Front de Pareto et rangs de Pareto pour un problème de minimisation de deux objectifs.

#### 5.4. Résolution d'un problème multi-objectif :

De nombreuses méthodes de résolution existent pour les problèmes multi objectifs. Elles correspondent à des situations et des problématiques différentes. Toutes ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories suivant le but recherché :

- Celles visant à obtenir une (ou plusieurs) solution(s) représentant un bon compromis entre les différents objectifs, Leur but est de trouver une (ou plusieurs) solution(s) qui correspondra(ont) à un bon compromis entre les différents objectifs en fonction des préférences exprimées par le décideur à l'aide des paramètres. Ces méthodes peuvent être utilisées soit avec des paramètres fixés a priori, soit de manière interactive en modifiant les paramètres durant la recherche (Agrégation des objectifs, Résolution lexicographique, Goal programming, Max-ordering, ..ect).
- Celles visant à déterminer l'ensemble de la frontière efficace, elle rassemble les méthodes déterminant l'ensemble complet des solutions Pareto optimales du problème, ou plus souvent

seulement l'ensemble minimum complet (nom donné par Hansen [HAN, 1979] au sous-ensemble des solutions efficaces ne contenant pas les solutions équivalentes). Ces méthodes permettent au décideur de sélectionner a post-priori la (ou les) solution(s) qui l'intéresse parmi l'ensemble des solutions efficaces. Différentes méthodes peuvent être utilisées (la méthode du Ranking, la recherche dichotomique, la méthode  $\epsilon$ -contrainte,...ect).

- Et celles visant à calculer une bonne approximation de cette frontière, elle réunit les méthodes ne cherchant qu'une approximation de la frontière efficace. Celles-ci peuvent être utilisées soit dans le cadre d'une méthode interactive, soit pour effectuer une sélection à posteriori. Ces méthodes sont particulièrement utiles pour les problèmes de grande taille ou avec de nombreux objectifs dans un contexte de ressources (temps de calcul et/ou mémoire) limitées [DEL, 2003].

Notons qu'une autre classification, basée sur le type d'interactivité avec le décideur (a priori, interactive ou a posteriori), est parfois utilisée.

## **6. Les métaheuristiques et le problème multi-objectifs :**

### **6.1. Définition :**

Les métaheuristiques sont apparues au début des années 1980 avec une ambition commune : « résoudre au mieux les problèmes dits d'optimisation difficile ». En effet, celles-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes discrets, et elles peuvent s'adapter aussi aux problèmes continus [AYA, 2010].

Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objectif [VER, 2008].

### **6.2. Classement des métaheuristiques :**

Pour classer l'ensemble ces métaheuristiques, il existe en réalité plusieurs possibilités (ce qui est notamment ce qui du au fait qu'elles sont le fruit de travaux en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle). Le classement dépend donc du point de vue. Une classification possible de ces algorithmes. On distingue :

- Constructives (algorithmes glouton, méthode Pilote, GRASP)
- Recherche locale (algorithmes de descente appelés aussi méthodes d'améliorations itératives, multi-départs, recuit simulé, algorithme à seuil, recherche Tabou, méthode de bruitage)
- Evolutionnistes (algorithmes génétiques, algorithmes d'évolution, recherche dispersée, méthode des chemins, systèmes de fourmis)
- Réseaux de neurones (Modèle de Hopfield-Tank, machine de Boltzmann, réseau auto-adaptatif, réseau élastique)

- Heuristiques Bayésiennes (optimisation globale, optimisation discrète)
- Superposition (perturbation des données, perturbation des paramètres d'une heuristique).

### **6.3. Les métaheuristiques et le problème d'optimisation multi-objectifs :**

L'utilisation de méthodes exactes étant limitée à des problèmes de petites tailles, il convient, notamment pour pouvoir traiter des problèmes réels, de développer des méthodes heuristiques. Les métaheuristiques et en particulier les algorithmes évolutionnaires, travaillant sur des populations de solutions, sont bien adaptés à l'optimisation multi-objectif.

### **6.4. Les métaheuristiques et le problème de plus court chemin multi-objectifs :**

#### **6.4.1. Introduction :**

Dans cette section, nous présentons les métaheuristiques utilisées dans la littérature pour résoudre le problème de plus court chemin multi objectifs. Les métaheuristiques sont représentées essentiellement par les méthodes de voisinage comme le recuit simulé et la recherche tabou, et les algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétiques et les stratégies d'évolution.

Diverses approches évolutionnistes ont été proposées depuis 1985 [SAW, 2011] capables de résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs en un temps d'exécution raisonnable. Les principaux algorithmes évolutionnaires utilisés pour le problème de plus court chemin multi-objectifs sont les algorithmes génétiques. De plus, des algorithmes à base de populations tels que les algorithmes de colonies de fourmis ont également été utilisés pour résoudre ce type de problème.

#### **6.4.2. Algorithmes génétiques et le problème de plus court chemin multi-objectifs :**

Il est très difficile d'adapter ces approches au problème du plus court chemin. Il est en effet assez difficile de modéliser le problème dans le cadre précédent à cause du grand nombre de contraintes inhérentes à ce problème : une solution générée aléatoirement n'a pratiquement aucune chance d'être réalisable. Même si certains auteurs ont malgré tout essayé d'utiliser ces approches évolutionnaires, la grande majorité des problèmes de plus court chemin multi-objectifs ont été résolus avec des méthodes exactes.

Une exception notable est Maria, [MAR, 2007], où les auteurs ont utilisé l'algorithme SPEA-II pour le problème du plus court chemin multi objectifs. Cette approche a été testée sur des instances aléatoires. Le nombre d'optima dans le front obtenu et la diversité des solutions est étudiée. Les résultats montrent qu'au fur et à mesure des itérations les solutions tendent vers le front de Pareto et que les solutions sont assez diversifiées. On peut cependant regretter que les auteurs n'aient pas testé les résultats sur des instances dont le front de Pareto est connu et que la performance en temps ait été laissée de côté.

### **6.4.3. Les colonies des fourmis et le problème de plus court chemin multi-objectifs :**

Si les algorithmes de colonies de fourmis sont de plus en plus utilisés pour la résolution de problèmes multi objectifs, très peu d'études sur leur application au problème de plus court chemin multi-objectifs existent. Dans l'article [CAR, 2003] présenté par Cardoso, un algorithme de colonies de fourmis est utilisé pour résoudre un problème de plus court chemin multi objectifs. Ici, le processus d'optimisation utilise une seule colonie avec des traces de phéromones multi niveaux et une heuristique qui favorise l'introduction d'une formule d'heuristique aléatoire pour construire les chemins optimisés. Toutes les fourmis artificielles essaient de trouver le plus court chemin de la source  $s$  à la destination  $t$ . Pour cela, chaque fourmi est placée sur le noeud source  $s$  et construit son chemin en ordonnant les noeuds et en considérant la proximité avec le noeud  $t$  ainsi que les traces de phéromones entre le noeud courant et ses successeurs.

La première phase de cet algorithme consiste à construire les chemins optimaux en fonction de « probabilité de transition » de l'ACO (Ant Colony Optimization) ; la seconde phase concerne la mise à jour des traces de phéromones dans le réseau en fonction de l'intensité des traces de phéromones laissées par les fourmis sur les chemins du graphe [CAR, 2003].

### **6.4.4. Essais particuliers et le problème de plus court chemin multi-objectifs :**

Cette métaheuristique, qui a été initialement proposée par Kennedy, Eberhart [KEN, 1995], imite le comportement d'un essaim d'oiseaux capable de trouver une source de nourriture malgré une communication restreinte entre les individus.

Les résultats des variantes multi objectives sont compétitifs par rapport aux algorithmes plus traditionnels. Une comparaison complète des différentes adaptations possibles a été effectuée dans Durillo, [DUR, 2009].

Cependant il est peu probable que cette approche soit un jour appliquée à un problème de type plus court chemin. En effet, cette approche fonctionne bien sur des problèmes continus avec peu de contraintes sur les variables, tout à l'opposé des problèmes de plus courts chemin qui sont discrets et très fortement contraints [GRÄ, 2010].

## **7. Le chemin le plus court dans un réseau routier urbain :**

### **7.1. Choix des solutions à présenter :**

Nous traitons le problème de plus court chemin dans un graphe multivalué où plusieurs objectifs de type somme sont considérés : temps, trafic, la hauteur autorisé, poids autorisé, le nombre des ralentisseurs et les feux tricolores. En se basant sur la modélisation du réseau routier urbain présentée dans le deuxième chapitre, nous appliquerons un algorithme de colonie de fourmis pour résoudre le

problème de plus court chemin. L'évaluation des résultats obtenus fait appel à d'autres algorithmes d'optimisation qui résolvent le même problème comme Dijkstra, A\*, ...ect.

## **7.2. Taille des problèmes :**

### **7.2.1 Taille du graphe :**

Nous nous intéressons tout particulièrement aux trajets en milieu urbain dans une commune algérienne (cas de la commune d'Oran).

L'échelle des problèmes est donc de l'ordre d'une agglomération. La commune d'Oran est considérée parmi les plus grandes communes algériennes (Elle est peuplée de 1454078 habitants en 2008 [ONS, 2012] pour une superficie de 2 114 km<sup>2</sup>). Il existe en effet douze arrondissements également appelés « secteurs urbains ou quartiers». 57 km de rocade (La première rocade de 22 km -4e périphérique- déjà opérationnelle qui prendra son départ de Haï Belgaïd pour arriver aux nouvelles Halles Centrales d'El Kerma. La 2ème rocade, d'une longueur de 35 km, prendra son départ de douar Belgaïd en passant par El-Kerma au niveau du marché de gros pour relier la RN2 et la localité de Boutlélis), la distance globale de tramway est environ de 48 km, et le nombre de voitures a explosé au cours des dernières années avec pas moins de 426.399 voitures immatriculées à Oran en 2011 [TRA, 2012]. Enfin, notre réseau routier comporte environ 10 000 noeuds et 20 000 arcs.

### **7.2.2. Objectifs considérés**

Contrairement aux approches existantes qui ne traitent habituellement que deux objectifs (temps et distance), nous nous proposons de prendre en compte :

- Trafic,
- Le nombre de ralentisseurs ;
- Le nombre de feux tricolores ;
- La hauteur et le poids autorisé ;
- Calcul du temps de passage de train ou tramway.

**7.2.3. Tableau récapitulatif des approches existantes :**

Le tableau 3.1 récapitule les différents objectifs d'un problème de plus court chemin dans un milieu urbain, les graphes de représentation et les algorithmes utilisés pour le résoudre.

	Objectifs	Type	Prise en compte	Type de graphe	Algorithmes
Le chemin le plus court	Distance	Mono – objectif (simple)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La distance entre les nœuds (appel aux théorèmes de calcul de la distance entre deux entités géographiques).</li> <li>• Les contraintes non temporelles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphe statique déterministe (coût =distance)</li> </ul>	A* Dijkstra ACO
Le chemin le plus rapide	Temps	Mono – objectif (en fonction du temps)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le temps de passage entre les nœuds.</li> <li>• Contraintes non temporelles (la gestion de circulation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphe statique déterministe (coût =temps)</li> </ul>	A* Dijkstra ACO
		Mono – objectif (dépend du temps)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les contraintes précédentes (le temps et les contraintes non temporelles)</li> <li>• Les contraintes temporelles (temps d'attente devant les passages des train et tramways)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphe dynamique (coût =temps,</li> <li>• Initialiser le temps de départ)</li> </ul>	ACO
	Temps et trafic	Bi – objectif (en fonction du temps)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le temps de passage entre les nœuds.</li> <li>• Contraintes non temporelles (la gestion de circulation et de trafic)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphe statique déterministe (coût =temps, trafic)</li> </ul>	Dijkstra généralisé Martin ACO
		Bi – objectif (dépend du temps)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les contraintes précédentes (le temps et les contraintes non temporelles)</li> <li>• Les contraintes temporelles (temps d'attente devant les passages des train et tramways)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphe dynamique (coût =temps et trafic,</li> <li>• Initialiser le temps de départ)</li> </ul>	ACO
Le chemin de moindre coût	Temps, distance, trafic, ralentisseurs, feux tricolores, hauteur et poids autorisé	Multi – objectifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût = [temps, distance, trafic, ralentisseurs, feux tricolores, hauteur autorisée, poids autorisé]</li> <li>• Les contraintes temporelles (temps d'attente devant les passages des train et tramways)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphe dynamique (coût = [temps, distance, trafic, ralentisseurs, feux tricolores, hauteur autorisée, poids autorisé].</li> <li>• Initialiser le temps de départ)</li> </ul>	ACO

Tableau 3.1: Tableau récapitulatif des approches existantes.

## **8. Conclusion :**

Le choix d'un chemin pour acheminer dans un réseau routier urbain peut se faire en tenant compte du temps de transport, du trafic, du respect du code de la route, ... D'une façon générale, les outils utilisés pour guider ce choix sont basés sur des techniques de résolution de « problème de plus court chemin multi-objectifs ».

L'utilisation de méthodes exactes étant limitée à des problèmes de petites tailles. Il convient, notamment pour pouvoir traiter des problèmes réels, de développer des méthodes « heuristiques ». Les métaheuristiques et en particulier les algorithmes évolutionnaires, travaillant sur des populations de solutions, sont bien adaptés à l'optimisation multi-objectifs.

Les principaux algorithmes évolutionnaires utilisés pour le problème de plus court chemin multi-objectifs sont les algorithmes génétiques. De plus, des algorithmes à base de populations tels que les algorithmes de colonies de fourmis ont également été utilisés pour résoudre ce type de problème.

Dans le chapitre qui suit, nous expliquerons que la complexité de la plupart des algorithmes de graphes est directement liée au nombre des nœuds et d'arêtes (resp, d'arcs). Cela constitue un facteur limitatif important quand à la taille des graphes possibles à traiter en pratique. Pour contrôler cette complexité, nous proposerons de créer une zone circulaire appelée « zone de recherche ». En basant sur les requêtes SQL, nous créerons cette zone avec un ensemble de contraintes temporelles et non temporelles déterminées par l'utilisateur. Et nous terminerons avec l'application d'un algorithme de colonie de fourmis de plus court chemin multi-objectifs (MOSPACO) sur cette zone de recherche.

**Chapitre IV :**  
*Le chemin optimal dans un milieu urbain*

« Les éthologistes ont montré que les fourmis étaient capables de sélectionner le plus court chemin pour aller du nid à une source de nourriture grâce au dépôt et au suivi de pistes de phéromone. »

G. THERAULAZ, E. BONABEAU, M. DORIGO [BON, 2000]

---

## 1. Introduction:

Lorsqu'un chemin existe entre deux sommets dans un graphe, l'être humain se pose rapidement la question non seulement de trouver un tel chemin, mais bien souvent il est intéressé par le plus court chemin possible entre ces deux sommets. Notre œil est d'ailleurs particulièrement efficace dans cette tâche, tant que le graphe est de taille raisonnable... Mais dès que le graphe comporte plusieurs dizaines de sommets et d'arêtes (comme la ville d'ORAN), trouver le plus court chemin entre deux points devient vite un casse-tête.

La métaheuristique ACO (Ant Colony Optimization / optimisation par colonies de fourmis), introduite par Dorigo en 1992, s'inspire du comportement collectif des colonies de fourmis pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. L'idée est de représenter le problème à résoudre sous la forme de la recherche d'un «meilleur» chemin dans un graphe. Des fourmis artificielles circulent dans ce graphe de façon aléatoire et incomplète, à la recherche de «bons» chemins.

La présente contribution a pour objectif de présenter un algorithme de colonies de fourmis mis en place pour résoudre le problème de plus court chemin multiobjectif.

Le problème est, pour un graphe limité dans une zone de recherche et pour une paire de sommets départ et arrivée, de déterminer le plus court ou le plus rapide chemin entre eux avec plusieurs objectifs. Pour résoudre ce problème, cela nécessite l'utilisation d'une méthode adéquate et rapide.

L'objectif de ce chapitre, est la mise en œuvre d'un système d'information géographique sur le réseau routier urbain avec ses contraintes temporelles et non temporelles et l'application d'un algorithme de colonie de fourmis de plus court chemin multi-objectifs (MOSPACO) sur une zone de recherche limitée et calculée.

## 2. Présentation de la solution classique :

Les algorithmes les plus classiques de recherche d'un chemin entre un sommet de départ  $n_d$  et un sommet d'arrivée  $n_a$  consistent, à partir du sommet  $n_d$  du graphe, à numéroter positivement ou négativement tous les arcs rencontrés selon qu'ils sont parcourus dans le sens normal (c'est-à-dire de leur extrémité initiale vers leur extrémité finale) ou qu'ils sont "remontés" (de l'extrémité finale vers l'extrémité initiale). Lorsque le sommet  $n_a$  est rencontré, la succession des arcs numérotés positivement constitue un chemin de  $n_d$  à  $n_a$ . Les algorithmes de recherche de chemins entre deux sommets peuvent ne pas tenir compte de valuation possible sur les arcs ou les sommets, ou tenir compte d'une valuation positive ou nulle sur les arcs et rechercher un chemin avec évaluation d'une fonction de coût (algorithme de Dijkstra). Ils peuvent également tenir compte d'une valuation quelconque sur les arcs (algorithme de Ford-Bellman).

Nous présentons les algorithmes avec évaluation de coût dans le cas où les valuations sont positives (cas le plus fréquent pour des réseaux routiers) par l'examen de l'algorithme de la colonie de fourmis.

## 3. Démarche de la solution choisie :

### 3.1. Définitions :

- La complexité algorithmique informe sur le nombre de calculs, et donc sur la performance d'un programme. Plus la complexité algorithmique est faible, moins l'algorithme effectue de calculs, et plus il est performant [LER, 2010].
- La complexité d'un algorithme se mesure en calculant le nombre d'opérations élémentaires nécessaires pour traiter une donnée de taille  $n$ . Pour cela, on considère que, quelle que soit la machine utilisée, toutes les opérations sont effectuées en temps constant (égal à 1) ; ces opérations sont, entre autres l'addition, la multiplication, les comparaisons, l'affectation, les instructions de contrôle, ect [WEI, 2009].
- Une contrainte est un critère porte sur un ensemble d'objets (sommets et/ou arcs) et vérifie pour chaque objet, indépendamment des autres objets de l'ensemble, son exactitude vis-à-vis d'une condition.
- La contrainte temporelle signifie simplement une contrainte liée au temps (par manque de temps ou à cause du temps).

### 3.2. Principe :

La modélisation du milieu urbain, nous a montré que ce dernier est loin d'être facile. Il est composé de rues organisées et désorganisées, condensées ou élargies et des impasses selon chaque ville, sa modernité, sa gestion d'urbanisme,....ect.

La recherche de chemin de moindre coût dans un graphe orienté est utilisée dans de nombreuses applications. On s'intéresse ici à la détermination d'un itinéraire de voyage. Pour cela on représente les différentes routes et ses intersections par un graphe orienté, valué par le coût entre deux sommets (intersection).

La complexité de la plupart des algorithmes de graphes est directement liée au nombre d'arêtes (resp. d'arcs). Cela constitue un facteur limitatif important quand à la taille des graphes possibles à traiter en pratique. On doit donc contrôler le nombre des arrêtes pour avoir une complexité acceptable.

Sur la base de ce qui précède, Nous proposons de créer une zone circulaire appelée « zone de recherche », sa diagonale est supérieure ou égale à la distance linéaire entre le nœud de départ et le nœud d'arrivée. Toute arrête ayant ses deux nœuds d'extrémités dans cette zone est jugée « arrête incluse dans la zone ». On peut ajouter d'autres conditions dans la sélection par exemple : on sélectionne seulement les chemins bidirectionnels, opérationnels, leur hauteur dépasse 3 mètres... ect. Ces conditions sont appelées contraintes ou critères.

Un critère porte sur un ensemble d'objets (sommets et/ou arcs) et vérifie pour chaque objet, indépendamment des autres objets de l'ensemble, son exactitude vis-à-vis d'une condition. Ce critère va tester pour chaque sommet et/ou arc du graphe les valeurs de la fonction d'étiquetage définie sur ce sommet et/ou cet arc.

On peut distinguer deux types de contraintes :

- Une contrainte agrégative est une contrainte portant sur un ensemble de sommets et/ou d'arcs et nécessitant le calcul d'une fonction agrégative (somme, moyenne, minimum, maximum, cardinalité) sur les valeurs de la fonction d'étiquetage pour cet ensemble de sommets et/ou d'arcs. Les sommets et/ou arcs doivent donc être considérés dans leur ensemble et non plus indépendamment les uns des autres. exemple : "Aller de Sidi Bel Abbes à Oran avec un temps de voyage minimum (coût de trajet = temps)".
- Une contrainte régulière est une contrainte portant sur un ensemble de sommets et/ou d'arcs et pouvant être exprimée sous forme d'une expression régulière sur les valeurs d'étiquetage de ces sommets et/ou de ces arcs. exemple : "Aller de Sidi Bel Abbes à Oran en utilisant des autoroutes".

Une fois que nous ayant déterminé les itinéraires et les contraintes, la requête créera la zone de recherche et c'est là, où nos algorithmes d'optimisation seront appliqués.

L'organigramme de la (Fig. 4.1) suivant décrit mieux ces étapes :

### 3.3. Organigramme de la solution choisie :

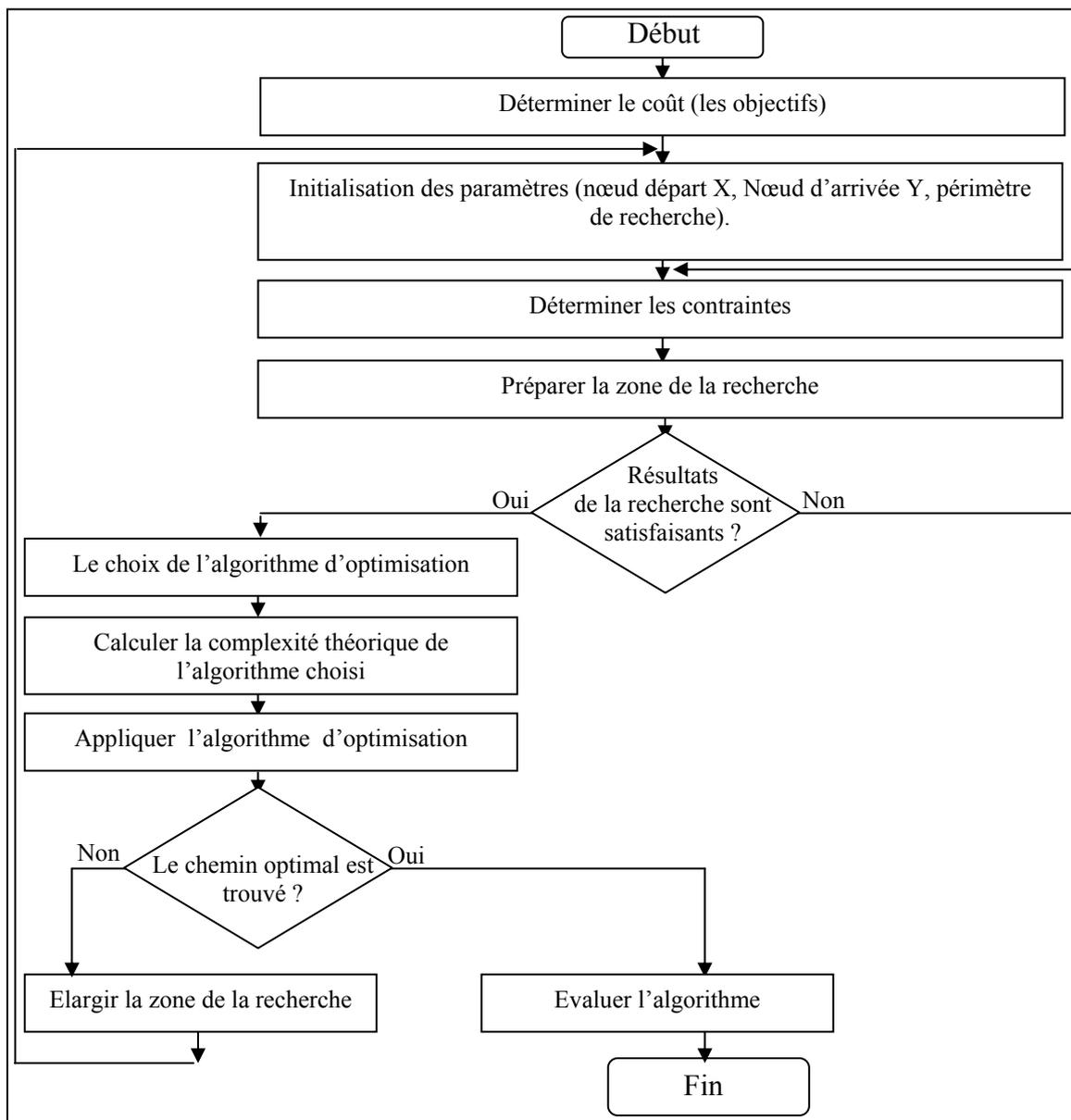


Figure 4.1 : Organigramme de la solution choisie.

## 4. La zone de recherche :

### 4.1. Principe :

La (Fig. 4.2) nous montre une zone de recherche dans un quartier de la commune d'Oran, où elle est limitée par un nœud de départ et un nœud d'arrivée (en rouge). La diagonale de ce cercle est égale à la distance entre les deux nœuds. On peut élargir ce cercle pour avoir plus d'arrêtes et de nœuds. Le calcul des distances entre les nœuds fait appel à la formule « vol de l'oiseau ». Cette zone ignore les arrêtes ayants seulement un seul nœud dans le cercle (Fig. 4.3).



Figure 4.2 : La zone de recherche peut être élargie à partir de la distance minimale. Tout segment ayant seulement un seul nœud dans la zone, il sera ignoré (Fig. 4.3).

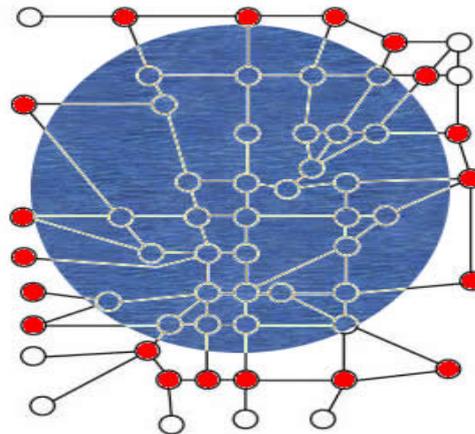


Figure 4.3 : Les segments ayant un nœud dans la zone et l'autre hors zone.

Le processus « création de la zone de la recherche » crée d'abord un nouveau nœud imaginaire dans le centre au milieu de la distance entre les deux itinéraires. Puis nous testons tous les nœuds des segments existants, s'ils appartiennent à ce cercle (la distance -entre le nœud testé et le centre- est inférieure ou égale au rayon du cercle), alors l'arrête (resp. arc) est incluse, sinon elle est rejetée.

L'organigramme (Fig. 4.4) suivant explique le processus de « création de la zone de recherche » :

## 4.2. Organigramme de la zone de recherche sans contraintes :

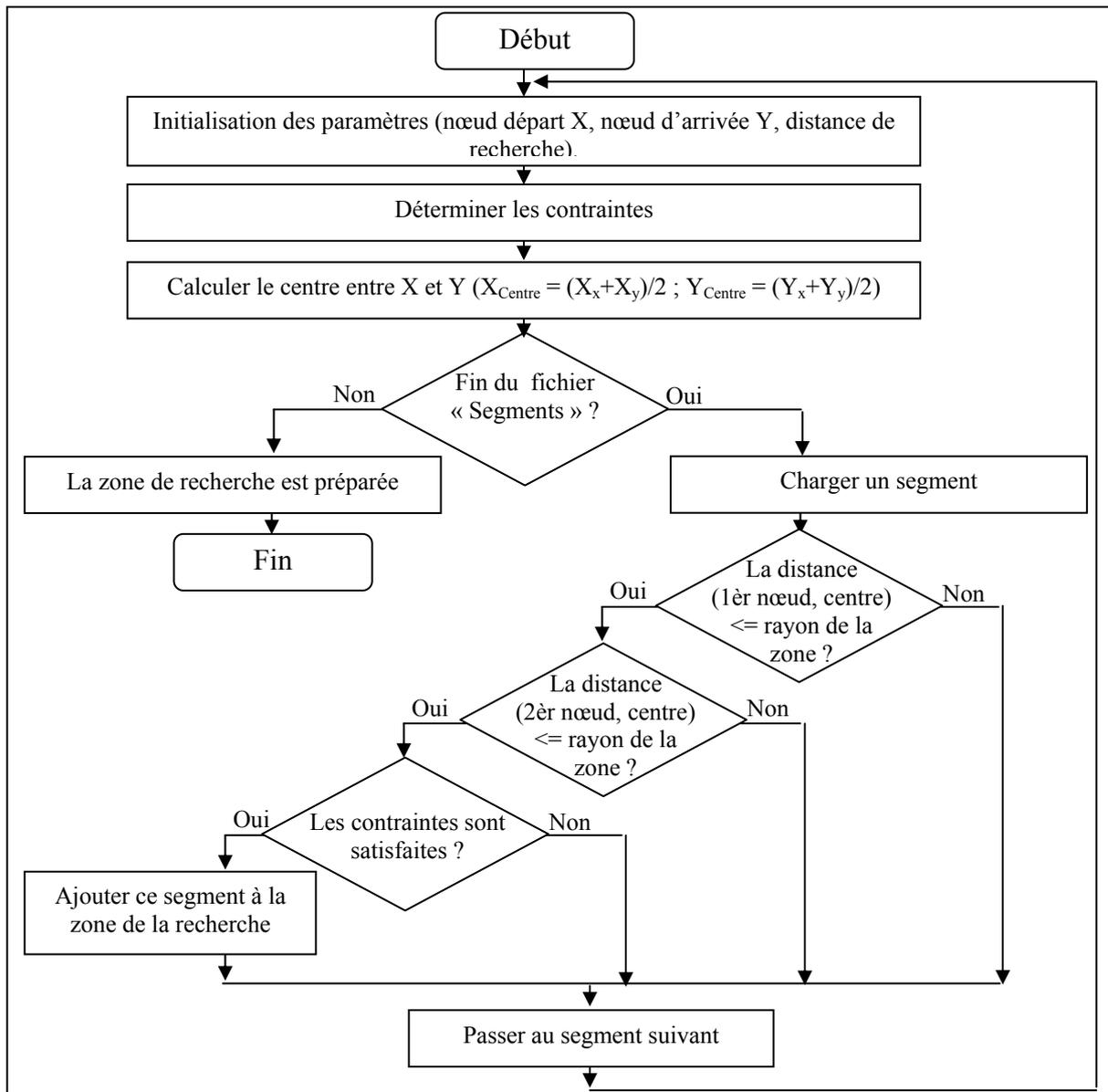


Figure 4.4: Organigramme « zone de la recherche sans contraintes ».

## 4.3. Création de la zone de recherche avec les requêtes SQL :

### 4.3.1. Définitions :

- SQL (Structured Query Language) désigne le langage d'interrogation des données informatiques stockées dans les bases relationnelles inventé dans les années 1970 [PET, 2008].
- SQL « langage de requête structuré » - est un langage de définition de données, un langage de manipulation de données et un langage de contrôle de données pour les bases de données relationnelles. Base, très complet, rend possible l'exécution de requêtes SQL directement, sans interprétation [ROD, 2010].

- Une requête, en terme général, est une demande d'information. Par exemple demander le chiffre d'affaires des magasins pour une année particulière. Une requête SQL fait exactement la même chose sauf qu'un certain formalisme est nécessaire pour respecter les règles d'interrogation en SQL [PET, 2008].
- Une requête SQL est un texte qui donne un ordre à exécuter à un moteur de base de données sur une base de données. Elle peut concerner un enregistrement ou plusieurs, elle peut mettre en jeu une table ou plusieurs.

### **4.3.2. La requête « création de la zone de recherche » :**

#### **4.3.2.1. Présentation :**

Il est courant, lorsqu'on cherche à se rendre d'un point à un autre dans un réseau routier, de chercher le plus court chemin, c'est-à-dire celui dont la distance est la plus petite. Si le nombre de trajets possibles entre le point de départ et le point d'arrivée est faible, il suffira de calculer les longueurs de chacun des trajets - en additionnant la longueur des liens qui le composent - et de comparer directement les longueurs obtenues. Mais une telle solution exhaustive devient rapidement impraticable si le nombre de trajets possibles est grand.

Lorsque l'objectif à minimiser dans un graphe pondéré est le temps et qu'il n'existe aucune contrainte sur le parcours d'un arc (par opposition au cas où l'on doit respecter une grille horaire), il est possible d'utiliser les mêmes algorithmes de plus court chemin avec la variation temps au lieu de distance entre les nœuds du graphe.

Lorsque la fonction de coût à optimiser n'est pas le temps mais qu'elle dépend du temps. Il est peu probable qu'il existe un algorithme en temps polynomial : ce problème est en effet NP-difficile puisqu'il permet de résoudre le problème de plus court chemin avec des contraintes de ressources.

La zone de recherche nous permet d'avoir des arrêtes (Resp. arcs) voisines des itinéraires, elles satisfont les contraintes demandées et elles sont pondérées avec des coûts (temps, distance, trafic ...). Dès que cette zone sera créée, on pourra lancer les algorithmes d'optimisation pour trouver les chemins optimaux dans cette zone d'espace limitée.

L'organigramme (Fig. 4.5) suivant présente l'algorithme global de la procédure « création de la zone de recherche ».

### 4.3.2.2. Organigrammes de la zone de recherche avec le coût « distance » et « temps » :

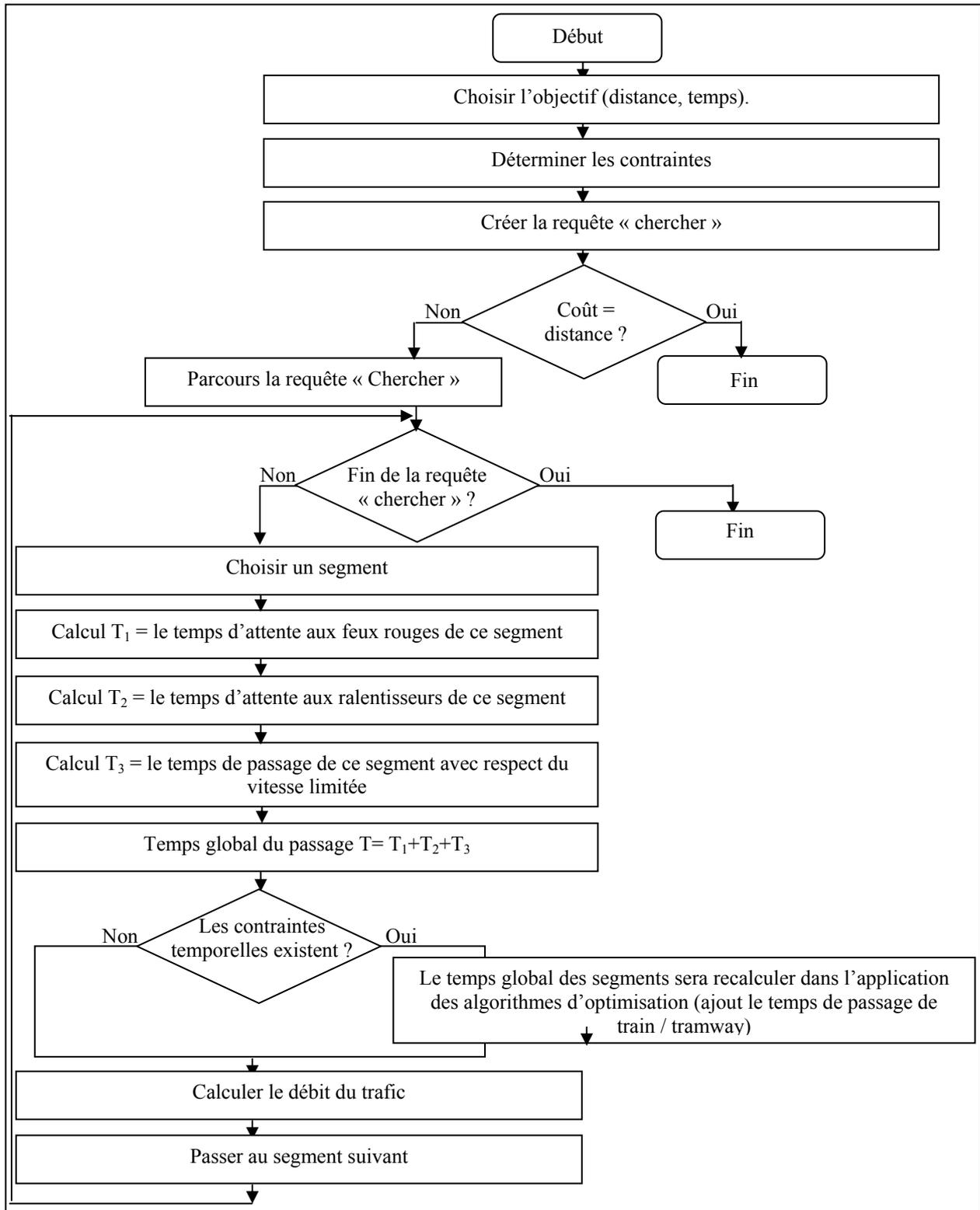


Figure 4.5 : Organigramme de la zone de recherche avec deux objectifs (distance, temps).

### 4.3.2.3. La requête « création de la zone de recherche, objectif = distance »

#### a. Sans contraintes :

```
Select S.num_seg as Num_segment, dep_noeud as Noeud_depart , fin_noeud as Noeud_arrivee ,
dis_seg as Longueur_en_Mètre From segments S Where (S.dep_noeud IN (Select num_noeud
From noeuds where (((cgx_noeud -:param1)*(cgx_noeud -:param1))+((cgy_noeud -
:param2)*(cgy_noeud -:param2))) <= (:param3 *:param3))) AND (S.fin_noeud IN (Select
num_noeud From noeuds where (((cgx_noeud -:param1)*(cgx_noeud -:param1))+((cgy_noeud -
:param2)*(cgy_noeud -:param2))) <= (:param3 * :param3)))[1] ;
```

:param1 : coordonnée géographique X pour le nœud du centre de la zone de recherche.

:param2 : coordonnée géographique Y pour le nœud du centre de la zone de recherche.

:param3 : le rayon de la zone de recherche.

#### b. Avec contraintes (prise en compte de la hauteur autorisée) :

**1. Présentation :** Cette requête nous permet de sélectionner l'ensemble des segments inclus dans une zone de recherche limitée entre deux nœuds (départ et arrivée), où la hauteur autorisée dans ces segments est supérieure ou égale à la variable param4, fixée par l'utilisateur.

#### 2. Schéma de la requête :

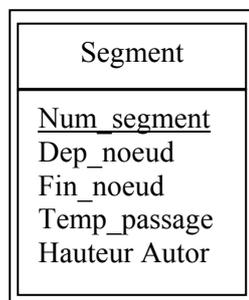


Figure 4.6: La table de la requête « hauteur autorisée ».

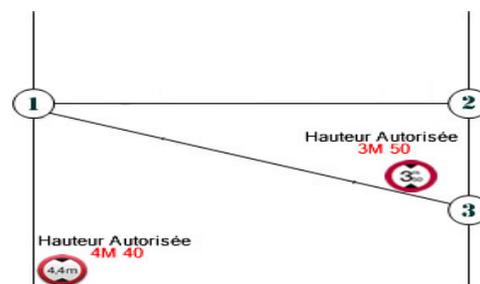


Figure 4.7: Hauteur autorisée dans un segment.

#### 3. La requête:

```
Select S.num_seg as Num_segment, dep_noeud as Noeud_depart , fin_noeud as Noeud_arrivee ,
dis_seg as Longueur_en_Mètre From segments S Where (S.dep_noeud IN (Select num_noeud
From noeuds where (((cgx_noeud -:param1)*(cgx_noeud -:param1))+((cgy_noeud -
:param2)*(cgy_noeud -:param2))) <= (:param3 *:param3))) AND (S.fin_noeud IN (Select
num_noeud From noeuds where (((cgx_noeud -:param1)*(cgx_noeud -:param1))+((cgy_noeud -
:param2)*(cgy_noeud -:param2))) <= (:param3 * :param3))) AND (hau_seg >= :param4) ;
```

:param1, :param2, :param3 : Idem; :param4 : Hauteur autorisée.

<sup>[1]</sup> Cette requête est écrite sous SQL local (est un sous-ensemble de la spécification SQL-92 utilisé pour accéder aux tables dBASE, Paradox et FoxPro).

#### 4.3.2.4. La requête « création de la zone de recherche, objectif = temps »

##### a. Sans contraintes:

###### 1. Principe :

La vitesse est par définition limitée à 50 km/h en agglomération. Par conséquent, cette limitation (qui entre en vigueur à partir de panneau d'entrée d'agglomération) n'est pas toujours signalée par un panneau d'interdiction. La vitesse maximale peut être ponctuellement relevée à 70 km/h sur les routes importantes traversant les villes (rocares, rues sans habitation, etc.).

Dans le cas, où il n'y a pas des panneaux qui limitent la vitesse, on va calculer la vitesse de passage sur les segments du réseau sur la vitesse 50 km/h comme valeur par défaut, la requête suivante calcule le temps de passage de chaque segment dans la zone de recherche.

###### 2. La requête:

```
Select S.num_seg as Num_segment, dep_noeud as Noeud_depart , fin_noeud as Noeud_arrivee ,
((S.DIS_Seg*60)/(50000)) As Temps_Passage_En_Minutes From segments S Where (S.dep_noeud
IN (Select num_noeud From noeuds where (((cgx_noeud -:param1)*(cgx_noeud -
:param1))+((cgy_noeud -:param2)*(cgy_noeud -:param2))) <= (:param3 *:param3))) AND
(S.fin_noeud IN (Select num_noeud From noeuds where (((cgx_noeud - :param1)*(cgx_noeud -
:param1))+((cgy_noeud - :param2)*(cgy_noeud -:param2))) <= (:param3 *:param3))) ;
```

Param1 : le numéro du segment ;

##### b. Avec contraintes (prise en compte des obstacles suivants : ralentisseurs, vitesse limitée, feux tricolores) :

###### 1. Principe :

Plusieurs techniques ou plutôt obstacles sont utilisées pour forcer les usagers de la route de diminuer leurs vitesses. On débutera par un simple ralentisseur sur la route et on terminera par un barrage officiel (police ou gendarmerie). Ces obstacles ou points de contrôle influencent amplement sur le temps de passage des segments.

Une panne d'un véhicule, un embouteillage causé par un accident, ou un autre imprévu sont des facteurs importants qui influencent largement sur le temps de parcours, et mettent tous nos calculs en doute. Mais supposons en cas idéal et on va ignorer dans nos calculs tous ces facteurs imprévus. Le temps de parcours d'un segment global est égal à la somme de temps de passage du segment sans obstacles et l'ensemble des temps d'attente devant les obstacles (ralentisseurs, feux tricolores)

La formule (4.1) calcule le temps de passage d'un segment avec des différentes vitesses sans prise en compte des obstacles:

$$\text{La durée} = \sum_{i=0}^n d_i \times v_i \quad (4.1)$$

**Erreur ! Signet non défini.** Où  $d_i$  est la distance de cette limitation de vitesse et  $v_i$  est la vitesse limitée.

**2. Les requêtes :**

- La requête « calcul le temps d’attente des feux tricolores » :

Segment	Nombre_Feux	Feu_Tricolore
<u>Num_segment</u> Dep_noeud Fin_noeud Temp_passage	<u>Num_segment</u> Num_feux Nombre	<u>Num_feux</u> <u>Typ_feux</u> <u>Temps_attente</u>

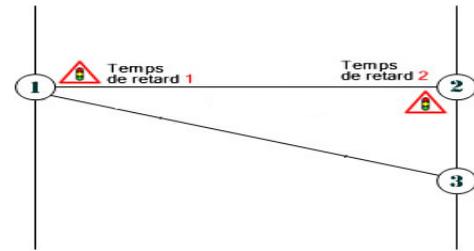


Figure 4.8: Les tables de la requête « calcul le temps de d’attente des feux tricolores d’un segment »

Figure 4.9: Les feux tricolores dans un segment.

```
Select SUM (Nombre * Temps_Attente) As Temps_Attente_Feux_Tricolore_En_Minutes From
Nombre_Feux N, Feux_Tricolores F Where (N.Num_Feux = F.Num_Feux) AND (N.Num_Seg = :Param1);
```

Param1 : le numéro du segment ;

- La requête « calcul le temps de ralentissement » :

Segment	Nombre_Ralentis	Ralentisseurs
<u>Num_segment</u> Dep_noeud Fin_noeud Temp_passage	<u>Num_segment</u> Num_ralent. Nombre	<u>Num_ralent.</u> <u>Typ_ralent.</u> <u>Temps_attente</u>

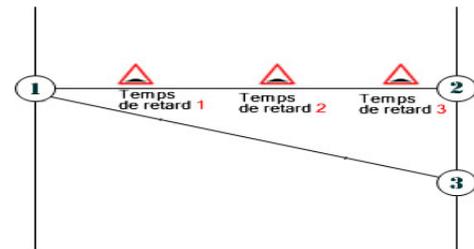


Figure 4.10: Les tables de la requête « calcul le temps de ralentissement »

Figure 4.11: Plusieurs ralentisseurs dans un segment

```
Select SUM (Nombre * Temps_Attente) As Temps_Attente_Ralentisseurs_En_Minutes From
Nombre_Ralentisseur_T, Ralentisseurs_R Where (T.Num_Ralentisseur = R.Num_Ralentisseur)
AND (T.Num_Seg = :Param1);
```

Param1 : le numéro du segment ;

- La requête « calcul le temps de passage d'un segment avec le respect des panneaux de limitation de vitesse » :

Segment	Distance limitée	Vitesse limitée
<u>Num_segment</u>	<u>Num_segment</u>	<u>Num_vitesse</u>
Dep_noeud	Num_vitesse	Type_engin
Fin_noeud	Distance_limitée	Vitesse_limite
Distance		

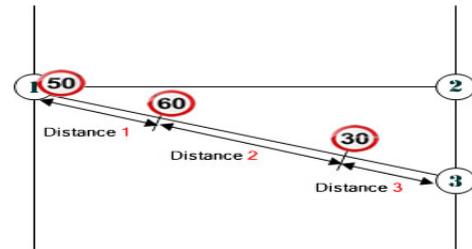


Figure 4.12: Les tables de la requête « calcul le temps de passage d'un segment ».

Figure 4.13: Plusieurs vitesses dans un segment.

```

Select SUM ((Distance_Limitée *60)/ (Vitesse_limite * 1000)) As
Temps_Passage_Segment_En_Minutes From Segments S, Distances_Limitee D, Vitesse_Limitee
V Where (S.Num_seg = D.Num_seg) AND (D.Num_Vit = V.Num_Vit) AND (S.Num_Seg
= :Param1);
Param1 : le numéro du segment ;
    
```

**c. Avec contraintes temporelles :**

**1. principe :**

Il arrive, en particulier dans les réseaux routiers, que certains arcs ne puissent être parcourus que dans certaines contraintes horaires. Comme le passage du train ou tramway. Ce temps d'attente du passage augmente le temps de parcourt du segment. Ce temps varie d'un passage à l'autre et d'un train à l'autre.

Pour traiter cette situation difficile surtout par la présence de plusieurs facteurs qui influencent sur le temps d'attente comme la file d'attente des véhicules et le non respect des horaires par les trains. Nos calculs ignorent ces facteurs et nous considérons que les trains respectent les horaires et le conducteur est seul devant le passage.

Soit les variables suivantes :

- $T_{\text{passage global}}$  : temps de passage global du segment (y compris l'attente du train ou tramway) ;
- $T_{\text{passage}}$ : temps de passage de segment (sans prise en compte du temps d'attente de passage du train », cette variable est déjà calculée par la requête « création de la zone de recherche avec le coût temps avec contraintes non temporelles »).
- $T_{\text{arrivée au passage}}$ : temps d'arrivée au passage;
- $T_{\text{début du passage}}$ : temps de début du passage de train ou tramway ;
- $D_{\text{passage}}$  : la durée de passage du train ou tramway ;

Le calcul du temps de passage d'un segment ayant un passage de train ou tramway.

Si ((  $T_{\text{arrivée au passage}} \geq T_{\text{début du passage}}$  ) ET (  $T_{\text{arrivée au passage}} < T_{\text{début du passage}} + D_{\text{passage}}$  )) Alors

$$T_{\text{passage global}} = T_{\text{passage}} + (T_{\text{début du passage}} + D_{\text{passage}}) - T_{\text{arrivée au passage}};$$

Fin

Sinon

$$T_{\text{passage global}} = T_{\text{passage}}.$$

FIN

## 2. La requête « calcul le temps d'attente devant les passages de tramway et train » :

Segment	Passage_Train tramway	R13 (temps attente prévu)	Horaire_de Passage
<u>Num_segment</u> Dep_noeud Fin_noeud Temp_de passage	<u>Num_passage</u> <u>Num_segment</u> Typ_passage Type_barrière Nom_gardien	<u>Num_passage</u> <u>Num_horaire</u> Temps_prévu _passage	<u>Num_horaire</u> Le jour Temps_début _de passage

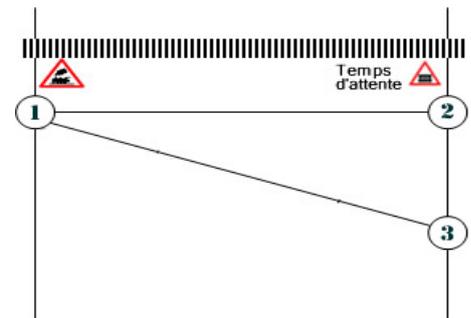


Figure 4.14: Les tables de la requête « calcul le temps d'attente devant les passages de tramway et train »

Figure 4.15: Les passages de train et de tramway

```

Select S.num_seg as Num_segment, dep_noeud as Noeud_depart , fin_noeud as Noeud_arrivee ,
Jour, Temps_Debut_de_passage, Temps_Prévu_passage From segments S,
Passage_Train_Tramway P, R13 M, Horaire_passage H Where (S.Num_seg = P.Num_seg) AND
(P.Num_pas = M.Num_pas ) AND (M.Num_hor = H.Nom_Hor) AND (S.Num_Seg = :Param1);
Param1 : le numéro du segment ;
    
```

## 5. Les algorithmes de colonie de fourmis:

### 5.1. Définition :

À l'origine, l'optimisation par colonie de fourmis (en anglais Ant Colony Optimization - ACO) a été conçue pour résoudre le problème du voyageur de commerce. L'objectif de ce problème étant de trouver la tournée la plus courte pour servir un ensemble de villes. Le premier algorithme proposé dans ce contexte fut appelé « Ant System » (AS) par son auteur Marco Dorigo. Chaque fourmi représente un agent qui en se déplaçant d'une ville à une autre, laisse des traces sur le chemin parcouru [DOR, 1992].

Le choix des villes à visiter se fait à l'aide d'une probabilité basée sur un compromis entre l'intensité de la trace laissée et la visibilité qui prend en considération la distance entre les villes. Finalement, une fourmi possède une sorte de mémoire Tabou lui rappelant la liste des villes déjà visitées afin de lui permettre de former une solution admissible [GAG, 2001].

D'autres variantes d'amélioration de cet algorithme ont été proposées. Nous pouvons citer Ant-Q

[DOR, 1996a], Ant Colony System (ACS) [DOR, 1997a] et Max-Min Ant System [STU, 2000]. Dans [GAG, 2001] les auteurs ont utilisé l'optimisation par colonies de fourmis pour résoudre un problème réel d'ordonnement.

Un algorithme de colonies de fourmis est un algorithme itératif à population où tous les individus partagent un savoir commun qui leur permet de guider leurs futurs choix et d'indiquer aux autres individus des directions à suivre ou au contraire à éviter.

Fortement inspiré du déplacement des groupes de fourmis, cette méthode a pour but de construire les meilleures solutions à partir des éléments qui ont été explorés par d'autres individus.

Chaque fois qu'un individu découvre une solution au problème, bonne ou mauvaise, il enrichit la connaissance collective de la colonie. Ainsi, chaque fois qu'un nouvel individu aura à faire des choix, il pourra s'appuyer sur la connaissance collective pour pondérer ses choix [SCH, 2008a].

## 5.2. Comportement des fourmis :

Les fourmis déposent des phéromones sur le sol et sont attirées par les chemins qui en comportent la plus grande concentration. Partant de la fourmilière, elles explorent au hasard les environs en déposant chacune leur trace de phéromone. Lorsqu'une source de nourriture a été trouvée par une fourmi, elle revient sur ses pas en marquant doublement le chemin qu'elle a suivi (aller et retour). Le premier chemin marqué doublement est celui qui permet à la fourmi qui l'emprunte de revenir la première à la fourmilière, c'est donc le plus court. Les autres fourmis sont alors attirées de préférence par ce chemin marqué, et l'exploitation de la nourriture peut y commencer [ZWI, 2006] (Fig. 4.16).

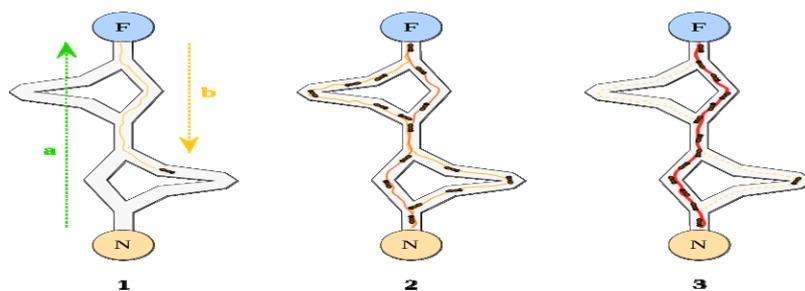


Figure 4.16: 1) la première fourmi trouve la source de nourriture (F), via un chemin quelconque (a), puis revient au nid (N) en laissant derrière elle une piste de phéromone (b). 2) les fourmis empruntent indifféremment les quatre chemins possibles, mais le renforcement de la piste rend plus attractif le chemin le plus court. 3) les fourmis empruntent le chemin le plus court, les portions longues des autres chemins perdent leur piste de phéromones.

Les algorithmes imitant le comportement des fourmis se sont révélés des plus performant surtout pour résoudre le problème du voyageur du commerce. On commence par lâcher au hasard sur les villes des

fourmis virtuelles dont chacune va accomplir un trajet complet selon la règle suivante : la probabilité pour une fourmi située dans une ville donnée d'aller ensuite dans une ville qu'elle n'a pas encore visitées est proportionnelle à la concentration en phéromone du chemin entre les deux villes et inversement proportionnelle à la distance entre les deux villes. Ainsi les trajets courts et fortement marqués seront privilégiés. Lorsque toutes les fourmis ont bouclé un tour complet, les traces de phéromone déposés sont mises au jour en faisant intervenir une certaine évaporation et en renforçant la trace de manière proportionnelle au nombre de fourmis qui l'ont parcourue et inversement proportionnelle à la longueur du trajet. Ces étapes sont ensuite répétées jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante.

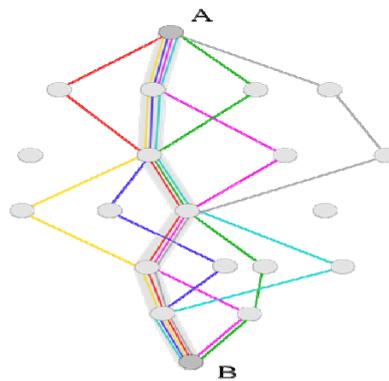


Figure 4.17: Avec un algorithme de colonies de fourmis, le plus court chemin, au sein d'un graphe, entre deux points A et B, est construit à partir de la combinaison de plusieurs chemins.

### 5.3. Méthode usuelle d'optimisation avec l'ACO:

Il y a deux façons d'aborder les algorithmes de colonie de fourmis :

- La première est celle qui a, historiquement, menée au « Ant System » original ; et que nous allons décrire dans la section suivante;
- La seconde est une description plus formelle des mécanismes communs aux algorithmes de colonies de fourmis [ETS, 2008].

### 5.4. Description de l'algorithme de base « Ant system » (AS) :

Le problème du voyageur de commerce, à l'origine de l'AS, consiste à trouver le trajet le plus court reliant « n » villes données, chaque ville ne devant être visitée qu'une seule fois. Le problème est plus généralement défini comme un graphe complètement connecté  $(N; A)$ , où les villes sont les noeuds « N » et les trajets entre ces villes, les arêtes A.

Dans cet algorithme de colonies de fourmis de base, à chaque itération  $t$  ( $1 < t < t_{\max}$ ), chaque fourmi  $k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) parcourt le graphe et construit un trajet complet de  $n = |N|$  étapes (on note  $|N|$  le cardinal de l'ensemble N). Pour chaque fourmi, le trajet entre une ville  $i$  et une ville  $j$  dépend de :

1. la liste des villes déjà visitées, liste tabou, qui définit les mouvements possibles à chaque étape, quand la fourmi  $k$  est sur la ville  $i$  :  $J_i^k$  ;

2. l'inverse de la distance entre les villes :  $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ , appelée visibilité. Cette information "statique" est utilisée pour diriger les fourmis vers des villes proches, et éviter les villes trop lointaines ;

3. la quantité de phéromone déposée sur l'arête reliant les deux villes, appelée l'intensité de la traînée. Ce paramètre définit l'attractivité d'une partie du trajet global et change à chaque passage d'une fourmi. C'est, en quelque sorte, une mémoire globale du système, qui évolue par apprentissage [DRE, 2004].

La règle de déplacement (appelée règle aléatoire de transition proportionnelle" par les auteurs [BON, 1999] est la suivante :

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} (\tau_{il}(t))^\alpha \cdot (\eta_{il})^\beta} & \text{Si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{Si } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (4.2)$$

Où :

-  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux paramètres qui contrôlent l'importance relative de l'intensité de la piste,  $\tau_{ij}(t)$ , et de la visibilité,  $\eta_{ij}$ .

Si  $\alpha = 0$ , seule la visibilité de la ville est prise en compte ; la ville la plus proche est donc choisie à chaque pas. Par contre, si  $\beta = 0$ , seule la quantité de phéromone détermine le choix de la ville à explorer.

Pour éviter une sélection trop rapide d'un trajet, un compromis entre ces deux paramètres, jouant sur les comportements de diversification et d'intensification, est nécessaire.

Après un tour complet, chaque fourmi laisse une certaine quantité de phéromone  $\Delta \tau_{ij}^k(t)$  sur l'ensemble de son parcours, quantité qui dépend de la qualité de la solution trouvée :

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{si } (i, j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (4.3)$$

Où :

- $T^k(t)$  est le trajet effectué par la fourmi  $k$  à l'itération  $t$ ,
- $L^k(t)$  la longueur de la tournée,
- $Q$  paramètre fixé.

L'algorithme ne serait pas complet sans le processus d'évaporation des traînées de phéromone. En effet, pour éviter d'être piégé dans des solutions « sous-optimales », minimum local, il est nécessaire de permettre au système « d'oublier » les mauvaises solutions. Pour cela, il faut contrebalancer l'additivité des traînées par une diminution constante de la quantité de phéromone des arêtes à chaque itération. La règle de mise à jour des traînées de phéromone est donc :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (4.4)$$

Où  $m$  est le nombre de fourmis et  $\rho$  le taux d'évaporation. La quantité initiale de phéromone sur les arêtes est une distribution uniforme d'une petite quantité  $\tau_0 \geq 0$ .

Le processus itératif décrit ci-dessus permet de trouver rapidement une solution de qualité pour des problèmes d'optimisation combinatoire.

---

Algorithme de colonies de fourmis de base « Ant System ».

---

**Pour**  $t = 1, \dots, t_{\max}$

**Pour** chaque fourmi  $k = 1, \dots, m$

**Choisir** une ville au hasard

**Pour** chaque ville non visitée  $i$

**Choisir** une ville  $j$ , dans la liste  $J_i^k$ , des villes restantes, selon la formule (4.2)

**Fin Pour**

**Déposer** une piste  $\Delta \tau_{ij}^k(t)$  sur le trajet  $T^{k_t}(t)$  conformément à la formule (4.3)

**Fin Pour**

**Évaporer** les pistes selon la formule (4.4)

**Fin Pour**

---

Figure 4.18: Algorithme de colonies de fourmis de base «Ant System ».

### 5.5. La complexité :

Marco DORIGO a divisé l'algorithme en 5 sections pour calculer la complexité :

1. initialisation.
2. un cycle de l'algorithme.
3. fin du cycle et calcul des dépôts de phéromone.
4. Evaporation des phéromones.
5. boucle de l'algorithme.

Procédons étape par étape :

1. On a une complexité  $O(|L| + m) = O(n^2 + m)$ , puisque l'on a supposé une interconnexion totale entre les villes.
2. La complexité est  $O(n^2 \cdot m)$ , puisque les opérations de calcul de la ville suivante nécessite un balayage de l'intégralité des villes.
3. La complexité est  $O(|L| + m \cdot |L|) = O(m \cdot |L|) = O(n^2 \cdot m)$ .
4. La complexité est  $O(|L|) = O(n^2)$ .
5. Le test de stagnation est de complexité  $O(n \cdot m)$  (on doit comparer les tours de  $m$  fourmis, chaque tour ayant une longueur de  $n$  éléments).

La complexité globale est obtenue en additionnant la complexité de l'étape 1, au produit du nombre total de cycle (soit  $NC_{\max}$ ) par la complexité globale des étapes 2 à 5. La complexité globale étant celle maximale, soit  $O(n^2 \cdot m)$ . La complexité générale de l'algorithme devient donc :

$$O(n^2 + m + NC_{\max} \cdot n^2 \cdot m) \quad (4.5)$$

soit :  $AS_{\text{complexity}} = O(NC_{\max} \cdot n^2 \cdot m)$

Il faut noter cependant que cette formule ne nous dit rien sur le nombre d'étapes qui sont effectivement nécessaires pour atteindre l'optimum : on pourrait atteindre celui-ci bien avant les  $NC_{\max}$  cycles [COS, 2006].

## 5.6. Variantes :

**5.6.1. Ant System et élitisme :** Une première variante de « Ant System » a été proposée par Dorigo [DOR, 1996b]: elle est caractérisée par l'introduction de fourmis « élitistes ». Dans cette version, la fourmi qui a effectué le trajet le plus court (la meilleure) dépose une quantité plus importante de phéromone, dans l'optique d'accroître la probabilité des autres fourmis d'explorer la solution la plus prometteuse.

**5.6.2. Ant-Q :** Dans cette variante de AS, la règle de mise à jour locale est inspirée du « Qlearning<sup>[1]</sup> » [GAM, 1995]. Cependant, aucune amélioration par rapport à l'algorithme AS n'a pu être démontrée. Cet algorithme n'est d'ailleurs, de l'aveu même des auteurs, qu'une pré-version du « Ant Colony System ».

---

<sup>[1]</sup> Q-Learning est un algorithme d'apprentissage par renforcement non supervisé, qui repose sur le modèle mathématique des processus décisionnels de Markov.

**5.6.3. ACS & 3-opt :** Cette variante est une hybridation entre le ACS et une recherche locale de type 3-opt [DOR, 1997a]. Ici, la recherche locale est lancée pour améliorer les solutions trouvées par les fourmis (et donc les ramener à l'optimum local le plus proche).

**5.6.4. Max – Min Ant System :** Dans [STU, 1997] est introduit l'utilisation de valeurs  $\tau_{\max}$  et  $\tau_{\min}$  pour l'intensité de la trace de phéromone. Ceci permet d'éviter que certains chemins soient trop favorisés. De plus, si la recherche ne progresse plus, un mécanisme de «*smoothing*» permet de remettre à flot certains arcs. On peut aussi retenir l'utilisation de listes candidates pour accélérer la recherche et l'utilisation d'une recherche locale pour améliorer les solutions [MON, 2000]. Cette recherche locale est appliquée pour toutes les fourmis ou pour la meilleure de l'itération seulement. Retenons les points principaux de la méthode, notée MMAS-TSP :

- la mise à jour des phéromones est globale ;
- les phéromones sont bornées :  $\tau_{ij} \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}]$  ;
- elles sont initialisées à  $\tau_{\max}$ .

**5.6.5. Ant Colony System :** l'algorithme « Ant Colony System » (ACS) a été introduit pour améliorer les performances du premier algorithme sur des problèmes de grandes tailles [DOR, 1997a], [DOR, 1997b].

ACS introduit une règle qui dépend d'un paramètre  $q_0$  ( $0 \leq q_0 \leq 1$ ), qui définit une balance diversification/intensification. Cette règle permet aux fourmis de favoriser plus, lors de leurs déplacements, l'arête qui contient le maximum de traces suivant  $q_0$ , sinon la règle de transition habituelle est utilisée. Ainsi ACS permet d'intensifier plus la recherche vers les zones les plus prometteuses, qui contiennent plus de traces [ALA, 2009].

Les résultats obtenus par ACS sur le PVC sont les meilleurs obtenus par les heuristiques à base de fourmis sans toutefois dépasser les meilleures heuristiques dédiées à ce problème [MON, 2000].

**5.6.6. AntNet :** l'algorithme AntNet développé par Di Caro et Dorigo [DOR, 1998a], [DOR, 1998b] a été conçu pour résoudre les problèmes de routage dans les réseaux. Il utilise des agents fourmis qui sont chargés de modifier les tables de routage afin de les adapter aux fluctuations du réseau.

## 6. Application de colonie de fourmis sur le réseau routier urbain :

### 6.1. Présentation :

Un graphe peut être représenté par un tableau à deux dimensions ou par des listes chaînées.

Dans le cas de l'implémentation sous la forme d'un tableau, les lignes et les colonnes sont les sommets du graphe, chaque case au croisement de la ligne  $s_1$  et de colonnes  $s_2$  contient la valeur de l'arc  $(s_1, s_2)$

du graphe. Si le graphe est non orienté, le tableau est symétrique par rapport à sa diagonale, la distance de  $s_1$  et  $s_2$  est la même que celle de  $s_2$  à  $s_1$ . La diagonale du tableau ne contient que des valeurs à 0 : quelque soit le sommet  $s$ , l'arc  $(s, s)$  est égal à 0. Les cases « vides » sont affectées par une valeur représentant l'infini, par exemple 99999, pour indiquer qu'il n'existe pas d'arc.

L'avantage de cette représentation est sa simplicité. La valeur de l'arc  $(s_1, s_2)$  est fournie par la case de ligne  $s_1$  et de colonne  $s_2$ . L'inconvénient majeur est l'occupation inutile d'espace mémoire. La plupart des cases sont vides (chaque sommet n'a de relation qu'avec quelques sommets seulement). Dans le cas de graphes importants, elle doit être évitée.

L'autre représentation en listes chaînées précise pour chaque sommet  $s$  la liste des sommets adjacents. Les informations portées par les éléments de la liste sont le « nom » du sommet adjacent et sa distance à  $s$ , la liste des sommets peut être aussi une liste chaînées ou un tableau « colonne ». Cette représentation minimise l'occupation mémoire, mais elle est moins simple à programmer [LER, 2010].

## 6.2. L'Algorithme de colonie de fourmis pour résoudre le problème de plus court chemin multi-objectifs (MOSPACO):

### 6.2.1. Présentation :

Le problème de plus court chemin multi-objectif a pour objectif le choix d'un chemin dans un graphe en tenant compte simultanément de deux ou plusieurs objectifs. Dans notre cas, nous avons sept objectifs à savoir le temps, la distance, trafic, le nombre des ralentisseurs, le nombre des feux tricolores, la hauteur autorisée et le poids autorisé.

La recherche d'un chemin dans un graphe  $G(V, A)$  consiste à trouver la succession de noeud et de mode transport à utiliser. Selon l'additivité des critères, chaque chemin est évalué par un «vecteur performance»  $C^1(P_{st}) = \{C^1(P_{st}), \dots, C^n(P_{st})\}$  correspondant à la somme des coûts associés au critère  $l$  le chemin  $P_{st}$ . Résoudre le problème de plus court chemin multi-objectif revient donc à trouver l'ensemble des chemins ayant un vecteur performance  $c^1(P_{st})$  minimal [SAW, 2010].

Dans MOSPACO (Multi-Objective Shortest Path ACO) a été proposé une nouvelle définition de la règle de transition par une stratégie de matrices de phéromones et de visibilité multiples. Une matrice de visibilité est associée à chaque objectif et est définie comme l'inverse de la valeur objectif associé à l'arc candidat. En d'autres termes, nous avons utilisé des matrices phéromone et de visibilité multi-objectif multimodale avec

$$\Delta\tau_{ij}^{lm} = \sum_{f \in W} \frac{Q}{c^l(P_{st}^{(f)})} \text{ et } \eta_{ij}^{lm} = \left( \frac{1}{\varepsilon + c_{ij}^l} \right). \quad (4.6)$$

Chaque fourmi possède une mémoire  $Liste_f$  qui stocke les informations concernant le chemin choisi, le nombre de transbordements réalisé ainsi le vecteur performance de chaque chemin. Une seule colonie de fourmis est utilisée et les solutions obtenues par chacune des fourmis sont évaluées par des tests de dominance, réalisés suivant deux scénarios: le scénario économique (temps et distance) et le scénario écologiques (trafic, feux tricolores).

### 6.2.2. Algorithme de colonies de fourmis multi-objectif pour résoudre le problème de plus court chemin (MOSPACO):

---

#### Algorithme MOSPACO (Ant colony optimization for multi-objective shortest path problem)

---

Fixer les paramètres de l'algorithme  $\alpha, \beta, \tau_0, \rho, N_f$  et la condition d'arrêt  $n\_tours$ , puis charger le réseau à étudier

**Tant que** le nombre maximal d'essais n'est pas atteint

**Initialisation**

Initialiser les traces de phéromones à  $\tau_0$  sur tous les arcs

Itération=1

**Pour** toutes les fourmis  $f = 1, \dots, N_f$

Si  $s \rightarrow t$

Placer toutes les fourmis au nœud  $s$

$liste_f \leftarrow s$

Sinon

Si  $t \rightarrow s$

Placer toutes les fourmis au nœud  $t$

$liste_f \leftarrow s$

**Fin pour**

**Construction**

**Tant que** la condition d'arrêt n'est pas atteinte

**Pour** tout nœud  $j \in \Gamma_i^+$

Pour tout critère  $l = 1 \dots n$

Calculer la probabilité  $p_{ij}^f$  pour tous les successeurs  $j ; j \in \Gamma_i^+$

Choisir le nœud  $j$  suivant une règle de transition

$liste_f \leftarrow j$

Mise à jour locale

**Fin pour**

**Fin tant que**

**Évaluation**

Si toutes les fourmis arrivent au nœud destination  $t$

$P_{st} \leftarrow liste_f$

Calculer les vecteurs objectifs associés aux chemins trouvés.

Appliquer les tests de dominance, mettre à jour le front de Pareto

**Mise à jour des traces**

Appliquer la mise à jour globale

**Itération ++.**

$n_{try} ++$

**Fin tant que**

---

Figure 4.19: Algorithme de MOSPACO

## 7. Conclusion :

Le réseau routier de la commune d'Oran, comprend des centaines de kilomètres de chaussée. Si on place un point sur toutes les intersections avec ses coordonnées (géographique et GPS), cela fera des milliers de données à stocker. On peut rajouter d'autres informations importantes (voie, hauteur et poids autorisé, vitesse limitée,...etc) sur chaque rue, localité, les programmes des horaires des trains et tramways. De ce fait, on va se trouver avec une base de donnée très riche, très lourde et difficile à gérer.

Le réseau routier est en fait un gigantesque graphe dont les sommets sont les points GPS ou coordonnées géographiques et les arrêtes les segments de route. La recherche d'un chemin optimal, au sens d'un critère, pour relier un point de départ à point d'arrivée. Le critère pourra être le chemin le plus court ou le plus rapide ou le plus économique.

Toute recherche quelconque exige deux informations nécessaires la cible (la destination) et le point de départ. Sans ces deux paramètres on ne peut jamais lancer une recherche. La détermination de la zone de recherche nous facilite la localisation des cibles, elle nous minimise les efforts de recherche et elle nous permet de trouver la cible rapidement et avec moins d'effort. Plus on aura des échecs dans notre recherche, plus on doit étendre la zone de recherche

L'algorithme de colonie de fourmis est une métaheuristique basée sur le comportement collectif des fourmis. Son principe consiste à « lancer » des fourmis, et à les laisser élaborer pas à pas la solution, en allant d'un noeud à l'autre. C'est donc un algorithme qui repose sur la construction progressive de solutions. Afin de ne pas revenir sur ses pas, une fourmi tient à jour une liste « Tabou », qui contient la liste des noeuds déjà visités.

Le problème de plus court chemin multiobjectif a pour objectif le choix d'un chemin dans un graphe en tenant compte simultanément de plusieurs objectifs. Dans notre cas, nous avons sept objectifs à savoir le temps, la distance, le trafic, le nombre des ralentisseurs, le nombre des feux tricolores, la hauteur autorisée et le poids autorisé.

Dans le chapitre suivant, nous concrétiserons la solution proposée dans le chapitre 4 et nous analyserons les résultats obtenus par l'application de MOSPACO sur notre réseau routier urbain de la commune d'Oran.

**Chapitre V :**  
*Implémentation*

« Quand les fourmis se mettent ensemble, elles peuvent transporter un éléphant »  
Proverbe Africain

## **1. Introduction :**

Afin de valider le modèle théorique et l'algorithme de colonies de fourmis, présentés au chapitre quatre, nous avons développé une application permettant de proposer un système d'aide à la décision. Ce chapitre est donc dédié à l'implémentation de l'algorithme de MOSPACO. Pour ce faire, nous avons construit une base de données composée d'un réseau de transport basée sur une cartographie utilisant des données géographiques réelles de la commune d'Oran. Nous avons également construit une base de données sur les paramètres d'entrée du modèle notamment les coûts fixes et variables.

La concrétisation de la solution choisie dans le chapitre précédant fait appel aux questions suivantes :

- Quels sont les outils (en matériels et en logiciels) nécessaires pour réaliser une application qui gère le réseau routier urbain ?
- Quelle est la méthodologie la plus efficace pour simplifier l'application proposée ?
- Quel est le système de gestion de base de données (SGBD) approprié qui sauvegarde nos données (géographiques, images, numériques,... ect) ?
- Quel est le langage de programmation adéquat pour programmer et appliquer les algorithmes de plus court chemin simple et multiobjectifs?

Les réponses à ces questions et autres, forment nos buts opérationnels dans ce chapitre.

## 2. Présentation de l'application :

### 2.1. Principe et objectifs :

L'objectif de notre étude est de réaliser un système d'information géographique puissant capable :

- Gérer le réseau routier national algérien ;
- Gérer les plaques de signalisation (les feux tricolores, les ralentisseurs, les vitesses limitées, ...ect) ;
- Trouver les chemins les plus courts ou les plus rapides entre deux emplacements dans un milieu urbain.
- Prendre en considération les contraintes temporelles (les passages des trains et tramways) pour calculer les chemins les plus rapides.
- L'application d'un algorithme de colonie de fourmis de plus court chemin multi-objectifs (MOSPACO) sur une zone de travail limitée et calculée.

L'application consiste à convertir le réseau routier national en graphes orientés pondérés entre le point de départ (nœud initial) et le point d'arrivée (nœud final), comme le montre la (Fig. 5.1) suivante :

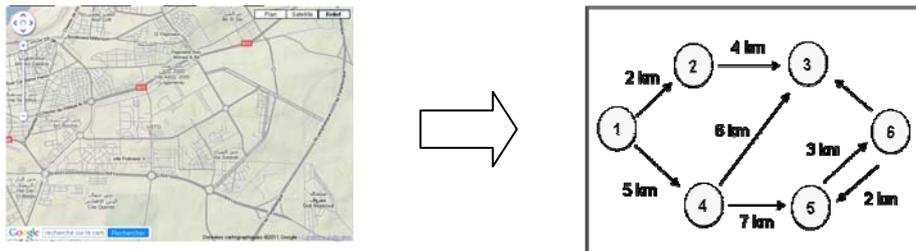


Figure 5.1 : Convertir le réseau routier en un graphe orienté pondéré.

Le travail se base sur un fichier nommé « segment », qui est presque en relation avec tous les autres fichiers. Pour se localiser dans ce fichier « segment », il faut avoir une clé de recherche ou le code de l'occurrence. Ce code de 13 caractères est difficile à saisir ou à retenir, il est sujet à l'erreur de frappe. Le moyen efficace de le saisir est d'utiliser le principe des classes et sous classes, C.A.D de choisir la classe mère « wilaya » puis la sous classe « Daïra », « Commune », « Quartier », « Rue » et enfin se localiser sur le segment choisi. Mais la possibilité de le saisir directement reste offerte.

La figure suivante (Fig. 5.2) nous donne le plan de notre application. Le fichier « segment » est un fichier important dans l'application. Il appartient à la gestion administrative de l'environnement (rue, quartier, commune,...ect) et à la gestion du réseau routier (les feux tricolores, les ralentisseurs, les vitesses limitées,...ect). Le fichier «rues ou routes » contient des rues urbaines et des routes inter communales ou inter wilayas (autoroute).

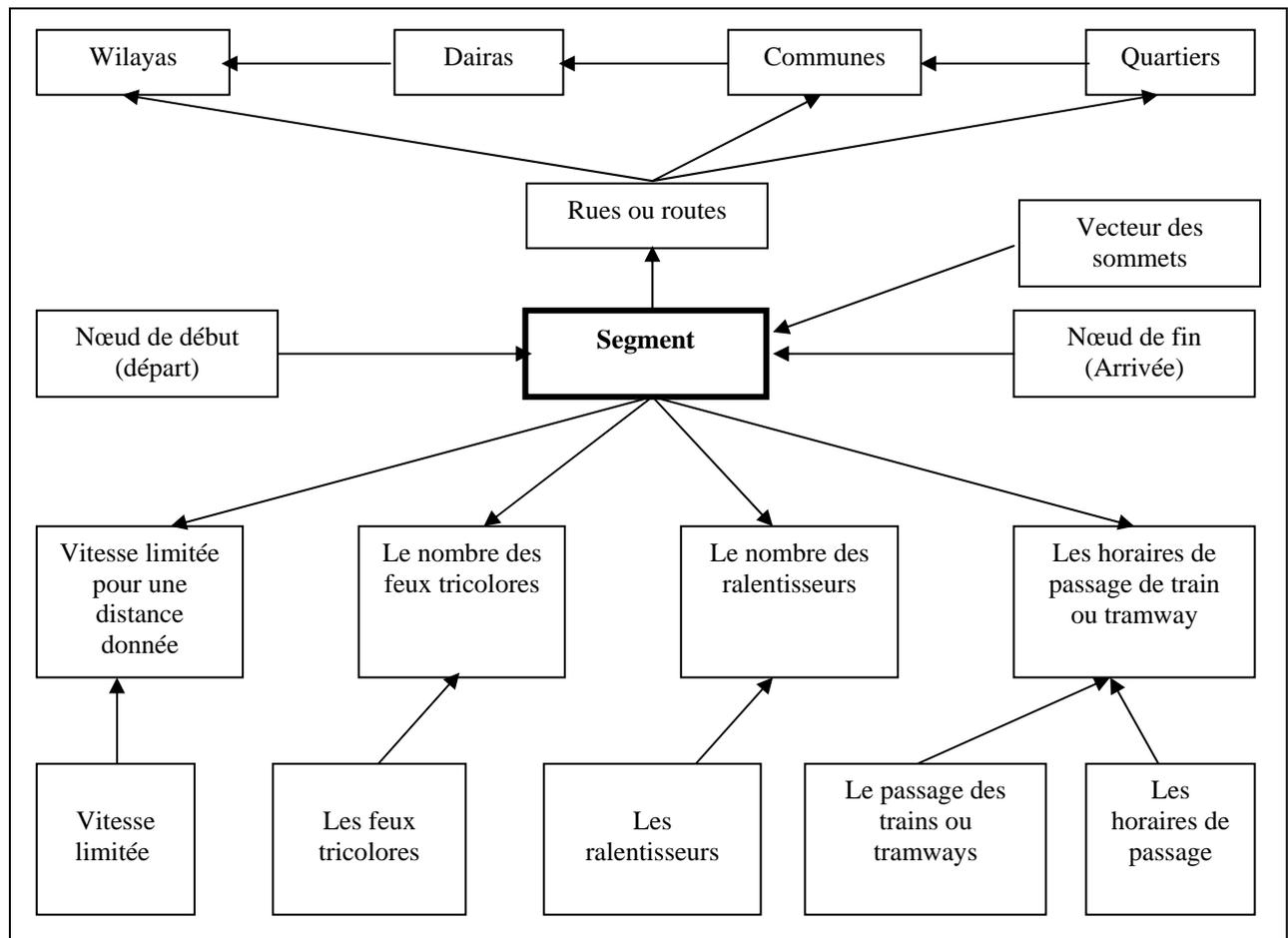


Figure 5.2 : Les tables de l’application.

La mise à jour des fichiers de base est assurée dans l’application, elle permet de créer, de modifier et de supprimer les occurrences pour chaque fichier. Simplifier l’accès à cette mise à jour dans le moment et l’emplacement adéquat, est une technique qu’on doit l’apprendre en considération dans la conception de l’application.

Le tableau suivant récapitule l’ensemble des fiches de mise à jour dans l’application. Ces fiches se basent sur deux fichiers différents (maître et esclave) pour assurer la cohérence des données (clés) entre les fichiers.

N°	Fiches	Maîtres	Esclaves
01	Table_wilaya_daira	Wilaya	Dairas
02	Table_wilaya_rues	Wilaya	Rues
03	Table_daira_commune	Daira	Commune
04	Table_commune_rue	Commune	Rues
05	Table_commune_quartier	Commune	Quartiers
06	Table_rues_segment	Rues	Segments
07	Table_noeuds_debut_segment	Nœuds	Segment
08	Table_noeuds_fin_segment	Nœuds	Segment
09	Table_segment_vitesse_limitee	Segment	Distance_vitesse_limitee
10	Table_segment_nbr_feus_tricolore	Segment	Nombre_feus_tricolore
11	Table_segment_nbr_ralentisseur	Segment	Nombre_ralentisseur
12	Table_segment_passage_train	Segment	Passage_train_tramway
13	Table_passage_train_horaires	Passage_train_tw	Horaires_passage
14	Table_segment_vecteurs_sommets	Segment	Vecteur_sommets

Tableau 5.1: Les fiches de mise à jour.

## 2.2. Aspect physique et logiciel :

Les tests ont été effectués sur un micro-ordinateur : Pentium IV, une mémoire vive de 1 G octet, un disque Dur de 40 Géra octet, Windows XP et la configuration recommandée de la carte VGA est 800/600 (la résolution d'écran) et 32 bits (qualité de couleur).

Le langage de programmation choisi est le c++ Builder V.6 de Borland qui est un environnement de programmation visuel orienté objet pour le développement rapide d'applications (RAD). Il fournit tous les outils nécessaires pour développer, tester et déployer vos applications, notamment une importante bibliothèque de composants réutilisables, une suite d'outils de conception, des modèles d'applications et de fiches, ainsi que des experts de programmation [BOR, 2002].

Le moteur de bases de données Borland (BDE) est un mécanisme d'accès aux données pouvant être partagé entre plusieurs applications. Le BDE définit une puissante bibliothèque d'appels API qui peuvent créer, restructurer, mettre à jour, interroger ou manipuler des serveurs de bases de données locaux ou distants. Le BDE fournit une interface uniforme permettant d'accéder à une grande variété de serveurs, en utilisant des pilotes pour se connecter aux différentes bases de données. Nous pouvons utiliser les pilotes pour la base de données locale (Paradox, dBASE, FoxPro et Access) et un adaptateur ODBC qui nous permet de fournir nos propres pilotes ODBC [EMB, 2012].

Nous avons utilisé les tables PARADOX (.db) qui est un système de gestion de base de données relationnelle édité par Corel. Depuis la version 8, Paradox fait partie de la suite bureautique Wordperfect

Office Pro. Paradox est donc un SGBDR présentant une approche bureautique et n'est pas conçu pour supporter de très grandes bases de données opérationnelles sur de vastes réseaux, ces utilisations étant confiées aux serveurs SQL distant, auxquels Paradox offre l'accès au travers des diverses interfaces supportées par le BDE.

Les données de Paradox, lorsqu'elles sont au format DBF, sont facilement exploitables dans les publipostages d'OpenOffice.org ou Word et les tableaux OpenOffice ou Excel. Réciproquement les feuilles de données d'Excel peuvent être accédées, comme des tables en lecture seule de la base de données, au moyen du pilote ODBC pour Excel.

La façon traditionnelle de se connecter à Paradox est d'utiliser le BDE:

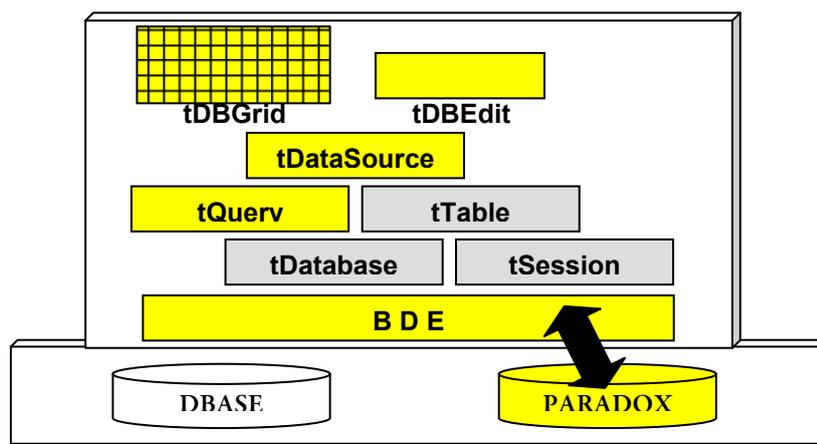


Figure 5.3 : utilisation de BDE pour se connecter à Paradox

Soit:

- Optionnellement un tDatabase explicite, et une tSession ;
- un tQuery pour les requêtes SQL, ou un tTable pour le portage depuis Paradox ou Dbase ;
- pour la partie visuelle, des tDataSources et des composants visuels: tDbGrid, tDbEdit etc

### 2.3. Estimation de la base des données :

Le volume de la base de données vide du réseau routier urbain national algérien (seulement les structures des fichiers) est de 1950 octets, et son volume plein avec des données du réseau national est d'environ 20.075.350.681 octets  $\simeq$  18.9 Géga octet.

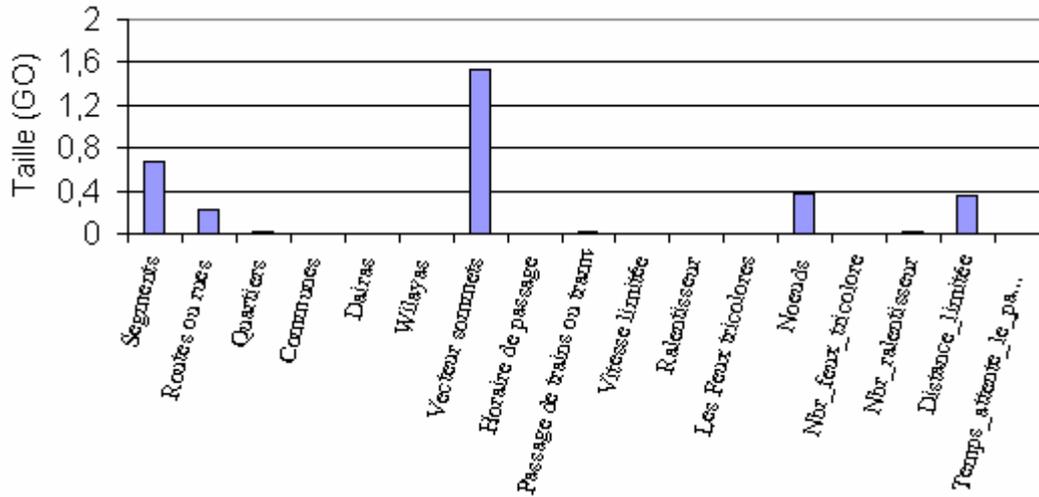


Figure 5.4: les fichiers de la base de donnée pleine.

### 3. Résultats et interprétations :

#### 3.1. Présentation du lieu d'implémentation:

Nous avons choisi le quartier Hai Yaghmourassen comme lieu d'implantation de notre solution, Yaghmourassen est un quartier populaire dans la ville d'Oran, qui se situe entre Hai Emir et el moudjahidine (nord), Hai M'nouer ex. St. Charles (est), Hai sidi el Bachir et plateau (sud) et Hai Ennasr et Karama (Ouest).



Figure 5.5: Hai Yaghmourassen [WIK, 2012].

Dans le quartier « Hai Yaghmourassen », il existe environ 481 segments et 309 nœuds. Cinq établissements d’enseignement (école primaire, CEM, ..., ect), une banque BDL, Centre commercial El Anik, et d’autres établissements des jeunes et loisirs (Maison des jeunes, Manage Miramar, ..ect).



Figure 5.6 : Les nœuds du quartier Yaghmourassen



Figure 5.7 : Les segments du quartier Yaghmourassen

### 3.2. Paramétrage de l’algorithme de MOSPACO :

Concernant la fixation des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ , plus la valeur de  $\alpha$  sera élevée plus l’intensification (l’importance des traces) sera importante, car les traces de phéromones auront une grande influence sur le choix des fourmis. Inversement, plus  $\alpha$  est faible, plus la diversification sera forte, car les fourmis n’accorderont pas une grande importance aux traces de phéromones, mais plus aux valeurs associées à la visibilité.

Pour régler ces deux paramètres, nous avons exécuté l’algorithme pour plusieurs combinaisons des paramètres, nous avons utilisé un réseau de transport de 23 nœuds et 30 arrêtes avec 14 fourmis et 1500 itérations. Les fronts de Pareto obtenus par les différentes configurations sont ensuite comparés les unes aux autres. Par la suite, la combinaison de paramètres donnant de meilleurs résultats sera conservée pour l’exécution de l’algorithme.

Fronts de Pareto pour différentes valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$

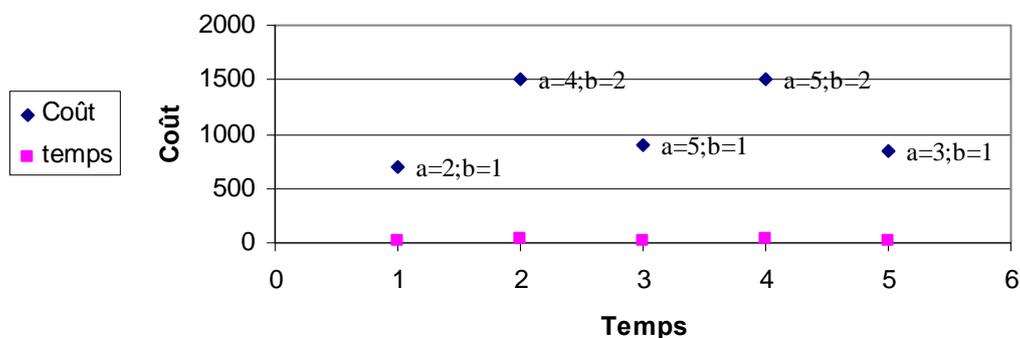


Figure 5.8 : Front de Pareto pour différentes valeurs de  $\alpha$ ,  $\beta$ .

En analysant les résultats des sept graphes de la (Fig. 5.8), nous remarquons que pour ces trois configurations les valeurs obtenues sont très proches, cependant, la configuration  $\alpha = 2, \beta = 1$  donne des solutions moins diversifiées que les configurations  $\alpha = 4, \beta = 2, \alpha = 5, \beta = 1, \alpha = 5, \beta = 2$  et  $\alpha = 3, \beta = 1$ , ainsi pour respecter les principes de diversification et d'intensification, il faudrait choisir l'une des deux dernières configurations, nous choisissons la configuration  $\alpha = 2, \beta = 1$  parce que deux solutions appartenant à ce front dominant celles de la configuration  $\alpha = 5, \beta = 1$ .

Pour valider notre choix nous avons appliqué les différentes valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  sur d'autres graphes, La configuration  $\alpha = 2, \beta = 1$  codée par le chiffre 1 dans la (Fig. 5.9) reste toujours meilleure par rapport aux autres.

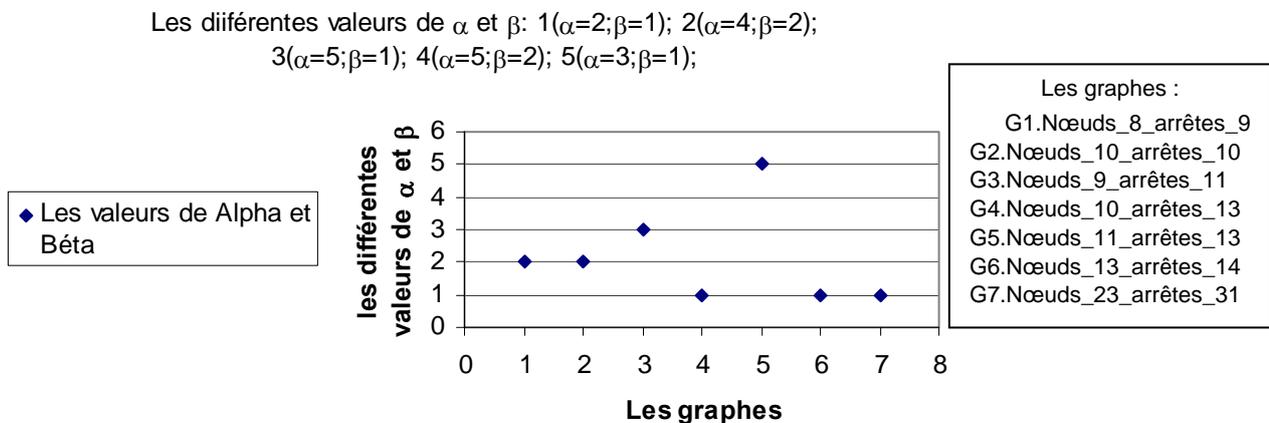


Figure 5.9: Application des différentes valeurs de  $\alpha = 2$  et  $\beta = 1$  sur sept graphes différents.

Dans cette formule,  $\rho$  est le taux d'évaporation globale tel que  $\rho \in [0,1]$ , Si  $\rho = 1$ , cela signifie qu'il n'y a pas d'évaporation des traces et si  $\rho = 0$ , les fourmis prennent en compte uniquement la quantité de phéromones déposée lors du dernier cycle. Les valeurs que prend le paramètre  $\rho$  influencent le comportement des fourmis par rapport à cette dualité entre l'intensification et la diversification. La diversification peut aussi être augmentée soit en diminuant la valeur du poids du facteur  $\alpha$  (de sorte que les fourmis deviennent moins sensibles aux traces de phéromones), soit en diminuant le taux d'évaporation  $\rho$  de sorte que la phéromone s'évapore plus doucement et les écarts d'une trace à l'autre évoluent plus doucement (Fig. 5.10).

Pour tester l'évolution du paramètre  $\rho$ , nous fixons la valeur de  $\alpha = 2$  et  $\beta = 1$  ensuite nous faisons évoluer celle de  $\rho$  pour tester l'influence de l'évolution du paramètre  $\rho$  sur la dualité intensification / diversification. Ces tests sont appliqués sur les sept graphes pour une valeur de  $\rho$  allant de 0.1 à 0.5.

### Influence des taux d'évaporations sur le nombre des itérations.

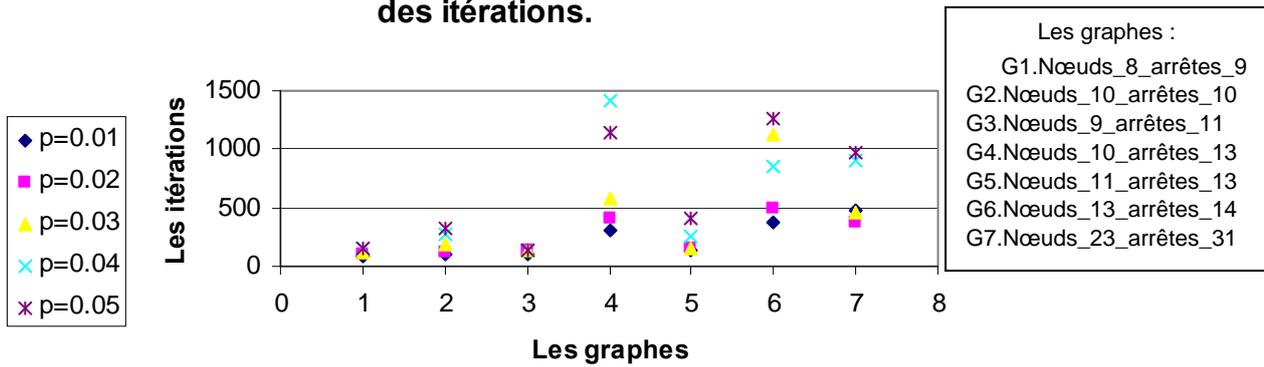


Figure 5.10: Influence des taux d'évaporations sur le nombre des itérations.

Les résultats obtenus montrent que le taux d'évaporation faible ( $\rho = 0.1$ ;  $\rho = 0.2$ ) active la diversification par rapport à l'intensification. Il permet au MOSPACO de bien explorer l'espace de recherche, en évitant que celui-ci soit localisé dans une région pour une longue durée. L'algorithme n'approfondit pas ses recherches sur des zones qui paraissent "prometteuses". Le temps d'exécution du programme est court mais l'optimalité de la solution n'est pas garantie (fig. 5.11). Nous choisissons  $\rho = 0.05$  pour garder un équilibre acceptable entre la diversification et l'intensification.

### Influence des taux d'évaporations sur le temps d'exécution de MOSPACO

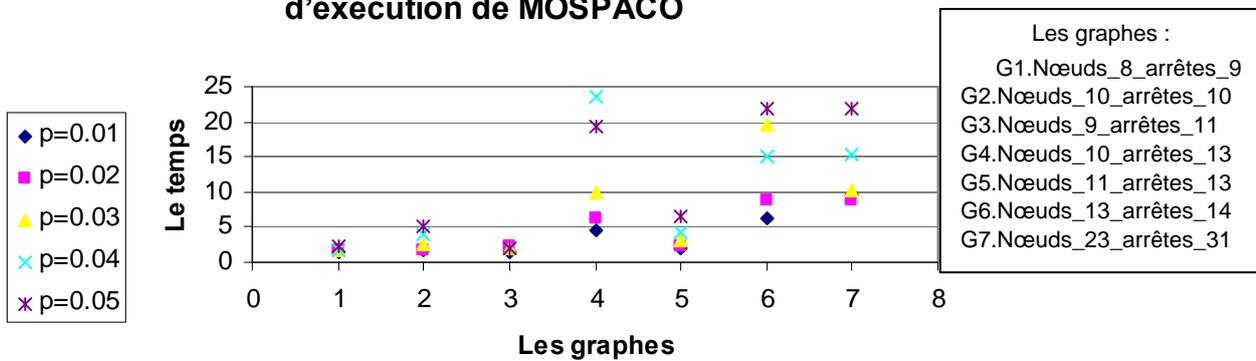


Figure 5.11: Influence des taux d'évaporations sur le temps d'exécution du programme.

### 3.3. Le plus court chemin de l'école primaire Colonel Mejdoub et la bibliothèque régionale d'Oran:

La distance entre l'école primaire Colonel Mejdoub et la bibliothèque régionale d'Oran de Hai Yaghmourassen égale environ 782 mètre selon la formule de vol de l'oiseau. Ce qui donne un graphe 136 nœuds et 210 segments, le plus court chemin entre les deux itinéraires sera calculé avec trois algorithmes différents (Fig. 5.12; 5.13; 5.14). Les résultats obtenus nous montre que l'algorithme A\*

nous donne une solution non optimale. Mais elle est réalisable, par contre l'optimalité est garantie avec les deux autres algorithmes (dijkstra et MOSPACO).

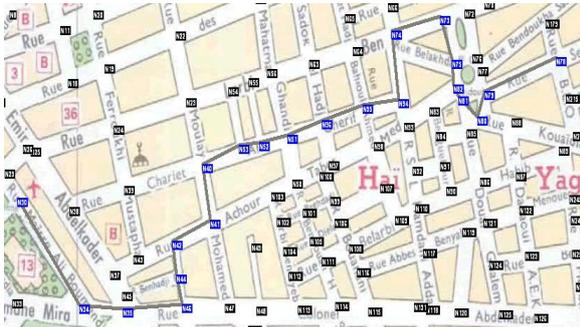


Figure 5.12: Résultat obtenu de l'algorithme A\*

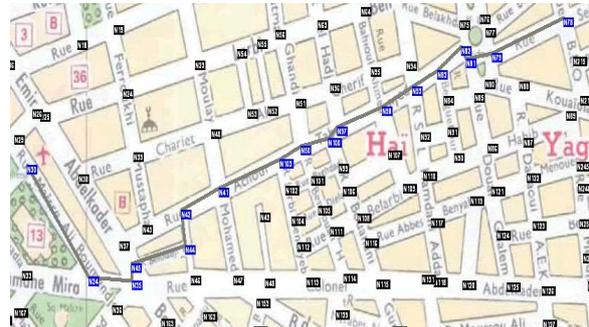


Figure 5.13: Résultat obtenu de l'algorithme de dijkstra



Figure 5.14: Résultat obtenu de l'algorithme de MOSPACO Temps / Feux tricolores (après 3000 itérations).

### 3.4. Le plus court chemin multi-objectifs :

Les fronts de Pareto obtenus pour chaque préférence du décideur seront analysés pour montrer la capacité de l'algorithme à trouver les meilleurs compromis possible entre les critères évalués. Les paramètres de MOSPACO sont :  $\alpha = 2$  ;  $\beta = 1$  ;  $\rho = 0.5$  ;  $\tau_0 = 30$  Compte tenu des tests réalisés sur le paramètre  $\rho$  sa valeur est fixée en fonction des critères de préférence du décideur. Nous avons choisi une seule préférence (temps / feux tricolores) à expliquer, mais le même principe sera appliquée sur toutes les autres préférences.

Pour une préférence temps / feux tricolores, le meilleur compromis possible c'est d'avoir un minimum des feux tricolores dans un temps très court possible entre le nœud de départ et d'arrivée (Fig. 15).

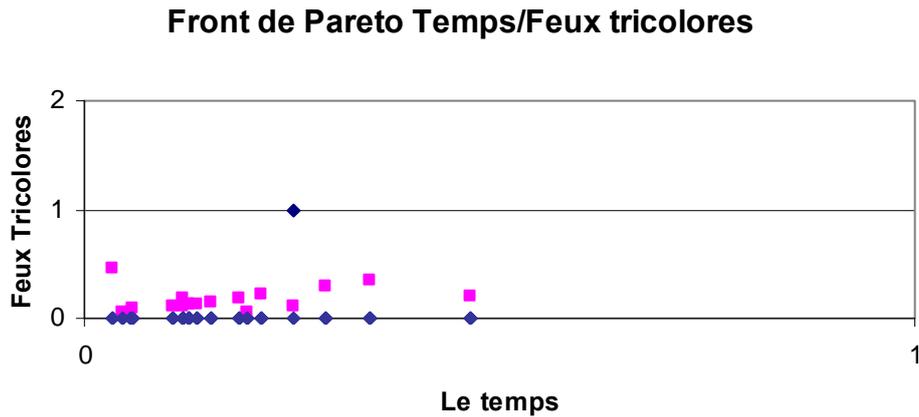


Figure 5.15: Le front de Pareto temps / feux tricolores

La (Fig. 5.16) montre qu'il y a un feu tricolore sur le trajet optimal (meilleur temps) entre l'école primaire Colonel Mejdoub et la bibliothèque régionale d'Oran. Un temps d'attente de 3 minutes devant ce feu augmente le coût du segment, qui va influencer automatiquement sur le trajet optimal. La solution est de relancer le programme avec une modification du coût (ajout ces 3 minutes d'attente au coût du segment). La (Fig. 5.17) montre le changement du trajet de la solution optimale.



Figure 5.16: La solution sur carte

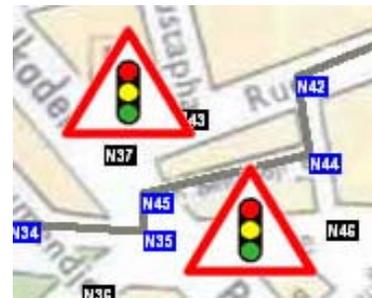


Figure 5.17: Le feu tricolore qui a influencé sur le trajet

Les préférences proposées pour les utilisateurs dans l'application sont :

- Temps / feux tricolores.
- Temps / ralentisseurs.
- Temps / trafic.
- Distance / hauteur autorisée.
- Distance / poids autorisée.

#### 4. Interfaces Utilisateurs.

Le menu principal de la page d'accueil est composé de huit options différentes (Fichier, vitesse limitée, feux tricolores, ralentisseurs, gestion des passages de train, calcul des chemins optimaux, outils et l'aide). La (Fig. 5.18) montre la page d'accueil de l'application.

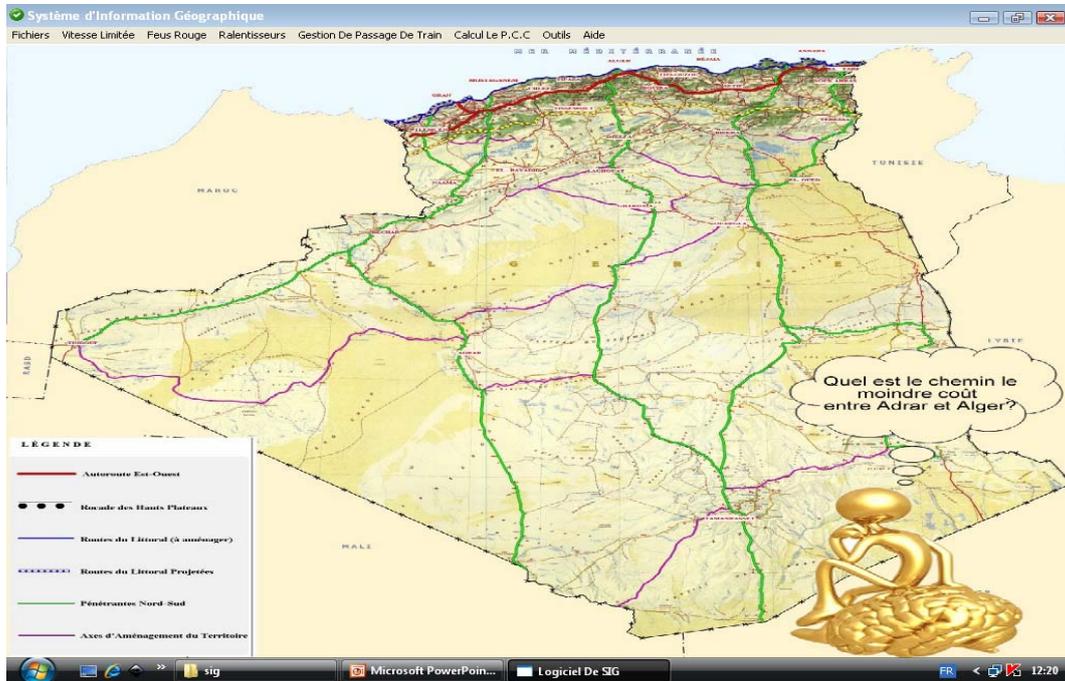


Figure 5.18: La page d'accueil.

La liste des communes par wilaya est une fiche de mise à jour de la table commune, elle est utilisée pour ajouter, modifier ou supprimer une occurrence « commune ». L'accès direct ou séquentiel à la table « commune » ou « wilaya » sont assurés dans cette fiche.

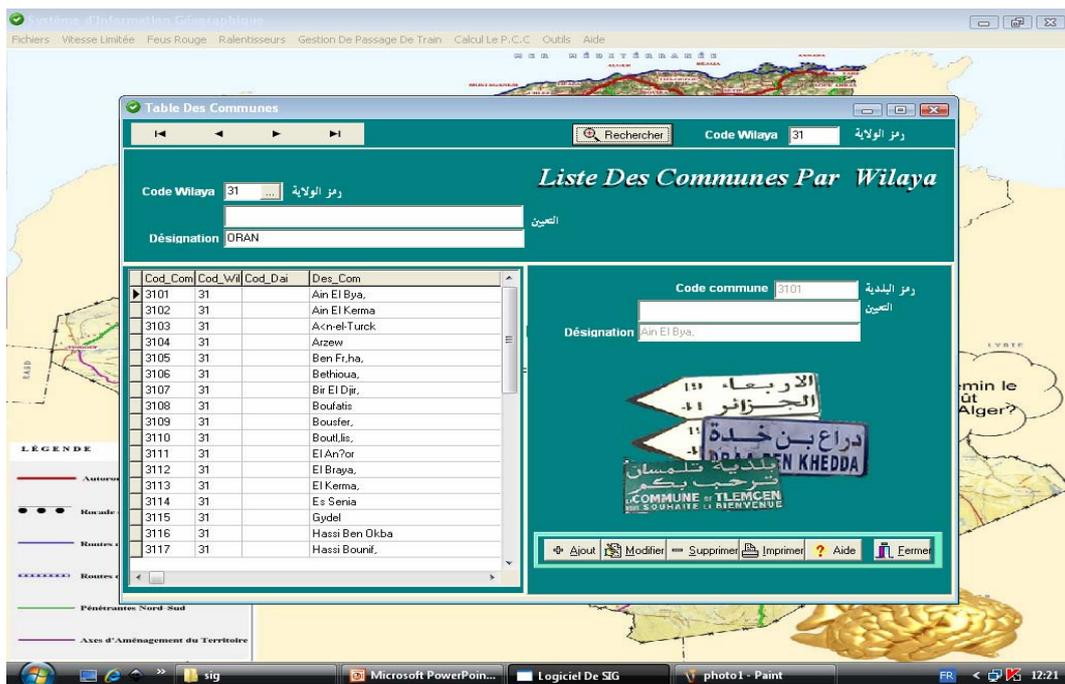


Figure 5.19: La mise à jour d'une table.

La fiche de la zone de recherche (Fig. 5.20) est une fiche très importante, elle permet de créer la zone de recherche et de choisir l’algorithme d’optimisation à appliquer.



Figure 5.20: La fiche zone de recherche

On peut diviser l’interface de la fiche à six blocs différents (les objectifs, les itinéraires, périmètre de recherche, les contraintes, les résultats obtenus de la recherche et le choix de l’algorithme d’optimisation). Ces blocs sont colorés et numérotés dans la (Fig. 5.21). Le premier bloc en bleu désigne les objectifs, où l’utilisateur choisit son objectif (distance, temps ou temps avec contraintes temporelles). Le bloc 2 en rouge est réservé pour les itinéraires de voyage. Dans le bloc vert en milieu, l’application calcule la diagonale de la zone et propose d’autres valeurs (cas, d’élargir le périmètre de recherche). Le bloc 4 en marron regroupe les contraintes et les conditions. L’utilisateur peut choisir six conditions différentes dans une requête et les résultats obtenus sont affichés dans le bloc 5. Dans le sixième et le dernier bloc en gris, l’utilisateur choisit l’algorithme d’optimisation à appliquer.



Figure 5.21: Les blocs de la fiche « zone de recherche ».

La fiche du simulateur MOSPACO permet de trouver le chemin optimal dans un graphe pondéré. Ce dernier peut être enregistré dans un fichier externe ou récupéré de la fiche de recherche. L'utilisateur visualise le déroulement de l'algorithme sur deux échelles (petite et grande) comme les montre la (Fig. 5.22)

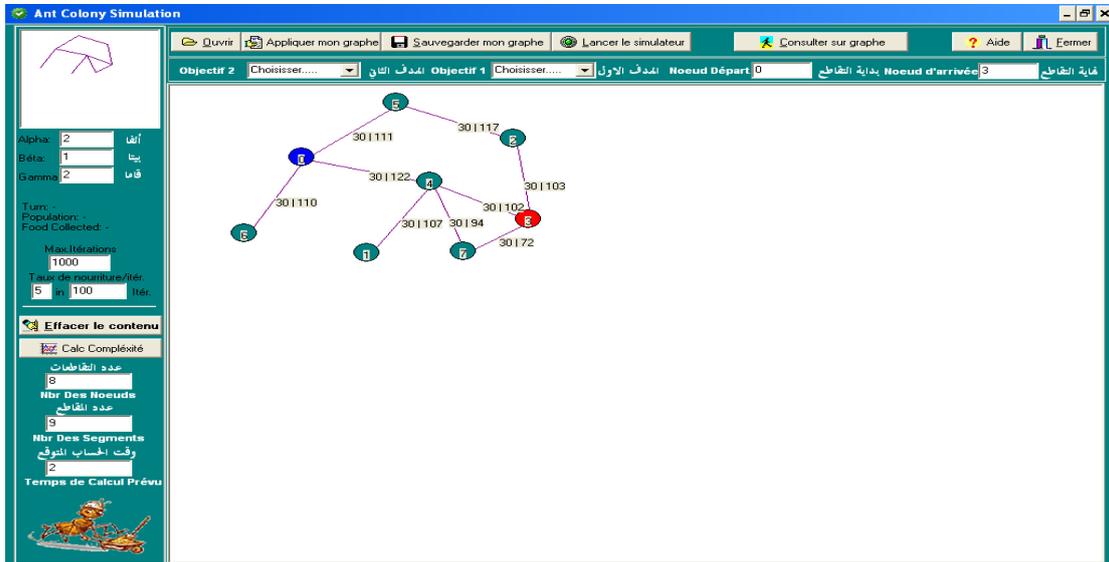


Figure 5.22: La fiche du simulateur MOSPACO.

L'interface du simulateur MOSPACO est composée de 5 blocs : le premier bloc affiche le graphe (les nœuds et les arrêtes) pondéré (par le coût et le phéromone) sur deux échelles (petite et grande). On peut visualiser clairement les itinéraires de voyage (Le nœud bleu « le nid » et le nœud rouge « la nourriture »). Le deuxième bloc (en jaune) est réservé aux objectifs (seulement deux objectifs à la fois). Les codes des itinéraires de voyage sont affichés dans le bloc 3 (en vert clair). Les paramètres de l'algorithme sont rassemblés dans le bloc 4, et enfin le bloc 5 affiche la complexité théorique de l'algorithme avec le temps d'exécution.

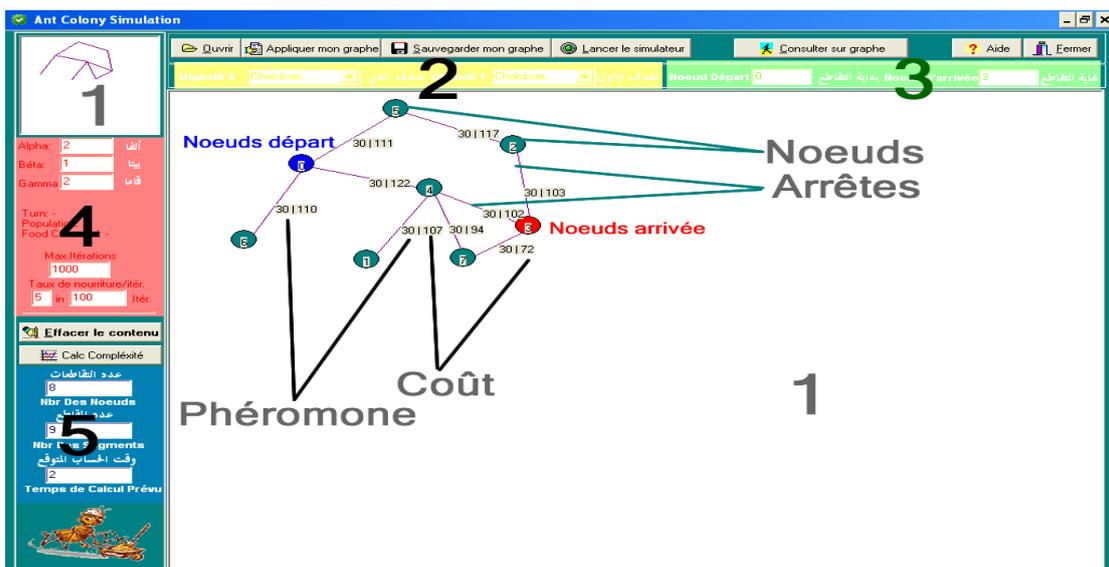


Figure 5.23: Les cinq blocs de l'interface du simulateur MOSPACO.

Le temps d'exécution écoulé est une information importante pour évaluer l'algorithme. Elle est affichée après chaque exécution.

La (Fig. 5.24) montre la solution optimale obtenue sur un graphe (ligne rouge).

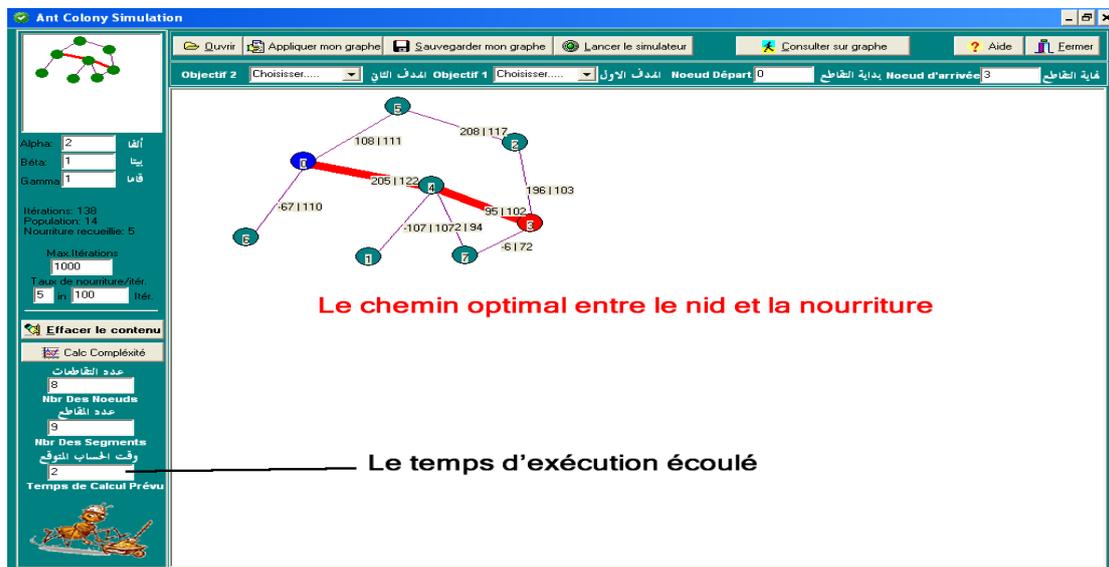


Figure 5.24: La solution optimale obtenue sur un graphe

### 5.Conclusion :

Les résultats trouvés par l'algorithme donnent les solutions représentant un compromis entre les critères étudiés. Les résultats démontrent qu'en fonction des préférences du décideur, MOSPACO est capable de trouver un bon compromis de chemins possible.

La nature des fronts de Pareto obtenus dépend fortement des critères à optimiser. Les solutions appartenant au front de Pareto sont compatibles avec les objectifs. En effet, l'optimisation des critères écologiques privilégie les chemins sans feux tricolores (minimiser le maximum la pollution), tandis que l'optimisation des critères économiques privilégie les itinéraires sans obstacles, rapides et moins cher (sans ralentisseurs, coût).

Notre approche allie l'utilisation des théories sur le plus court chemin multiobjectif et les algorithmes de colonies de fourmis pour offrir un outil d'aide à la décision dans un réseau de transport urbain.

**Conclusion générale et perspective :**

L'objectif de cette thèse a été l'optimisation d'itinéraires pour des véhicules dans les réseaux routiers urbains d'une commune algérienne. Pour le calcul de ces itinéraires, la recherche bibliographique a montré qu'il existe de nombreux algorithmes de calcul de plus court chemin, mais il reste encore une certaine marge de progression en ce qui concerne la modélisation d'un réseau réellement multimodal et de l'utilisation des techniques d'optimisation multiobjectif.

Les données à référence spatiale (données géographiques) constituent des abstractions des phénomènes du monde réel (routes, rues, etc.). Elles permettent de décrire ou de localiser les observations faites sur la réalité et d'alimenter les outils d'aide à la décision, de gestion et de planification du territoire tels les systèmes d'information géographique (SIG). Ces systèmes que nous avons présentés dans le premier chapitre.

Dans le deuxième chapitre, nous avons utilisé une conception basée sur la démarche Merise qui est bien adaptée à la conception de SIG, dont la principale caractéristique est la modélisation relationnelle de la réalité, permettant ainsi de présenter les objets et leurs comportements ou leurs relations dans le monde réel. Cette conception fait appel à des connaissances techniques et à divers savoir-faire. On doit mobiliser des compétences en géodésie (connaissance des concepts de système de référence et de système de projection), en analyse des données, des processus et de modélisation (analyse Merise par exemple), en traitement statistique ou graphique.

Dans le troisième chapitre, nous avons expliqué la limitation des méthodes exactes à des problèmes de petites tailles, il convient, notamment pour pouvoir traiter des problèmes réels, larges ou complexes, de développer des méthodes heuristiques. Les métaheuristiques et en particulier les algorithmes évolutionnaires, travaillant sur des populations de solutions, sont bien adaptés à l'optimisation multi-objectif. Notre problématique a été représenté par un graphe multi-valué où plusieurs objectifs de type somme sont considérés : temps, trafic, la hauteurs autorisée, poids autorisé, le nombre des ralentisseurs et les feux tricolores. En se basant sur la modélisation du réseau routier urbain présentée dans le deuxième chapitre, nous avons proposé quelques algorithmes d'optimisation pour calculer le plus court chemin mono-objectif et multi-objectif.

Dans Le chapitre quatre, nous avons contrôlé la complexité des algorithmes d'optimisation appliqués sur notre graphe avec une zone circulaire nommée « zone de travail », cette complexité est directement liée au nombre des nœuds et d'arêtes (resp, d'arcs). Cela constitue un facteur limitatif important quand à la taille des graphes possibles à traiter en pratique. Nous avons présenté aussi, les travaux s'inspirant du comportement des fourmis réelles pour la

résolution de problèmes en informatique. Les fourmis possèdent en effet de nombreuses caractéristiques collectives et individuelles pouvant nous aider à la résolution de problèmes complexes. MOSPACO est un algorithme de colonies de fourmis mis en place pour résoudre le problème de plus court chemin multiobjectif, en tenant compte simultanément de deux ou plusieurs objectifs. Dans notre cas, nous avons sept objectifs à savoir distance, temps, trafic, la hauteur autorisée, poids autorisé, le nombre des ralentisseurs et les feux tricolores.

Et enfin dans le dernier chapitre, nous avons mis en place un modèle du plus court chemin multiobjectif ayant pour objectif d'aider au choix d'un « plus court chemin » dans un réseau routier urbain. Dans notre cas, « plus court chemin » signifie un chemin avec moins d'impacts environnementaux (feux tricolore) et sécuritaires (Hauteur autorisée, poids autorisé, ralentisseurs) et garantissant des critères économiques (distance, temps) satisfaisants. Nous avons ainsi fourni un système d'aide à la décision pour les décideurs qui souhaitent réduire leurs impacts sur l'environnement lors du choix d'itinéraire et pour la planification de leurs expéditions. Le système permet de se baser sur un certain nombre de données d'entrée pour fournir un itinéraire répondant aux exigences du décideur.

La perspective la plus immédiate est l'amélioration des performances dans l'optique de passage à l'échelle. En effet, en routage mono-objectif, pour minimiser le temps de parcours, il est possible de calculer un itinéraire à travers la planète entière en environ une milliseconde. Nous sommes encore très loin d'avoir de telles performances. Parmi les pistes à étudier, il y a les recherches bidirectionnelles, les approches hiérarchiques, mais aussi le calcul de bornes pour approcher les itinéraires.

Il est peu probable qu'il existe une solution idéale pour ne présenter qu'un nombre restreint de solutions à l'utilisateur. Il s'agit en effet d'une part d'un compromis entre un faible paramétrage par l'utilisateur et laisser l'utilisateur définir au mieux ses souhaits.

D'autre part, il s'agit d'un compromis entre la sélection de solutions les plus variées et l'élimination de solutions trop extrêmes.

## Bibliographie :

- (ABI, 2006) C. ABIGNOLI, les définitions de l'urbain, CERTU savoirs de base en sécurité routière fiche n°08 août, 2006 ; pp. 1.
- (ACT, 2008) ACTIV PERMIS Réussissez votre code de la route ; Paris : Micro application, cop. ; 2008
- (AHN , 1991) B.H. AHN, J.Y. SHIN. "Vehicle-Routing with Time Windows and Time-Varying Congestion ". The Journal of the Operational Research Society, 42(5):393 - 400, 1991.
- (AHU, 2002) R. AHUJA, , J. ORLIN, , S. PALLOTTINO, M. SCUTELLA, (2002). Minimum Time and Minimum Cost-Path Problems in Street Networks with Periodic Traffic Lights. *Transportation Science*, 36(3), 326–336.
- (ALA, 2009) I. ALAYA ; Optimisation multi-objectifs par colonies de fourmis : cas des problèmes de sac à dos ; thèse doctorat ; Université Claude Bernard Lyon 1 et ENSI Tunis ; 2009 ; pp. 39,50-51
- (ALD, 2003) N. ALDOSA, M. LE BIHAN, M. MONIN ; Information, communication, organisation ; Bréal Rosny ; 2<sup>ème</sup> édition ; 2003 ; pp. 159.
- (AUG, 2004) C. AUGRIS ; Évolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime ; Ifremer collection "Bilans et perspectives" ; 2004 ; pp. 39.
- (AYA, 2010) N. AYARI, Métaheuristiques parallèles hybrides pour l'optimisation combinatoire : problème de règles de Golomb ; Université de Jendouba TUNISIE ; 2010 ; pp : 15
- (BAN, 2002) J.W. BANDER. " A heuristic search approach for a nonstationary stochastic shortest path problem with terminal cost ". *Transportation Science*, 36(2):218 - 230, 2002.
- (BAT, 1994) R. BATTITI, G. TECCHIOLLI, « The reactive tabu search », in *ORSA Journal on Computing*, 6 (2) ; 1994 ; pp. 126-140
- (BEL, 2007) A. BELTRAN, P. GRISET; Histoire d'un pionnier de l'informatique 40 ans de recherche à l'INRIA ; EDP Sciences, coll. Sciences & Histoire ; Paris ; 2007 ; pp. 186.
- (BEN, 1835) G. BENOIT, J. RAINGO ; Géographie élémentaire à l'usage des écoles Belges ; Mons : de Manceaux-Hoyois, 1835 ; pp. 01.
- (BID, 2000) B. BIDEGARAY, L. MOISAN, L. MOISAN ; Petits problèmes de mathématiques appliquées et de modélisation : issus des concours d'entrée à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan ; Berlin [u.a.] : Springer, 2000 ; Pp. 10
- (BIG, 2006) M. BIGAND, H. CAMUS, J. BOUREY, D. CORBEEL ; Conception des systèmes d'information: modélisation des données, études de cas ; Technip ; 2006 ; pp. 03.
- (BON, 1994) F. BONN ; Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone ; Presses de l'Université du Québec ; 1994 ; pp. 471-472.
- (BON, 1999) E. BONABEAU, M. DORIGO, G. THERAULAZ. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford, UK: Oxford University Press, 1999.
- (BON, 2000) E. BONABEAU, M. DORIGO, G. THERAULAZ. Inspiration for optimization from social insect behaviour. *Nature*, Vol. 406, 2000, pp. 39-42.
- (BOR, 2002) Borland Software Corporation; *Prise en main ; Borland C++Builder™ 6 pour Windows™ ; 2002 ; pp. 1-1.*
- (BOR, 2004) J. P. BORD, Pierre-Robert BADUEL ; *Les cartes de la connaissance ; Karthala ; 2004 ; pp. 47.*
- (BRE, 1996) M. BRESSO, A. HAURIE ; *Gestion de l'environnement et entreprise ; Presse polytechnique et universitaire Romandes ; 1996 ; pp.139.*
- (BRO, 1996) M. BROCARD, P. MALLET, L. LEVEQUE, C. BESSINETON ; *Atlas de l'estuaire de la Seine ; Publications des universités de Rouen et du Havre ; 1996 ; pp. 144.*
- (BRO, 2003) J. BRODEUR ; *Introduction aux normes ISO19100 ; ressource naturelle Canada ; 2003 ; pp.4.*
- (BSC, 2002) BORLAND SOFTWARE CORPORATION; *Prise en main ; Borland C++Builder™ 6 pour Windows™ ; 2002 ; pp. 1-1.*
- (BUR, 1986) BURROUGH, P.A. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford ; Oxford University Press ; 1986 ; pp. 194 p.
- (CAL, 2011) R. CALOZ, C. COLLET *Analyse spatiale de l'information géographique ; Lausanne : Presses Polytechniques Universitaires Romandes, 2011 ;Pp. 206*

- (CAR, 2003) P. CARDOSO, M. JESUS, A. MARQUEZ, (2003). MONACO – « Multi-Objective Network Optimisation Based on an ACO », Proc. X Encuentros de Geometria Computacional, Seville, Spain, June 16-17.
- (CEM, 2000) CEMAGREF ; Revue : Ingénieries: eau, agriculture, territoires ; Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (France) ; CEMAGREF ; 2000 ; pp.38
- (CEU, 1994) COUNCIL OF EUROPE ; european yearbook Vol. XLII ; kluwer law international ; 1994 ; pp.19.
- (CHA, 1998) I. CHABINI. “ A new algorithm for shortest path problems in discrete dynamic networks “. Dans Proceedings of the 8th IFAC Symposium on Transport Systems, pages 551 - 556, 1998.
- (CHE, 1996) B.V. CHERKASSKY, A.V. Goldberg et T. Radzik. “Shortest paths algorithms : Theory and experimental evaluation “. Mathematical Programming, 73:129\_174, 1996.
- (CLE, 2012) CLEVACTI S.A.R.L ; Algorithme de Dijkstra , <http://www.techno-science.net>; D.C février 2012.
- (COH, 2006) P. COHEZ-VAJDA, Thèse : Mise en place de la base de données spatialisée de suivi et de surveillance du domaine de la Tour du Valat ; Université Jean Monnet ; 2006 ; pp. 29
- (COL, 1992) C. COLLET; Système d'information géographique en mode image ; Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes ; 1992 ; pp. 186.
- (CON, 1831) F. CONSTANT ; Précis de géographie comparée de Rougemont ; Neuchâtel ; 1831 ; pp. 01.
- (COS, 2006) A. COSTANZO, T. LUONG, G. V. MARILL ; Optimisation par colonies de fourmis ; 2006 ; pp.14
- (DEL, 2003) X. DELORME ; Modélisation et résolution de problèmes liés à l'exploitation d'infrastructures ferroviaires ; Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France ; 2003; Pp. 22-26
- (DEN, 1996) J. DENEGRÉ, F. SALGE; Les systèmes d'information géographique ; Paris, PUF, Coll. "Que sais-je ?" ; 1996 ; n° 3122 ; pp. 127-128.
- (DHA, 2005) C. DHAENENS-FLIPO ; Optimisation Combinatoire Multi-Objectif : Apport des Méthodes Coopératives et Contribution à l'Extraction de Connaissances ; thèse doctorat ; Université des Sciences et Technologies de Lille U.F.R. d'I.E.E.A. France ; 2005 ; pp.8
- (DIJ, 1959) E.W. DIJKSTRA. “ A note on two problems in connexion with graphs”. Numerische Mathematik, 1:269 - 271, 1959.
- (DJA, 2004) L. DJADIA ; la géophysique appliquée : une contribution à la gestion de l'environnement. Lettre de CRAAG ; Centre de recherche en astronomie astrophysique et géophysique ; 2004 ; n° :18 ; pp. 3.
- (DOR , 1992) M. DORIGO; Optimization, Learning and Natural Algorithms (in Italian). Thèse de doctorat, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, Italy ; 1992
- (DOR, 1996a) M. DORIGO, L. GAMBARDELLA, A study of some properties of ant-q. In VOIGT, H.-M., EBELING, W., RECHENBERG, I. et SCHWEFEL, H.-P., éditeurs : Parallel Problem Solving from Nature – PPSN IV: International Conference on Evolutionary Computation – The 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, volume 1141; Springer-Verlag; 1996 ; pages 656–665.
- (DOR,1996b) M. DORIGO, V. MANIEZZO; A. COLOMI (1996) Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. Systems, Man and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions on Volume 26, Issue 1 ; 1996 ; pp. 29-41.
- (DOR, 1997a) M. DORIGO, L.M Gambardella,. 1997. Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1); 1997; pp. 53-66.
- (DOR, 1997b) M. DORIGO, L. GAMBARDELLA, Ant colonies for the traveling salesman problem. BioSystems ; 1997 ; pp. 43:73–81.
- (DOR, 1998a) M. DORIGO, G. DICARO, AntNet: Mobile Agents for Adaptive Routing. Dans le proceeding de 31st Hawaii International Conference on System, Los Alamitos, CA, IEEE Computer Society Press, p. 74-83.
- (DOR, 1998b) M. DORIGO, G. DICARO; AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks. Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), Vol. 9, p. 317-365. 1998b
- (DRE, 2004) J. DREO ; Adaptation de la méthode des colonies de fourmis pour l'optimisation en variables continues. Application en génie biomédical ; Thèse doctorat ; UFR de Sciences, Université Paris 12 . Val de Marne ; 2004 ; pp. 11-13-14

- (DUR, 2009) J. J. DURILLO, J. GARCÍA-NIETO, A. J. NEBRO, C. A. C. COELLO, and F. LUNA, et al. (2009). Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: An Experimental Comparison. , pp. 495-509.
- (EMB, 2012) EMBARCADERO Technologies ; Aide en ligne de Delphi® XE2 et C++Builder® XE2; <http://docwiki.embarcadero.com> ; 2012.
- (ESP, 2002) S. ESPIE, *Approche multi-acteur dans la simulation de trafic automobile*. In Organisation et applications des SMA. Chapitre 10. Mandiau, Grislin-Le Strugeon et Péninou (Eds.), Paris: Hermès. 2002.
- (ETS, 2008) F. ETSINDA MPIGA ; nouvelle approche hybride d'optimisation multi-objective basée sur la méthode des surfaces de réponse et le système de colonies de fourmis;Thèse de Maîtrise de école de technologie supérieure université du QUEBEC; 2008 ; Pp. 41
- (GAG, 2001) C. GAGNÉ, W. PRICE, M. GRAVEL, Optimisation par colonie de fourmis pour un problème d'ordonnancement industriel avec temps de réglages dépendants de la séquence. In Actes de la troisième conférence francophone de Modélisation et SIMulation, Troyes, France ; 2001.
- (GAL, 1988) G. GALLO, S. PALLOTTINO. “ Shortest path algorithms “. Annals of Operations Research, 13:3 \_ 79, 1988.
- (GAM, 1995) L. M. GAMBARDELLA, M. DORIGO, Ant-Q : A Reinforcement Learning Approach to the Travelling Salesman Problem. In Proceedings Twelfth International Conference on Machine Learning, volume ML-95 ;Palo Alto. Morgan Kaufmann ; 1995 ; pp. 252-260.
- (GAO, 2006) S. GAO et I. CHABINI. “ Optimal routing policy problems in stochastic time-dependent networks “. Transportation Research Part B, 40:93-122, 2006.
- (GAR, 1975) A. LE GARFF ; Dictionnaire de l'informatique ; Paris : Presses universitaires de France ; 1975.
- (GAR, 1979) M. GAREY et D. JOHNSON; Computers and Intractability : A guide to the theory on NP-completeness; W.H. Freeman and Co. Publishers, New York; 1979.
- (GHE, 2006) K. GHEDIRA ; Logistique de la production: approches de modélisation et de résolution ; Paris : Éditions Technip, 2006 ; pp. 86-87
- (GRA, 1991) Y. GRAFMEYER ; Habiter Lyon: milieux et quartiers du centre-ville, PUL ; 1991 ; pp. 85.
- (GRÄ, 2010) T. GRÄBENER, Calcul d'itinéraire multimodal et multiobjectif en milieu urbain; Thèse doctorat Université de toulouse, France; 2010; Pp.34
- (GRE, 1935) B.D. GREENSHIELD; “A Study of Traffic Capacity.” *Highway Research Board Proceedings*; 1935; Vol. 14: 448-477.
- (GUE, 2009) J. F. GUEGAN, M. CHOISY ; Introduction à l'épidémiologie intégrative ; De Boeck université 2009 ; pp. 43.
- (GUM, 2000) H. GUMUCHIAN, C. MAROIS ; Initiation à la recherche en géographie Aménagement, développement territorial, environnement ; Economica ; 2000 ; pp. 26.
- (GUT, 1819) W. GUTHRIE, H. LANGLOIS ; Abrégé de la nouvelle géographie universelle, physique, politique et historique ; Paris, chez Hyacinthe Langlois, libraire et géographe ; 2<sup>ème</sup> édition ; Tome premier ; 1819 ; pp. 01.
- (HAC, 2000) DICTIONNAIRE HACHETTE. Langue française. (2000), Paris.
- (HAC, 2003) DICTIONNAIRE HACHETTE langue française. Hachette Educ (Eds.), 2003.
- (HAL, 1986) R.W. HALL. “The fastest path through a network with random time dependent travel times » . Transportation Science, 20(3):182 - 188, 1986.
- (HAN, 1979) P. HANSEN. Bicriterion path problems. Dans Fandel G. et Gal T., éditeurs, Multiple Criteria Decision Making theory and application, volume 177 de Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, pages 109{127. Springer, 1979.
- (HIZ, 2008) M. M. HIZEM ; Recherche de chemins dans un graphe à pondération dynamique ; thèse doctorat ; ÉCOLE CENTRALE DE LILLE ; 2008; Pp.37
- (IOR, 2006) V. IORDANOVA ; Contribution à la modélisation et la commande du trafic routier : approche Bond Graph et commande par platitude ; thèse doctorat ; université D'artois ; 2006 ; Pp.16.
- (JAM, 2006) M. JAMALI; “Learning to Solve Stochastic Shortest Path Problems”. Rapport Technique, Sharif University of Technology, 2006.
- (KAU, 1993) D.E. KAUFMAN, R.L. SMITH. “Fastest Paths in Time-Dependent Networks for Intelligent Vehicle-Highway Systems Application”. Journal of Intelligent Transportation Systems, 1(1):1 - 11, 1993.

- (KEN, 1995) J. KENNEDY, R. EBERHART, (1995). Particle swarm optimization. *Neural Networks Proceedings., IEEE International Conference on*, 4.
- (KLE, 2001) J. L. KLEIN, S. LAURIN, C. TARDIF ; Géographie et société: vers une géographie citoyenne ; Presses de l'Université du Québec ; 2001 ; pp. 203.
- (KNO, 2005) P. KNOEPFEL, A. DA CUNHA, J. P LERESCHE, S. NAHRATH ; Enjeux du développement urbain durable : Transformations urbaines, gestion des ressources et gouvernance; Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR) ; 2005 ; pp. 129.
- (KON, 2009) O. KONE ; Nouvelles approches pour la résolution du problème d'ordonnancement de projet à moyens limités ; UNIVERSITÉ DE TOULOUSE ; 2009 ; pp. : 16
- (LAN, 2003) P. LANNOY ; Le Problème de la circulation et la promesse télématique ; Publibook paris ; 2003 ; pp : 17.
- (LAU, 2009) C. LAURGEAU, le siècle de la voiture intelligente, presses des mines coll. mathématiques et informatique ; 2009 ; pp. 15.
- (LEG, 1996) J. P. LEGROS ; Cartographies des sols: de l'analyse spatiale à la gestion des territoires ; Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR); 1996 ; pp. 167.
- (LER, 2010) J. M. LERY ; Algorithmique en C ; Paris : Pearson Education, cop. 2010 ;Pp. 32, 253
- (MAR, 1988) P. MARGADA ; Cahiers de l'urbanisme, Revue de l'administration wallonne de l'aménagement du territoire N° 4 ; 1988 ; pp. 62.
- (MAR, 2001) J. MARTEL ; Les tables dBASE ; the dbulletin - Issue N°. 17 ; MGA Communications ; 2001.
- (MAR, 2007) J., MARIA, A. PANGILIANA, G. JANSSENS, (2007). Evolutionary algorithms for the multiobjective shortest path planning problem. *International journal of computer and information science and engineering*, 1(1), 54–59.
- (MIL, 1998) E.D. MILLER-HOOKS, H.S. MAHMASSANI. "Least possible time paths in stochastic time-varying networks ". *Computers & Operations Research*, 25:1107 - 1125, 1998.
- (MIL, 2000) E.D. MILLER-HOOKS et H.S. MAHMASSANI. "Least expected time paths in stochastic time-varying transportation networks ". *Transportation Science*, 34(2):198 - 215, 2000.
- (MON, 2000) N. MONMARCHE ; Algorithmes de fourmis artificielles : applications à la classification et à l'optimisation; thèse doctorat ; Ecole Doctorale : Santé, Sciences et Technologies, Université François Rabelais Tours ; 2000 ; Pp. 31-32
- (MTP, 2012) Le site officiel du ministère des travaux publics algérien; <http://www.mtp.gov.dz/fr/>; date consultation : 16/01/2012.
- (MÜL, 2003) D. MÜLLER; Introduction à la théorie des graphes, cahiers de la CRM, n°: 6 ; commission romande de mathématique; 2003. pp.35
- (NAV, 2010) L. NAVARRO ; Optimisation des bases de données: Mise en oeuvre sous Oracle ; 2010 ; pp. 25.
- (NOT, 2002) A. NOTTET ; Analyse et croisement cartographique de la base de données BASIAS et des bases de données de l'IGN ; Mémoire de maîtrise d'Aménagement du Territoire Université Paris XII – Val-de-Marne ; 2002 ; pp. 60.
- (NOV, 2009) N. NOVA ; Les médias géolocalisés: Comprendre les nouveaux espaces numériques ; Fyp ; 2009 ; pp. 17.
- (NUN, 2004) NATIONS UNIES, Manuel des systèmes d'information géographique et de cartographie numérique, Division de statistique, Publication des nations unies 2004 ; pp. 175
- (OBC, 1999) OURS BLANC DES CARPATHES™ ; Introduction à C++ Builder ; ISIMA 1988-1999 ; Pp. 7
- (OCD, 2004) OCDE ; L'espace à l'horizon 2030: quel avenir pour les applications spatiales ?; organisation de coopération et de développement économique ; OCDE ; 2004 ; pp. 130-132.
- (ONS, 2012) ONS (L'Office National des Statistiques); Population résidente des ménages ordinaires et collectifs (MOC) selon la wilaya de résidence et le sexe et le taux d'accroissement annuel moyen (1998-2008) ; <http://www.ons.dz/>; date consultation : 05/05/2012
- (ORD, 1990) A. ORDA et R. ROM. " Shortest Path and Minimum Delay Algorithms in Networks with Time-Dependent Edge Length" . *Journal of the ACM*, 37(3):607 \_ 625, 1990.
- (ORD,1991) A. ORDA, R. ROM, (1991). Minimum weight paths in time-dependent networks. *Networks*, 21(3), 295–319.

- (PAL, 1998) S. PALLOTTINO, M. SCUTELLA, (1998). Shortest path algorithms in transportation models : classical and innovative aspects. Kluwer Academic Publishers.
- (PET, 2008) T. PETIBON ; BusinessObjects XI Web intelligence ; Saint-Herblain : Éd. ENI, cop. 2008 ; pp.52
- (PRE, 1995) R. PRELAZ-DROUX ; Système d'information et gestion du territoire ; Presses polytechniques et universitaires romandes ; 1995 ; pp. 176
- (PRO, 2007 ) L. PROVENCHER, Jean-Marie Maurice DUBOIS ; Précis de télédétection: Méthodes de photo interprétation et d'interprétation d'image, Volume 4 ; 2007 ; pp. 33.
- (PUM, 1997) D. PUMAIN - Th. SAINT-JULIEN ; L'analyse spatiale - tome 1, Col. Coursus, Série Géographie ; Paris, Armand Colin ; 1997 ; pp. 156
- (RIE, 2001) M. RIEDO, J. CHETELAT ; Présentation des outils informatiques destinés au développement des applications SIG; EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale De LAUSANE) ; 2001 ; pp. 05.
- (ROB, 2007) LE NOUVEAU PETIT ROBERT de la langue française 2007, ed. Le Robert.
- (ROC, 2000) S. ROCHE ; Les enjeux sociaux des systèmes d'information géographique ; Revue géographique sociale ; l'Harmattan ; 2000.
- (ROD, 2010) J. RODA ; OpenOffice.org 3.2 ; Paris : Micro application, impr. 2010 ; Pp. 257
- (ROS, 1991) Y. ROSSIER ; Systèmes de gestion industrielle: une étude de cas ; Lausannes : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1991 ; Pp. 122
- (SAN, 2001) A. SANGALLI ; Éloge du flou : aux frontières des mathématiques et de l'intelligence artificielle ; Presses de l'Université de Montréal, 2001 ; pp. 84
- (SAW, 2010) M. SAWADOGO, D. ANCIAUX ; Optimisation multiobjectif par colonies de fourmis pour le transport intermodal au sein de la chaîne logistique verte ; 8ème ENIM IFAC Conférence Internationale de Modélisation et Simulation (MOSIM 10) 10-12 mai 2010 ; tunisie ;
- (SAW, 2011) M. SAWADOGO; Intégration de l'impact environnemental, sociétal et économique du transport intermodal au sein des chaînes logistiques vertes Optimisation multiobjectif par les colonies de fourmis ; thèse doctorat, L'université Paul Verlaine de Metz; 2011; pp. 88
- (SCH, 2008a) P. SCHWARTZ, Application d'un algorithme de colonie de fourmis au problème du voyageur de commerce ; www.developpeur.com ; 2008
- (SCH, 2008b) P. SCHWARTZ ; Recherche de chemin par l'algorithme A\* ; www.developpeur.com; 2008.
- (SEB, 2003) D. SEBA ; Merise: concepts et mise en œuvre ; Nantes : Editions ENI ; 2003 ; pp. 22.
- (SER, 2002) M. SERFATI, M. BITBOL ; De la méthode: recherches en histoire et philosophie des mathématiques ; Besançon : Presses universitaires franc-comtoises, 2002 ; pp. 192
- (STU, 1997) T. STÜTZLE, H. HOOS, MAX-MIN Ant system and local search for combinatorial optimization problems; Towards adaptive tools for global optimization. In 2<sup>ND</sup> international conference on metaheuristics ; Sophia Antipolis, France, July 1997. INRIA ; 1997; pp. 5
- (STU, 2000) T. STUTZLE, H. HOOS, (2000). Max min ant system. Journal of Future Generation Computer Systems ; 2000 ; pp. 16:889-914.
- (TRA, 2012) *TRANSACTION D'ALGERIE* quotidien national d'information économique ; ORAN : Étouffe sous le poids des voitures ; <http://www.transactiondalgerie.com/>; Mardi, 08. Mai 2012
- (VER, 2008) S. VEREL; Métaheuristiques pour l'Optimisation Difficile ; équipe ScoBi, Université de Nice Antipolis ; 2008
- (WAL, 1974) J. WALCH ; M. Chevalier, économiste saint-simonien, 1806-1879 ; Lille, 1974 ;pp. 397
- (WEI, 2009) J. A. WEIL, A. YGER ; Mathématiques appliquées L3 : cours complet avec 500 tests et exercices corrigés ; Paris : Pearson Education, impr. 2009 ; Pp. 263
- (WIK, 2012) Image de Wikimapia ; <http://wikimapia.org/18611728/fr/Hay-Yaghmourassen>; date consultation : 09/06/2012.
- (ZWA, 2000) P. ZWAENEPOEL ; Agriculture de précision: avancées de la recherche technologique et industrielle ; Educagri Dijon ; 2000 ; pp. 58-59.
- (ZWI, 2006) H. ZWIRN ; Les systèmes complexes: mathématiques et biologie ; Odile Jacob ; 2006 ; pp. 128

## Liste des figures :

- Figure 1.1: La géomatique.
- Figure 1.2 : Matrices Géographiques.
- Figure 1.3 : Schéma de la mise en place du système d'information.
- Figure 1.4: Les fonctionnalités du SIG.
- Figure 1.5 : Mode Raster et Vecteur.
- Figure 1.6 : Représentation des images Raster et Vecteur.
- Figure 1.7 : Domaines d'application du SIG.
- Figure 2.1 : Le réseau routier de la commune d'Oran.
- Figure 2.2 : Le système de coordonnées géographiques.
- Figure 2.3 : Le découpage UTM planétaire (Il commence au parallèle 80° au Sud et se termine au parallèle 84° au Nord. Les zones polaires ne sont donc pas couvertes par la projection UTM).
- Figure 2.4 : Carte de l'Afrique et grille UTM (compatible GPS).
- Figure 2.5 : Les entrées principales de notre université USTOMB, Oran.
- Figure 2.6 : Les segments d'une rue dans un milieu urbain.
- Figure 2.7 : La position GPS et/ou la coordonnée géographique (C.G) est une donnée commune entre les quatre segments (Forme +).
- Figure 2.8 : La position GPS et la coordonnée géographique (C.G) est une donnée commune entre les trois segments (Forme Y).
- Figure 2.9 : Les quatre Positions GPS et/ou coordonnées géographiques dans un Rond point.
- Figure 2.10 : Les segments monodirectionnels.
- Figure 2.11 : Les segments bidirectionnels.
- Figure 2.12 : Limitation de vitesse, ce panneau indique la vitesse à ne pas dépasser.
- Figure 2.13 : Ralentisseur de type dos-d'âne.
- Figure 2.14 : Ralentisseur de type Cassis ou dos-d'âne.
- Figure 2.15 : Annonce de feux tricolores.
- Figure 2.16 : Passage à niveau muni de barrières à fonctionnement manuel ou automatique lors du passage des trains.
- Figure 2.17 : Passage à niveau sans barrière ni demi-barrière. Ce panneau peut être complété par le panneau "feux clignotants" ou par le panneau "stop".
- Figure 2.18 : Traversée de voies de tramways.
- Figure 2.19 : Accès interdit aux véhicules, aux véhicules articulés, trains doubles ou ensemble de véhicules dont le poids autorisé en charge ou le poids total roulant autorisé excède le nombre indiqué.
- Figure 2.20 : Accès interdit aux véhicules dont la hauteur, chargement compris, est supérieure au nombre indiqué.
- Figure 2.21 : Travaux. Ce panneau impose aux usagers le respect d'une règle élémentaire de prudence consistant à prévoir la possibilité d'avoir à adapter leur vitesse aux éventuelles difficultés de passage.
- Figure 2.22 : Modèle conceptuel relationnel de données "comptages routiers".
- Figure 2.23 : Modèle conceptuel des données.
- Figure 2.24 : Modèle logique des données.
- Figure 3.1: Un graphe statique déterministe.
- Figure 3.2 : Un graphe statique stochastique.
- Figure 3.3 : Chemin de moindre coût de longueur infinie. A chaque parcours d'un arc, t est incrémenté de 1. Le chemin de moindre coût bouclera une infinité de fois entre 1 et 2.
- Figure 3.4: Front de Pareto et rangs de Pareto pour un problème de minimisation de deux objectifs.
- Figure 4.1 : Organigramme de la solution choisie.
- Figure 4.2 : La zone de recherche peut être élargie à partir de la distance minimale.
- Figure 4.3 : Les segments ayant un noeud dans la zone et l'autre hors zone.
- Figure 4.4: Organigramme « zone de la recherche sans contraintes ».
- Figure 4.5 : Organigramme de la zone de recherche avec deux objectifs (distance, temps).
- Figure 4.6: La table de la requête « hauteur autorisée ».
- Figure 4.7: Hauteur autorisée dans un segment.

Figure 4.8: Les tables de la requête « calcul le temps de d'attente des feux tricolores d'un segment ».

Figure 4.9: Les feux tricolores dans un segment.

Figure 4.10: Les tables de la requête « calcul le temps de ralentissement ».

Figure 4.11: Plusieurs ralentisseurs dans un segment.

Figure 4.12: Les tables de la requête « calcul le temps de passage d'un segment ».

Figure 4.13: Plusieurs vitesses dans un segment.

Figure 4.14: Les tables de la requête « calcul le temps d'attente devant les passages de tramway et train ».

Figure 4.15: Les passages de train et de tramway.

Figure 4.16: 1) la première fourmi trouve la source de nourriture (F), via un chemin quelconque (a), puis revient au nid (N) en laissant derrière elle une piste de phéromone (b). 2) les fourmis empruntent indifféremment les quatre chemins possibles, mais le renforcement de la piste rend plus attractif le chemin le plus court. 3) les fourmis empruntent le chemin le plus court, les portions longues des autres chemins perdent leur piste de phéromones.

Figure 4.17: Avec un algorithme de colonies de fourmis, le plus court chemin, au sein d'un graphe, entre deux points A et B, est construit à partir de la combinaison de plusieurs chemins.

Figure 4.18: Algorithme de colonies de fourmis de base «Ant System ».

Figure 4.19: Algorithme de MOSPACO.

Figure 5.1 : Convertir le réseau routier en un graphe orienté pondéré.

Figure 5.2 : Les tables de l'application.

Figure 5.3 : Utilisation de BDE pour se connecter à Paradox.

Figure 5.4: Les fichiers de la base de donnée pleine.

Figure 5.5: Hai Yaghmourassen.

Figure 5.6 : Les nœuds du quartier Yaghmourassen.

Figure 5.7 : Les segments du quartier Yaghmourassen.

Figure 5.8 : Front de Pareto pour différentes valeurs de  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Figure 5.9: Application des différentes valeurs de  $\alpha = 2$  et  $\beta = 1$  sur sept graphes différents.

Figure 5.10: Influence des taux d'évaporations sur le nombre des itérations.

Figure 5.11: Influence des taux d'évaporations sur le temps d'exécution du programme.

Figure 5.12: Résultat obtenu de l'algorithme A\*.

Figure 5.13: Résultat obtenu de l'algorithme de dijkstra.

Figure 5.14: Résultat obtenu de l'algorithme de MOSPACO Temps / Feux tricolores (après 3000 itérations).

Figure 5.15: Le front de Pareto temps / feux tricolores.

Figure 5.16: La solution sur carte.

Figure 5.17: Le feu tricolore qui a influencé sur le trajet.

Figure 5.18: La page d'accueil.

Figure 5.19: La mise à jour d'une table.

Figure 5.20: La fiche zone de recherche.

Figure 5.21: Les blocs de la fiche « zone de recherche ».

Figure 5.22: La fiche du simulateur MOSPACO.

Figure 5.23: Les cinq blocs de l'interface du simulateur MOSPACO.

Figure 5.24: La solution optimale obtenue sur un graphe.

## Liste des tableaux :

Tableau 2.1 : Architecture des trois niveaux cycle d'abstraction.

Tableau 2.2 : Recensement des relations.

Tableau 2.3 : Recensement des individus.

Tableau 3.1: Tableau récapitulatif des approches existantes.

Tableau 5.1: Les fiches de mise à jour.