

Table des matières

Table des matières.....	7
Liste des figures	11
Liste des tableaux	13
Liste des abréviations.....	14
Introduction générale.....	16
CHAPITRE 1 : L’information géographique, SIG et sélection de sites	20
1.1 Introduction.....	20
1.2 Concept de localisation (Sélection de sites).....	20
1.2.1 Définition.....	20
1.2.2 Les origines de la sélection de sites.....	21
1.2.2.1 Localisation agricole.....	21
1.2.2.2 Localisation industrielle.....	22
1.2.3 L’aspect géographique des problèmes de sélection de sites.....	22
1.3 L’information géographique.....	25
1.3.1 Définition de l’information géographique.....	25
1.3.2 L’information géographique, du monde réel au modèle mental.....	25
1.3.3 Le support de l’information géographique.....	26
1.3.4 Les propriétés systémiques de l’espace géographique.....	27
1.3.5 Modélisation de l’espace géographique	28
1.3.6 De la réalité géographique à ses modèles.....	28
1.3.7 La cartographie.....	28
1.3.8 Concepts spatiaux fondamentaux.....	29
1.4 Les systèmes d’information géographiques(SIG)	30
1.4.1 Définition des SIG.....	30
1.4.2 Historique.....	31
1.4.3 Structure d’un SIG	33
1.4.4 Enjeux et domaine d’application des SIG.....	33
1.5.5 Principe de fonctionnement d’un SIG	34
1.4.5.1 Le cycle de vie de l’information géographique dans un SIG	34
1.4.5.2 Les couches.....	34
1.4.5.3 Modes d’acquisition et de représentation des données pour le SIG.....	35
• Mode Raster.....	36
• Mode Vecteur.....	36
1.4.5.4 Les bases de données géographiques.....	38
1.4.5.5 Les Types Abstraits de Données spatiales (TADs).....	39
1.4.6 L’analyse spatiale dans le SIG.....	40
1.4.7 Les requêtes spatiales.....	41
1.4.8 Visualisation et géo-visualisation.....	41

1.4.8.1	La visualisation cartographique.....	41
1.4.8.2	La géo-visualisation.....	42
1.4.9	Les SIG au service de la sélection de sites (état de l’art).....	42
1.4.10	Limites du SIG pour la prise en charge les problèmes spatiaux.....	43
1.5	Conclusion.....	45
CHAPITRE 2	: Aide a la décision multicritère.....	47
2.1	Introduction.....	47
2.2	Concept de la décision.....	48
2.3	L’aide à la décision.....	48
2.3.1	Définition de l’aide à la décision.....	48
2.3.2	Les étapes d’une méthodologie d’aide à la décision.....	49
2.3.3	Définition de l’aide multicritère à la décision.....	50
2.3.4	Formulation d’un problème multicritère.....	51
2.3.5	Notion de problématique en aide à la décision.....	51
2.3.6	Démarche de l’aide multicritère à la décision.....	52
2.3.7	Analyse multicritère et aide à la décision spatiale.....	54
2.4	Méthode d’analyse multicritère d’aide à la décision.....	55
2.4.1	Méthodes de critère unique de synthèse.....	55
2.4.1.1	Technique for order preference by similarity to ideal solution.....	56
2.4.1.2	Simple multi-attribue rating technique (SMART).....	56
2.4.1.3	Multiple attributes value theory (MAVT).....	56
2.4.1.4	Multiple attributes utility theory (MAUT).....	56
2.4.1.5	Utility Theory Additive (UTA).....	57
2.4.1.6	Analytic Hierarchy Process (AHP).....	57
2.4.2	Les méthode de surclassement de synthèse.....	62
2.4.2.1	ELECTRE.....	63
2.4.2.2	PROMETHEE.....	64
2.5	Avantages et inconvénients des méthodes multicritères.....	66
2.6	Conclusion.....	67
CHPITRE 3	: Intégration entre SIG et AMC.....	69
3.1	Introduction.....	70
3.2	Définition.....	70
3.3	Complexités des problèmes spatiaux.....	70
3.3.1	Complexité liée aux données.....	71
3.3.2	Complexité conceptuelle.....	71
3.3.3	Complexité ontologique et sémantique.....	71
3.3.4	Complexité technique.....	71
3.4	Utilité et arguments de l’intégration SIG-AMC.....	71
3.5	Schéma conceptuel d’intégration SIG-AMC.....	72
3.6	Mode d’intégration entre SIG et AMC.....	73
3.6.1	Intégration indirecte (loose coupling).....	73
3.6.2	Intégration encastrée (tight coupling).....	73

3.6.3 Intégration complète (<i>full integration</i>).....	74
3.7 Aspects techniques de l'intégration.....	75
3.8 Etat de l'art sur l'intégration SIG-AMC.....	77
3. 8.1. Travaux théorique.....	77
3. 8.2. Applications.....	81
3.9 Limites des travaux d'intégration SIG-AMC.....	85
3. 10 Conclusion.....	86
CHAPITRE 4 : Un modèle basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision.....	87
4.1 Introduction.....	88
4.2 Éléments du modèle.....	89
4.2.1 L'intégration.....	89
4.2.2 AHP et son extension flou.....	90
4.2.3 État de l'art sur l'utilisation de FAHP.....	92
4.2.4 Règle de décision.....	93
4.3 Approche globale.....	94
4.3.1 Processus de sélection des zones industrielles.....	94
4.3 .2 Le rangement des zones industrielles.....	96
4.3.2.1 L'intégration SIG-FAHP proposé pour le rangement.....	96
4.3.2.2 L'approche proposée pour le rangement.....	96
4.4 Le SDSS (Spatial Decision Support System) propose.....	100
4.4.1 INPUT du SDSS.....	101
4.4.2 Les traitements.....	102
4.4.3 OUTPUT du SDSS.....	103
4.5. Application au rangement des zones industrielles en Algérie.....	103
4.5.1 Programmes des nouvelles zones industrielles.....	103
4.5.2 Enjeux du programme.....	104
4.5.3 Le rangement des zones.....	104
4 .5.3.1 Les actions (Alternatives).....	105
4.5.3.2 Les critères de jugement.....	105
4 .5.3.3 La base de règles.....	106
4.5.3.4 Les comparaisons par pair.....	109
4.6 Conclusion.....	113
CHAPITRE 5 : Un modèle basé sur PROMETHEE intégrée au SIG.....	115
5.1 Introduction.....	116
5.2 Éléments du modèle.....	116
5.2.1 La méthode PROMETHEE.....	116
5.2.2 Les SIG.....	118
5.3 Approche globale proposé pour le rangement.....	118
5.4 Architecture du SDSS (Spatial décision Support System) Proposé.....	120
5.4.1 Input du SDSS.....	120
5.4.2 Les traitements	120
5.4.3 Output du SDSS	121

5.5 Application au rangement des zones industrielles.....	122
5.5.1 Les actions.....	122
5.5.2 Les critères.....	122
5.5.3 Pondération des critères.....	125
5.5.4 Table de performance.....	126
5.5.5 Seuils d'indifférence et de préférence.....	126
5.6 Conclusion.....	127
Conclusion générale et perspectives.....	128
Référence.....	131

Liste des figures

Figure 1.1	Données spatiales et analyse spatiale pour la sélection d'un site pour un centre Commercial.....	23
Figure 1.2	Information géographique, du monde réel au modèle mental.....	26
Figure 1.3	Unité d'observation régulière.....	26
Figure 1.4	Unité d'observation irrégulière.....	27
Figure 1.5	Carte géographique d'intérêt sanitaire et épidémiologique.....	28
Figure 1.6	Système d'Information Géographique (SIG).....	30
Figure 1.7	Structure d'un SIG.....	33
Figure 1.8	Cycle de vie de l'information géographique.....	34
Figure 1.9	Les couches dans un SIG.....	35
Figure 1.10	Une Carte générée par MapViewer d'ORACLE spatial représentant des thèmes Multiples.....	35
Figure 1.11	Modèle raster et modèle vecteur.....	36
Figure 1.12	Vue en mode vecteur.....	37
Figure 1.13 a	Création d'une table spatiale.....	38
Figure 1.13 b	Requête SQL utilisant un prédicat spatial.....	38
Figure 1.13 c	Insertion d'un objet géographique dans la table.....	38
Figure 1.13 d	Représentation tabulaire et cartographique.....	38
Figure 2.1	Problématique de Tri.....	52
Figure 2.2	Problématique de choix.....	52
Figure 2.3	Problématique de Rangement.....	52
Figure 2.4	Démarche top-down d'analyse multicritère.....	53
Figure 2.5	Démarche bottom-up d'analyse multicritère.....	54
Figure 2.6	Démarche intermédiaire d'analyse multicritère.....	54
Figure 2.7	Utilisation d'AHP selon les régions mondiales.....	57
Figure 2.8	Les étapes d'application de l'AHP.....	58
Figure 2.9	Structure hiérarchique d'un problème.....	59
Figure 3.1	Schéma conceptuel d'intégration SIG-AMC.....	72
Figure 3.2	Intégration indirecte.....	73
Figure 3.3	Intégration encadrée.....	74
Figure 3.4	Intégration complète.....	74
Figure 3.5	L'interface d>IDRISSI.....	76
Figure 3.6	Architecture de DECERNS.....	77
Figure 3.7	Nombre d'articles parus par année de 1991 à 2009.....	78
Figure 4.1	La fonction floue triangulaire.....	91
Figure 4.2	Processus de sélection de zones industrielles en Algérie.....	95
Figure 4.3	Mode d'intégration proposée.....	96
Figure 4.4	L'approche proposée.....	97
Figure 4.5	Réduction des critères par la base de règles.....	98
Figure 4.6	Architecture du système d'aide à la décision spatiale proposé.....	101
Figure 4.7	Interface de visualisation.....	103
Figure 4.8	Localisation géographique des zones industrielles programmées.....	104
Figure 4.9	Structure hiérarchique du problème incluant l'arborescence des critères....	105

Figure 4.10	Étage bioclimatique d'Algérie.....	106
Figure 4.11	Classification sismiques des wilayas d'Algérie.....	106
Figure 4.12	Hierarchie après réduction des critères.....	109
Figure 4.13	Fuzzification/Defuzzification des matrices de comparaison par pair.....	109
Figure 5.1	Papier de recherche utilisant PROMETHEE de 1982 à mars 2017.....	118
Figure 5.2	Approche proposée.....	119
Figure 5.3	Architecture du SDSS proposé.....	120
Figure 5.4	RPRO interface.....	121
Figure 5.5	L'interface principale du module de visualisation.....	121
Figure.5.6	Hierarchie des critères de jugement.....	122

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Les étapes, les données et les analyse pour choisir un site pour centre Commercial.....	24
Tableau 1.2	Principales étapes historiques de l'évolution des SIG.....	32
Tableau 1.3	Avantages et inconvénients des deux modes Raster et Vecteur.....	37
Tableau 2.1	Les différentes problématiques de décision.....	52
Tableau 2.2	Échelle de Saaty.....	58
Tableau 2.3	Exemple d'une matrice de comparaison par paire.....	60
Tableau 2.4	Les ratios de cohérence acceptable.....	61
Tableau 2.5	Les indices de cohérence aléatoire.....	61
Tableau 2.6	Tableau comparatif des méthodes PROMETHEE.....	64
Tableau 2.7	Fonctions de préférence de PROMETHEE.....	65
Tableau 2.8	Résumé des avantages et des inconvénients de PROMETHEE et d'AHP...	67
Tableau 3.1	Articles SIG-AMC publiés dans des journaux référés de 1990 à 2011.....	80
Tableau 4.1	Les TFNs utilisées pour la fuzzyfication des matrices de comparaison.....	100
Tableau 4.2	Échelle de Saaty fuzzyfiée.....	100
Tableau 4.3	Matrice de comparaison par pair des critères principaux.....	110
Tableau 4.4	Matrice de comparaison par pair fuzzyfié pour les critères de Jugements....	110
Tableau 4.5	Rangs des critères de jugement.....	111
Tableau 4.6	Matrices de comparaison des actions selon Cr1, Cr2, Cr3, Cr4.....	111
Tableau 4.7	Poids flous et rang de chaque action selon Cr1, Cr2, Cr3 et Cr4.....	112
Tableau 4.8	Résultats obtenus avec AHP toute seule et AHP flou avec prétraitement par base de règles.....	113
Tableau 4.9	Avantage du modèle proposé par rapport à AHP seule intégré au SIG.....	114
Tableau 5.1	L'échelle de mesure proposée pour les zones sismiques.....	123
Tableau 5.2	Evaluation des actions selon le critère (C1).....	123
Tableau 5.3	Évaluation des actions selon les critères C2 et C3.....	123
Tableau 5.4	Évaluation des actions selon les critères C4, C5, C6.....	124
Tableau 5.5	Évaluation des actions selon le critère C7.....	124
Tableau 5.6	Évaluation des actions selon le critère C8.....	125
Tableau 5.7	Tableau des poids intra critères.....	125
Tableau 5.8	Table des performances.....	126
Tableau 5.9	Seuils d'indifférence et de préférence de tous les critères.....	126
Tableau 5.10	Flux et rangs finaux des zones.....	127

Liste des abréviations

AADL	Agence d'Amélioration et de Développement du <i>Logement</i>
AFIGEO	Association française pour l'information géographique
AHP	Analytic Hierarchy Process
AMCD	L'analyse multicritère d'aide à la décision
ANIREF	Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière
ANP	Analytic Network Process
API	Application Programming Interface
BDG	Base de données géographique
BIT	BIrary digiT
COM	Component Object Model
DECADE	Dynamic, Exploratory Cartography for Decision support
DECERNS	Decision Evaluation in Complex Risk Network Systems
DRSA	Dominance based Rough Set Approach
DSS	Decision Support System
ELECTRE	ELimination ET Choix Traduisant la REalité
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process
FRS	Système de rangement des facteurs
FST	Théorie des ensembles floue
GIS	Geographic Information System
GPS	General positioninig system
IA	Indice aléatoire
IC	Indice de cohérence
LBS	Location Based Service
LSM	Landslide Susceptibility Mapping
MAGISTER	Multicriteria Analysis and GIS for Territory
MAUT	Multiple Attribute Utility Theory
MAVT	Multiple Attribute Value Theory
MEDUSAT	METHode d'aide à la Décision par l'Utilisation du SIG IDRISI pour l'Aménagement du Territoire
MNT	Modèle Numérique du Terrain
OLAP	On line Analysis Processing
OWA	Ordered Weighted Averaging
PROMETHEE	Préférence Ranking Organisation Méthode for Enrichement Evaluation
PVL	Plug-ins for Visual Langage
RC	Ratio de coherence
RPRO	Ranking PROMethee
SDMA	Spatial Decision Making Aid
SDSS	Spatial décision Support System
SGBD	Système de Gestion de Base de Donnée
SGC	Spatial Group Choice
SI	Système d'information
SIAD	système interactif d'aide à la décision
SIG	Système d'information géographique
SMART	Simple Multi-Attribue Rating Technique

SNAT	Schéma national d'aménagement du territoire
SOLAP	Spatial On line Analysis Processing
TADS	Types Abstraites de Données Spatiales
TFNs	Triangular Fuzzy Numbers
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarly to Ideal Solution
UML	Unified Modeling Language
UTA	Utility Theory Additive
VZI	Visualisation des Zones industrielles
WAC	Weighted Additive Combination method
WAS	La somme pondérée simple
WLC	Weighted Linear Combination

Introduction Générale

Les praticiens de la santé confirment que les zones industrielles constituent une menace sur la santé des citoyens. Le taux des maladies (respiratoire, de la peau etc.) de la population habitante aux alentours des zones industrielles est en hausse permanente. Partant du souci d'éradication des épidémies causées par les zones industrielles polluantes, comme ARZEW ou EL-KERMA, nous avons décidé d'entreprendre le problème à ses débuts. Une localisation zonale bien étudiée, basée sur des critères de jugements suffisants en nombre et adéquats en genre constitue le premier pas à accomplir pour éviter des éventuelles épidémies.

La sélection des zones industrielles constitue un vrai problème décisionnel a connotation géographique, c'est le début du chemin pour la réussite ou l'échec d'un projet industriel. Les décideurs doivent agir précocement en se basant sur des analyses approfondies des critères (facteurs, contraintes) environnementaux, socioéconomiques et autres. Une bonne décision dans ce contexte peut augmenter les gains économiques et diminuer les risques sur la santé des citoyens. L'introduction des critères environnementaux dans le processus de décision pour protéger l'environnement et surmonter les problèmes de santé liés à l'utilisation de ces zones est fortement conseillée.

Une décision anarchique pour le choix d'un site industriel ou même des types d'activités programmés dans ce site peuvent engendrer des conséquences alarmantes sur la santé des citoyens.

La sélection géographique d'un site (location) pour l'installation des projets industriels est définie comme le processus de recherche de l'endroit propice pour les activités industrielles à base de critères socioéconomiques et environnementaux (**Khalid, 2013**). Le choix des zones industrielles est une décision primordial pour un bon aménagement du territoire (**Hadeal et al., 2015**).

La sélection des sites industriels est un problème spatial, décisionnel et multicritères. La complexité de ce problème provient de : i) grand volume de données, ii) données hétérogènes, multidimensionnelles iii) beaucoup d'intervenant avec des préférences conflictuelles et des objectifs divergents iv) besoin de critères multiples souvent conflictuels avec des importances variées (**Chakhar, 2006**).

Les systèmes d'information géographiques (SIG) en tant qu'outils d'aide à la décision spatiale semblent prendre en charge la masse de données géographiques impliquées dans ce genre de problème, pour stocker, gérer et analyser. Néanmoins cet outil tout seul ne peut pas prendre en charge la décision avec sa complexité, sa diversité et son caractère multicritère. La technologie SIG actuelle souffre encore de plusieurs lacunes dues en grande partie à un manque de capacités analytiques capables de supporter les problèmes spatiaux (**Malczewski, 2010**), (**Agouti Tarik, 2009**).

Afin d'augmenter les capacités d'analyse spatiale et décisionnelle des SIG, plusieurs chercheurs ont proposé l'intégration des fonctionnalités analytiques plus sophistiquées basées

sur des outils de la recherche opérationnelle tels que : la programmation linéaire, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones, l'intelligence artificielle, etc. Ces outils ont permis d'améliorer les potentialités analytiques des SIG (**Chakhar, 2006**). Cependant, ils restent limités vis-à-vis du caractère multicritère des problèmes de décision à référence spatiale.

Les méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision(AMC) fournit les techniques pour structurer et évaluer les alternatives engendrés par une décision selon une multitude de critères bien pondéré. L'AMC ne s'intéresse pas à l'analyse spatiale ni a la cartographie des données géographiques car elle présente des limites à prendre en charge cet aspect, par contre l'aspect décisionnel multicritère est bien pris en charge.

Le couplage des SIG et des méthodes d'AMC devient intéressant pour aborder le problème sous ses aspects multiples. L'intégration des SIG et de l'AMC constitue une voie privilégiée et incontournable pour faire évoluer les SIG vers de véritables systèmes d'aide à la décision. L'effet synergique, généré par cette intégration contribue à l'efficacité et à la qualité de l'analyse spatiale pour la sélection des sites industriels (**Aleksandar et al., 2015**).

Les chercheurs se sont intéressé à l'approche d'intégration SIG-AMC depuis 1988 avec les travaux de Diamond et Wright (1988), Janssen et Rietveld (1990). Plusieurs centaines d'articles pratique et théorique ont été publiés donnant la naissance à une nouvelle théorie « GIS-Based-Multicriteria Analysis » (**Malczewski, 2006**). L'idée conceptuelle sur laquelle se base les travaux d'intégration SIG-AMC consiste à utiliser les fonctionnalités du SIG pour préparer les entrées (*inputs*) nécessaires à l'application des méthodes d'AMC et d'exploiter les potentialités de présentation du SIG pour visualiser les résultats de l'analyse, (**Chakhar 2006**).

Malheureusement lorsqu'il y a intégration de deux outils issus de deux théories différentes, certe on profite des avantages des deux mais on souffre aussi de leurs inconvénients tout les deux.

Dans les travaux de cette thèse nous avons accompagné le décideur dans le domaine de la sélection de nouveaux sites pour l'installation des zones industrielles. Notre intérêt s'est porté sur le développement de solutions méthodologiques et informatiques dédiées au renforcement de ce lien légitime entre les SIG el l'AMC en essayant de surmonter certains limites des deux composantes : les SIG et l'AMC et même de l'intégration entre les deux. Plus spécifiquement nous proposons de:

- 1- Utiliser l'intégration SIG-AMC pour aider le décideur lors de la création de 49 nouvelles zones industrielles au niveau national. Ce projet a été confié par les autorités publiques à l'ANIREF (Agence National d'Intermédiation et de REGulation Foncière) en 2013.
- 2- Exploiter les travaux de (**Chakhar, 2006**) qui a distingué quatre modes d'intégration : (i) Pas d'intégration, (ii) Intégration indirecte, (iii) intégration encastrée, (iv) intégration complète. Dans cette thèse, un mode mixte entre le (i) et le (iv) convenable a notre cas d'étude est proposé.

- 3- Utiliser un modèle décisionnel basé sur les méthodes de surclassement et un autre basé les méthodes de critère unique de synthèse. L'objectif étant de proposer au décideur deux philosophies différentes issues de deux écoles pour favoriser la plus près de son esprit et la plus convenable à résoudre le problème.
- 4- Consolider le modèle décisionnel basé sur AHP par un ensemble de règle de décision. L'utilisation de ces règles a conduit à une réduction considérable des critères en input de AHP, à une réduction des incohérences et à un gain en matière de complexité. Le prétraitement par base de règle permet aussi une transformation d'un nombre important de critères techniques issus d'une expertise objective en un ensemble réduit de critères à caractère subjectif convenable a AHP.
- 5- Utiliser la logique floue au niveau de la construction des matrices de comparaison par pair. L'objectif est d'alléger l'incertitude, l'hésitation et la subjectivité des décideurs qui construisent ces matrices. Une étude empirique sur la façon dont le décideur pondère nous a orienté vers le choix de la fonction triangulaire.

Les chapitres qui constituent ce document sont brièvement décrits ci-dessous :

Chapitre 1 : C'est un chapitre de mise en contexte géographique qui commence par une brève description du concept de sélection de sites. Nous présentons l'information géographique, ses propriétés et ses supports. Nous présentons ensuite le Système d'Information Géographique qui est le modèle numérisé de l'espace géographique, avec ses fonctionnalités et ses modes de représentation des données.

Chapitre 2 : C'est un chapitre de mise en contexte décisionnelle qui propose une introduction à l'aide à la décision multicritère. L'accent est mis dans la première partie de ce chapitre sur les méthodes d'analyse multicritères discrètes. Dans la deuxième partie les méthodes de surclassement et les méthodes de critère unique de synthèse sont explicitées.

Chapitre 3 : Ce chapitre est consacré à l'approche de couplage de l'AMC avec les SIG. Nous soulignons d'abord la complexité des problèmes spatiaux et de l'intérêt de cette intégration pour aborder ce type de problèmes. Nous présentons par la suite un extrait des travaux d'intégration SIG-AMC et nous terminons par quelques limites de cette intégration.

Chapitre 4 : Ce chapitre est consacré à la description de notre premier modèle qui intègre AHP Flou, les SIG et les règles de décision, ce modèle est mis au service du décideur de l'ANIREF (**ANIREF, 2013**). Nous proposons dans ce chapitre le processus global de décision pour la sélection des zones industrielles, l'approche de sélection proposée et le système d'aide à la décision spatiale.

Chapitre 5 : Ce chapitre est dédié au deuxième modèle proposé, dans lequel la méthode PROMETHEE II est utilisée pour le rangement des zones industrielles.

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre premier

L'information géographique, SIG et sélection de sites

Almost everything that happens, happens somewhere. Knowing where something happens is critically important.
(Longley et al., 2001)

1.1. Introduction

Dans les secteurs de développement socio-économique et environnemental, pour installer des nouvelles zones industrielles, construire des logements AADL ou pour prendre des mesures de protection de l'environnement, le décideur est confronté à l'information géographique lors de sélection des sites propices à ses activités.

Il est courant de dire que 80% de l'information que nous traitons possède une dimension géographique (AFIGEO, 2017). Une approche scientifique est indispensable pour l'analyse et la modélisation et de cette information. Des modèles explicites doivent être créés pour décrire en détail cette réalité géographique complexe. L'analyse spatiale doit faire l'intérêt primordiale parce qu'elle représente le noyau dur du processus de décision (Caloz et Collet, 2011).

Les bases de données géographiques doivent répondre à un potentiel d'interrogations formulées par les utilisateurs, ces interrogations sont des requêtes spatiales de type thématiques, géométriques ou topologiques (Caloz et Collet, 2011). La révolution numérique survenu a fourni des moyens fabuleux de calcul et d'analyse de la réalité géographique. Les outils informatiques et les outils technologiques comme les SIG (système d'information géographique), les GPS (General positioninig systems), la télédétection et l'imagerie aérienne qui n'ont pas cessé de se développer ont contribué à la célébrité de la géographie et a la naissance d'une nouvelle science la ' Géomatique'.

Les spécialistes qui ont besoin d'analyser d'importants volumes de données géographiques dans différents domaines (urbanisme, environnement, climatologie, marketing, agriculture, santé, transport, etc.) ont tous besoin des SIG.

Nous débutons ce chapitre par une description de la sélection des sites et de ses origines scientifiques et économiques et nous mettons l'accent sur son lien étroit avec la géographie et les SIG. Ensuite, nous nous focalisons sur les caractéristiques principales de l'information géographique et les fonctionnalités des systèmes d'information géographique, par rapport au stockage de données géographiques, à leur analyse spatiale et à leur visualisation.

1.2 Concept de sélection de sites

1.2.1 Définition :

Dans le dictionnaire 'Webster', *la sélection de sites ou la localisation (Location) est le choix d'une position géographique ou d'une zone marquée pour un objectif spécifique.* Par conséquent, un problème de localisation est l'identification d'une position ou d'un lieu spécifique pour une activité économique ou un service social.

Church (1997) distingue deux types de problèmes de localisation : a) Problème de mesure de localisation qui est simplement la réponse à la question, ou et b) Problème de recherche de localisation qui implique la recherche d'un emplacement approprié pour une activité.

La sélection de sites est une théorie fondée sur des travaux théoriques considérables ayant des mots clefs tel que : utilisation du sol (land use), production industrielle (industrial production), places centrales (central places) et compétition spatiale (spatial competition) (**Murray, 2010**).

Les premières investigations dans ce domaine sont orientées vers la localisation géographique des activités économiques. La localisation industrielle est l'une des clefs de la révolution industrielle occidentale. On trouve dans Wikipedia, la définition suivante : *La théorie de la localisation répond à la question : quelles activités économiques se localisent où et pourquoi.* La localisation est devenue une partie intégrante de la géographie économique, des sciences régionales, de l'économie spatiale et fournit une aide considérable à l'aménagement du territoire.

1.2.2 Origines et développement de la sélection de sites

La mesure ou la recherche d'une localisation doit faire l'objet des décisions étudiées pour maximiser les gains et diminuer les risques et par conséquent une aide à la décision est primordiale dans ce contexte. La théorie de localisation (location science) s'est développée au fil du temps, évoluant depuis ses premières origines jusqu'à son utilisation actuelle par diverses parties comme les institutions politiques, les professionnels de l'urbanisme, les institutions environnementales (**Abramovich, 2012**). Les scientifiques ont essayé depuis longtemps de trouver des règles et des modèles pour une aide à la décision aux opérateurs de localisation afin d'évaluer l'attractivité relative d'un site par rapport à d'autres sites potentiels. L'application de cette théorie s'est orientée principalement dans ses débuts vers l'agriculture et l'industrie.

1.2.2.1 Localisation agricole :

Au début, les hommes et les institutions se sont intéressés à chercher les meilleures terres à cultiver selon plusieurs critères (fertilité, coûts, main d'œuvre,...). Von Thünen (1826) est considéré comme le père de la théorie de localisation. Il s'est donné comme objectif de trouver les localisations optimales des activités agricoles. Pour lui La localisation optimale est telle qu'en tout point de l'espace, la rente foncière est maximisée, il a proposé un modèle (model de Von Thünen) qui repose sur plusieurs hypothèses (**Ponsard, 1988**) :

- Le sol est de qualité homogène (la fertilité du sol est constante) ;
- La production est à rendement d'échelle et factoriels constants, ce qui implique que la production par unité de surface (x) est fixe, et que le coût par unité de surface (c) est fixe également, indépendamment de la localisation ;
- Le prix du produit (p) est fixé par le marché au lieu central, indépendamment du lieu de production ;
- Le coût de transport est proportionnel à la distance parcourue et à la quantité de produit transportée. Le taux de transport par unité de distance et par unité de produit est τ .

- Le sol est attribué à l'utilisateur qui est capable de payer la plus forte rente.

Pour un produit donné, la fonction de rente offerte est une fonction linéaire et décroissante,

qui s'écrit : $\rho_s = px - c - \tau x \delta_s$ où δ_s est la distance du lieu s au centre du marché.

1.2.2.2 Localisation industrielle :

La localisation industrielle a commencé avec Alfred Weber (1868-1958) qui a élaboré la théorie de localisation industrielle sur la base des critères économiques et en s'appuyant sur des modèles mathématiques. Pour Alfred Weber, la formulation mathématique n'aide pas seulement à la compréhension, mais apporte aussi directement des solutions décisives.

La théorie de Weber est fondée sur trois postulats de base (**Merenne, 1991**) :

- un grand nombre de matières ont une localisation spécifique, on ne peut pas les trouver partout.
- les marchés des produits finis sont localisés en certains points et la concurrence est parfaite.
- les bassins de main-d'œuvre sont localisés et peuvent offrir un nombre illimité de travailleurs à un certain taux de salaire. L'espace est totalement uniforme culturellement, politiquement et spatialement.

Le modèle de Weber s'articule principalement sur le facteur « coût de transport » et repose sur un triangle dont les deux sommets représentent les points d'offre de deux matières premières et le troisième sommet représente la demande de produit fini, la main-d'œuvre étant disponible partout (**Ponsard, 1988**).

1.2.3 Aspect géographique des problèmes de sélection de site :

Les données géographiques qui caractérisent les problèmes de sélection de sites sont dominantes et multi sources. L'homme d'étude et le décideur sont confrontés à la modélisation, la gestion et l'analyse de ce type de données pendant tout le processus de sélection. La figure 1.1 illustre la sélection d'un site pour l'installation d'un centre commercial, les contraintes (critères) géographiques fixées pour cette sélection sont :

- Ne considérer que les zones qui peuvent avoir le permis de construire d'un centre commercial auprès des autorités.
- Ne considérer que les zones ayant une superficie suffisante.
- Ne considérer que les zones non exposées aux risques naturels comme les inondations.
- Ne considérer que les zones qui sont près des routes principales pour assurer la bonne accessibilité.

Ainsi, les étapes d'analyse principales pour cette sélection sont :

- L'utilisation d'une carte géographique d'aménagement du territoire fourni par le SNAT (Schéma National d'Aménagement du Territoire) sur laquelle figure les zones prévues juridiquement pour l'installation des grandes surfaces commerciales.
- A partir d'une carte géographique fournie par l'agence foncière de la wilaya, sélectionner les lots de terrain à vendre et ayant des superficies suffisantes.

- Utiliser une carte géographique des zones exposées au risque naturel (inondation, séisme, etc.) fournie par les services concernés pour éliminer les lots à risque.
- En dernière étape, utiliser une carte géographique des voies de transport pour ne garder que les lots accessibles facilement par les futurs clients.

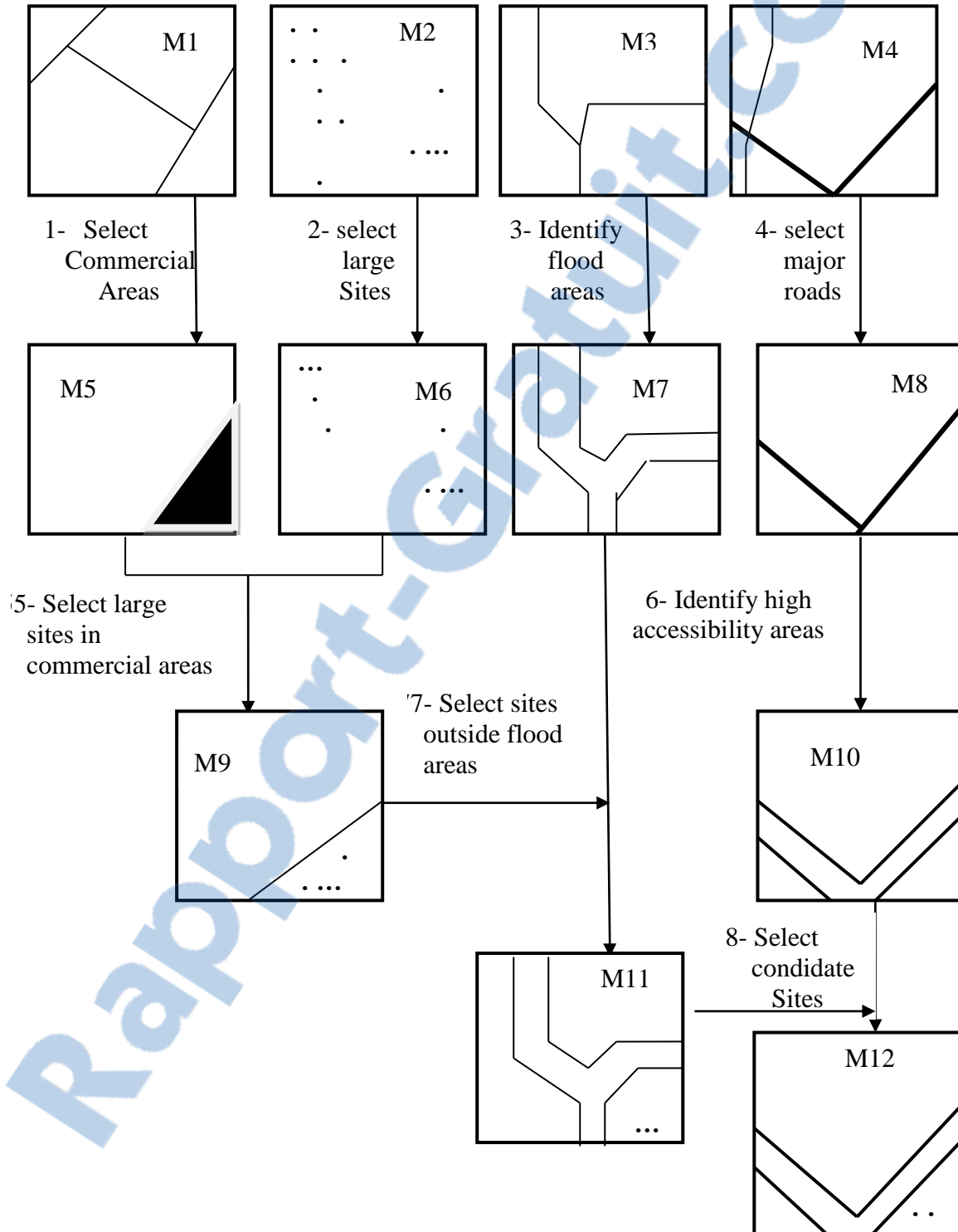


Figure1.1. Données spatiales et analyse spatiale pour la sélection d'un site pour un centre commercial inspiré de (Kothuri et al., 2011).

Le tableau 1.1 récapitule les données géographiques utilisées ainsi que les analyses nécessaires pour la sélection d'un centre commercial.

Tableau 1.1. Étapes, données et analyse pour la localisation d'un centre commercial.

Etape	Données	Analyse	Résultat
1- Sélection des sites destinés au commerce	M1 : Carte d'utilisation du sol : Ensemble de polygones avec l'attribut «Land-use type »	Sélectionner le polygone ayant comme valeur de l'attribut : « commercial »	M5 : sites commerciaux : Un ensemble de polygone ayant l'attribut « commercial »
2- Sélection des sites ayant une superficie suffisante	M2 : Les sites à vendre avec la description géométrique et le prix du lot	Sélectionner les sites ayant une surface supérieure à celle déterminée par le client	M6 : Obtention des sites ayant une superficie suffisante
3- Identification des zones a risque d'inondation	M3 : Carte des rivières	Création d'une zone tampon d'1Km au moins autour de la rivière à éviter	M7 : Terrain exposé au risque d'inondation
4- Sélection des routes principales	M4 : Carte du réseau routier, chaque route possède des attributs comme : Vitesse tolérée, type de route...	Sélectionner les zones traversées par les routes principales	M8 : routes principales
5- Sélection des sites commerciaux avec superficie suffisante	M5 et M6	Superposer M5 et M6 pour avoir les sites commerciaux a superficie suffisante	M9 : Sélection des sites large a vocation commercial
6- Identifier les zones fortement accessibles	M8	Créer une zone tampon de 500 m sur chaque coté de la route principale	M10 : Zone à forte accessibilité
7- Sélection des sites en dehors des zones à risque d'inondation	M9 et M7	Superposer (Overlay) M9 et M7 et éliminer les zones a risque d'inondation	M11 : sélection des sites commerciaux à superficie suffisante et non exposé au danger d'inondation
8- Sélection des zones candidates	M10 et M11	Sélectionner les zones sécurisées parmi les zones à forte accessibilité	Sites ayants des superficies suffisante fortement accessible par des routes principales et non exposés au risque d'inondation.

A partir de cet exemple illustratif nous concluons que la sélection de sites prend en considération beaucoup de données géographiques sous forme de cartes numériques produites nécessairement par les SIG et détenues par plusieurs services. Ces données doivent être analysées spatialement sous les différentes formes de l'analyse spatiale.

1.3. L'information géographique :

1.3.1. Définitions

- **Définition 1 (Denegre et Salge, 1997).**

L'information géographique est la représentation d'un objet ou d'un phénomène réel localisé dans l'espace à un moment donné. L'information géographique est caractérisée par une composante purement spatiale et une composante sémantique.

- **Definition 2 (Caloz et Collet, 2011).**

L'information géographique est tout ce qu'on perçoit de la réalité naturelle, elle peut décrire des objets à distribution discrets, tel qu'un bâtiment avec sa position, sa forme et ses coordonnées ou une route avec ces paramètres ou une forêt, un fleuve comme elle peut représenter un phénomène à distribution continu telle que la température, la sismicité ou l'altitude.

La dimension d'un objet géographique peut varier de l'immensité d'un continent à la grandeur d'une région jusqu'à la petite source d'eau. La complexité peut être celle d'une immense ville comme Alger ou New York. Les objets géographiques se caractérisent par :

- Un aspect géométrique qui se résume généralement par la position géographique (Longitude, latitude), l'air, la longueur, le périmètre, etc.
- Un aspect topologique qui se résume selon (Egenhofer, 1989) par trois éléments clés :
 - le bord, le corps intérieur et le corps extérieur.
- Un aspect sémantique ou thématique, c'est l'ensemble des attributs thématiques de l'objet (Numéro cadastrale d'un terrain, nom d'une route ...)

1.3.2 L'information géographique : Du monde réel au modèle mental :

L'information géographique décrit les phénomènes géographiques à partir du monde réel par un processus d'acquisition, d'abstraction et de modélisation pour arriver à un modèle mental (Weger, 1999) (Figure 1.2).

L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

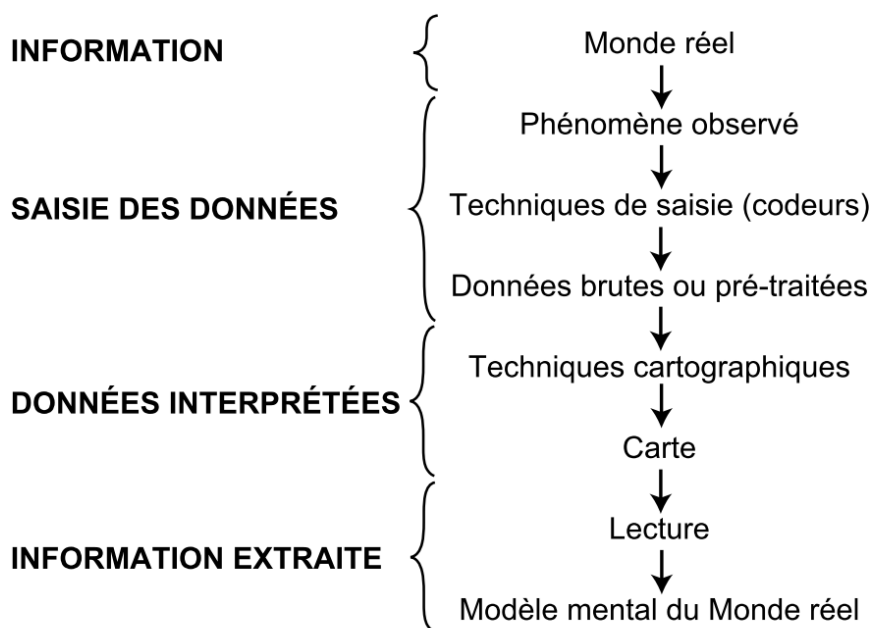


Figure 1.2 : Information géographique, du monde réel au modèle mental (Weger, 1999).

1.3.3 Le support de l'information géographique :

L'unité d'observation est le support géométrique élémentaire de l'information géographique ou la portion de l'espace géographique observée (Collet, 2005). L'unité d'observation est considérée comme le BIT de la géographie, elle est indivisible, elle peut être régulière, désignée par « maille » ou « pixel » (figure 1.2), comme elle peut être irrégulière, désignée par « objet spatial » (figure 1.3).

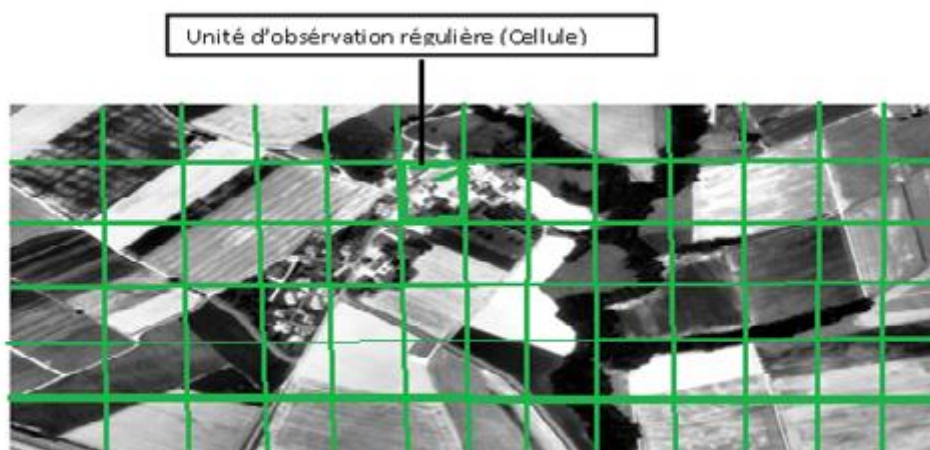


Figure 1.3. Unité d'observation régulière, source (Collet, 2005).

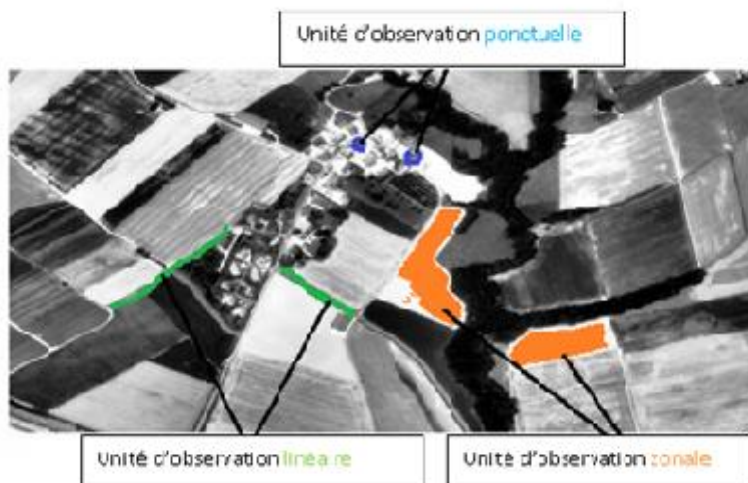


Figure 1.4. Unité d'observation irrégulière, source (Collet, 2005)

1.3.4 Les propriétés systémiques de l'espace géographique

Brunet, (1980) a défini l'espace géographique comme une organisation spatiale d'un ensemble plus ou moins cohérent de lieux mis en relation. Cet ensemble est à la fois différencié et intégré en aires et réseaux dans lesquels circulent des flux.

Pour appréhender l'espace géographique dans une démarche systémique **Christine et Jean-pierre, (2005)** s'appuyant sur **Brunet, (1980)** qui dit « *Tout lieu est situé dans l'espace, dans le temps et dans un ensemble de processus, au sein d'un champ de forces quelque part dans les Structures du Monde* » ont pris en considération les propriétés systémiques suivantes :

Ces champs de force sont principalement financiers, culturels, démographiques et coexistent à toutes les échelles spatiales. Les relations qui unissent les champs de force et les lieux sont d'ordre systémique. Ainsi, les multiples forces qui interfèrent en un lieu contribuent à le façonner, de façon plus ou moins intense et durable selon les espaces et les périodes. Réciproquement, les lieux sont constitutifs des champs, ils déterminent la propagation des flux, freinent ou canalisent les courants d'échanges.

- L'espace géographique est à la fois organisé et organisant. Si la société produit l'espace, les éléments spatiaux rétroagissent également sur l'action de la société en créant des contraintes ou, au contraire, en exerçant une attractivité. La géographie spatiale, s'attache à mieux comprendre les liens existant entre les éléments spatiaux et les éléments anthropiques, en recherchant le rôle exercé par l'espace sur l'action de la société et dans les processus de transformation territoriale.
- L'espace est un potentiel que les agents réexaminent et réévaluent continuellement en fonction de leurs besoins et de leurs aspirations, au regard des dynamiques et des potentialités des autres territoires. Cette dynamique incessante conduit à d'éventuels repositionnements des lieux et des objets dans le système.

1.3.5. Modélisation de l'espace géographique :

La modélisation vient pour réduire la complexité du monde réel dans un contexte géographique. Lors de la conception d'un modèle, on ne retient que les éléments jugés significatifs pour le phénomène étudié, de manière à mieux comprendre son fonctionnement.

Un modèle dans ce sens est une réduction contrôlée de la réalité. Il est en général finalisé dans la mesure où il est conçu pour satisfaire des objectifs préalablement fixés. Ainsi, un modèle du territoire dépend fortement du regard disciplinaire : géologue, hydrologue, épidémiologiste, etc.

Les étapes d'un processus de modélisation géographique peuvent se résumer selon (**Caloz et Collet, 2011**) par :

- Appréhension globale de l'espace géographique par la sélection des éléments jugés importants.
- Identification des éléments significatifs en leur affectant un nom
- Identification des relations existantes entre les éléments
- Détermination des propriétés des éléments et de leurs relations.

1.3.6 De la réalité géographique à ses modèles

La modélisation de l'espace géographique constitue la première étape de l'analyse spatiale (**Caloz et Collet, 2011**). La réalité du champ visuel d'un observateur ou même d'une image doit être modélisée en objets et relations structurant le territoire. La difficulté de la modélisation provient de la complexité géographique de la réalité. Pour prendre en compte l'aspect statique et dynamique d'un système, des modèles prédictifs et descriptifs sont utilisés :

- a- Un modèle est descriptif lorsqu'il représente une sorte de photographie de la réalité sans se mêler de l'évolution et de la dynamique de cet état. Une base de données géographique (BDG) peut être considérée comme modèle descriptif de la réalité géographique.
- b- Un modèle est prédictif lorsqu'il décrit l'évolution d'un phénomène de manière à pouvoir prédire un état futur à partir d'un état initial connu. Sa mise en œuvre repose sur une expression mathématique liant les variables significatives. La carte est considérée comme le premier modèle de la réalité géographique.

1.3.7. La cartographie :

Depuis longtemps, la carte (Map) a été utilisée pour modéliser la perception de la réalité géographique pour faire des analyses ou des communications par exemple :

- En 1854, Le médecin britannique John Snow a utilisé une carte (Figure 1.5) pour trouver le lien entre le choléra et les sources polluées des eaux dans la ville de Londres.

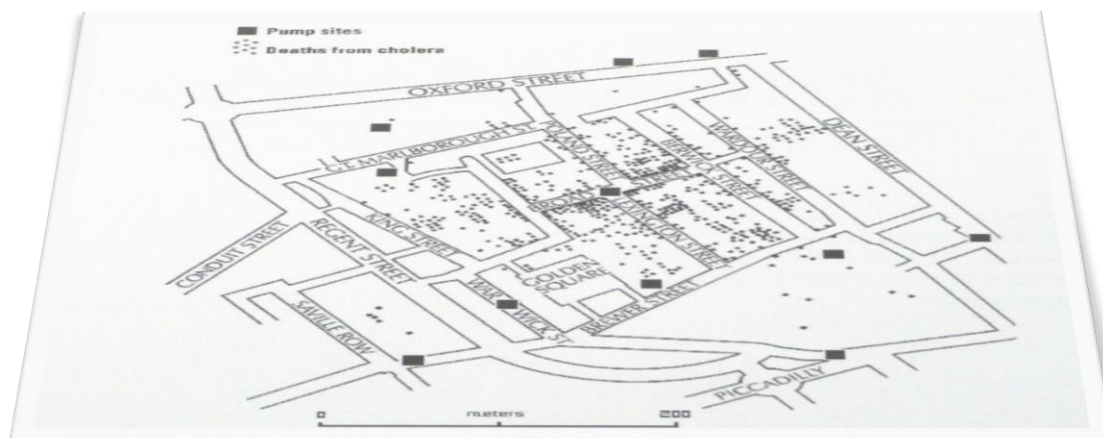


Figure 1.5 : Carte géographique d'intérêt sanitaire et épidémiologique (Paulson, 2014).

- En 1781 le cartographe français Louis-Alexandre Berthier dressait des cartes avec calques superposés et rabattables montrant des mouvements de troupes lors de la bataille de Yorktown pendant la guerre de l'indépendance américaine (Martin, 2004).

La carte utilise une symbolique conventionnelle (langage graphique), la lecture est faite grâce aux capacités particulières de notre perception visuelle. Le langage graphique d'une carte dépasse la lecture et les mathématiques qui ne supportent pas la superposition (Weger, 1999)

Les fonctions d'une carte géographiques peuvent se résumer comme suit (Caloz et Collet, 2011) :

- La reconnaissance d'un lieu.
- La représentation spatiale d'objets ou de classes d'objets.
- La représentation d'inventaires thématiques et leur distribution spatiale.
- La représentation des phénomènes dynamiques au moyen de signes (direction d'écoulement de nappe phréatiques, de vents dominants, etc.).

La cartographie de l'espace géographique constitue ainsi la première étape d'analyse spatiale.

1.3.8 Concepts spatiaux fondamentaux :

Avec le développement des modèles numériques, la carte a évolué en base de données géographique sans remettre en cause les concepts spatiaux fondamentaux qui sont :

- Echelle cartographique.
- Géo référencement.
- Systèmes de projection (Projection cylindriques, Projection de Lambert).
- Positionnement.
- Les relations spatiales.
- Topologie (Adjacence, Connectivité, Inclusion, Intersection).

1.4 Les systèmes d'information géographiques (SIG)

Le recours à l'informatique et aux techniques de base de données est tout à fait légitime vu l'énorme quantité des informations géographiques et la complexité de ces dernières. De plus, le développement des technologies d'acquisition tel que le GPS, l'imagerie aérienne, la télédétection... a conduit à une production immense des données géographiques. Pour les prendre en charge, différentes solutions SIG commerciales et non commerciales ont été développées (ArcView, MapInfo, Quantum GIS, Grass, IDRISI, etc.). Les données géographiques dans les SIG sont organisées sous forme de couches et analysées en se basant sur le principe de superposition des cartes « *overlay* », Le stockage se fait selon deux différents modèles : « vecteur » et « raster ».

1.4.1 Définitions des SIG:

Avec la croissance du nombre d'utilisateurs des SIG qui ne cesse de croître, il y a beaucoup de définitions, chacune reflète les intérêts et les perspectives de son utilisateur.

Chakahr, (2006) s'est intéressé aux stratégies d'intégration entre les SIG et l'analyse multicritère d'aide à la décision (AMC), il a donné la définition suivante: *Geographic Information System is a system of hardware, software, data, people, organizations and institutional arrangements for collecting, storing, analyzing, and disseminating about areas of the earth.*

A partir de cette définition, on peut déduire les fonctionnalités opérationnelles des SIG (figure 1.6).

- Stockage, représentation et gestion des données.
- Manipulation et analyse des données.
- Affichage, visualisation de produits (rapports, cartes statistiques, etc.).
- Communication avec l'utilisateur et acquisition.

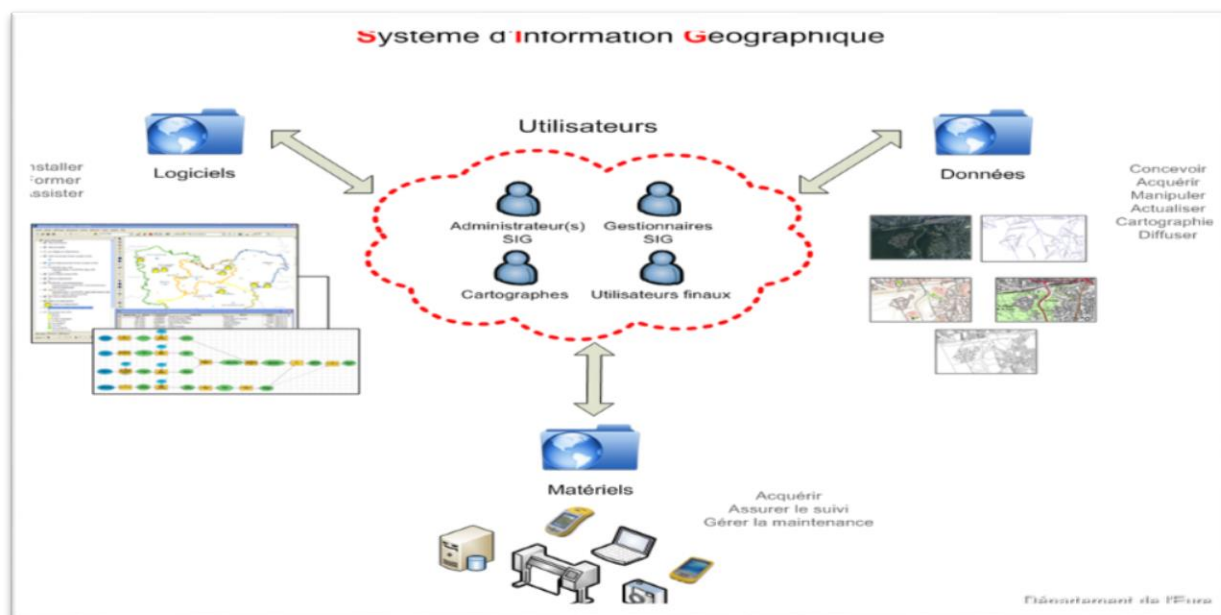


Figure 1.6. Système d'Information Géographique (SIG).

L'objectif de **Marc, (2002)** est la conception puis l'implémentation du SIG (SAVANE), sa proposition de définition comporte le concept d'aide à la décision : « *Un système d'information géographique (SIG) est avant tout un système de gestion de base de données capable de gérer des données localisées, et donc capable de les saisir, de les stocker, les extraire (et notamment sur des critères géographiques), de les interroger et analyser, et enfin de les représenter et les cartographier. L'objectif affiché est essentiellement un objectif de synthèse, permettant à la fois la gestion des données comme l'aide à la décision* ».

Dans (**Sandro, 2007**), l'auteur intègre l'information géographique dans les entrepôts de données pour l'analyse en ligne, il a proposé la définition suivante :

« *Un système d'Information Géographique (SIG) est un ensemble d'outils qui permet d'intégrer des informations cartographiques et alphanumériques dans un environnement unique et cohérent. Les SIG permettent d'accomplir un ensemble d'opérations liées aux données géographiques comme l'acquisition, la structuration, la mémorisation, l'analyse et la visualisation. Les utilisateurs potentiels d'un SIG sont tous des spécialistes qui ont besoin d'analyser d'importants volumes de données géographiques dans différents domaines (urbanisme, environnement, climatologie, marketing, agriculture, santé, transport, etc.)* ».

A partir de ces différentes définitions, on peut résumer les objectifs généraux d'un SIG dans les points suivants :

- Saisie et stockage numérique de plans et de cartes.
- Structuration de l'information.
- Calculs de métriques (distances, surfaces), calculs techniques (visibilité, recherche opérationnelle), positionnement et projection géographiques.
- Gestion et traitement des collections d'objets géographiques.
- Gestion administrative et partage des données entre utilisateurs
- Gestion et analyse spatiale, Gestion spatio-temporelle
- Statistique et géostatistique
- Simulation et modélisation
- Télédétection géo-référencement et traitement d'image

1.4.2 Historique des SIG

L'historique du développement des SIG peut être divisé en trois périodes : les années 60-70, représentant les premières réalisations, les années 80 pour la consolidation et l'apparition des premiers logiciels commerciaux, et les années 90 pour la diffusion générale des outils et de la technologie SIG, (**Marc, 2002**). Le terme SIG a été utilisé par Roger Tomlinson en 1963, alors que le premier SIG a été développé au début des années 1960 par Howard T. Fisher de l'Université Harvard. L'année 1962 marque la parution du SIG , CGIS au CANADA, (**Chakhar, 2006**). Le tableau 1.2 ci-dessus illustre les étapes du développement historique des SIG.

Tableau 1.2, Principales étapes historiques de l'évolution des SIG (Caloz et Collet, 2011)

Periode	Evolution des SIG	Développements informatiques
1970-1980	<p>Formulation de la théorie de base de données relationnelle.</p> <p>Développement de système de bases de données relationnelles pour la gestion des salaires du personnel, de stock, de marchandise, etc.</p> <p>Méthode MERISE pour la conception et la mise en œuvre de base de données en entreprise et administration publique</p>	<p>Ordinateurs centraux</p> <p>Machine à dessiner basées sur des traceurs à plume</p> <p>Imprimante matricielle dont les tons de gris sont produits en augmentant la densité de caractères</p>
1980-1990	<p>Mise sur le marché des premiers logiciels dits de SIG par les géographes basés sur le mode image et SIT (Système d'Information du Territoire) pour la création et la gestion du cadastre foncier par les ingénieurs-géomètres notamment :</p> <p>En mode objet(Vecteur)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Arcinfo, System 9, etc. - IDRISI, GRASS, P-MAP <p>Poursuite de développement des systèmes de Base de Données Relationnelle (SGBDR)</p> <p>Publication du livre Géographic Information System.</p> <p>Mars 1987, première parution de la revue : Geographical Information System</p>	<p>Cartographie numérique</p> <p>Editeurs graphiques et imprimante atteignant une excellente qualité</p> <p>Formulation d'une structure permettant la gestion de la topologie de manière informatique</p> <p>Début 1980, mise sur le marché des « mini ordinateurs » permettant une décentralisation des moyens informatiques dans les institutions et des « Micro ordinateur ou Ordinateurs personnels (PC)</p>
	<p>Naissance du concept actuel de SIG intégrant la triologie : mode image, mode vecteur et base de données relationnelle</p>	
Début 1990	<p>Mise en commun des informations en réseau « Intranet »</p> <p>Première mise en œuvre d'Internet</p>	<p>Développement de la puissance des processus selon la loi de Moore 1965 (le nombre de transistors intégrés dans un processus double tous les deux ans)</p>
1990-2000-2010	<p>Le concept de système d'information géographique devient Science de l'information géographique.</p> <p>Mise sur le marché de logiciel SIG à faible cout.</p>	<p>Population d'internet</p> <p>Développement et diffusion des ordinateurs portables.</p>

Il faut souligner qu'actuellement, avec le développement de l'analyse en ligne la communauté utilise le SOLAP (Spatial On line Analysis Processing) qui identifie un type de système d'aide à la décision spatiale intégrant les techniques d'analyse de l'OLAP (On line Analysis Processing) et des systèmes d'information géographique. Le SOLAP augmente les capacités d'analyse des systèmes OLAP classiques et implique une reformulation des concepts des entrepôts de données et de l'analyse en ligne d'un point de vue formel et d'implémentation (Sandro, 2007).

Le SIG hérite du SI (système d'information) une multitude de caractéristiques. C'est un système informatique qui permet de stocker les données de type géographique dans les bases de données et de faire des requêtes, des analyses spatiales et de fournir des visualisations à la demande de l'utilisateur sous forme de cartes.

1.4.3. Structure d'un SIG

Malscewski, (1999) a dégagé quatre composantes fonctionnelles principales des SIG (figure 1.7) :

- Entrée/Sortie des données.
- Stockage et gestion des données.
- Manipulation et analyse des données.
- Interface dialogue avec l'utilisateur.

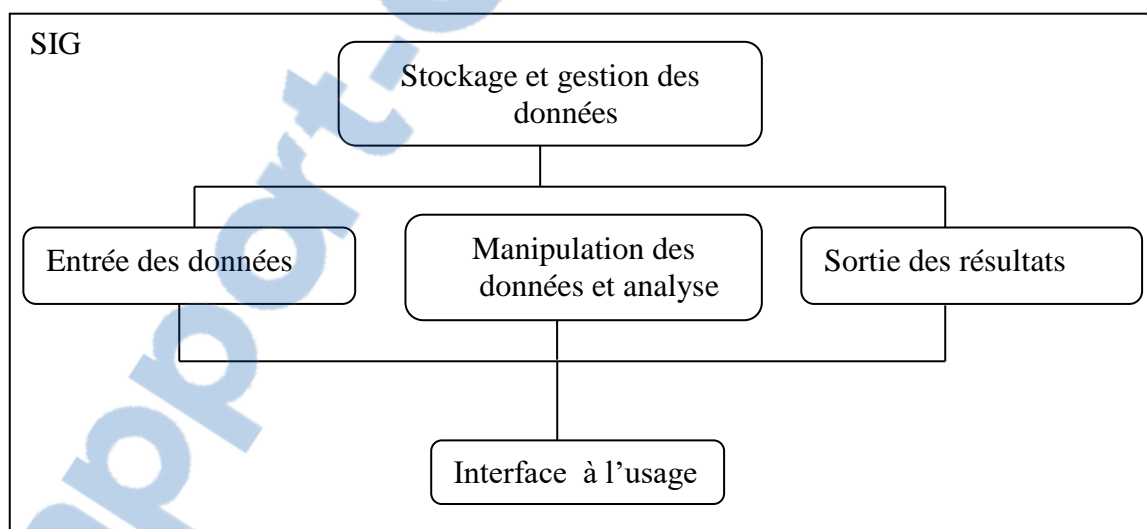


Figure 1.7 Structure d'un SIG

1.4.4. Enjeux et domaine d'application des SIG

Les enjeux auxquels toutes les nations font face sont : l'économie, l'environnement, la santé, la démographie, etc. Ces domaines ont un lien étroit avec la géographie. La plus part des activités socio-économiques et politiques impliquent des données géographiques et nécessitent l'utilisation des SIG. On peut citer comme secteurs d'application des SIG : L'agriculture, l'aménagement du territoire, les travaux publics, le cadastre, la démographie, l'environnement, la géologie, la gestion de réseaux, la santé, le tourisme, etc.

1.4.5. Principe de Fonctionnement des SIG

Dans les SIG, les données géographiques suivent un cycle de vie itératif, elles sont organisées sous forme de couches et elles sont représentées selon deux différents modes (vecteur et raster).

1.4.5.1 Le cycle de vie de l'information géographique dans un SIG

Le cycle de vie de l'information géographique reflète son dynamique, ce cycle est itératif, quand on passe une étape on est susceptible d'y revenir à chaque moment, ce qui explique la forme circulaire de la figure 1.8. Ce cycle montre, le fait qu'un SIG n'est pas établi une fois pour toutes et doit être adapté à toute transformation de l'espace géographique (Caloz et Collet, 2011)

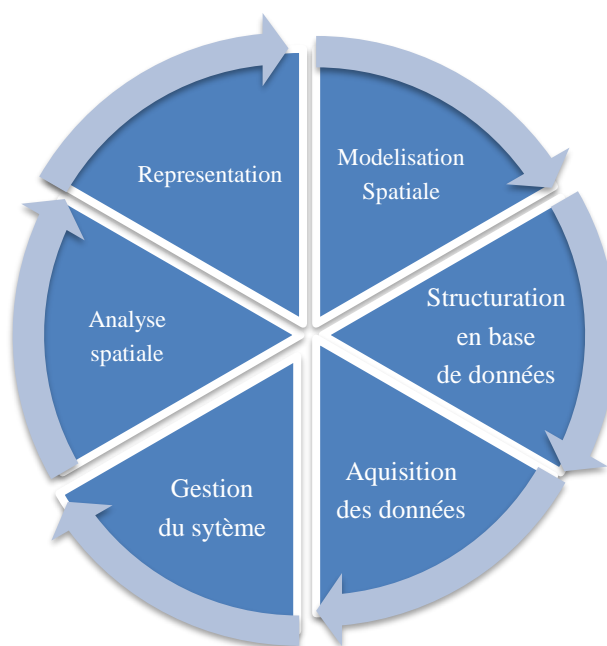


Figure 1.8, Cycle de vie de l'information géographique, source (caloz et collet, 2011).

1.4.5.2 Les couches

Le stockage des informations dans un SIG se structure selon le concept de couches thématiques (figure 1.9). On reprend dans le SIG ce que le cartographe fait manuellement en superposant ses différents calques (calque de route, calque des réseaux d'assainissement, etc.). La métaphore utilisée dans le SIG pour organiser les données géographiques est la couche (Sandro, 2007). La liaison entre ces couches se fait par leurs coordonnées géographiques. Un thème est la rubrique utilisé par un SIG pour rassembler les données d'un sujet particulier (Figure 1.10).

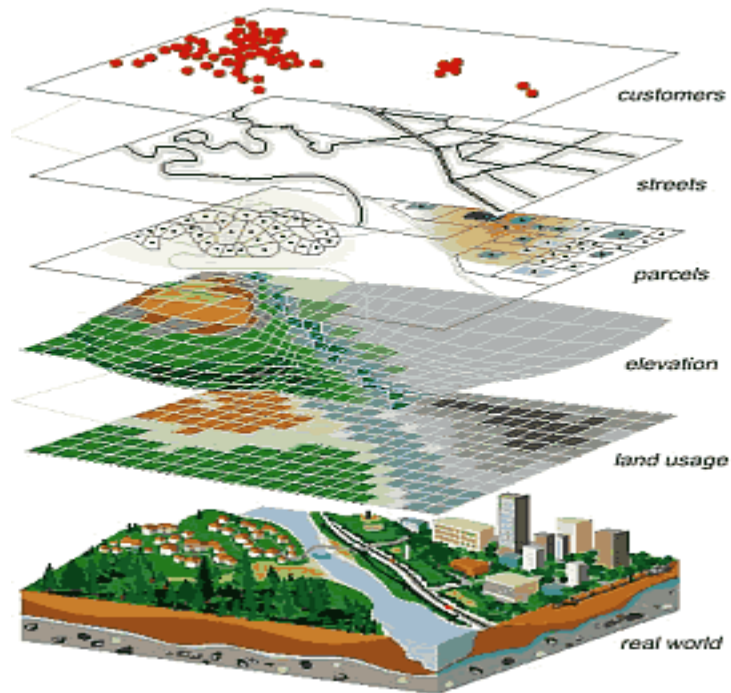


Figure 1.9. Les couches dans un SIG source (ESRI, 2017)

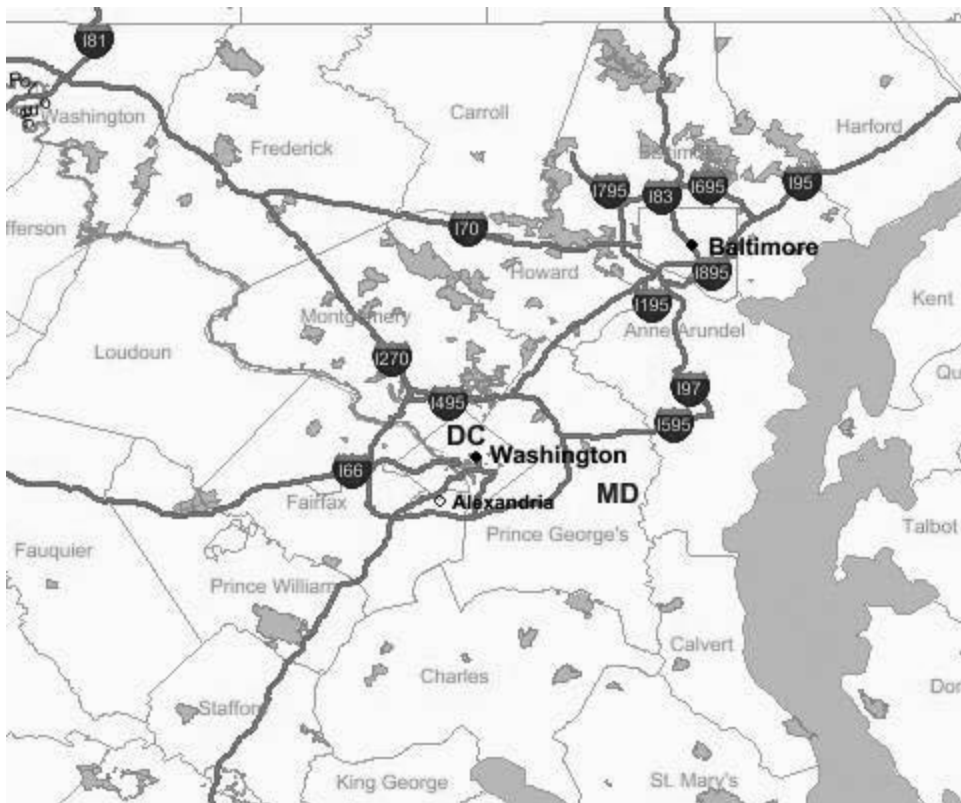


Figure 1.10. Une Carte générée par Map-Viewer d'ORACLE spatial représentant des thèmes multiples

1.4.5.3 Modes d'acquisition et de représentation des données géographique par un SIG

Deux modes sont utilisés pour numériser et stocker les données géographiques dans un SIG ; le mode raster et le mode vecteur (Rigaux et al., 2001) . Le choix dépend de la nature

des données géographiques et de leur utilisation (Couclelis, 1992). Le modèle matriciel (dit aussi Raster) représente l'espace comme un seul champ continu. Au contraire, le modèle vectoriel modélise l'espace à travers l'ensemble d'objets identifiés grâce à un ensemble de points (Sandro, 2007). Le mode Raster stocke et gère la distribution des propriétés d'un phénomène spatial alors que le mode vecteur traite les objets avec leurs différentes identités (Tomlin, 1990).

▪ **Le mode Raster ou maillé :**

C'est un modèle matriciel qui permet de manipuler et de représenter l'information cartographique à partir d'une matrice de cellules (pixels) de même forme et de même dimension que possède certains attributs. L'espace géographique est alors décrit point par point, chaque cellule ou pixel va contenir une valeur représentant une portion de l'objet géographique. On traite les pixels par des classifications permettant de distinguer des zones similaires.

Le raster illustré dans la figure 1.11 est plus adapté pour la modélisation des phénomènes spatiaux continus tels que la température, la pollution, l'altitude etc. L'analyse thématique s'effectue grâce à une algèbre de cartes appelée « Map Algebra » (Tomlin, 1990). Ce mode est facile à mettre en œuvre et par conséquent les produits issus de ce modèle ne sont pas coûteux.

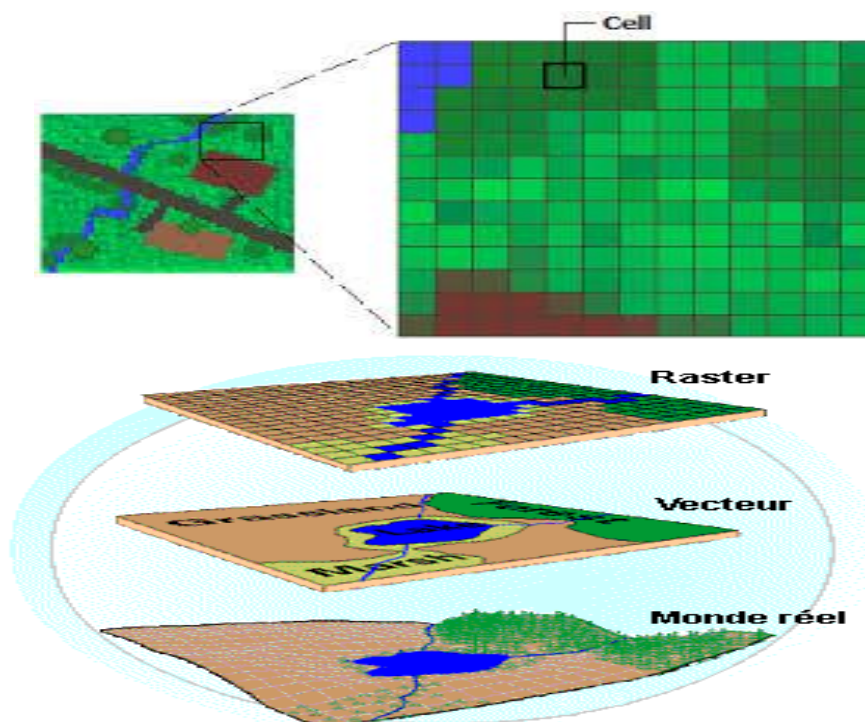


Figure 1.11, Mode raster et mode vecteur source (ESRI, 2017).

▪ **Le mode vecteur :**

Ce mode est adéquat pour la représentation de l'information géographique définie par les hommes, par exemple les bâtiments ou les limites administratives d'un pays.

La caractéristique principale de cette approche est la représentation géométrique des entités géographiques selon l'approche de la cartographie traditionnelle (figure 1.12) (Sandro, 2007). Ce mode est difficile à mettre en œuvre mais il est précieux et précis. Dans ce mode on représente la réalité géométrique et topologique des objets à base des types de données suivants :

- Point (coordonnée X, Y).
- Ligne (Liste de points).
- Polygone (liste de ligne).

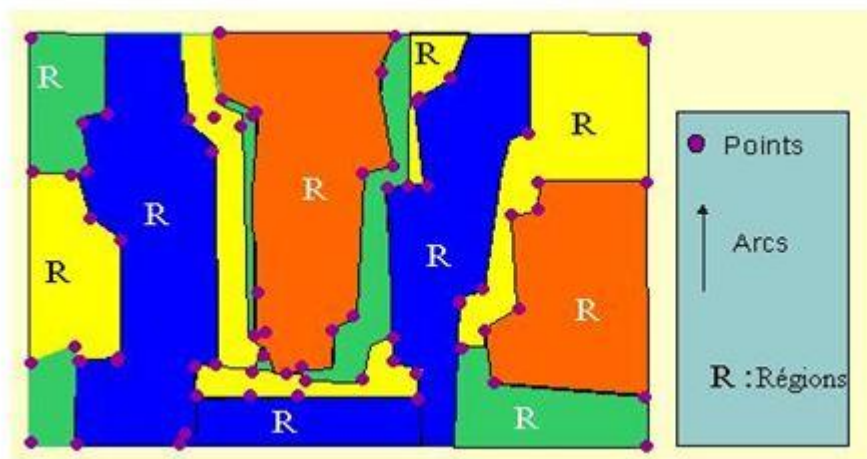


Figure 1.12, Vue en mode vecteur (Koeln et Cowardin, 1994).

Koeln et Cowardin, (1994) ont donné les avantages et les inconvénients des deux modes Raster et vecteur dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3. Avantages et inconvénients des deux modes Raster et Vecteur

Mode	Avantages	Inconvénients
Raster	<ul style="list-style-type: none"> - Structure de données simple. - Compatible avec des données à distance senties ou analysées. - Procédures d'analyse spatiales simples. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige un plus grand espace mémoire - Selon la taille du pixel le rendement peut être graphique et moins agréable. - Les transformations de projection sont plus difficile - Plus difficile de représenter des rapports topologiques
Vecteur	<ul style="list-style-type: none"> - Exige moins d'espace mémoire. - Les rapports topologiques Sont aisément maintenus. - Le rendement graphique ressemble plus étroitement aux cartes tirées par la main. 	<ul style="list-style-type: none"> -structure de données plus complexes -Non compatible avec des données à distance senties - Le logiciel et le matériel sont souvent plus chers - Quelques procédures d'analyse spatiale peuvent être plus difficile - Recouvrement de multiples cartes de vecteur est souvent long

1.4.5.4 Les bases de données spatiales

Pour la modélisation des données géographiques de type Point, ligne ou polygone, les chercheurs ont proposé des extensions aux formalismes de modélisation des données non-géographiques. **Bedard, (2004)** par exemple, a intégré les PVL (Plug-ins for Visual Langage) à UML (Unified Modeling Language) pour la modélisation des données spatio-temporelles. Des fonctions spatiales sont ajoutées aux SGBD (Système de Gestion de Base de Donnée) comme Overlap, distance, et surface pour l'analyse et la formulation des requêtes spatiales.

Les SGDB spatiaux permettent aux applications SIG de s'enrichir par les caractéristiques principales des bases de données : sécurité, concurrence d'accès, flexibilité et passage à l'échelle (**Sandro, 2007**).

Le modèle vectoriel est bien implémenté dans les SGBD spatiaux existants alors qu'il y a peu de systèmes comme « Oracle10g » qui gère les données géographiques modélisées en format matriciel.

Dans l'exemple ci dessous, **Sandro, (2007)** utilise Oracle Spatial et propose :

- la création d'une table spatiale représentant les départements de France à travers le modèle vectoriel (Figure 1.13a).
- Création d'une requête spatiale qui vise à sélectionner les départements avec une surface supérieure à 5000 Km² (Figure 1.13b).
- L'insertion d'un tuple dans la table et sa représentation cartographique sont illustré en figures 1.13c et 1 .13.d.

```
CREATE TABLE DEPT ( NOM VARCHAR2
(30), AREA NUMBER, POP
NUMBER, GEOM SDO_GEOMETRY );
```

Figure 1.13 a, Création d'une table spatiale

```
SELECT NOM, POP FROM
DEPTWHERE
SDO_GEOM.SDO_AREA(GEOM,
0.005) > 5000;
```

Figure 1.13 b, Requête SQL qui utilise un prédicat spatial

```
INSERT INTO DEPT VALUES( 'AIN', 50000,154,
SDO_GEOMETRY(2003,NULL, NULL,
SDO_ELEM_INFO_ARRAY(1,1003,1),
SDO_ORDINATE_ARRAY(3.3, 6.3, 6.5, 4.5,
3.3) );
```

Figure 1.13 c, Insertion d'un objet géographique dans la table

Nom	Area	Pop	Geom
Ain	50000	154
Rhone	60000	250



Figure 1.13 d, Représentation tabulaire et cartographique

1.4.5.5 Les Types Abstraits de Données Spatiales (TADS) utilisés dans un SIG

L'entité géographique désigne un élément du monde réel alors que l'objet géographique désigne cet élément dans le SIG. Par exemple, les entités géographiques : Zone industriel, le segment d'eau et pays sont représentés dans le SIG par les objets Point, Ligne et Polygone. Ces objets sont définis par (**Chakhar, 2006**) comme suit :

- Point : Il représente un objet géographique de dimension 0 (zero). On dira également d'un point qu'il s'agit d'un objet spatial ponctuel. Par exemple, l'objet spatial associé à une ville est un point.
- Ligne : Il représente un objet géographique de dimension 1. On dira également d'une ligne qu'il s'agit d'un objet spatial linéaire. Par exemple, l'objet géographique associé à une rivière est une ligne.
- Polygone : Il représente un objet géographique de dimension 2. On dira également d'un polygone qu'il s'agit d'un objet spatial polygonal ou surfacique. Par exemple, l'objet géographique associé à une commune est un polygone.

Les types abstraits correspondant aux objets géographiques : point, ligne et polygone selon (**Kothuri et al., 2011**) sont:

*Type: **gpolygon***

set: gPolygon, gLine, gPoint, Rectangle, boolean, real

Syntax:

make gpoint × ... × gpoint → gpolygon

Point – In – Polygon gpolygon × gPoint → boolean

Intersect gpolygon × gpolygon → Boolean

Intersection gpolygon × gpolygon → gpolygon

Clipping gpolygon × rectangle → gpolygon

Adjacent gpolygon × gpolygon → boolean

Area gpolygon → real

Centroid gpolygon → gpoint

Hole gpolygon → gpolygon

Bondaries gpolygon → gline

*Type **Line***

set: polygon, Line, Point, Boolean, real

Syntax:

Make gpoint × gpoint → gpoint

Point – in – linne gline × gpoint → boolean

Length gline → real

Start gline → gpoint

End gline → gpoint

Intersect – lp line gpolygon → boolean

Type point

set: polygon, line, point, boolean, real

syntax

Make real × real → gpoint

Is equal gpoint × gpoint → boolean

Distance – pp gpoint × gpoint → real

Distance – ZP gpolygon × gpoint → real

X gpoint → real

Y gpoint → real

1.4.6 L'analyse spatiale dans le SIG :

L'analyse spatiale pour les sciences environnementales et les SIG est une opération intellectuelle qui consiste à décomposer un phénomène de l'espace en ses éléments essentiels afin d'en saisir les rapports et de donner un modèle de l'ensemble (**Caloz et Collet, 2011**). L'analyse spatiale n'est pas née avec l'émergence des SIG mais bien avant. Le terme « analyse spatiale » fait référence à l'analyse d'un phénomène distribué dans l'espace qui possède également des dimensions physiques (la localisation, la proximité, l'orientation, etc.) (**Sandro, 2007**). L'analyse spatiale vise à l'estimation, la prédiction, l'interprétation et la compréhension des phénomènes du monde réel, en mettant en évidence des structures et des formes d'organisation spatiale récurrentes. Elle s'applique à plusieurs domaines comme les problèmes environnementaux, le marketing, les sciences humaines, etc.

Longley et al., (2001) ont classifié les méthodes d'analyse spatiale en cinq classes :

- Les méthodes d'interrogation et raisonnement
- Les méthodes de mesure
- Les méthodes de transformation
- Les méthodes de synthèse
- Les techniques d'optimisation

Le processus d'analyse spatiale est représenté par une séquence d'opérations, de la spécification du problème au résultat.

Mitchell, (2005) formule le processus d'analyse spatiale comme un processus itératif qui consiste à:

- Identifier le problème et les buts de l'analyse,
- Identifier les problématiques spatiales et les outils pour les résoudre,
- Identifier les données et leur préparation pour les opérations spatiales,
- Créer un plan d'analyse (les fonctions et les opérations spatiales peuvent être appliquées séquentiellement, en d'autres termes leur résultat peut être l'entrée d'une ou plusieurs fonctions et/ou opérations spatiales),
- Exécuter le plan,
- Visualiser les résultats.

1.4.7 Les Requêtes spatiales :

Les requêtes spatiales recouvrent les formes d'interrogation des bases de données géographiques pour sélectionner et localiser l'information répondant à un ou plusieurs critères ou encore pour exploiter les informations par des calculs et par des règles de gestion (Caloz et Collet, 2011). Enfin une requête est en grande partie n'est qu'une analyse spatiale. Les requêtes spatiales sont classées en trois types :

- Les requêtes thématiques : Concernent les attributs a-spatial des objets spatiaux.
- Les requêtes géométriques : portent sur les caractéristiques géométriques de l'objet.
- Les requêtes topographiques : Concernent la manipulation des objets spatiaux sur la base de leurs caractéristiques de voisinage et de relation spatiales aux autres objets.

1.4.8 Visualisation et géo-visualisation

La visualisation est une potentialité des SIG, elle constitue une finalité de l'analyse spatiale. Les cartes ne sont pas seulement un outil de visualisation des données géographiques, mais elles stimulent également l'utilisateur dans son processus mental pour la découverte de patterns, relations et tendances (MacEachern et Kraak, 2001).

1.4.8.1 La visualisation cartographique

Il a été signalé que la carte représente l'information géographique par un langage graphique visuel. Les représentations visuelles sont particulièrement efficaces, parce qu'elles impliquent au préalable un traitement des données et une sélection de l'information pertinente et parce qu'elles autorisent une lecture instantanée d'une image globale. Le graphique d'une carte utilise les propriétés du plan pour faire apparaître les relations de ressemblance, d'ordre ou de proportionnalité entre les ensembles de données.

La sémiologie graphique est l'ensemble des règles qui permettent l'usage d'un système de signes graphiques pour transmettre l'information. Le langage cartographique en est une partie. Les signes graphiques élémentaires (points, lignes, surfaces) sont l'alphabet, les variables visuelles sont le vocabulaire et les règles de la perception visuelle sont la syntaxe.

On appelle variable visuelle une façon de faire varier les signes graphiques. Sandro, (2007) distingue six variables visuelles différentes : la taille, la valeur, la couleur, la forme, l'orientation et le grain.

La visualisation des données géographiques est un problème complexe. En effet, pour permettre une analyse judicieuse des cartes, il faut savoir trouver un juste équilibre entre la précision (et donc le nombre de données représentées sur la carte) et la lisibilité.

En général, les SIG mettent à disposition de l'utilisateur, deux types différents de cartes : les cartes de références générales et les cartes thématiques. Les cartes de références générales représentent la localisation d'objets concrets (cartes routières, etc.). Les cartes thématiques représentent la distribution spatiale d'attributs (par exemple des cartes représentant la densité de population, etc.), (Sandro, 2007).

1.4.8.2 La géo-visualisation

La géo-visualisation n'indique pas « la visualisation géographique comme son nom l'indique mais c'est la science de la visualisation ». Dans les années 90, la visualisation scientifique donnait au mot « visualisation » une nouvelle signification en liant la visualisation à l'informatique décisionnelle. Autrement dit, la visualisation scientifique devenait de plus en plus un outil d'aide à la décision permettant de rendre visibles les connaissances qui se cachent derrière les données.

La géo visualisation est une discipline qui intègre les techniques de visualisation scientifique, de cartographie, d'analyse des images, d'exploration de données, pour fournir une théorie, des méthodes et des outils pour la représentation et la découverte de la connaissance spatiale (**MacEachren et Kraak, 2001**). La géo-visualisation est liée au concept de carte interactive.

Une carte est interactive si elle fonctionne comme une interface vers d'autres données. Les cartes interactives deviennent des outils incontournables pour l'exploration et l'analyse des données géographiques (**MacEachren et Kraak, 1997**).

1.4.9 Les SIG au service de la sélection de sites (état de l'art)

L'émergence des SIG a donné une poussé considérable pour la solution des problèmes de sélection de sites. L'utilisation des SIG dans ce contexte a fait l'objet de beaucoup de travaux qui ont investi sur l'intégration des modèles de localisation dans les SIG. Ci dessous quelques travaux théoriques et pratiques sur le couplage des SIG avec la théorie de localisation dans des secteurs différents :

- Travaux théorique
- Dans un papier intitulé « Geographical information System and location science » (**Church ,2002**) l'auteur a estimé que le SIG peut aider à résoudre les problèmes spatiaux dans le contexte de localisation et joue un rôle significatif pour le développement des modèles et des applications sur la sélection des sites. Après l'étude de l'historique du couplage entre SIG et Localisation, il a mis l'accent sur le domaine de recherche qui surgit de ce couplage.
- **Bin et Yao, (2006)** ont mis l'accent sur l'apport des SIG sur la localisation des services (Location Based Service LBS). LBS est une branche de la théorie de localisation pour laquelle l'auteur a donné la définition, les caractéristiques et les perspectives d'applications.
- Dans un papier intitulé « Advances in location modeling: GIS linkages and contributions », **Murray, (2010)** a évoqué que les systèmes d'information géographiques (SIG) ont mûri et sont devenus une technologie attractive et importante pour le développement de beaucoup de disciplines en relation avec la localisation. L'auteur a montré comment le SIG a contribué à l'évolution de la théorie de localisation en matière de visualisation, d'input des données, d'application et d'étude théorique. Il conclut par des perspectives sur l'apport du couplage des deux disciplines pour l'évolution et la prospérité de la géomatique.

- Applications

Beaucoup de chercheurs ont utilisé les SIG comme outil principal d'aide à la décision pour la sélection des sites dans plusieurs secteurs. Deux secteurs ont suscité le plus grand nombre de recherches, le dépôt des déchets et les services. Ci-dessous quelques travaux concernant ces deux contextes :

- Le choix de sites adéquats pour le dépôt des déchets constitue un challenge pour les autorités locales des pays pour préserver l'hygiène et la propreté des villes. Le journal *Waste Management* d'Elsevier est destiné à publier les recherches dans ce domaine. Parmi les nombreux travaux publiés dans ce journal, nous pouvons citer : **(Islam et al., 2016)**, **(Shrivastava et al., 2015)**, **(Thompson et al., 2013)**, **(Mansour et al., 2012)**, **(Sumathi et al., 2008)**.
- La motivation pour le choix de localisation pour les services, c'est d'assister l'utilisateur (client) par l'information exacte, l'endroit exact et dans le bon moment pour le choix d'un service voulu. Parmi les travaux dans ce contexte, on peut citer : **(Chang, 2017)**, **(Amir et al., 2011)**, **(Rein et al., 2005)**

1.4.10. Limites du SIG pour la prise en charge total des problèmes géo-décisionnels.

Une des fonctions importante d'un SIG est l'analyse spatiale. Cette fonctionnalité analytique permet des requêtes spatiales recouvrant toutes les formes d'interrogation des bases de données géographiques. Ces requêtes sont thématiques, géométriques et topologiques. Il faut remarquer que de nombreux concepts d'analyse spatiale sont antérieurs à l'avènement de SIG mais actuellement, font partie intégrante de lui. Certains auteurs signalent une difficulté d'intégration de l'analyse spatiale aux SIG. Cette difficulté est considérée comme lacune des SIG. Selon **Laaribi, (2000)**, **Malczewski, (2006)**, **Chakhar (2006)** et **Guezo, (2011)**, les SIG souffrent d'autres lacunes dans le domaine de l'aide à la décision à référence spatiale :

1. Manque de fonctionnalités analytiques.
 - Manque de prise en charge de la notion du temps (il n'est pas possible de faire une interpolation entre deux cartes à des dates différentes par exemple).
 - Absence de la multi-dimensionnalité (pas de véritables 3D - image aérienne souvent drapée sur un MNT (Modèle Numérique du Terrain))
 - Peu de performance dans le traitement des aspects multi-échelles (difficulté à travailler sur de petites échelles)
2. Limites des techniques d'overlay. Les facteurs causant ces limites sont :
 - les résultats de l'opération d'overlay deviennent rapidement compliqués et donc difficiles à comprendre quand le nombre de facteurs impliqués dépasse quatre ou cinq.
 - la plupart des procédures overlay dans les SIG ne tiennent pas compte du fait que les variables peuvent être d'inégale importance, c'est-à-dire que l'on pourrait leur attribuer des poids différents afin de pondérer les informations entre elles.
 - l'utilisation de valeurs de seuil pour cartographier des variables continues, comme par exemple la densité de la population, va inévitablement mener à une perte substantielle de la qualité de l'information.

3. Discrétisation de l'espace. Les phénomènes spatiaux sont de deux types : Continu et discret. Les SIG sont caractérisés par une discrétisation explicite des phénomènes géographiques. Dans l'analyse spatiale cette discrétisation est implicite.
4. Un problème pratique surgit quand on effectue des analyses spatiales avec les SIG : c'est l'absence d'une démarche systématique qui permettrait d'utiliser des séquences d'opérations pour obtenir la réponse désirée. Pour répondre à une requête spatiale simple, chaque utilisateur se confie à son intuition et emprunte un chemin personnel, pour aboutir finalement aux mêmes résultats (**Burrough, 1990**).
5. Une situation riche en données et pauvre en théorie. Plusieurs études, qui se sont livrées à l'analyse des SIG existants, sont concordantes : on se trouve dans une situation caractérisée par un état riche en données et en progression croissante par rapport à un état pauvre en théorie. En effet, il y a place pour une approche plus créative et pour des outils analytiques pouvant suggérer de nouvelles propositions théoriques et supporter des fonctions d'exploration de données (**Laaribi, 2000**).
6. Des critères d'admissibilité et non des critères d'évaluation. Les fonctionnalités analytiques du SIG ne permettent pas d'aborder des problèmes à référence spatiale lorsqu'un ensemble de critères conflictuels et d'objectifs multiples sont en jeu. En effet, si l'analyse spatiale dans les SIG utilise plusieurs critères de sélection appliqués sur plusieurs attributs d'un ou de plusieurs objets de la base de données, de telles analyses s'avèrent limitées en matière d'aide à la décision et ce pour les raisons suivantes : (i) les critères qui sont pris en compte pour l'analyse ne sont pas considérés comme conflictuels ; (ii) les critères sont généralement considérés d'égale importance ; (iii) la solution obtenue doit répondre à tous les critères ; ainsi, comme on applique critère après critère et qu'il s'agit de critères d'admissibilité et non pas de critères d'évaluation.

Tout se passe comme s'il s'agissait d'une recherche monocritère itérative. Les SIG permettent d'identifier les solutions propices répondant simultanément à tous les critères et non pas d'effectuer un rangement de ces solutions pour fournir la meilleure solution.

Afin de surmonter ces lacunes, les chercheurs ont proposé l'idée d'intégrer des outils mathématiques et informatiques aux SIG, en :

- Programmation linéaire : **Cambell et al., (1992), Chuvieco, (1993), Caro et al., (2004), etc.**
- Statistique : **Burrough, (2001) ; Wise et al., (2001) ; Zhang et McGrath, (2004), etc.**
- Réseaux de neurones artificiels : **Sui (1993), Bennett et al., (1996) , Rigol et al., (2001), etc.**
- Algorithmes génétiques : **Brooks, (2001) , Ducheyne et al., (2006), etc.**
- Automate cellulaire : **Wu, (1998) , Batty et al., 1999), etc.**
- Logique floue : **Wang et al., (1990) , Stefanakis et al., (1999) , Yanar et Akyürek, (2006), etc.**
- Intelligence artificielle: **Egenhofer et Frank, (1990), etc.**
- Systèmes experts : **Yialouris et al., (1997), Khalid, (2006) , Fleming et al., (2007), etc.**

- Multi-agents : **Gimblett, (2002), Sengupta et Bennett, (2003), Brown et al., (1994),** etc.

Ce genre de travaux ont permis d'améliorer les potentialités analytiques des SIG et de répondre aux limites mentionnées plus haut. Cependant, ils échouent lorsqu'il s'agit de tenir en compte des aspects multicritères des problèmes de décision à référence spatiale. L'AMC semble être la mieux placée pour faire face à ces insuffisances. Le chapitre suivant a comme objectifs d'introduire les concepts fondamentaux de l'AMC pour l'intégrer au SIG afin de sélectionner les sites industriels.

1.5. Conclusion

Au fil des sections de ce chapitre, nous avons constaté la nécessité des SIG à prendre en charge les données géographiques qui constituent la majorité des données impliquées dans un problème de sélection de sites. Le SIG comme il est présenté dans ce chapitre permet de mémoriser, analyser et visualiser les données géographiques, il faut ajouter à cela le fait qu'un SIG a bien suivi l'émergence des technologies de communication comme internet qui on conduit a une masse importante d'informations géographique ayant comme source les foules de citoyens sur les réseaux sociaux (crowdsourc) et les institutions sur des plates formes professionnelles. Les foules et les institutions doivent coopérer pour sélectionner les sites industriels adéquats en faisant confiance aux scientifiques. La prise en compte de la nature particulière de l'information géographique avec l'aspect décisionnel implique une reformulation des outils et des techniques classiques de mémorisation, d'analyse et de visualisation. Ainsi l'intégration de l'information géographique au sein d'un système d'aide à la décision implique le couplage des SIG et de l'AMC, en termes de modèles d'analyse et d'agrégation des données. Le chapitre suivant va être consacré à l'AMC, à ces concepts et à ces méthodes pour l'élaboration d'une aide à la décision dans le contexte de sélection de sites.

Chapitre Deuxième

Aide à la décision multicritère

« A l'auberge de la décision, les gens dorment bien »

Proverbe perse

2.1 Introduction

La décision est une faculté humaine qui peut marquer l'histoire positivement si elle est bonne ou négativement si elle est mauvaise. Une décision anarchique pour le choix d'un site industriel ou même des types d'activités programmés dans ce site peut engendrer des conséquences alarmantes sur la santé des citoyens et causer une propagation des épidémies au sein de la société.

L'aide à la décision est primordiale pour expliquer l'environnement de la décision, pour éclaircir son côté ombreux et pour orienter le décideur vers le chemin de la bonne décision. L'analyste se base sur des données multi sources, généralement ambiguës et imprécises de la part du décideur, son objectif est de construire des modèles formelles d'aide à la décision.

Dans la littérature, on trouve quatre approches de prises de décision : Normative, descriptive, perspective et constructive. Pour l'approche constructive, le décideur est sollicité tout au long de la mise en œuvre du modèle décisionnel (**Mouine, 2011**). L'approche constructive est adoptée dans cette thèse.

Le but de la prise de décision constructive n'est pas de découvrir une vérité existante, externe aux acteurs impliqués dans le processus, mais de construire un « jeu de clés » qui ouvrira des portes pour les acteurs et leur permettre d'avancer, de progresser en fonction de leurs objectifs (**Roy, 1993**).

Beaucoup de disciplines s'investissent dans le contexte d'aide à la décision : l'informatique décisionnelle, le data mining, les SIG, l'intelligence artificielle, la simulation, la recherche opérationnelle, l'analyse multicritère etc.

La sélection des sites industriels est un problème spatial décisionnel complexe. Ni l'approche classique d'optimisation d'une unique fonction économique, ni le modèle linéaire de H.Simon (Intelligence, design and choice) (**Simon, 1960**) ne suffisent pour sa solution. L'utilisation de l'approche d'Analyse Multicritère est avantageuse pour une meilleure solution seulement si elle est assistée par les SIG en tant qu'outil d'analyse spatiale et de cartographie.

Les méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision sont des techniques assez récentes et en plein développement. Par leur manière d'intégrer tout type de critères, ces procédures semblent mieux permettre de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum souvent désuet (**Ben Mena, 2000**). Le développement des méthodes multicritères d'aide à la décision a permis de prendre conscience de l'importance de la modélisation des préférences (**Lagreze et Roy, 1980**).

L'AMC a été appliquée depuis son émergence à des problèmes à référence spatiale, même sans l'utilisation du SIG (**Chakhar, 2006**).

On présente dans ce chapitre un aperçu sur l'analyse multicritères d'aide à la décision, sur la méthodologie poursuivie et sur la démarche d'analyse adoptée. L'accent est mis sur les méthodes utilisées dans cette thèse à savoir : PROMETHEE (Préférence Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation) qui constitue l'un des piliers des méthodes de surclassement et AHP (Analytic Hierarchy Process) qui est le représentant célèbre des méthodes de critère unique de synthèse. L'objectif de ce deuxième chapitre est de cerner l'aspect décisionnel du problème de sélection des sites après avoir cerné l'aspect géographique de ce problème dans le premier chapitre.

2.2 Concept de la décision

La décision est définie comme étant « *l'action de décider après délibération* ». Une délibération doit se baser dans ce contexte sur la modélisation de l'environnement de la décision et sur des outils scientifique (généralement mathématique) pour agréger les préférences des décideurs. Pour les problèmes spatiaux, une visualisation et même une géo-visualisation de l'espace géographique dans lequel on doit décider est primordiale.

Mintzberg, (1993) a donné une définition orientée théorie des organisations: « *Une décision est l'engagement dans une action, c'est-à-dire une intention explicite d'agir* ». Le but d'une décision est de résoudre un problème qui se passe à l'organisation où l'individu. Mais la décision peut correspondre à un changement de l'environnement (comportement réactif) ou au désir de saisir une opportunité et ainsi changer l'environnement (comportement d'anticipation).

Décider est donc choisir une alternative mais selon **Simon, (1983)**, l'alternative qui est finalement choisie ne permet jamais la réalisation totale ou parfaite des objectifs; elle n'est que la meilleure solution possible dans des circonstances données.

Pour converger vers une meilleure décision dans des circonstances souvent subjectifs et flous, ou il faut prendre en considération les avis de plusieurs parties prenantes l'aide a la décision s'impose.

2.3 L'aide à la décision

L'aide à la décision est généralement sollicitée par des organisations dans le cas où elles sont confrontées à des problèmes comme la planification, la localisation, l'allocation et la gestion de ressources, de dimensionnement de structure, de choix et d'évaluation, etc. Ces problèmes induisent une décision (ou une série de décisions) lourde(s) de conséquences, et que l'expérience et le bon sens, seuls, ne suffisent pas à éclairer. Cette série de décisions s'inscrit dans un processus appelé « processus de décision » (**Lounes, 2013**)

2.3.1 Définition de l'aide à la décision

Roy, (1985) a donné une définition que l'on trouve dans la plus part des travaux sur l'aide à la décision, selon l'auteur l'aide à la décision est : « *l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution*

du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part ».

(**Chakhar, 2006**) conclut de cette définition que l'aide à la décision s'articule autour d'un processus de décision suivant le modèle classique de l'économiste H. Simon (**Simon, 1960**) qui se base sur un processus de décision en trois phases (intelligence, conception et choix).

Les acteurs d'aide à la décision doivent s'insérer dans le processus de décision (**Martel, 1999**). **Landry (1998)** remarque que le succès d'une démarche d'aide à la décision dans une organisation nécessite la compréhension de l'ensemble du processus de décision dans lequel s'insère cette aide, ce qui implique une capacité d'appréhender adéquatement le problème qui justifie l'origine et qui alimente, par la suite ce processus.

Au cours des processus d'aide à la décision, il convient de distinguer principalement deux intervenants : l'homme d'étude et le décideur qui représente selon **Dorra, (2010)** un acteur bien identifié, doté de pleins pouvoirs, agissant en vertu d'un système de préférences rationnel au sens d'un certain corps d'axiomes excluant l'ambiguïté et l'in comparabilité. **Dorra (2010)** a ajouté que toute activité d'aide à la décision fait intervenir un décideur. Celui-ci, est un intervenant principal à qui s'adresse l'aide à la décision et occupant une place centrale dans le processus de décision.

2.3.2 Les étapes d'une méthodologie d'aide à la décision

Les étapes d'une méthodologie d'aide à la décision représentent le cheminement suivi pour la construction d'un modèle de décision. Une fois le modèle construit, une dernière étape peut être nécessaire. Elle consiste à construire une recommandation à partir des résultats fournis par le modèle. Le processus d'aide à la décision peut se dérouler selon les étapes suivantes (**Lounes, 2013**).

- 1- Représentation du problème qui commence par l'analyse de processus de décision afin d'identifier :
 - les intervenants concernés par l'aide à la décision.
 - leur rôle au sein du processus.
 - les préoccupations de chaque intervenant par rapport au problème posé.
- 2- Formulation du problème : Identifier avec le décideur l'ensemble A des actions possibles. Une fois cet ensemble est déterminé, pas nécessairement de manière formelle, il s'agit d'identifier ce que le décideur souhaite en faire (un choix, un rangement, un tri ou une description).
- 3- Construction du modèle d'évaluation : Après avoir déterminé l'ensemble des actions A ainsi que ce que le décideur veut en faire (traitement), l'homme d'étude cherche à construire le modèle sur lequel il se base pour construire sa recommandation. Afin d'explicitier et de formaliser ces modèles d'évaluation, il a besoin de construire les dimensions, permettant de caractériser l'ensemble A , les critères permettant d'évaluer A , et les méthodes ou les procédures permettant d'effectuer le traitement souhaité sur l'ensemble A . Ces éléments sont définis ci-dessous :
 - Les dimensions : elles représentent l'information disponible sur l'ensemble A . La collecte de l'information peut se faire, selon l'approche d'aide à la décision utilisée, avec ou sans

le décideur. Cette information peut être utilisée pour évaluer l'ensemble A . Les dimensions sont généralement codées sur des échelles pour obtenir une représentation formelle de A .

- Les critères : un critère est une dimension ou plus généralement une agrégation de dimensions traduisant un même point de vue et permettant d'évaluer les éléments de A sur ce point de vue. Dans le cas où le décideur est sollicité, la construction de ces critères prend en compte ses préférences.
 - Les méthodes d'évaluation : elles représentent les outils permettant d'effectuer les traitements souhaités sur l'ensemble A afin de fournir une solution au modèle (par exemple des procédures d'agrégation multicritère ou bien un algorithme pour résoudre un programme mathématique).
- 4- Construction de la recommandation finale : bien que le résultat fourni par la méthode d'évaluation soit cohérent avec le modèle, cela ne veut pas dire qu'il l'est nécessairement avec les préoccupations des intervenants. Pour cela, et avant de fournir une quelconque recommandation, l'homme d'étude doit :
- s'assurer par le biais d'une analyse de sensibilité, que le résultat fourni par la méthode d'évaluation n'est pas très sensible à des variations jugées non significatives des données utilisées pour la construction du modèle,
 - Etre capable d'interpréter le résultat fourni par la méthode en tenant compte des hypothèses sur les données, sur le modèle et sur l'évolution du processus de décision, sous lesquels il a été obtenu.

2.3.3 Définition de l'aide multicritère à la décision

Vincke, (1989) à définit l'aide multicritère à la décision comme : « *L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision ou plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte* ».

Bouyssou, (1993), a trouvé naturel que l'on prenne en compte plusieurs points de vue pour aider à la décision et donc qu'on utilise des méthodes multicritères, ne peut à lui seul justifier d'adopter une démarche multicritère pour aider à la décision. Utiliser un tel argument conduirait à voir le monocritère.

Techniquement, l'aide multicritère à la décision est développée pour traiter plusieurs types de problèmes de décision (choix, tri, description, rangement...) tout en considérant plusieurs critères (attributs), souvent conflictuels et non commensurables et en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs du ou des décideurs (**Pohekar et Ramachandran, 2004**).

Maystre et al., (1994) considèrent que l'aide multicritère à la décision est une analyse ayant pour but d'explicitier une famille cohérente de critères et permettant d'appréhender les différentes conséquences d'une action.

Il n'existe pas, en général, d'action meilleure que toutes les autres, simultanément sur tous les critères. Il ne s'agit pas donc de chercher une vérité cachée, mais plutôt à aider le décideur à progresser vers une action de compromis (**Chakhar, 2006**). Lorsque l'activité

de l'aide à la décision se base sur une approche multicritère où plusieurs critères, souvent conflictuels, sont pris en compte, on parle de l'aide multicritère à la décision.

2.3.4 Formulation d'un problème multicritère

Un problème multicritère est formulé par l'expression suivante :

$$\text{Opt} \{ (g_1(x), g_2(x) \dots g_m(x)) / x \in A \}$$

g_1, g_2, \dots, g_m désignent les fonctions critères qui correspondent à m critères. A est l'ensemble des actions admissibles. Il s'agit d'un problème mathématiquement mal posé, c'est-à-dire sans solution objective.

Par contre, un problème monocritère est simplement formulé par l'expression : $\{\text{Opt} (g(x)) : x \in A\}$

Ce modèle traduit généralement un problème bien structuré et bien défini mathématiquement, qui s'impose à la fois au décideur et à l'homme d'étude.

2.3.5 Notion de problématique en aide à la décision

Roy, (1985) a proposé une typologie en quatre problématiques de base dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 2.1 : Problématique de choix, (figure 2.1), problématique de rangement, (figure 2.2), Problématique de tri, (figure 2.3) et problématique de description. Selon l'auteur, tout problème de décision multicritère doit se ramener nécessairement à l'une d'entre elles. Un problème de décision multicritère n'est évidemment pas une réalité objective dont on peut donner une description immédiatement acceptable par tout le monde (**Chakhar, 2006**). Un problème peut donner lieu à un mélange de problématiques : de choix, de tri ou de rangement (**Vincke, 1992**). **Bana et Costa (1996)** ont proposé d'étendre la typologie de B.ROY (**Roy, 1985**) avec trois autres types :

- Problématique d'évaluation comparative
- Problématique d'évaluation absolue
- Problématique de rejet

Chakhar, (2006) a estimé que la typologie de B. Roy est valable même dans un contexte spatial comme le cas du problème de sélection des sites, avec néanmoins une part plus importante pour la problématique du choix, que cette problématique peut servir dans un cadre spatial où l'objectif consiste parfois à évaluer une situation et non pas à prendre une décision. Nous rappelons que la problématique traitée dans le cadre de cette thèse est une problématique de rangement dans un contexte spatial.

. Tableau 2.1. Les différentes problématiques de décision

Problématique	Objectif	procédure	prescription
Prob α	sélectionner un sous ensemble aussi restreint que possible de A contenant les meilleures actions	Sélection	Sous ensemble A
Prob β	Affecter chaque action de A à une et une seule des catégories définies selon de normes préétablies	Segmentation	Partition de A
Prob γ	Ordonner les actions de A de la meilleure à la moins bonne	rangement	Ordre partiel sur A
Prob δ	Décrire les actions et leurs conséquences	Cognitif	Aucune prescription

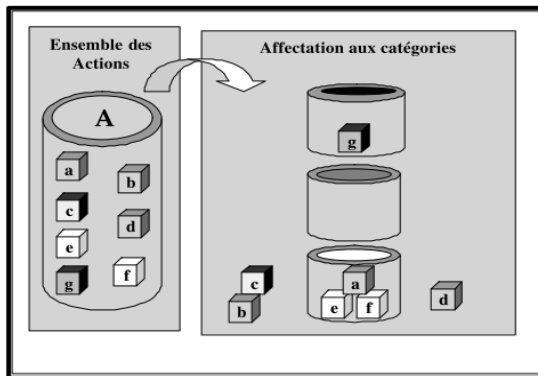


Figure.2.1. Problématique de Tri, source (Guinting, 2000)

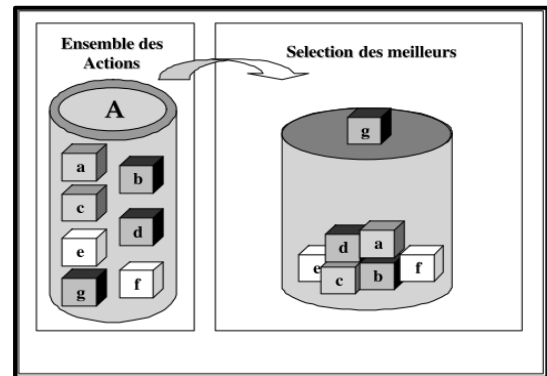


Figure 2.2. Problématique de Choix, source (Guinting, 2000)

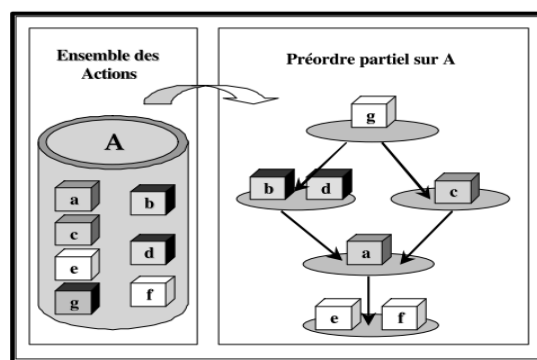


Figure 2.3. Problématique de Rangement, source (Guinting, 2000)

2.3.6 Démarche de l'aide multicritère à la décision

Il existe trois démarches, celle de **Keeney, (1992)**, de **Roy, (1985)** et celle de **Laaribi, (2000)** qui est une démarche intermédiaire entre les deux premières :

- **Keeney ,(1992)** a proposé l'approche du "haut vers le bas" (*topdown*) qui consiste à construire une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est "éclaté" en sous-objectifs qui sont à leur tour "éclatés" en sous-sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs (figure 2.4).
- **Roy, (1985)** se base sur une approche de "bas vers le haut" (*bottom-up*) qui consiste à identifier toutes les conséquences pouvant résulter de la mise en œuvre des actions, que l'on structure en dimensions puis en axes de signification autour desquels sont construits les critères (figure.2.5).
- **Laaribi (2000)** a proposé une approche intermédiaire qui, selon lui, est de portée plus générale (figure. 2.6). Son approche est décrite comme suit : "partant d'une situation de décision quelconque (perception d'un problème de décision), il y a lieu de tenter de dégager au départ les objectifs qu'on cherche à atteindre. En tenant compte de ces objectifs, un faisceau de points de vue pourrait se dégager, exprimant en quelque sorte des classes de critères. Aussi, les objectifs permettraient de définir des actions (globales) ou des scénarios (ensemble des actions fragmentées), tandis que la famille de points de vue se traduit généralement par un ensemble de critères qui permettraient de procéder à une évaluation des actions ou des scénarios. Une fois l'évaluation effectuée, on procède à l'investigation par une procédure d'agrégation multicritère appropriée afin de parvenir à une recommandation.

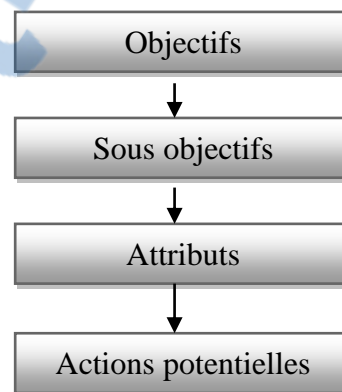


Figure 2.4. Démarche top-down d'analyse multicritère

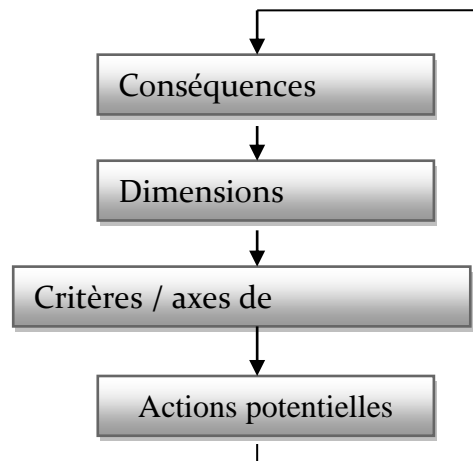


Figure 2.5. Démarche bottom-up d'analyse multicritère

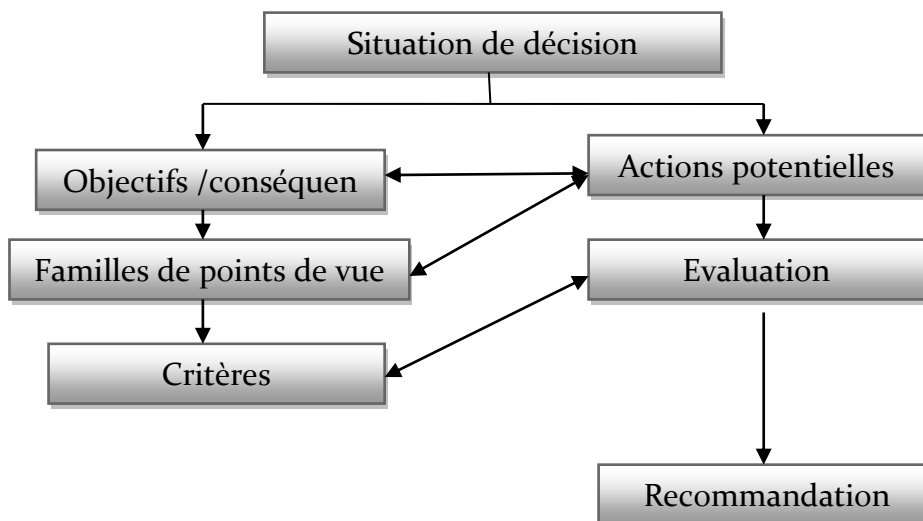


Figure 2.6. Démarche intermédiaire d'analyse multicritère

2.3.7 Analyse multicritère et aide à la décision spatiale

L'AMC a été appliquée depuis son émergence à des problèmes à référence spatiale, même sans utilisation du SIG (Chakhar, 2006). Ci dessous quelque travaux recensés par Chakhar, (2006) et actualisés dans le cadre de cette thèse, ces travaux sont cités selon leurs domaine d'utilisation :

- Localisation : (Martel et Aouni, 1992) ; (Khalil et al., 2003), (Bernadette, 2007), (Gourion et al., 2012).
- Aménagement et utilisation du sol : (Beinat et Nijkamp, 1998) ; (Koo et Connell, 2006).
- Allocation /affectation, plus court chemin, planification urbaine et régionale, zonage, environnement : (Lahdelma et al., 2000) ; (Kiker et al., 2005).

- Gestion forestière (Tarp et Helles, 1995) ; (Teclé, 1998).
- Agriculture (Janssen et Rietveld, 1990) ; (Francis, 2013)
- Gestion et conservation des ressources en eau : (Raju et Pillai, 1999a) ; (Raju et Pillai, 1999b) ; (Petit et Bruno, 2009), (Bachta, 1995).
- Planification du transport : (Clímaco et al., 1993) ; (Jankowski, 1995) ; (Marius, 2009)

Les travaux cités précédemment ont montré des limites de l'AMC pour la prise en charge des caractéristiques géographiques des problèmes géo-décisionnels.

Chakhar, (2006) a constaté à partir de la littérature que les logiciels d'AMC sont peu pratiques dans l'aide à la décision à référence spatiale pour les deux raisons suivantes:

- Les logiciels d'AMC ne disposent pas de capacités nécessaires pour la gestion des données à référence spatiale.
- Les logiciels d'AMC manquent d'outils nécessaires à la représentation cartographique des résultats qui peuvent améliorer leur compréhension.

On a remarqué pendant les travaux de cette thèse que le décideur ne peut pas être convaincu des propos de l'analyste sans la visualisation de la géographie du problème (critères et action). Le décideur ou l'homme d'étude ne peut pas prononcer ces préférences sans l'étude géographique des éléments décisionnels du problème à traiter.

L'intégration du SIG et l'AMC semble être la meilleure solution pour combler leurs lacunes respectives (**Chakhar, 2006**).

2.4 Méthode d'analyse multicritère d'aide à la décision

Les méthodes d'analyse multicritère sont des outils (procédures d'agrégation) qui servent à aider pour décider et non pas pour décider. Le processus de décision basé sur l'AMC doit faire sortir la bonne décision de l'esprit du décideur dans un environnement multicritères où certains critères sont conflictuels.

Les méthodes d'analyse multicritère permettent de se diriger vers un judicieux compromis plutôt qu'un optimum. Les actions sont généralement désignées par un ensemble :

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ où n est le nombre d'actions

Si le nombre des actions n est fini, les méthodes associées sont discrètes et s'il est infini les méthodes associées sont continues.

Les actions sont évaluées et comparées sur la base d'un ensemble de critères d'évaluation :

g_1, g_2, \dots, g_m m est le nombre de critères. L'évaluation d'une action a selon un critère g_j est notée $g_j(a)$.

Pour comparer les actions de l'ensemble A , il est nécessaire d'agréger les évaluations partielles (i.e. par rapport à chaque critère) en une évaluation globale en utilisant un mécanisme d'agrégation donné. Dans la catégorie discrète, il existe deux approches d'agrégation : (i) approche du critère unique de synthèse, et (ii) approche de surclassement de synthèse.

2.4.1 Approche de critère unique de synthèse (Agrégation totale)

C'est l'approche d'inspiration anglophone, le principe général est que le décideur a pour but de maximiser une fonction d'utilité : $U(a) = U(g_1(a), g_2(a), \dots, g_m(a))$ en

agrégeant les évaluations partielles de chaque action $a \in A$ en une évaluation globale. La fonction d'utilité la plus simple et la plus utilisée est la suivante :

$$U(a) = \sum_j u_j (g_j(a))$$

Les fonctions d'utilités partielles u_j $j = 1 \dots m$ sont strictement croissantes et à valeurs réelles qui servent uniquement à transformer les critères initiaux à ce qu'ils s'expriment tous suivant la même échelle de mesure. Dans cette forme, les relations binaires de préférence P et d'indifférence I sont définies pour deux actions a et b comme suit :

$$aPb \Leftrightarrow U(a) > U(b) \text{ et } aIb \Leftrightarrow U(a) = U(b).$$

Ces méthodes excluent donc l'incomparabilité, assurent toutes les transitivités des préférences ce qui donne une structure de pré ordre total sur A .

Ci dessous quelques méthodes à base de cette approche. Enfin de section AHP (Saaty, 1980), (Saaty, 1982) est plus détaillée, cette méthode est utilisée pour la construction du premier modèle d'aide à la décision proposé pour la sélection des sites industriels

2.4.1.1 Technique for Order Preference by Similarly to Ideal Solution (TOPSIS)

La méthode TOPSIS est développée par HWANG et YOON en 1981. Le concept de base de cette méthode est que, l'alternative choisie doit avoir la plus courte distance à l'alternative idéale (la meilleure sur tous les critères), et la plus grande distance à l'alternative négative (qui dégrade tous les critères) (Méndez et al., 2006).

2.4.1.2 Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART)

La méthode SMART développée par EDWARDS en 1971 consiste à utiliser la forme additive pour l'agrégation des évaluations sur les différents critères. Ceci a été justifié par le fait qu'on obtient d'aussi bonnes approximations avec la forme additive qu'avec d'autres formes non linéaires qui sont plus complexes, (Dorra, 2010).

2.4.1.3 Multiple Attribute Value Theory (MAVT)

La méthode MAVT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 repose sur l'idée fondamentale suivante: tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction qui agrège tous les attributs. La particularité de la méthode MAVT réside dans l'idée de construction d'une fonction de valeur partielle pour chaque attribut. La meilleure action sur un attribut aura une valeur partielle (par rapport à l'attribut étudié) égale à 1 et la pire des actions aura une valeur partielle égale 0, (Dorra, 2010).

2.4.1.4 Multiple Attribute Utility Theory (MAUT)

La méthode MAUT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 peut être utilisée pour résoudre les problèmes de choix ou de rangement multicritère sur un ensemble d'actions. Elle construit une fonction d'utilité à partir d'un pré ordre défini par l'utilisateur sur un sous ensemble d'actions de référence. La procédure, basée sur un principe de régression ordinale, consiste à résoudre un programme linéaire. L'utilisateur peut modifier d'une façon interactive les fonctions d'utilité dans les limites fournies par une analyse de sensibilité du problème de régression ordinale. Pour effectuer ces modifications, l'utilisateur est aidé par une interface graphique très conviviale. La fonction d'utilité

acceptée par l'utilisateur sert alors à définir un pré-ordre sur l'ensemble des actions (Jiménez et al., 2007).

2.4.1.5 Utility Theory Additive (UTA)

La méthode UTA développée par Jacquet-Lagrange et Siskos en 1982 se base sur l'idée suivante : nous supposons que le décideur connaît bien un sous ensemble d'actions. Nous cherchons à estimer a fonction d'utilité (ayant une forme additive) en s'approchant le plus possible des jugements portés par le décideur sur le sous-ensemble connu (Dorra, 2010).

2.4.1.6 AHP (Analytic Hierarchy Process)

Depuis son invention par T.L Saaty en 1980 (Saaty, 1980), AHP est très utilisée par les chercheurs et les praticiens, surtout dans les pays anglophone (figure 2.7). C'est une méthodologie systématique, flexible et simple pour l'aide à la décision multicritères.

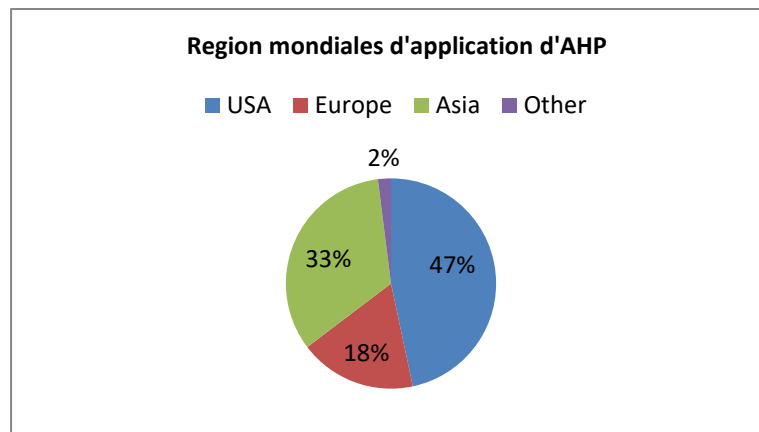


Figure 2.7 Utilisation d'AHP selon les régions mondiales (Omkarprasad et al., 2006)

AHP est une méthode d'aide à la décision multicritère, qui s'appuie sur le calcul des vecteurs et des valeurs propres, et sur une échelle allant de 1/9 (le poids le moins estimé) à 1 (pour l'égalité) jusqu'à 9 (pour le poids le plus absolument important) (Omkarprasad et al., 2006) , (Tableau 2.2) .

Tableau 2.2 Echelle de Saaty (Saaty, 1977).

	Degré de préférence
1	Importance égale
2	Importance faible
3	Importance assez modérée
4	Importance modérée
5	Importance assez forte
6	Importance forte
7	Importance très forte
8	Importance extrême
9	Importance capitale

L'application de la méthode AHP commence par la structure hiérarchique du problème à traiter avant l'évaluation et le calcul des priorités.

Les critères peuvent être qualitatifs ou quantitatifs (Saaty, 2007). La structure hiérarchique est descendante, de l'objectif qui se trouve en racine jusqu'aux alternatives qui constituent les feuilles de la hiérarchie arborescente, cette structure clarifie le problème et reflète la tendance naturelle de l'esprit de l'homme (Hua et al., 2008).

Les INPUT de cette méthode sont les matrices de comparaison par pairs, la méthode AHP s'applique selon l'organigramme ci-dessous (Figure 2.8) :

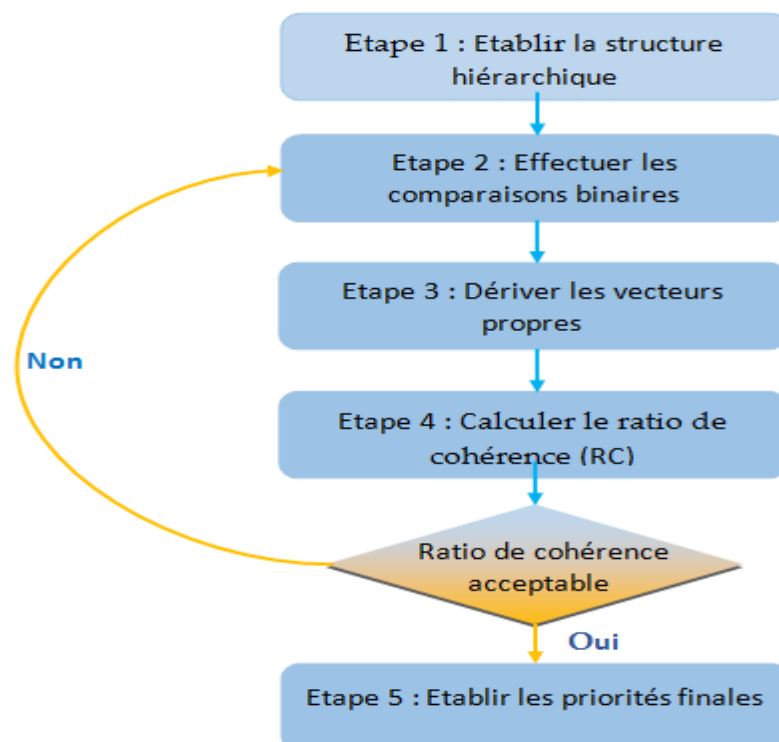


Figure 2.8. Les étapes d'application de l'AHP.

- Étape 1 : Etablir la structure hiérarchique qui consiste à décomposer le problème aussi complexe soit il en une structure hiérarchique à travers des niveaux :

Niveau 0 : Définir l'objectif cible.

Niveau 1 : Définir les critères de jugements principaux.

Niveau intermédiaire : Il peut y avoir plusieurs pour déterminer les sous critères

Dernier Niveau : Définir les alternatives ou les actions possibles.

La figure 2.9 illustre la décomposition d'un problème en hiérarchie.

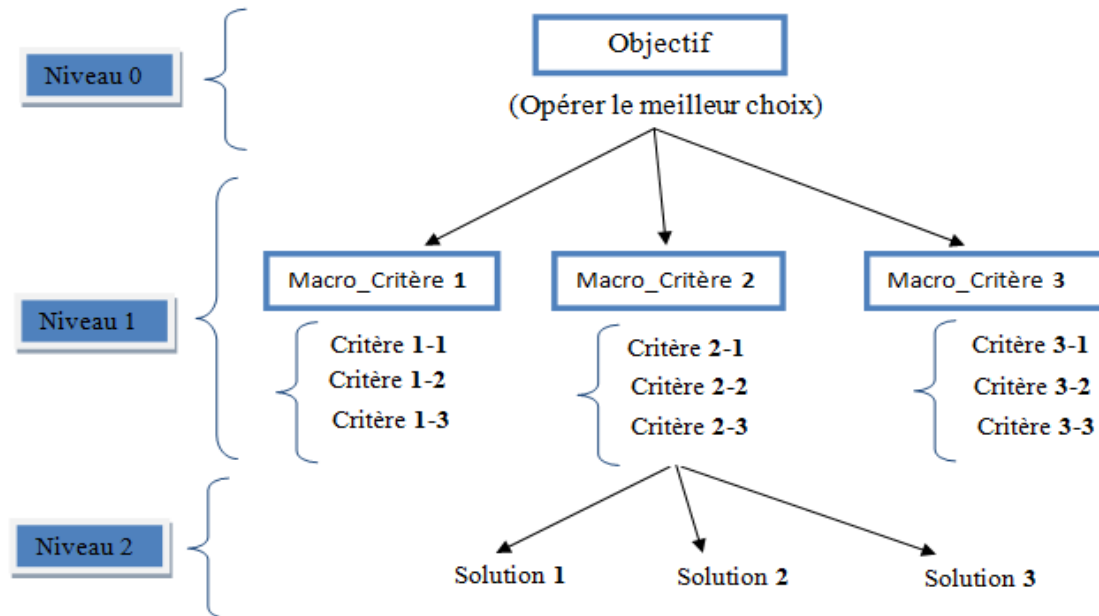


Figure 2.9. Structure hiérarchique d'un problème.

- Étape 2 : Effectuer les pondérations binaires

Cette étape consiste à étudier les points suivants :

- Comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris deux par deux, par rapport à l'élément du niveau immédiatement supérieur en utilisant l'échelle de 9 points de T.L Saaty.
- Former une matrice carrée réciproque $N \times N$ composée par les ratios issus des comparaisons. N étant le nombre d'éléments comparés, un exemple de matrice est présentée dans le tableau 2.3 et par la formule 2.1:

$$A = [a_{ij}] \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} a_{ii} = 1 \text{ pour } i = 1..K \text{ et} \\ a_{ji} = 1/a_{ij} \text{ (valeur réciproque)} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Tableau 2.3. Exemple d'une matrice de comparaison par paire.

	A1	A2	A3
A1	1	3	6
A2	1/3	1	2
A3	1/6	1/2	1

- Étape 3 : Calcul des priorités

Le but est de trouver un ensemble de poids w_1, \dots, w_n , tel que w_i / w_j correspond aux comparaisons a_{ij} dans la matrice de comparaison par paire. Le calcul se fait selon les trois étapes ci dessous :

- Effectuer la somme des éléments de chaque colonne j :

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} \quad \forall i, j \quad (2.2)$$

- Diviser chaque élément de la matrice par la somme des éléments de sa colonne (Normaliser) :

$$a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad \forall i, j \quad (2.3)$$

- Calcul de la moyenne de chaque ligne i :

$$w_i = \sum_{j=1}^n a'_{ij} / n \quad (2.4)$$

Remarque : Le calcul des priorités revient au calcul des vecteurs et des valeurs propres.

- Étape 4 : Calculer le ratio de cohérence (RC) :

Les priorités calculées ont un sens seulement si les matrices de comparaison par paire sont cohérentes (Respect de la transitivité), un contrôle de cohérence doit être appliqué. **Saaty**, (1977) a proposé un index de cohérence (IC) qui se calcule en se basant sur le calcul des valeurs propres :

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2.5) \quad \text{Tel que :}$$

n est la dimension de la matrice de comparaison

λ_{\max} est la valeur propre maximale de la matrice de comparaison.

Le ratio de consistance est calculé par la formule :

$$RC = IC/IA \quad (2.5) \quad \text{tel que :}$$

RC : est le ratio de cohérence.

IA : est l'indice aléatoire.

IC : est l'indice de cohérence.

Si RC est inférieur à 10 %, alors la matrice est considérée comme consistante et acceptable sinon il faut revoir les comparaisons. Le tableau 2.4 illustre les indices acceptés par Saaty selon les dimensions de la matrice.

IA est un indice aléatoire qui a été déterminé par T.L Saaty, (**Saaty, 1977**) d'une manière empirique, cet indice est présenté dans le tableau 2.5.

Tableau 2.4 Les ratios de cohérence acceptable (Saaty, 1977).

Taille de la matrice (n)	Ratio de cohérence acceptable
3	0,05
4	0,08
5 et +	0,10

Tableau 2.5 Les indices de cohérence aléatoire Satty (1977).

N = nombre de critère	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IA	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Étape 5 : Établir les priorités finales

La dernière étape doit synthétiser les priorités locales à travers tous les critères pour déterminer la priorité globale. L'approche d'AHP utilisée est appelée « mode distributif » qui adopte une fonction additive avec normalisation de la somme des priorités locales à l'unité :

$$p_i = \sum_j w_j \cdot l_{ij} \quad (2.6) \text{ tels que :}$$

p_i : Priorité globale de l'alternative i

l_{ij} : Priorité locale

w_j : Poids du critère j

Il faut remarquer que le mode distributif cause le problème du renversement du rang qui est une des limites de la méthode AHP (**Ishizaka et Labib, 2011**)

Une importante littérature traite les avantages et les inconvénients d'AHP (**Forman, 1993**), nous résumons les avantages de la méthode AHP dans les points suivants :

- Simplicité d'utilisation.
- Élimination des ennuis dûs aux unités de mesure.
- Bonne illustration graphique.
- Évaluation de plusieurs attributs (critères et alternatives à la fois souvent contradictoires).
- Possibilité de valider la cohérence sur la base du calcul de la valeur propre.

La méthode AHP présente toutefois certaines limites qui doivent être prises en compte lors de son utilisation (**DeIVecchio , 2006**) :

- Renversement du rang

Une des principales critiques de la méthode AHP réside dans le fait qu'il y a possibilité de renversement du rang des alternatives dit « Rank reversal » lors de l'ajout ou la suppression de critères.

- Nécessité d'interprétation des résultats

Les résultats obtenus grâce à la méthode AHP s'avèrent très utiles dans une prise de décision. Par contre, le jugement et l'expérience d'experts sont et seront toujours nécessaires pour interpréter l'ordre définitif des options ainsi que la décision finale.

- Subjectivité de l'analyse

Il est important de noter qu'une analyse individuelle avec la méthode AHP sera toujours influencée par la vision et les valeurs personnelles du répondant. La subjectivité sera inévitablement introduite dans l'analyse puisqu'il s'agit de l'intuition du décideur et sa perception de l'environnement de la décision.

Dans les travaux de cette thèse, nous avons proposé une base de règle pour un prétraitement des critères qui permet d'alléger le problème de renversement du rang. La logique floue est introduite au niveau des comparaisons par paires pour surmonter le problème de subjectivité des décideurs.

2.4.2 Les méthodes de surclassement de synthèse

Roy, (1968) a défini une relation de surclassement par :

« On dit qu'une alternative a surclasse une alternative b et on note « $a S b$ » si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire (vétos) ».

Les méthodes de surclassement se basent sur les comparaisons par paires des éléments de l'ensemble des actions (alternatives) $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ au moyen d'une relation de surclassement S . Puis d'exploiter cette relation pour choisir, ranger ou trier.

L'approche de surclassement consiste à prendre appui sur une règle apportant une réponse synthétique, exhaustive et définitive au problème de l'agrégation des performances. Elle prend la forme d'un ensemble de conditions conduisant à accepter ou à rejeter un surclassement entre les alternatives (**Simon, 1960**).

Les surclassements établis doivent être solides et conduisent à l'acceptation de l'incomparabilité sans avoir nécessairement des propriétés remarquables de transitivité (**Azzabi et al., 2008a**), (**Azzabi et al., 2008a**).

Les méthodes de surclassement s'appuient sur des modèles plus souples autorisant l'incomparabilité et même l'intransitivité (**Lagreze et Roy, 1980**).

Partant du souci d'introduire l'incomparabilité et l'intransitivité qui sont exigées parfois dans la réalité, que **Roy, (1968)** a développé la famille des méthodes de surclassement ELECTRE. Les méthodes de surclassement sont utiles lorsque : un critère au moins n'est pas quantitatif, les unités de mesure des critères sont très hétérogènes et leur codage en une échelle commune est difficile ou artificielle, la compensation entre avantages et désavantages sur différents critères n'est pas justifiable, des seuils de préférences ou de veto doivent être pris en compte (**Victor, 2013**)

(**Ben Mena, 2001**) à préféré l'utilisation des méthodes de surclassement pour l'aide à la décision dans le domaine de la gestion de l'environnement où le caractère qualitatif et

incommensurable est présent, cet aspect est pris en charge par les méthodes de surclassement. Les exemples de gestion environnementale traités par les méthodes de surclassement sont nombreux, nous citons par exemple : (Lahdelma, et al., 2000), (Nikolas, 2014), (Joerin et al., 2001) etc.

A remarquer que la gestion de l'environnement est une question primordiale lors de sélection des sites industriels.

Les méthodes de surclassement comprennent donc deux phases : celle de la construction de la relation de surclassement S et celle de l'exploitation de cette dernière. L'avantage de ces méthodes est qu'elles nécessitent une information moins riche et des hypothèses moins restrictives (Lounes, 2013) :

- les critères ne sont pas, nécessairement, totalement compensatoires,
- la transitivité des préférences n'est pas imposée,
- l'hétérogénéité des échelles n'est pas un problème (qu'elles soient ordinales, intervalles ou ratio) lors de l'agrégation des critères,
- l'incomparabilité, l'hésitation et l'indétermination sont prises en compte .

La définition de la relation S ainsi que les différentes possibilités de la construire et de l'exploiter ont donné lieu à plusieurs méthodes de surclassement. Nous pouvons citer deux grandes familles qui sont ELECTRE et PROMETHEE .

2.4.2.1 Les méthodes ELECTRE

Comme il a été signalé, Ces méthodes ont été développées par Roy et Bertier, (1971). Les méthodes ELECTRE ont initialisé une série de méthodes de surclassement, basées sur des comparaisons d'actions deux à deux.

Le surclassement de a sur b ($a S b$) repose sur deux principes :

- La concordance qui dépend d'un indice de concordance $c(a,b)$ représentant l'importance de la coalition de critères qui sont en faveur de a au sens large. Son expression la plus simple (sans prise en compte des préférences faibles) est la suivante :

$$c(a,b) = \sum_{i \in Cr(a,b)} w_i \quad (2.7) \quad \text{ou :}$$

- $Cr(a,b) = \{i \in F / g_i(a) \geq g_i(b)\}$ (2.8) est appelée coalition concordante.
- w_i représente l'importance (poids) du critère i .
- Le non discordance qui représente le fait qu'il ne doit pas exister de critère où l'avantage de b sur a contredit l'affirmation que $a S b$:

$$\forall i \in F / g_i(b) - g_i(a) \leq vt_i(g_i(a)) \quad (2.8)$$

Les vt_i sont appelés seuils de véto. On utilise généralement, dans les méthodes ELECTRE, un indice $d_i(a,b)$ indiquant si le critère i émet un véto sur le surclassement de a par rapport à b . L'expression la plus simple de cet indice est donnée par la formule suivante :

$$d_i(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{si } g_i(b) - g_i(a) > vt_i(g_i(a)) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.9)$$

- L'incomparabilité (R) entre deux alternatives a et b se traduit en terme de surclassement par le fait que $\neg aSb$ et $\neg bSa$.

Beaucoup de variantes ELECTRE ont été développées : ELECTRE I qui relève de la problématique de choix, ELECTRE 2 qui relève de la problématique de rangement, ELECTRE 2I qui relève aussi de la problématique de rangement, ELECTRE IV, et ELECTRE Is et ELECTRE TRI.

2.4.2.2 Les méthodes PROMETHEE

PROMETHEE a été développée par le professeur Jean-Pierre Brans en 1982, (**Brans et vincke, 1985**) sur la base théorique d'ELECTRE (**Roy, 1968**) et en introduisant le concept du critère généralisé.

Depuis ses débuts, beaucoup de variantes ont été développées et sont illustrées dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6. Tableau comparatif des méthodes PROMETHEE (**Dorra, 2010**)

Méthodes	Caractéristiques
PROMETHEE I	pré-ordre partiel (préférence stricte, indifférence et incomparabilité).
PROMETHEE 2	Pré- ordre Total (indifférence et préférence stricte).
PROMETHEE 2I	Un ordre d'intervalle.
PROMETHEE IV	L'ensemble des solutions admissibles est un continuum.
PROMETHEE V	Choix multicritères avec contraintes de segmentation

Les méthodes PROMETHEE sont utilisées dans de nombreux cas de recherche opérationnelle, et plus particulièrement dans la prise de décision en matière environnementale (**Simon et al., 2004**).

La notion classique d'un critère vis a vis de l'ensemble A des actions implique la structure de préférence {I,P} telle qu'elle est définie pour les méthodes ELECTRE ne prend pas en compte si la différence est large ou petite . Pour résoudre ce problème **Brans et al., (1984)** a introduit le concept d'extension de la notion de critère.

Extension de la notion de critère :

Ayant les préférences du décideur pour une action a sur une autre b, une fonction sur ces préférences est définie pour chaque critère séparément. La valeur de cette fonction est comprise entre 0 et 1 pour une préférence stricte.

La fonction de préférence (P_j) traduit la différence entre les évaluations obtenues par deux alternatives a et b en termes de critère particulier, dans un degré de préférence s'étendant de 0 à 1. Soit :

$$P_{j(a,b)} = G_j[f_j(a) - f_j(b)] \quad (2.11)$$

$$0 \leq P_{j(a,b)} \leq 1 \quad (2.12)$$

Pour chaque critère, le décideur définit deux paramètres pour indiquer clairement la surface d'indifférence au voisinage de $f_i(b)$ on écrit :

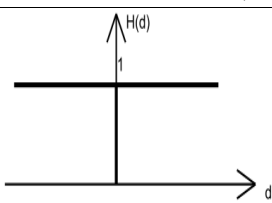
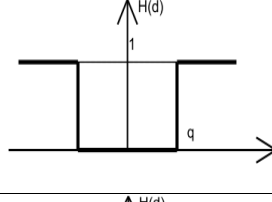
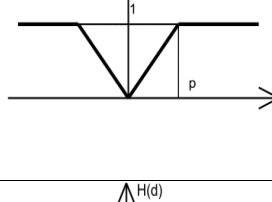
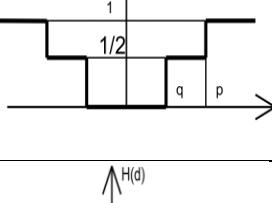
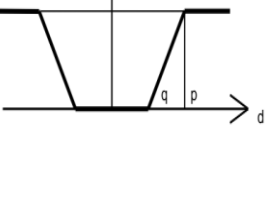
$$d_j(a, b) = f_j(a) - f_j(b) \quad (2.13)$$

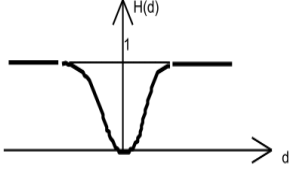
On représente graphiquement la fonction

$$G_j(d) = \begin{cases} g_j(a, b) & \text{Si } d >= 0 \\ g_j(b, a) & \text{Si } d <= 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Brans et Vincke (**Brans et Vincke, 1985**) ont proposé selon des études empiriques six types de fonction de préférence, ces types sont présentés dans le tableau 2.7 ci dessous.

Tableau 2.7. Fonctions de préférence de PROMETHEE.

Type des fonctions	Critères Généralisés (formes des fonctions)	Définitions	Paramètre à fixer
Fonction usuelle	Type I 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	-
Fonction quasi-critère	Type II 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	Q
Fonction linéaire	Type III 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ d/p & 0 < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	P
Fonction de critère à paliers (Pseudo)	Type IV 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1/2 & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Fonction de critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence	Type V 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ (d-q)/(p-q) & \text{si } q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q

Fonction de critère gaussien	Type VI 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-(d^2/2\sigma^2)} & \text{si } d \geq 0 \end{cases}$	S
------------------------------	--	---	---

q et p sont appelés aussi seuils de préférence et d'indifférence mais n'ont pas la même signification que dans ELECTRE, ils ne modélisent pas l'hésitation mais plutôt l'intensité de préférence. On calcule ensuite les intensités de préférence multicritère :

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b) w_j \quad (2.15)$$

Pour chaque alternative a, on calcule les flux de surclassement :

- Flux sortant : il exprime le caractère de surclassement de a face aux m-1 autres alternatives, ou encore sa force. Il est d'autant plus grand que a surclasse fortement les autres alternatives : $\varphi^-(a) = 1/(m-1) \sum_{x \in A} \pi_r(a, x)$ (2.16)

- Flux Entrant : il exprime le caractère surclassée de a face aux m - 1 autres alternatives, ou encore sa faiblesse. Il est d'autant moins grand que a est peu surclassé :

$$\varphi^+(a) = 1/(m-1) \sum_{x \in A} \pi_r(x, a) \quad (2.17)$$

Toutes les phases d'exploitation se fondent sur les valeurs $\varphi^+(a)$ et $\varphi^-(a)$.

Dans PROMETHEE I, on obtient un rangement partiel des alternatives car il se peut qu'il y ait des incomparabilités dues au fait que la condition pour laquelle une alternative a surclasse b est assez forte :

$$aSb \Leftrightarrow \begin{cases} \Phi^+(a) \geq \Phi^+(b) \\ \Phi^-(a) \leq \Phi^-(b) \end{cases} \quad (2.18)$$

On peut donc avoir $\neg aSb$ et $\neg aSb$. Par contre, dans PROMETHEE II, il ne peut pas y avoir d'incomparabilités, le rangement étant complet, il est obtenu en considérant le flux net :

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \quad (2.19)$$

2.5 Avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère

Les méthodes d'aide à la décision multicritère présentent des avantages et des inconvénients dans leurs applications. Elles permettent d'aider le décideur à faire un choix judicieux et une meilleure sélection. Le tableau 2.8 présente un résumé des avantages et des inconvénients de PROMETHEE II et d'AHP. Parmi les objectifs des modèles proposés dans cette thèse c'est de surmonter certains inconvénients des deux méthodes.

Tableau 2.8 : Résumé des avantages et des inconvénients de PROMETHEE et d'AHP

Méthodes	Avantages	Inconvénients
PROMETHEE II	La méthode PROMETHEE II construit un pré ordre total excluant l'incomparabilité et réduisant fortement l'indifférence.	La méthode PROMETHEE II apparaît clairement comme une méthode d'utilité, les comparaisons 2 à 2 ne servant qu'à masquer le calcul du score final de chaque action.
AHP.	<ul style="list-style-type: none"> • la méthode AHP permet la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique. • Elle utilise une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires. • Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions. • L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la problématique d'aide à la décision et quelques outils méthodologiques disponibles dans la littérature, qu'offre l'aide multicritère à la décision. Les deux méthodes AHP et PROMETHEEII sont explicités, l'accent est mis sur leurs avantages pour les consolider et sur leurs inconvénients pour les surmonter lors de sélection des sites industriels. L'aide à la décision est une activité scientifique et professionnelle. Par le biais de ce travail nous voulons jouer le rôle du scientifique pour une sélection fondée des zones industrielles. Le dialogue entre le scientifique et le professionnel doit continuer jusqu'à la fin du processus de décision, ce dialogues est supporté par un langage formel pour réduire l'ambigüité de la communication humaine. L'aide à la décision multicritère intervient pour le choix, le tri, le rangement, etc. en considérant plusieurs critères, souvent conflictuels et non commensurables, tout en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs des décideurs. L'utilisation de l'approche d'Analyse Multicritère est avantageuse pour une meilleure solution seulement si elle est assistée par les SIG en tant qu'outil d'analyse et de cartographie. L'approche d'intégration SIG-AMC est discutée dans le chapitre suivant, l'outil résultant de cette intégration est la base des

Chapitre2 : Analyse multicritère d'aide à la décision

modèles proposés pour la sélection des zones industrielles dans les chapitres 4 et 5. Le chapitre suivant est consacré à la description du couplage entre l'AMC et le SIG.

Chapitre Troisième

Intégration entre SIG et AMC

3.1 Introduction

L'intégration des SIG et de l'analyse multicritère d'aide à la décision constitue une voie privilégiée et incontournable pour faire évoluer les SIG vers de véritables systèmes d'aide à la décision (**Laaribi, 2000**). Les deux domaines de recherche SIG et AMC sont distincts mais ils s'entraident pour aboutir à la meilleure solution des problèmes géo-décisionnel comme celui de la localisation industrielle. Le SIG permet la représentation de la complexité géographique de ces problèmes mais il échoue à prendre en compte leurs dimension multicritère. L'AMC permet une formulation et une modélisation des problèmes géo-décisionnels, mais elle est limitée lorsqu'il s'agit de représenter leurs dimensions spatiales. L'intégration de l'AMC et des SIG conjugue les potentialités des deux outils en vue d'une aide à la décision spatiale plus élaborée pour la sélection des sites industriels.

Nous présentons dans ce chapitre les raisons d'être de cette approche, ses concepts, sa terminologie, les arguments en faveur de ce couplage ainsi que les modes d'intégration et les fonctionnalités qui participent à sa mise en œuvre.

Nous soulignons que ce couplage est de plus en plus opérationnel dans des domaines pluridisciplinaires pour résoudre les problèmes à caractères spatiaux et décisionnels. Beaucoup d'auteurs travaillent sur la théorisation de cette intégration. Quelques travaux théoriques sur l'approche ainsi que des applications qui l'utilisent dans différents secteurs sont présentés dans ce chapitre.

Quoique cette intégration a pu cerner les deux aspects : géographique et décisionnel du problème de sélection des sites, elle présente certaines limites. Ces limites sont héritées de l'AMC et des SIG ou de la façon de les intégrer. Nous énumérons certaines limites dans ce chapitre et essayons de surmonter certaines d'entre elles dans les modèles proposés en chapitre 4 et 5.

3.2 Définitions

Définition 1 : **Xue Qin, (2013)** a donné une définition caractérisée par sa simplicité : *“GIS-based multicriteria analysis (GIS-MCDA) is a procedure for transforming and combining geographic data and value judgments (preferences) to evaluate a set of alternatives with respect to relevant criteria”*

Définition 2: **Malczewski, (2010)** a donné une définition plus abstraite que la précédente *“GIS-MCDA) can be thought of as a process that transforms and combines geographical (spatial) data and value judgments (the decision maker's preferences) to obtain information for decision making”*.

3.3 Complexité des problèmes spatiaux

L'intégration SIG-AMC constitue une approche robuste pour surmonter la complexité des problèmes géo-décisionnels. Les types de complexité des problèmes spatiaux selon (**Chakhar, 2006**) sont :

3.3.1 Complexité liée aux données

Les données géographiques sont caractérisées par des attributs géométriques (forme et coordonnées), des données référentielles de position, des attributs topologiques et des attributs thématiques.

3.3.2 Complexité conceptuelle

Les problèmes décisionnels à référence spatiale concernent l'espace géographique naturel dont la définition des concepts est complexe et difficile.

3.3.3 Complexité ontologique et sémantique

Les problèmes géo-décisionnels font, de plus en plus, recourt à des données multi-sources dispersées géographiquement et généralement définies séparément sur des systèmes de coordonnées différents. Cette tendance, qui a été renforcée depuis l'avènement d'Internet et qui permet de réduire la redondance de l'information géographique, se confronte, néanmoins, à l'absence d'une base ontologique commune.

3.3.4 Complexité technique

La complexité technique, se manifeste lorsqu'il y a difficulté de combiner et de mesurer les entités décisionnelles (critères et alternatives). De plus les problèmes décisionnels à référence spatiale sont : (i) de nature multidimensionnelle, interdisciplinaires et difficilement formalisés, (ii) impliquent plusieurs personnes et institutions, ayant généralement des préférences et des objectifs divergents, (iii) nécessitent la définition de plusieurs critères conflictuels dont l'importance n'est pas la même, et (iv) demandent une quantité considérable de données quantitatives et qualitatives (**Raffaella et al., 2011**).

Les problèmes décisionnels à référence spatiale sont souvent multicritère et présentent un caractère décisionnel ou plusieurs intervenants sont impliqués, des critères hétérogènes sont imposés et des objectifs conflictuels sont envisagés.

3.4 Utilité et arguments de l'intégration entre les SIG et L'AMC

Il est difficile de résoudre les problèmes géo-décisionnels qui présentent la complexité citée dans la section précédente avec l'AMC sans SIG et vis versa car :

- Le SIG tout seul est bien adapté pour la représentation de la complexité des problèmes de décision à référence spatiale mais il échoue, au même temps, à prendre en compte la dimension multicritère inhérente de ces problèmes.
- l'AMC permet une formulation et modélisation des problèmes spatiaux, mais par contre elle est limitée lorsqu'il s'agit de représenter la dimension spatiale des problèmes spatiaux.

Chakhar, (2006) ; Pereira et Duckstein, (1993) ; Laaribi, (2000) ; Chakhar et Martel, (2003,2004) ; Malczewski, (2004) ont argumenté l'intégration par les points suivants :

- Les SIG ont évolué assez pour traiter les problèmes à référence spatiale avec leurs capacités d'analyse spatiale et de visualisation, néanmoins ils ne sont qu'à leurs premiers balbutiements en tant qu'outils d'aide à la décision.

- Les capacités analytiques et les techniques d'*overlay* des SIG permettent l'application d'un ensemble de critères afin de générer les solutions potentielles qui peuvent être évaluées par les méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision.
- Les SIG, définissent les actions et les critères pour le *design* de la solution alors que l'analyse multicritère met plus l'accent sur la sélection que sur le *design* ; il y a une certaine complémentarité entre les SIG et l'AMC.
- Les institutions chargées du développement et de l'aménagement du territoire dans les pays en voie de développement exigent des approches multicritères pour les problèmes de planification et d'aménagement du territoire pour renforcer les SIG.
À titre d'exemple, les décideurs qui veulent implanter des infrastructures tels qu'un aéroport ou une entreprise doivent prendre en compte une série de critères économiques, politiques, sociaux, environnementaux et techniques.

3.5 Schéma conceptuel d'intégration SIG-AMC

L'idée conceptuelle derrière l'intégration SIG-AMC est d'utiliser les fonctionnalités analytiques des SIG pour préparer les données en entrées des méthodes d'analyse multicritère et d'exploiter ces potentialités en matière de visualisation pour l'affichage des résultats de l'AMC sur les cartes (Chakhar, 2006).

Une intégration doit permettre la définition du problème, réduire le nombre initial (très grand) d'actions en un nombre limité d'actions qui peuvent facilement être évaluées et comparées par une méthode d'analyse multicritère. Finalement, les potentialités de présentation du SIG sont utilisées pour visualiser les résultats de l'analyse (Figure. 3.1).

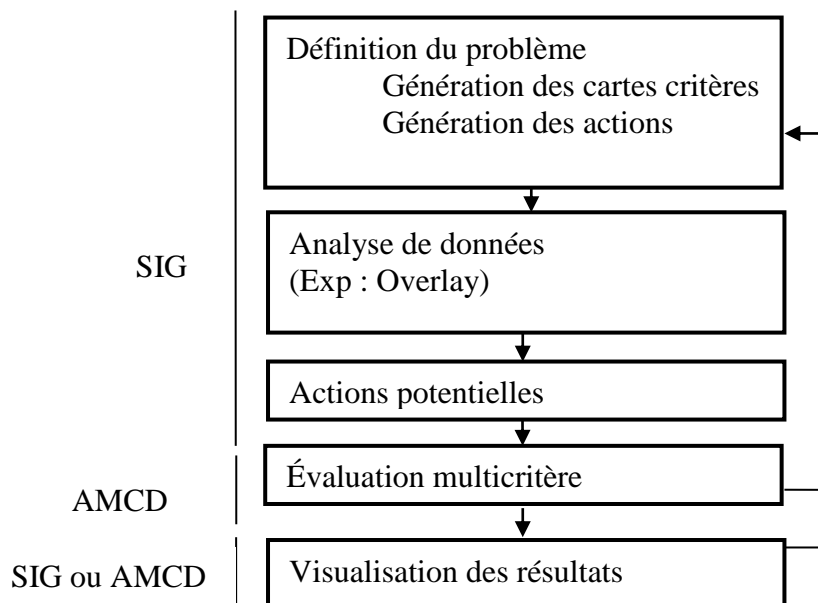


Figure. 3.1. Schéma conceptuel d'intégration SIG-AMC (Chakhar, 2006).

3.6 Mode d'intégration SIG-AMC

A partir des travaux d'intégration SIG-AMC, théorique ou pratique de : (Goodchild, 1991); (Goodchild et al., 1992); (Nyerges, 1992); (Laaribi et al., 1993); (Jankowski, 1995); (Karimi et Houston, 1996); (Malczewski, 1999); (Jun, 2000); (Chakhar, 2001) ; (Chakhar et Martel, 2003, 2004) etc., les deux auteurs : Malczewski (2006) et Chakhar (2006) ont distingué quatre modes d'intégration : (i) pas d'intégration, (ii) intégration indirecte (loose coupling), (iii) intégration encastrée (tight coupling) et (iv) intégration complète (full integration)

3.6.1 Intégration indirecte (loose coupling)

Un système intermédiaire est utilisé pour le dialogue entre le SIG et l'AMC, les deux logiciels restent complètement indépendants. Le système intermédiaire permet de reformuler et restructurer les données obtenues suite à l'opération d'OVERLAY dans le SIG en une forme convenable pour le logiciel d'AMC. (Figure 3.2)

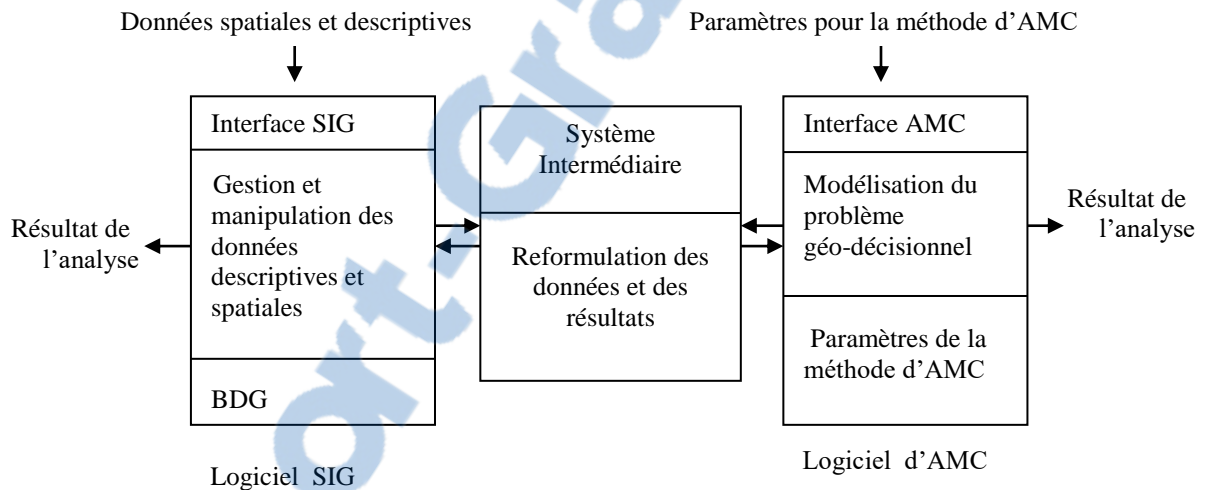


Figure 3.2. Intégration indirecte.

3.6.2 Intégration encastrée (tight coupling)

Les deux logiciels restent indépendants mais une seule interface (le plus souvent celle du SIG) est utilisée (Fig. 3.3). Le dialogue entre les deux systèmes se fait toujours via un système intermédiaire. Pour l'utilisateur, l'intégration est apparemment réalisée puisque les échanges de données lui sont transparents.

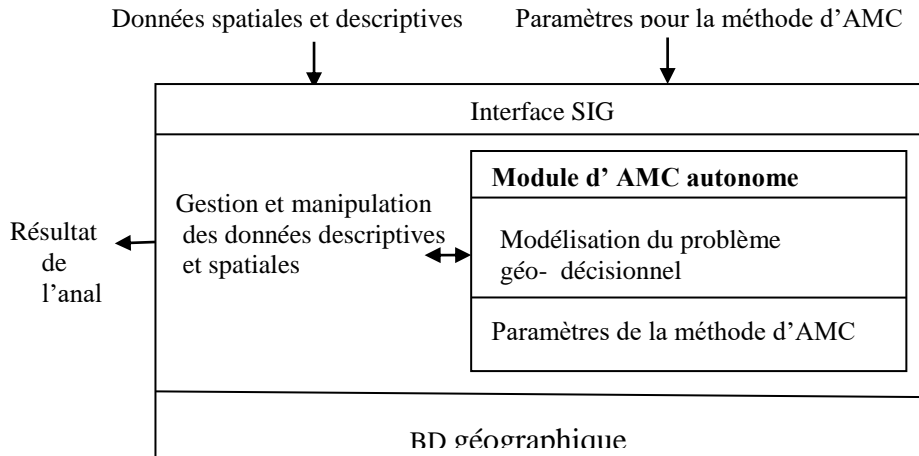


Figure. 3.3. Intégration encadré.

3.6.3 Intégration complète (full intégration)

Le système SIG-AMC est complètement intégré avec une interface unique et une base de données commune. Les fonctionnalités de l'AMC sont activées directement comme toute autre fonction de base du SIG. La base de données du SIG est renforcée afin qu'elle supporte aussi bien les données à référence spatiale que les paramètres nécessaires à l'application des techniques d'AMC (Figure 3.4).

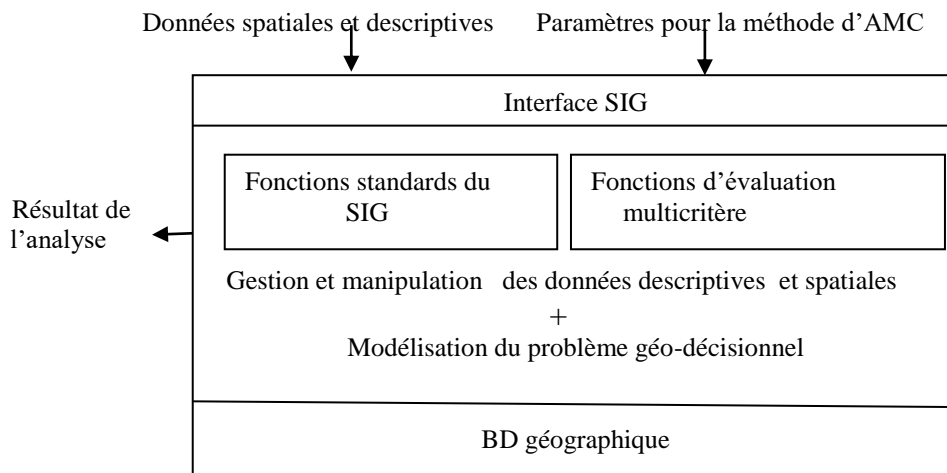


Figure .3 .4. Intégration complète.

(Malsewiski, 2006) a souligné qu'un nombre considérable d'articles parues avant 2004 (26.0% du total) n'ont donné aucun intérêt, ni sur le mode, ni sur la direction d'intégration des deux outils. La plus part des papiers de recherche théorique ou pratique consultés durant les travaux de cette thèse n'ont pas donné aussi d'intérêt aux modes d'intégration. Nous proposons dans cette thèse une intégration mixte, pour donner plus de souplesse à l'utilisation de l'outil résultant de cette intégration.

3.7 Aspects techniques de l'intégration SIG-AMC

Plusieurs systèmes basés sur l'intégration SIG-AMC ont été proposés mais il y a que peu qui ont survécu. Beaucoup de développement théoriques ont été soit oubliés, jamais utilisés ou ne sont pas rendus public. Les solutions SIG-AMC qui subsistent sont liées, soit à des plateformes commerciales soit à une communauté active (**Lidouh, 2013**). Ci dessous les SIG les plus utilisés pour cette intégration :

- IDRISI GIS (figure 3.5) :

IDRISI offre des outils SIG étendus en un seul ensemble logiciel particulièrement économique. Il permet la planification spatiale, l'aide à la décision multicritère et l'analyse des risques grâce à ses fonctionnalités de production des statistiques spatiales, d'analyses et de modélisation spatiale. Avec IDRISI, toutes les fonctionnalités d'analyse sont en standard « IDRISI », elles sont utilisées par des chercheurs et des professionnels dans une diversité de domaines dans plus de 175 pays. Dans (**Clark Labs, 2015**), on trouve les fonctionnalités principales d'IDRISI qui sont:

- requête de base de données en mode raster et vecteur en utilisant les capacités du SQL
- Cartographie dérivée, qui consiste à utiliser des modèles mathématique pour dériver un thème (layer) à partir d'un autre.
- Calcul de distance comme par exemple : les procédures pour trouver le chemin du moins coût et les routines d'allocation spatiales.
- Statistiques spatiales qui font appel à différentes techniques pour l'étude des données et de leurs attributs topologiques, géométriques et géographiques.
- Aide à la décision et gestion de l'incertitude : C'est la fonctionnalité qui nous intéresse dans ce chapitre, elle assure l'intégration entre le SIG IDRSSI et l'AMC. Cette fonctionnalité offre un environnement de modélisation graphique pour l'aide à la décision multicritère, une procédure d'allocation de terrain qui prend en compte la contiguïté et la compacité, une procédure permettant le consensus dans la pondération des critères et la standardisation floue ainsi qu'une panoplie de procédure d'agrégation basée sur la Combinaison Linéaire Pondérée (Weighted Linear Combination) et la moyenne Pondérée Ordonnée (Ordered Weighted Averaging).

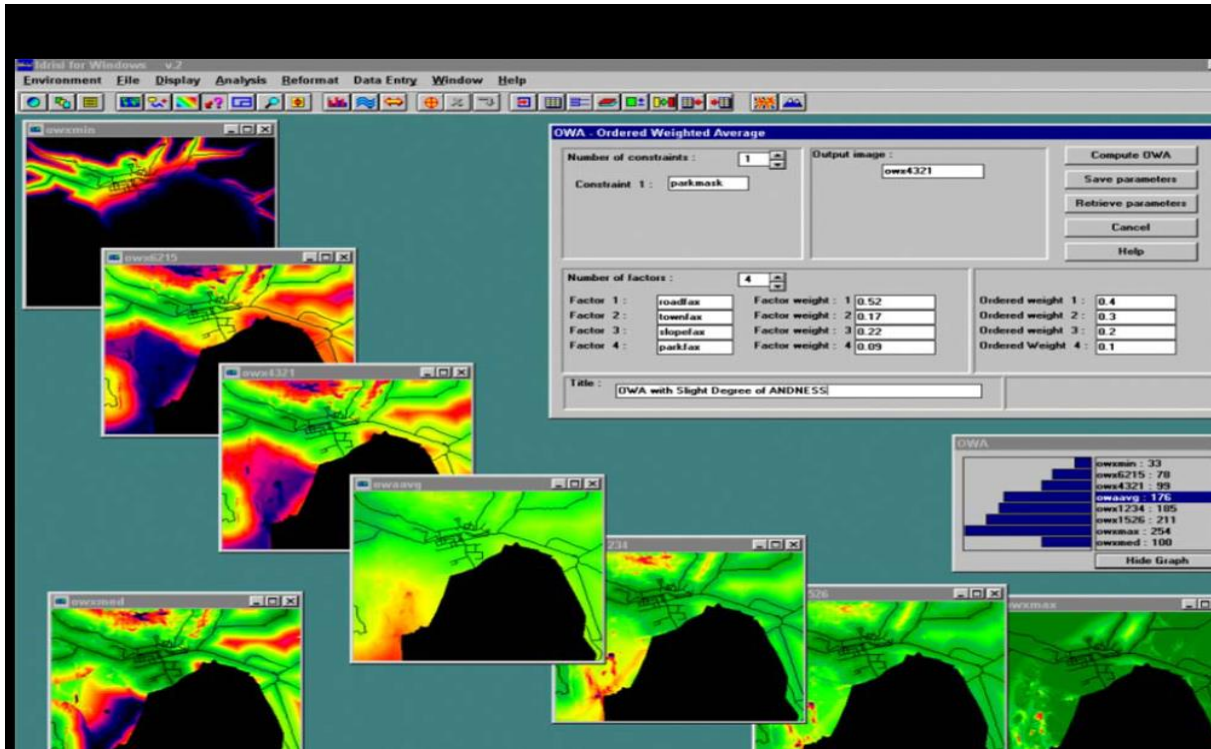


Figure 3.5. L'interface d'IDRISI.

- ESRI's ArcGIS

ArcGIS est un SIG qui couvre la puissance de la géographie et permet la prise de décision d'une manière intelligente et efficace. La section ArcScripts sur le site Web d'ArcGis permet aux développeurs de proposer leurs propres fonctions supplémentaires pour compléter le système. Des méthodes telle que AHP, OWA, TOPSIS ont été ajoutées pour prendre l'analyse multicritère en charge. La nouvelle version ArcGis 10.6 parue en 2018 a apporté de nouvelles fonctionnalités et une approche plus conviviale dans toutes les applications.

- DECERNS (Decision Evaluation in Complex Risk Network Systems)

DECERNS offre deux possibilités (Sullivan, 2009): L'utilisation distribuée sur le WEB ou l'utilisation autonome sur le PC.

DCERNS est un système d'aide à la décision spatial qui fournit une méthodologie, des modèles informatiques et des outils software pour faciliter la décision dans le domaine de la gestion de l'environnement.

L'architecture du DECERNS illustrée par la figure 3.6, montre que l'interface utilisateur commune fournit un accès aux fonctionnalités DECERNS. L'interface de programmation API (Application Programming Interface) intègre les trois composants principaux (les outils SIG, les Outils d'aide à la décision et les Modèles) qui sont liés à une seule plateforme.

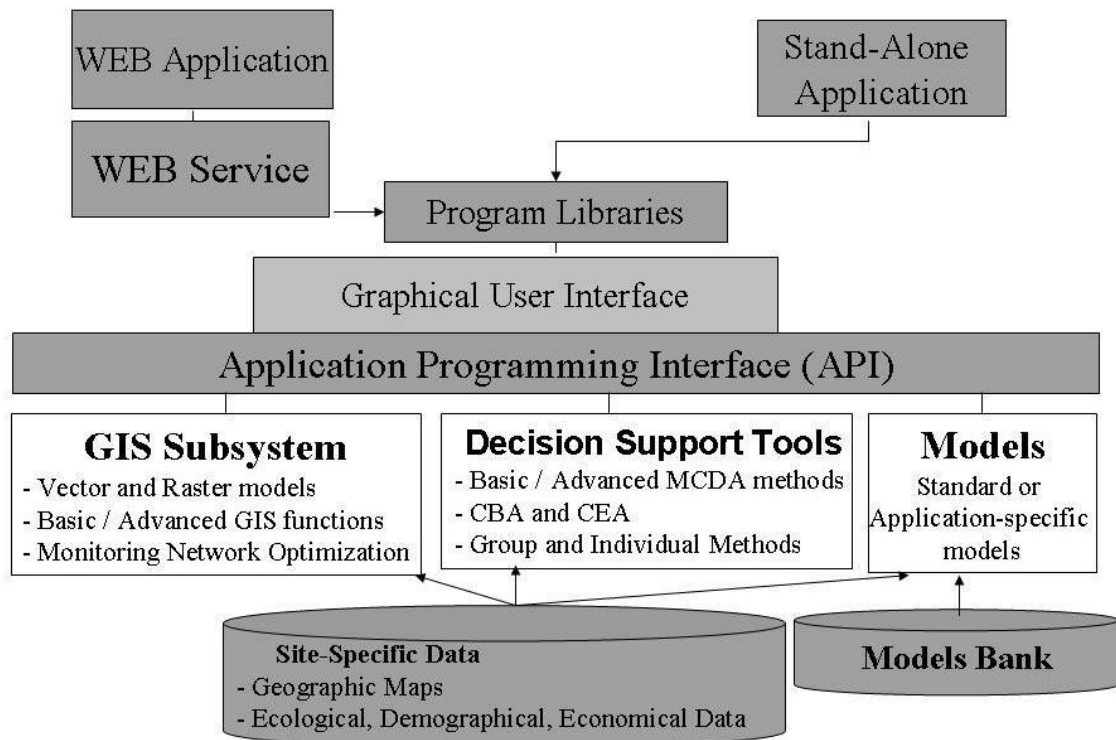


Figure 3.6. Architecture de DECERNS.

3.8 Intégration SIG-AMC : état de l'art

La quantité et la diversité des problèmes décisionnels à référence spatiale conduit à la croissance et au développement des recherches sur l'approche SIG-AMC. **Malczewski**, (2006) souligne que dans la synergie des recherches sur les SIG d'une part et sur l'AMC d'autre part que les recherches théoriques et pratiques sur l'intégration SIG-AMC avancent. Nous présentons dans cette section un tour d'horizon sur les travaux théoriques et sur les applications qui utilisent l'approche selon le domaine d'utilisation. Nous commençons par les travaux de sélection des sites industriels que nous jugeons de peu.

Selon **Malczewski**, (2006), les premiers travaux sur l'approche sont ceux de **Diamond et Wright (1988)**, **Janssen et Reitveld (1990)**, **Carver (1991)**, **Langevin et al (1991)**.

3.8.1.1 Travaux théoriques

Dans une revue de la littérature, **Malczewski (2006)** a énuméré environ 319 articles scientifiques sur l'intégration SIG-AMC dans la période de 1990 à 2004. Ces articles et leurs résumés sont disponibles à l'adresse <http://publish.uwo.ca/jmalczew/gismcda.htm>.

Sur les 319 articles répertoriés, 70% apparaît dans les dernières cinq années. Cette rapide augmentation du volume de la recherche sur l'intégration SIG-AMC qui n'a pas cessé jusqu'à nos jours, peut être expliquée par trois facteurs : (i) une large reconnaissance de la communauté scientifique envers les apports de l'AMC à la géomatique ; (ii) la disponibilité croissante des logiciels d'AMC grâce à leurs coûts abordables et leurs prises en main faciles ; (iii) la disponibilité et la relative facilité d'exploitation de modules d'AMC intégrés aux SIG

tels que ArcGIS et IDRISI (**Raffaella et al., 2011**). Le nombre d'articles parus par année, de 1991 à 2009 est illustré dans la figure 3.7.

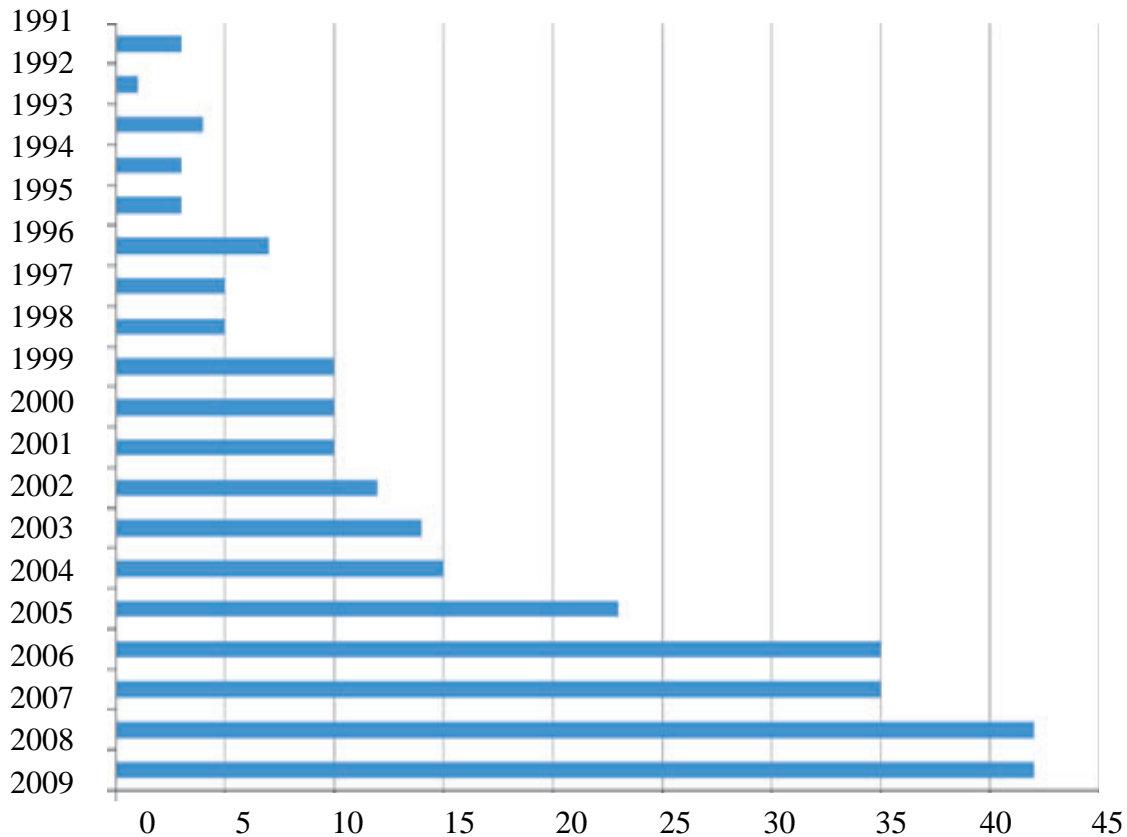


Figure 3.7. Nombre d'articles SIG-AMC parus par année de 1991 à 2009, source (**Randal et al., 2011**).

Malsewiski, (2006) à effectué des statistiques concernant plusieurs caractéristiques de cette intégration, quelques une sont citées ci-dessous (les choix adoptés dans cette thèse sont en gras). Ces points constituent la base de classification des travaux sur l'approche.

- Domaine d'utilisation :

72,4% des travaux concernent les domaines :

- **de la gestion territoriale et environnementale**
- du transport
- de la planification urbaine
- de la gestion des déchets
- de l'hydrologie et des ressources en H₂O
- de l'agriculture et des forêts

27,6% restants concernent les domaines :

- de la géologie et la géomorphologie
- de la cartographie

- Les problèmes décisionnels traités concernent :

- 30% l'analyse de susceptibilité/ faisabilité (carte d'aptitude)
- 15,4% l'évaluation de scénarios (ressources hydriques)

- 14, 5% **la sélection de sites propices**
- 11% la localisation de ressources
- Mode d'intégration entre SIG et AMC
- 26.0% à 30% d'articles ne donnent aucune indication ni sur le mode d'intégration, ni sur la Direction d'interaction
- 33.2% d'articles ont opté pour le mode indirect, 29.8% pour le mode encastré et 11.0% pour le mode d'intégration complet.
- 48% ont opté pour une intégration avec le SIG comme logiciel de base, 12.5% avec l'outil d'AMC comme logiciel de base, 9.1% pour une intégration bidirectionnelle et 4.4% pour une intégration dynamique.

Un mode d'intégration qualifié de mixte est proposé dans cette thèse, la fonctionnalité SIG de visualisation est intégrée d'une manière directe au module d'AMC (intégration directe) alors que l'étude géographique des critères spatiaux se fait indépendamment par d'autre SIG (pas d'intégration).

- Mode de représentation des données géographiques
 - 47,6 % d'articles utilisent des données en mode raster
 - 47 % **d'articles utilisent des données en mode vecteur**
- Méthode d'analyse utilisée
 - 39.3 % Somme pondérée (Weighted summation)/(Boolean overlay)
 - 9.6 % Ideal/reference point (TOPSIS, MOLA)
 - 9.4 % **Analytical Hierarchy Process (AHP)**
 - 4.7 % **Méthodes de surclassement (ELECTRE, PROMETHEE)**
 - 8.3 % Autres

Dans un autre *survey* de littérature, (**Valentina et Silvia, 2011**) présente dans le tableau une liste des journaux référés qui ont publié plus de quatre articles entre 1990 et 2011 sur l'intégration SIG-AMC.

Tableau 3.1. Articles SIG-AMCD publiés dans des journaux référés de 1990 à 2011.

Rang	Journal	Nbr d'articles	%
1	International Journal of Geographical Information Science	15	4.1
2	Landscape and Urban Planning	14	3.8
3	Journal of Environmental Management	13	3.6
4	Environmental Management	9	2.5
5	Computers Environment and Urban Systems	8	2.2
6	Environmental Monitoring and Assessment	6	1.6
7-9	Cybergeo	5	1.4
10-19	Applied Geography	5	1.4
10-19	Decision Support Systems	4	1.1
10-19	Environmental Geology	4	1.1
10-19	Transactions in GIS Management Information Systems	4	1.1
10-19	Transportation Research Record	4	1.1
10-19	Environmental Modelling and Software	4	1.1
10-19	Journal of Geographical Systems	4	1.1
10-19	International Journal of Applied Earth Observation and geoinformation	4	1.1
10-19	Journal of the Indian Society of Remote Sensing	4	1.1
10-19	Water Resources Management	4	1.1
10-19	Environmental Planning B Planning Design	4	1.1
	Others	245	67.1
	T O T A L	365	100

Dans un *survey* récent (2015), de la littérature de (Musakwa et al., 2015), il y a confirmation de la hausse du nombre des publications jusqu'à 2015. L'objectif principal des auteurs est de développer un système d'aide à la décision Spatiale pour la réforme foncière en Afrique du sud.

Lidouh, (2013), dans un article intitulé 'On the motivation behind MCDA and GIS intégration' a aussi investi sur l'approche en posant des questions telle que : quels sont les utilisateurs pour ces systèmes intégrés ? quelle est l'objectif d'utilisation de tels outils ?..., l'auteur a essayé de répondre à ces questions en proposant des orientations à toutes les parties, pour l'utilisation efficace de l'approche.

Chakhar, (2006) résume les problématiques de l'intégration entre le SIG et l'AMC dans les points suivant :

- Intégration indirecte ou encadrée
- Intégration d'une seule ou un nombre limité de méthodes dans le SIG
- Choix de la méthode multicritère à appliquer
- Intégration des méthodes du critère unique de synthèse
- Connaissance approfondie du SIG et de l'AMC

L'auteur a apporté des solutions conceptuelles, méthodologiques et informatiques à ces problématiques en proposant :

- Une stratégie d'intégration SIG-AMCD qui consiste à intégrer dans le SIG non pas une ou plusieurs méthodes d'analyse multicritère, mais plutôt un ensemble restreint de fonctions d'évaluation multicritère. Ces fonctions représentent les opérations élémentaires nécessaires à l'implémentation des méthodes multicritères. Cette stratégie permet de répondre aux exigences permettant d'éviter certaines limites des travaux d'intégration SIG-AMCD.
- Un module à base de règles pour le choix de la procédure d'agrégation à appliquer, s'appuyant sur une base de connaissances concernant les caractéristiques des méthodes d'AMCD et selon les spécificités du problème considéré et même du décideur,
- Une algèbre destinée à la modélisation spatiale multicritère.
- Une application au problème de génération des corridors pour valider les solutions proposées dans le cadre de son travail de recherche.

Marinoni (2006) propose l'intégration de PROMETHEE à ArcGIS. L'auteur a comparé ces résultats avec ceux obtenus en utilisant AHP, il a conclu que les méthodes de surclassement de synthèse se comportent plutôt bien pour des problèmes avec un grand nombre d'actions.

Les auteurs dans (**Joerin et al., 2001**) lient entre l'intégration SIG-AMCD et l'aménagement du territoire. Ils ont commencé à souligner l'intérêt des bases de données géographiques et des documents électroniques de gestion de territoire pour faciliter les décisions sur le territoire. Ce qui a permis une coordination facile entre les projets en cours sur le même territoire. Les planificateurs font face à deux défis i) le premier est qu'ils doivent planifier un projet sur le territoire non seulement pour des gains économiques mais aussi pour sauvegarder l'environnement et garder l'équilibre écologique. ii) le deuxième est qu'ils doivent jouer un rôle de médiateurs entre les différentes parties prenantes pour éviter les conflits et réduire les objections. Ils concluent que l'intégration des SIG avec les méthodes multicritères est inévitable pour les planificateurs afin de surmonter la complexité de gestion du territoire.

Joerin et Musy, (2000) ont proposé MAGISTER (Multicriteria Analysis and GIS for Territory), un modèle pour aider les planificateurs à concrétiser les instructions politiques en vraies décisions de localisation.

3.8.2 Les applications

Dans cette sous-section, nous présentons une synthèse des travaux d'application SIG-AMC en commençant par ceux destinés à la sélection des zones industrielles.

- **Sélection des zones industrielles.**

Le but des auteurs dans (**Boutkhom et al., 2015**) est de choisir une localisation appropriée pour implanter les industries en combinant FAHP et OLAP.

Les auteurs dans (**Aleksandar et al., 2013**) ont valorisé une bonne sélection des zones industrielles en indiquant que 80% des données utilisées dans ce contexte sont géographiques, les auteurs ont estimé que la synergie de cette intégration contribue à l'efficacité et la qualité

de l'analyse spatiale pour la sélection des zones. Les méthodes utilisées dans ce travail sont : WLC (Weighted Linear Combination) et AHP.

Pour déterminer l'aptitude de la région d'ASFAHANE à l'installation des industries, les auteurs dans (**Marzieh et al., 2011**) ont intégré les méthodes booléennes aux SIG. Ils procèdent par la définition des critères de sélection et la préparation des cartes correspondantes, ces cartes sont ensuite transformées en cartes booléennes et agrégées pour obtenir une carte d'aptitude finale.

Dans (**Carmen et al., 2007**), les auteurs ont proposée un nouveau modèle GIS-MCA pour la localisation des zones industrielles. Dans ce travail, la sélection des zones industrielles se fait en trois phases : i) investigation sur des régions (grandes surfaces) ii) investigation réduite sur des surfaces communales iii) investigation sur les surfaces destinées à l'industrie dans les communes.

Khalid (2003) a souligné l'influence de la sélection des zones industrielles sur le style de vie des citoyens et pour cela il faut que les analystes lutent pour déterminer la meilleure localisation. Son approche comporte une phase d'analyse et de recueil des données et une phase d'évaluation. Pour l'implémentation, l'auteur a intégré trois outils : les systèmes experts, les SIG et l'AMC en utilisant la technique COM (Component Object Model) pour les connecter. Il a utilisé « Visual Rule Studio » pour développer le système expert, ArcGIS 8.2 comme plateforme SIG et Excel pour implémenter AHP.

Jiang et Eastman (2000) ont intégré les deux méthodes : La combinaison booléenne et la combinaison linéaire pondérée (weighted linear combination) dans IDRISI. Les auteurs proposent d'utiliser la logique floue pour normaliser les performances. Le modèle proposé est appliqué à la localisation industrielle dans la ville de Nakuru au Kenya.

- Environnement.

Les auteurs dans (**Gianluca et al., 2014**) soulignent l'intérêt de l'intégration dans le domaine de l'environnement, indiquant que le SIG et l'AMC sont toutes les deux importantes pour la solution des problèmes spatiaux, les auteurs présentent un nouvel outil SIG-AMC pour résoudre le problème des eaux usées en agriculture.

Dans (**Valentina, et Silvia, 2011**) l'objectif est d'évaluer l'impact écologique des projets du développement durable, les SIG et l'ANP (Analytic Network Process) qui est une variante d'AHP sont utilisés pour déterminer les corridors écologiques potentiels dans la région de Piedmont (Nord de l'Italie)

Dans (**Makram et al., 2008**), on trouve une combinaison d' AHP avec les SIG pour localiser et ranger les sites appropriés pour le traitement des aquifères du sable en utilisant les critères techniques, socio-économiques et environnementaux.

Koo et Connell (2006) distinguent l'analyse multicritère spatiale de l'analyse multicritère aspatial. Les auteurs supposent que le poids d'un critère varie d'une zone à une autre. Ils utilisent à cet effet des fonctions mesurant la distribution d'indicateur et la potentialité de chaque pixel pour prendre en compte la "spatialité" du poids. La Problématique dans ce travail est la gestion de la pollution du nitrate en Angleterre.

Dans (**Carlo et al., 2003**), les auteurs essaient de démontrer comment l'intégration SIG-AMC aide à situer les préférences des parties prenantes régionales pour simplifier la décision dans le processus de planification des parcs au Canada.

Joerin, (1997) propose MEDUSAT (Méthode d'aide à la Décision par l'Utilisation du SIG IDRISI pour l'Aménagement du Territoire), un cadre méthodologique qui doit être précisé par les utilisateurs lors de chaque Application. Il intègre Electre Tri et Electre Is comme méthodes d'AMC. L'application du MEDUSAT dans ce papier porte sur la localisation d'une usine de traitement des déchets au Nord-Est de la Tunisie.

Malczewski (1996) a incorporé la méthode multicritère TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) dans IDRISI pour la problématique hypothétique de localisation d'un complexe nocif impliquant trois décideurs.

Jankowski (1995) a utilisé le mode d'Intégration indirecte et/ou encastré pour intégrer différents logiciels AMC existants (Best Choice, Expert Choice, MADM Windows etc.) dans le SIG Arc/Info. Le système résultant est destiné à l'analyse environnementale

- **Energie**

Un travail en relation avec la diversité énergétique concernant la conception d'un modèle SIG-AMC pour la conduite des projets en énergie éolienne (**Maria et al., 2011**)

Dans (**Dedemen, 2013**) le risque et le coût sont les critères principaux pour déterminer la meilleure ligne de transport de l'énergie en utilisant conjointement AHP et PROMETHEE avec les SIG.

- **Habitation**

Dans (**Meng et al., 2011**), les auteurs couplent AHP et OWA (Ordered Weighting Averaging) avec les SIG pour cartographier les modèles d'accessibilité aux sites d'habitation dans Cammore Alberta. Le système proposé aide les promoteurs en logement à faire le compromis entre les frais et les bénéfices.

Marinoni (2005) intègre deux versions de la méthode PROMETHEE (la version standard et une version stochastique) dans l'ArcGIS pour le choix d'une parcelle pour la construction de nouvelles habitations.

Les auteurs dans (**Jorein et Musy, 2000**), (**Jorein et al., 2001**), (**Joerin et Metzger, 2004**) proposent MAGISTER (Multicriteria Analysis and GIS for Territory) sur la base du SIG MapInfo et de la méthode ELECTRE TRI. Les auteurs ont utilisé un indice d'homogénéité qui permet de calculer la similarité entre chaque élément du territoire (i.e. pixel) et les caractéristiques moyennes de la zone afin de subdiviser le domaine d'étude en zones homogènes, représentant les actions potentielles à classer par ELECTRE TRI dans trois catégories de convenance : favorable, incertaine et non favorable. MAGISTER est proposé pour le problème de construction des habitats dans une zone rurale située dans le canton de Vaud en Suisse.

Can (1993) a implémenté la méthode ELECTRE I en utilisant le langage C dans Arc/Info via son langage de macro-commandes AML pour l'évaluation de la qualité résidentielle dans la ville de Syracuse (New York)

Jankowski et al. (1997) proposent le système « Spatial Group Choice » (SGC), destiné à la prise de décision de groupe et composé de deux modules dont l'un d'évaluation multicritère et l'autre de visualisation basé sur ArcView 2. Les deux modules communiquent via un protocole d'échange dynamique. Le système est utilisé pour le choix de trois localisations pour le développement d'habitat impliquant cinq décideurs.

- Agriculture et hydrologie

Janssen et Rietveld (1990) ont utilisé les deux outils Arc Info comme SIG et l'AMCD d'une manière indépendante (sans intégration) dans le domaine de l'agriculture aux Pays Bas.

Dans (Jain et al., 1995) les auteurs ont utilisé l'AMC basé sur une technique *ad hoc* de pondération intégrée dans le SIG Arc Info. La visualisation des résultats est assurée par ArcView. L'objectif étant la planification durable de la production animale dans la région de Southern Iowa aux États-Unis.

Les auteurs dans (**Giupponi et al., 1999**) ont utilisé la somme pondérée et IDRISI 2.0 pour mesurer le risque de pollution des ressources en eaux. L'objectif étant l'évaluation et la représentation des pollutions diffusées dans le bassin versant de la région de Lagon (Venise) en Italie.

Les auteurs dans **Laaribi et al., (1996)** ont utilisé PROMETHEE II intégré au SIG Arc/Info. Ils proposent une méthodologie pour la problématique de conservation des eaux et du sol en Tunisie.

Les auteurs dans (**Itami et al., 2000**) intègrent AHP à ArcView pour la gestion d'un bassin versant dans la région de Victoria en Australie. L'approche multicritère a permis de tenir compte de la complexité dans les problèmes de gestion et d'aménagement des bassins versants.

- Transport

Jankowski et Richard (1994) ont utilisé l'AMC intégré au SIG IDRISI pour l'identification d'un corridor destiné à l'implantation d'une autoroute

Dans (**Younsi et al., 2009**), les auteurs proposent un processus décisionnel en se basant sur les SIG, les techniques de télédétection et la méthode ELECTREIII. L'objectif étant la recherche de l'emplacement le plus adéquat pour l'implantation d'une future gare routière a Oran.

- Sélection de sites d'une manière générale

Les auteurs dans (**Martin et al., 2003**) proposent un système interactif d'aide à la décision (SIAD) composé d'une banque de données, du SIG Mapinfo, d'une interface utilisateur et deux logiciels d'AMCD : PROMOCALC (implémentation de PROMETHEE I) et GAIA implémentation de PROMETHEE II. Le SIAD est utilisé pour l'aménagement de la plaine alluviale de la Rivière Saint-Charles au Québec avec évaluation de huit scénarios d'aménagement.

Dans (**Sharifi et al., 2002**), la méthode de la somme pondérée intégrée au SIG utilisée pour combiner les différentes cartes critères générées. L'objectif de ce travail est la relocalisation de la zone frontalière entre le "Tunari National Park" et la ville de "Cochabamba" en Bolivie.

Les auteurs dans (**Jankowski et al., 2001**) proposent DECADE (Dynamic, Exploratory Cartography for Decision support). Dans ce modèle, la carte elle-même est utilisée pour l'aide à la décision en se basant sur sa manipulation directe pour ranger les alternatives et pondérer les critères. Ce modèle est utilisé pour l'implantation de centres hospitaliers dans les différents départements de l'état d'Idaho aux États-Unis.

Wu (1998) propose l'outil SimLand qui est une intégration encadrée du SIG Arc/Info, des automates cellulaires et d' AHP. L'objectif est l'étude de l'utilisation du sol dans la ville de Guangzhou dans le sud de la Chine

Le travail dans (**Eastman et al. 1993**) est considéré comme la première tentative significative pour l'intégration SIG-AMC. IDRISI4.1 qui est le SIG le plus adapté à intégrer avec l'AMC est utilisé.

Banai (1993) a intégré AHP flou dans le SIG IDRISI . Ce travail est parmi les premiers à utiliser la logique floue dans un système intégré SIG-AMC pour la problématique de localisation.

Le travail de **Carver (1991)** est considéré comme la 1^{ère} intégration effective entre Arc Info et trois techniques multicritères préalablement existantes sous Fortran 77. L'objectif est le choix de sites potentiels en fonction d'un ensemble de critères définis dans le contexte.

Chakhar et Mousseau (2007) proposent un SIAD basé sur ARCGIS comme SIG, et de plusieurs méthodes d'AMC comme Electri III, PROMETHE etc. Le système proposé est appliqué pour résoudre le problème de génération des corridors.

3.9 Limites de l'approche d'intégration SIG-AMC

La plus part des travaux qui ont été réalisés sur l'intégration SIG-AMCD sont restés dans le cadre académique et présente une ambiguïté d'expression et des besoins que ces systèmes devraient accomplir. Ce constat fait par **Chakhar (2006)** revient aux limites suivantes :

- Modes d'intégration indirecte ou encadrée.

Selon **Malczewski, (2006)**, (63%) de travaux d'intégration SIG-AMC ont opté soit pour l'intégration indirecte, soit pour l'intégration encadrée. L'intégration complète n'est utilisée que dans 11.0% à cause des raisons suivantes : (i) simplicité de ces deux modes d'intégration, par rapport à l'approche d'intégration complète (ii) l'existence des logiciels commerciaux pour la plupart des méthodes multicritère, (iii) les deux outils sont relativement récents et une intégration complète, qui nécessite un effort considérable, aussi bien conceptuel que technique, n'est pas motivée et (iv) manque d'échanges entre les chercheurs des deux domaines de recherche.

- Intégration d'une seule (ou un nombre limité) de méthode(s) d'AMC.

D'une manière générale l'intégration se fait en incorporant les méthodes d'AMC dans le SIG comme le cas du SIG IDRISI, de plus le nombre de méthodes d'AMC incorporées est limité. Cependant, il est bien établi dans la littérature que chaque méthode multicritère possède ses avantages et ses inconvénients de telle sorte qu'une méthode peut être appliquée dans un type particulier de problèmes et pas dans un autre type.

- Choix de la méthode multicritère.

Le choix de la méthode à utiliser est important. Ce choix se fait généralement d'une manière arbitraire : soit que l'analyste est familiarisée avec une méthode particulière, soit qu'elle a été développée de manière ad hoc ou encore tout simplement parce qu'elle est disponible sous forme de logiciel. Cependant, Il existe un certain nombre de travaux qui se basent sur l'utilisation d'un arbre de classification pour le choix de la méthode d'AMC, d'autres utilisent une méthode multicritère et d'autre utilisent un système expert (**chakhar (2006)**). Nous proposons en perspectives des travaux de cette thèse l'utilisation des techniques du Data Mining pour le choix de méthode appropriée.

- Intégration des méthodes du critère unique de synthèse.

58.3% des travaux d'intégration utilisent les méthodes du critère unique de synthèse (**Malczewski, 2006**). Les méthodes de surclassement de synthèse ont reçu peu d'attention, sont mieux adaptées aux problèmes de décision sur le territoire (**Malczewski, 1999**) ; (**Joerin et Musy, 2000**) ; (**Joerin et al., 2001**). Cette situation a au moins deux explications : (i) les méthodes de surclassement de synthèse sont mathématiquement plus complexes et difficiles à expliquer aux décideurs, et (ii) elles sont sujettes à des limitations informatiques par rapport au nombre d'actions. Dans cette thèse, nous présentons au décideur les deux types de méthodes pour lui permettre de voir de près les inconvénients et les avantages de chacune d'entre elles.

- Connaissance approfondie du SIG et de l'AMC.

L'utilisation en pratique de l'intégration SIG-AMCD reste limitée et le plus souvent ne dépasse pas le cadre académique. **Chakahr (2006)** donne les deux raisons suivantes : (i) l'utilisation de tels outils exige une bonne connaissance du SIG et d'AMCD ; (ii) la spécificité de chaque problème de décision fait qu'il n'est pas possible de "transporter" un système développé pour un problème donné pour être exploité dans un autre problème.

Nous ajoutons à ces limites le fait que :

- 1) les limites de l'AMCD, des SIG et de la façon d'intégration séparément constituent aussi une limite de l'approche.
- 2) le développement de l'AMCD, des SIG ou même de la façon de les intégrer séparément contribue au développement de l'approche.

3.10 Conclusion

Après une mise en contexte géographique et introduction des SIG au chapitre 1 et une mise en contexte décisionnel et introduction de l'AMC au chapitre 2, ce chapitre traite l'approche d'intégration SIG-AMC dans le but d'une sélection des zones industrielles. Nous avons présenté les arguments et les limites de cette intégration en établissant une liste des travaux théoriques et pratiques. Dans les deux chapitres (4 et 5) de contribution, nous proposons une sélection des sites industriels en utilisant deux modèles basés sur cette approche. Dans le premier modèle, une méthode de critère unique de synthèse est utilisée et dans le second on utilise une méthode de surclassèrent. Nous avons surmonté certaines limites qui concernent les méthodes d'AMC et les modes d'intégration en espérant que cela contribue au développement de cette approche que nous avons jugée intéressante pour la prise de décision lors de la sélection des sites industriels.

Chapitre quatrième

Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

4.1 Introduction

La sélection des sites est le processus de trouver les sites appropriés pour l'installation de nouveaux projets selon des critères socio-économiques et environnementaux (Khalid, 2003). Les auteurs dans (Daniel et al., 2015) identifient quelques facteurs déterminants pour la réussite d'un projet industriel : i) la complexité des projets ne dépend pas seulement de l'industrie; ii) le développement d'un projet n'est pas seulement l'affaire du chef de projet et son équipe, mais il y a un rôle important des parties prenantes à jouer; iii) l'incertitude et le changement continu dans la gestion d'un projet cause des difficultés pour une planification et un financement rigoureux. Il faut ajouter qu'une localisation bien mesurée est primordiale pour diminuer la complexité d'un projet, maximiser les intérêts et diminuer les risques. Dans cette contribution, un modèle basé sur l'intégration des SIG et de l'AMC, de la logique floue et des règles de décision est proposé. L'objectif est de bien mesurer la localisation des zones industrielles dans le cadre d'un projet national.

La complexité dans la prise de décisions pour le choix des sites industriels provient du compromis inhérent entre des critères socio-économiques, techniques et environnementaux. L'emplacement anarchique des zones industrielles cause des épidémies et des atteintes graves sur la santé des citoyens. Le modèle linéaire de Simon (Intelligence, conception et choix) et ses extensions sont insuffisants pour traiter la complexité de tels problèmes (Robyn, 1979).

Une zone est une action spatiale en langage d'AMC, elle est définie par sa position géographique, sa forme et ses relations spatiales (Raffaella et al., 2011). La majorité des critères et toutes les actions du problème ont un caractère géographique. L'approche d'intégration entre les SIG et les méthodes d'AMC est favorable pour la solution de ce genre de problème.

L'idée conceptuelle derrière l'intégration entre les SIG et l'AMC consiste d'une part à utiliser les fonctionnalités des SIG, pour préparer des données géographiques nécessaires en INPUT des méthodes d'AMC et d'autre part, d'employer les potentialités de visualisation des SIG pour l'affichage des résultats d'analyse (Chakhar, 2006).

Les SIG sont nécessaires pour modéliser, stocker, gérer, analyser et représenter des objets ou des collections d'objets spatiaux. Les évaluations d'action selon les critères géographiques sont basées sur une fonctionnalité importante des SIG : La cartographie. Nous rappelons qu'une carte est un modèle de la réalité pour la représentation géométrique d'objets avec une logique graphique et sémiotique (Caloz et Collet, 2011). Par exemple la valeur sismique d'une zone industrielle provient de sa position géographique sur la carte sismique du pays.

AHP est une méthode populaire utilisée comme outil pour la prise de décisions multicritères, ou comme une technique de pondération. AHP est utilisée dans beaucoup de domaines, comme la sélection de site, la planification de territoire, l'énergie nouvelle, etc. (Ying.Ming et al., 2008). AHP est largement utilisé pour la solution des problèmes géo-décisionnels (Vahidniaa et al., 2008). Cette méthode a des propriétés mathématiques

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

basées sur le calcul des vecteurs et des valeurs propres et permet le rangement total, elle exige une hiérarchie du problème de décision et des comparaisons par paires des entités fils de chaque nœud de la hiérarchie (Saaty, 2008). Il est remarquable que l'intégration d'AHP avec d'autre formalisme pour l'aide à la décision est beaucoup plus efficace que l'utilisation d'AHP toute seule (Yan.Ge et al., 2008).

Ce chapitre est consacré à la description de ce premier modèle qui se base sur l'intégration d'AHP Flou (FAHP), des SIG et des règles de décision, pour le mettre au service du décideur de l'Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière (ANIREF).

Pour que ce modèle soit plus efficace en aide à la décision nous proposons :

1. Un mode d'intégration mixte entre les SIG et l'AHP pour lui donner plus de flexibilité à prendre en charge le caractère géographique des données : Le mode d'intégration indirect (Pas d'intégration) est utilisé dans la phase d'analyse (screening phase), l'intégration complète est utilisée dans la phase d'évaluation.
2. Un ensemble de règles de décision (Si ... Alors) est conçu pour l'utiliser comme un filtre pour les critères en INPUT de la méthode AHP.
3. Pour traiter le flou et l'incertitude des données, nous adoptons l'extension floue d'AHP proposé par Chang (Chang, 1996). Cette extension est basée sur les TFNs (Triangular Fuzzy Numbers).

4.2 Éléments du modèle décisionnel proposé

Dans notre étude (Taibi et Atmani, 2016a), (Taibi et Atmani, 2017a), (Taibi et Atmani 2017b) l'AHP floue, les SIG et les règles de décision sont combinés pour fournir aux décideurs un modèle de rangement des sites industriels en Algérie. Le rangement est basé sur des critères socio économiques, techniques et sur des considérations environnementales. AHP floue est utilisé pour l'évaluation des sites industriels candidats en combinant la théorie des ensembles flous et AHP. La base de règle de décision filtre les critères par un prétraitement impliquant une réduction de leurs nombre. Le SIG est utilisé d'une part pour produire des cartes critères par la technique d'Overlay afin de préparer les données préférentielles en input de la méthode AHP et d'autre part pour visualiser les zones rangées sur la carte. Le rang d'une zone ainsi obtenu est un index utilisé par les décideurs pour une meilleure utilisation futur de la zone. Nous commençons cette section avec l'argumentation de la nécessité d'utiliser l'approche d'intégration SIG-AMC pour converger vers le meilleur rangement des sites, ensuite les concepts de base de FAHP et des règles de décision sont présentés.

4.2.1 L'intégration

La solution des problèmes géo-décisionnels implique la combinaison des données géographiques et décisionnelles en entrée pour obtenir une décision en sortie. Le SIG est un excellent outil pour l'acquisition, le stockage, la manipulation et l'analyse spatiale des données géographiques, mais présente certaines lacunes pour traiter les problèmes géo-décisionnels surtout lorsqu'il s'agit d'atteindre des objectifs contradictoires

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

dans le processus de prise de décisions. Nous rappelons ci dessous quelques critiques adressés à la technologie SIG (**Chakhar, 2006**).

- Les données décisionnelles comme les préférences des décideurs ne sont pas prises en compte correctement par les SIG.
- Le SIG ne permet pas l'évaluation et la comparaison des différents scénarios engendrés par un problème géo-décisionnel. La solution donnée par le SIG satisfait tous les critères simultanément.
- Des fonctionnalités Analytiques trouvées dans la plupart des SIG sont orientées vers la gestion des données et non pas vers une analyse effective de ces dernières.

Les techniques de l'AMC servent à évaluer les actions (alternatives) selon un ensemble de critères généralement conflictuels et des données préférentielles de la part d'un décideur.

Les SIG et l'AMC sont deux domaines différents, mais ils se complètent pour résoudre des problèmes géo-décisionnels. L'idée conceptuelle sur laquelle l'intégration SIG-AMC se base est l'utilisation des capacités d'analyse spatiale des SIG pour préparer les INPUT d'AMC et d'exploiter les potentialités des SIG en matière de visualisation pour l'affichage des résultats sur carte (**Chakhar, 2006**).

4.2.2 AHP et son extension flou

AHP a fait l'objet des recherches et a été utilisé dans un grand nombre d'applications liées à l'AMC dans les 20 dernières années (**William, 2008**). AHP combine des données quantitatives et qualitatives d'une manière flexible, elle prend en charge les différents groupes d'acteurs et combine les avis exprimés par beaucoup d'experts pour aider dans l'analyse faite par toutes les parties prenante (**Ramanathan, 2001**). AHP est basé sur le modèle de la somme pondéré et peut être utilisé dans l'environnement GIS de la même façon que la méthode WAC (Weighted Additive Combination method).

La défaillance dans l'AHP originale est l'utilisation des nombres précis exprimés par des valeurs numériques définies, tandis que les avis des décideurs sont caractérisés par l'incertitude et l'imprécision. L'AHP Flou (FAHP) est développé pour surmonter cette défaillance. FAHP est basée sur l'évaluation humaine et capture l'imprécision dans les jugements ordinaux obtenus à partir des questionnaires remplis par les parties prenantes (**Bennis et al., 2016**). La plus part des travaux qui utilisent FAHP adoptent l'ensemble flou triangulaire qui est représenté par trois nombres flou (Triangular Fuzzy Numbers) $l; m; h$, où l indique la valeur la plus faible possible, m la valeur moyenne, et h la valeur supérieure (**Chang, 1996**).

Les nombres flous triangulaires TFNs sont adoptés dans ce travail vu leurs simplicité en représentation et en calcul. Ils sont utilisés pour la fuzzyfication de toutes les matrices de comparaison par paires exigé par FAHP.

Un TFN est défini par le triplet (l, m, u) , la fonction d'appartenance flou $\mu_M(x)$ est illustrée dans la figure 4.1, elle est défini par l'équation (4.1) (**Cheng et Malcolm, 2005**):

$$\mu_M(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < l \\ \frac{x-l}{m-l} & \text{si } l \leq x \leq m \\ \frac{h-x}{h-m} & \text{si } m \leq x \leq h \\ 0 & \text{si } x \geq h \end{cases} \quad (4.1)$$

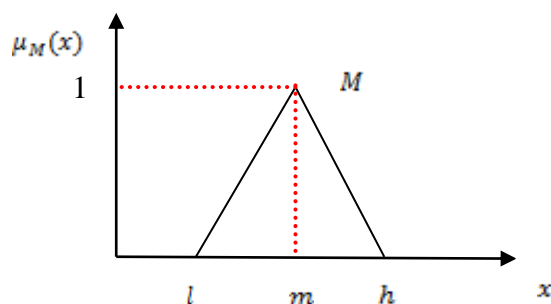


Figure 4.1. La fonction floue triangulaire.

Les quatre opérations définies sur les TFNs et utilisées dans ce travail sont illustrées ci dessous :

Soit M_1 et M_2 deux TFNs définies par : $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ et $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$, alors :

$$M_1 \oplus M_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (4.2)$$

$$M_1 \ominus M_2 = (l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2) \quad (4.3)$$

$$M_1 \otimes M_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \cdot l_2, m_1 \cdot m_2, u_1 \cdot u_2) \quad (4.4)$$

$$M_1 / M_2 = (l_1, m_1, u_1) / (l_2, m_2, u_2) = \left(\frac{l_1}{l_2}, \frac{m_1}{m_2}, \frac{u_1}{u_2} \right) \quad (4.5)$$

Beaucoup de chercheurs introduisent la logique floue pour la construction des matrices de comparaison par paires pour la prise en charge des données floues. L'une des méthodologies préférée est basée sur l'analyse étendue de Chang (Chang's extent analysis) (**Chang, 1996**). C'est une méthodologie claire et facile en la comparant avec d'autres méthodologies. Les bases théorique fondamentales de cette approche sont définies ci dessous (**Chang, 1996**), (**Gumus, 2009**) :

L'extension floue :

Soit $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ un ensemble d'objets (poids) et

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ un ensemble d'objectifs (valeurs linguistique).

Selon la méthode d'analyse extensible de Chang , chaque objet x_i est étendu pour chaque objectif u_i et on peut obtenir m valeurs pour chaque objet comme le montre les formules ci dessous :

$$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.6)$$

Ou $M_{g_i}^j$ $j = 1 \dots m$ est un TFN et :

La valeur floue extensible pour le i^{eme} objet est représentée par la formule:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (4.7)$$

La somme floue des m valeurs extensibles pour une matrice est faites pour obtenir:

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \text{ comme le montre la formule ci-dessous}$$

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m h_j \right) \quad (4.8)$$

On calcule, ensuite l'addition des m valeurs extensibles pour obtenir :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left(\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n h_i \right) \quad (4.9)$$

L'inverse du vecteur en Eq. (3) est calculé ci-dessous :

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n h_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (4.10)$$

4.2.3 État de l'art sur l'utilisation de FAHP

Les données décisionnelles (jugements des décideurs) sont entachées du flou, de l'incertitude et de l'imprécision. La méthode AHP flou (FAHP) est développée pour alléger ce problème. Ci-dessous quelque travaux intéressants utilisant FAHP intégré aux SIG.

Dans (Sylvian et al., 2016) les auteurs font une enquête sur l'utilisation de FAHP. Leur enquête dans la littérature révèle qu'au moins 190 articles ont été publiés dans des journaux référés entre 2004 et 2016. Cela constitue un argument pour affirmer que FAHP est largement utilisé.

Dans (Masoud et al., 2015) il y a application de FAHP pour choisir la meilleure technique pour la détection des mines sous terraines en IRAN, prenant en considération la subjectivité des décideurs.

Dans (Chien et al., 2013) les auteurs proposent un nouveau modèle FAHP hybride pour placer les centres d'affaires internationaux dans le contexte de sélection de site pour hôtels de tourisme.

Dans (Sehnaz et al., 2011) l'auteur se focalise sur le dépôt final des déchets solides municipaux (MSW) comme une étape importante et utilise FAHP pour déterminer le meilleur emplacement.

Dans (Ibrahim et al., 2011) , le problème est de choisir la meilleure localisation pour une station de traitement des eaux usées en concevant un modèle basé sur FAHP et les SIG.

Les auteurs dans (Akbari et al., 2008) mettent en lumière l'impact d'une mauvaise installation d'une décharge sur l'environnement, l'économie et l'écologie, il proposent une solution en deux étapes : (i) utilisation des SIG pour déterminer la zone candidate; (ii) utilisation de FAHP pour les ranger.

Le but dans (Sehnaz et al., 2010) et (Mehmet Ekmekciog et al., 2010) est la protection des lacs turcs en intégrant GIS et FAHP pour la sélection des sites de décharge publics sans risque environnemental sur les lacs.

Dans (Shuo et al., 2008), les auteurs proposent un système qui intègre la théorie des ensembles flous (FST), un système de rangement des facteurs (FRS) et la somme pondérée simple (WAS) pour évaluer des alternatives pour l'installation des infrastructures.

Les auteurs dans (Tsung et al., 2008) emploient FAHP pour traiter 21 critères afin de donner des directives claires aux investisseurs.

Dans (Tarek et al., 2003), les auteurs évaluent la vulnérabilité au danger des tremblements de terre à travers une analyse spatial multicritère des terrains urbains; ils utilisent FAHP et les SIG pour traiter les critères relevant des risque sociaux , des risques induits et de la vulnérabilité systémique.

4.2.4 Règle de décision

Les informations préférentielles modélisées par des règles de décision semblent être près du raisonnement humain. Les règles de type Si ... Alors... Sinon ... peuvent être utilisés seule pour aborder les problèmes de décision.

Dans (Greco et al., 2005), les auteurs présentent une approche appelée DRSA (Dominance based Rough Set Approach) basée sur un ensemble des règles de décision et le principe de dominance pour l'aide à la décision.

L'auteur dans (Chakhar, 2006) propose un système à base de règles pour choisir la méthode d'AMC appropriée afin de résoudre le problème de décision proposé. Dans cette proposition les règles couvrent trois catégories de faits: i) les caractéristiques du problème lui même, ii) les caractéristiques du décideur et iii) les caractéristiques de la méthode candidate. La simplicité de modélisation par des règles, facilite la formulation des connaissances pour les experts.

L'auteur dans (Frakling, 1996) à développé le système « StocDech » qui est un outil d'aide à la décision pour la recherche de sites de stockage de déchets en combinant la méthode Electre I et la somme pondérée avec une base de règles de décision, un extrait de 3 règles (R1, R2, R3) de ce système est présenté ci-dessous

R1 : Si Géologie geolap= geolap7 & proximité d'util de marne
=5<=d<=10 Km

Alors géologie globale= « Bon »

R2 : Si longueur de ruisseaux = aucune & densité de sources
privées= aucune

Alors hydrographie = bon

R3 : Si proximité de fournisseurs de déchets spéciaux =
favorable

Alors accès = bon

Dans ce projet, l'auteur a signalé le problème de l'explosion du nombre des règles en proportion avec l'augmentation du nombre des critères.

(Khalid, 2003) a aussi utilisé un système expert basé sur les règles de production, les SIG et l'AMC pour la sélection des sites. L'auteur a utilisé la technologie COM (component object model) pour l'intégration des trois outils en assurant l'interopérabilité.

Il semble avantageux de combiner les techniques de l'AMC avec la modélisation des connaissances par les règles de décision. Une base de règles peut servir comme un filtre pour un prétraitement des critères et par conséquent, la réduction de leur nombre.

4.3 Approche globale proposé

Nous présentons dans cette section l'aspect principal de notre contribution détaillée dans les points suivants :

4.3.1 Processus de sélection des zones :

Selon la politique de sélection des zones industrielles menée par les autorités, nous avons proposé un processus en quatre étapes : sélection politique, sélection géographique par l'analyse d'aptitude, étape de rangement des zones retenues et l'étape d'aménagement. Ces étapes sont illustrées dans la Figure 4.2.

- Sélection politique : Dans ce niveau, plusieurs sites dans chaque wilaya sont proposés à une délibération politique par une commission ministérielle, pour le choix des wilayas et la proposition du nombre des zones à installer dans les wilayas retenues. Des critères politiques sont utilisés à ce niveau comme : l'équilibre régional, le développement du sud, l'aptitude de certaines wilayas pour des industries favorables à l'orientation économique du pays.
- Sélection géographique par l'analyse d'aptitude : Des critères booléens sont utilisés pour éliminer les zones qui présentent des dangers clairs à l'égard des citoyens et de l'environnement comme par exemple : l'exclusion des zones situées à 300 m seulement du bâti existant, sur des pentes d'inclinaison supérieur à 15%, au dessus d'une ligne de transport d'électricité de haute tension, ou sur des régions de protection des eaux souterraines.
- Etape de rangement des zones retenues : Un mélange de critères, socio-économique et environnementaux est utilisé pour le rangement des zones industriels de l'ouest Algerien. Cette étape est réalisée dans le cadre des travaux de cette thèse
- Etape d'aménagement : Plusieurs variantes architecturale et technique sont proposées pour l'aménagement des zones retenues. Le rang issu de l'étape précédente est un critère déterminant en plus d'autre critère comme les frais d'aménagement, le délai...

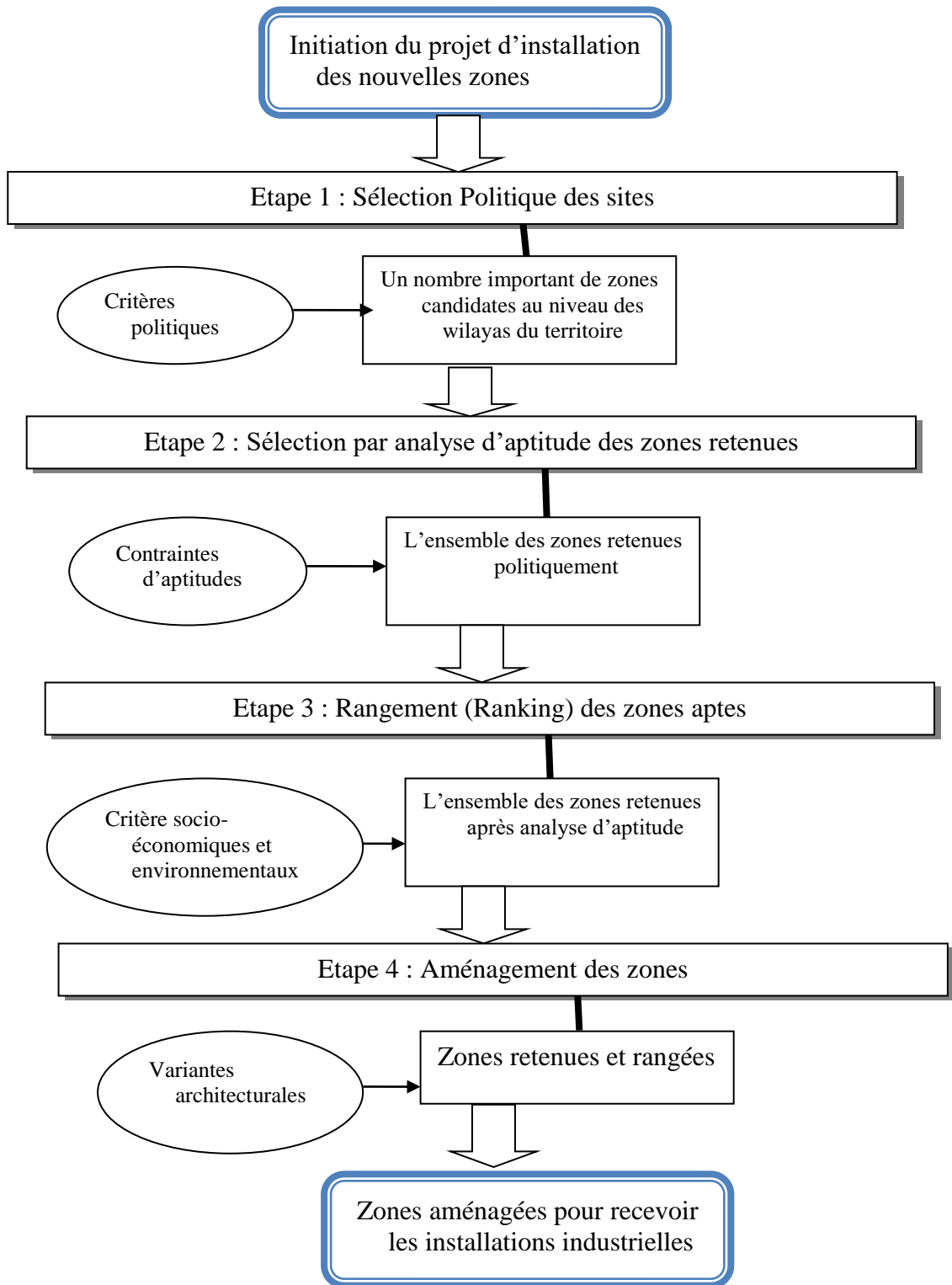


Figure 4.2. Processus de sélection de zones industrielles en Algérie.

4.3.2 Le rangement des zones industrielles

Le rangement (Ranking) des zones industrielles, l'objet principal de ce travail constitue la troisième étape du processus de sélection. Le mode d'intégration utilisé est explicité dans cette section, en suite l'approche proposée pour le rangement est présentée.

4.3.2.1 L'intégration SIG-FAHP pour le rangement

Comme mentionné dans le chapitre3, (Chakhar, 2006) recense quatre modes d'intégration : (i) pas d'intégration, (ii) intégration indirecte, (iii) intégration encastrée et iv) intégration complète. Dans notre approche on propose une intégration mixte: la cartographie et l'analyse des critères géographiques est faite indépendamment de l'AMC (pas d'intégration) alors que la visualisation des résultats est intégrée directement dans le module d'AMC (intégration complète) (Figure 4.3).

Cette intégration mixte donne plus de flexibilité à toutes les parties prenantes pour la prise en charge du caractère géographique des données.

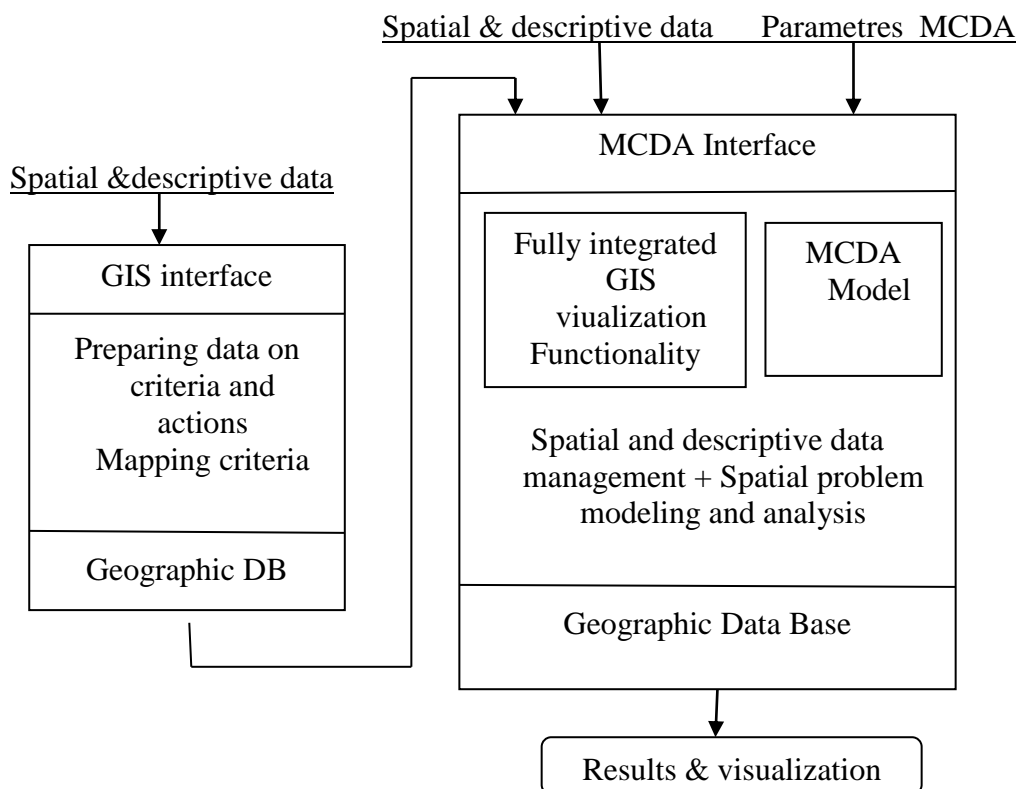


Figure 4.3. Mode d'intégration proposé.

4.3.2.2 L'approche proposée pour le rangement

L'approche proposée pour le rangement est illustrée dans la Figure 4.4, elle consiste en deux phases principales: phase d'analyse (screening) et phase évaluation.

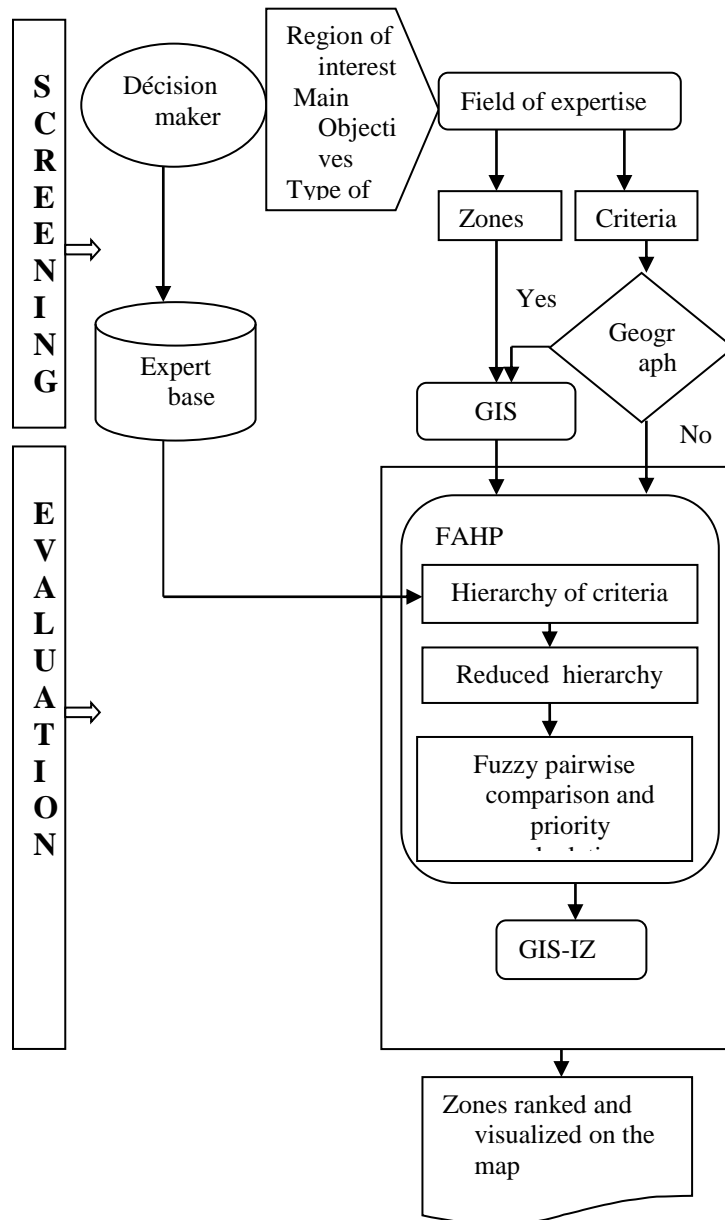


Figure 4.4. L'approche proposée.

▪ Phase d'analyse

Après la deuxième étape du processus de sélection, l'analyse des zones retenues commence par la collecte des deux genres de données géographiques et thématiques de ces zones. Les sources de données sont les bases de données géographiques, socio-économiques et climatiques ainsi que les archives des régions disponibles. Les cartes critères sont construites en utilisant les SIG indépendamment de l'AMC. Un domaine d'expertise sur les zones et les critères est mis à la disposition des parties concernées par la décision.

Une base de règles qui modélisent des connaissances sur les zones (Climat, environnement,...) est construite par les experts du domaine. L'objectif étant la réduction du nombre de critères avant l'agrégation par les méthodes d'AMC.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

▪ Phase d'évaluation

C'est le rangement total des zones par la combinaison de la méthode AHP, de la logique floue et d'une base de règle spécifique au problème à traiter (dans ce cas, le problème de rangement des zones industrielles). La visualisation est assurée par une fonction géographique incluse dans le module d'agrégation FAHP. La réduction des critères ainsi que la fuzzyfication sont explicitées ci-dessous :

a) Réduction des critères

La procédure AHP nécessite six étapes essentielles (Saaty, 2008), (Lee et al., 2008) :

1. Définition du problème
2. Représentation du problème par une structure hiérarchique
3. Construction des matrices de comparaison par pair
4. Calcul des poids relatifs
5. Etude de la consistance
6. Obtention des rangs finaux

Après la hiérarchisation du problème, les critères techniques permettant l'utilisation d'une expertise objective sont réduits en utilisant les règles de décision. Ces règles qui modélisent des données de certains critères sont utilisées comme un filtre pour les critères en input des méthodes d'AMC (Figure 4.5). Cette opération permet :

- Une réduction considérable de la hiérarchie du problème et par conséquent le nombre de matrices de comparaison par paires. A remarquer que le nombre élevé d'éléments dans la hiérarchie du problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paire ce qui augmente la complexité et l'incohérence.

La réduction des critères techniques en critères ayant une importance subjective convient à la méthode AHP qui est considérée comme une méthode subjective.

Ainsi une étape nommée "réduction de la hiérarchie" est ajoutée après l'étape 2.

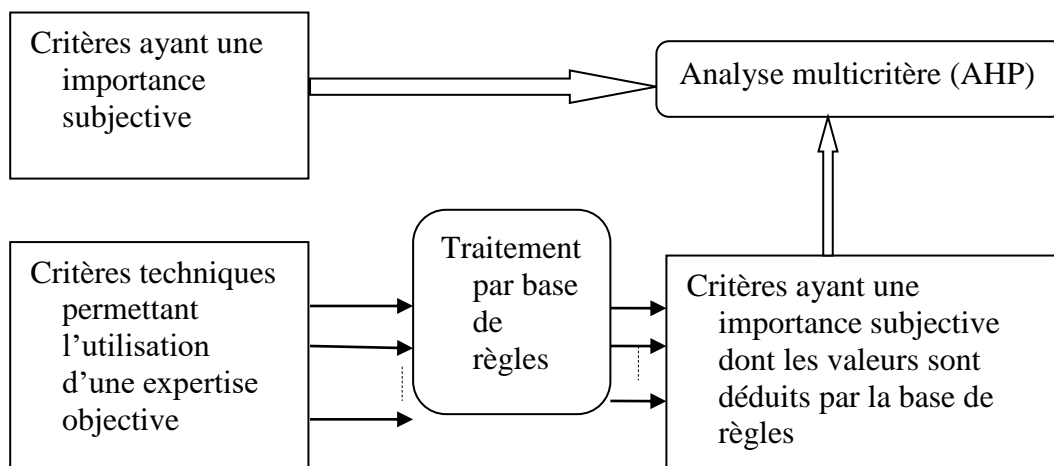


Figure 4.5. Réduction des critères par la base de règles.

- #### b) Fuzzyfication des matrices de jugements : La fuzzyfication est introduite pour les raisons suivantes :

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

- Elle donne aux décideurs l'opportunité d'exprimer leurs opinions « floues » en termes de nombres flous (**Van Laarhoven et Pedrycz , 1983**).
- Les décideurs préfèrent s'exprimer en langage naturel (**Lee et al., 2013**)
- Il est plus pratique de considérer les intervalles de jugements au lieu des valeurs fixes (**Jia et al., 2013**)
- Les valeurs fixes ne reflètent pas la réflexion floue et imprécise des décideurs (**Kutlu et Ekmekçioğlu, 2012**).
- Des comparaisons précises des alternatives par pairs est difficile (**Dubois, 2011**)

Les données en INPUT d'AHP sont les matrices de comparaison binaire (matrices de jugement). Ces matrices sont carrée réciproque avec la diagonale égale à 1, elles sont de la forme :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

a_{ij} représente le ratio de la comparaison entre l'élément i et j , selon l'échelle de 9 points de Saaty. Le décideur est chargé de donner ces jugements (a_{ij}) dans les limites de l'échelle. Généralement ces ratios sont entachés d'incertitude d'hésitation liée à la subjectivité humaine.

Pour remédier à ce problème, beaucoup d'auteurs ont étendu AHP par les techniques de la logique floue ce qui a conduit à plusieurs extensions (FAHP) comme : (**Ming-Shin et al., 2006**); (**Leung et Cao, 2000**); (**Chang, 1996**); (**Cheng, 1996**); (**Hepu Deng, 1999**); (**Chang, 1992**); (**Buckley, 1985**); (**VanLaarhoven et Pedrycz, 1983**). L'extension de Chang (**Chang, 1996**) explicité dans la section précédente est adoptée dans les travaux de cette thèse.

Les matrices de comparaison obtenues sont fuzzifiées en utilisant l'échelle présentée dans le tableau 4.1, cette échelle est inspirée de l'échelle de Saaty fuzzifiée proposé par (**Hepu Deng ,1999**) et selon les orientations des décideurs de l'ANIREF, cette échelle est présentée dans le tableau 4.2.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

Tableau 4.1. Les TFNs utilisées pour la fuzzyfication des matrices de comparaison par pairs.

Linguistic variables	TFNs	Reciprocal TFNs
Extreme strongly preferred	(7,9,9)	(1/7,1/9,1/9)
Intermediate	(6,8,9)	(1/6,1/8,1/9)
Very strongly preferred	(5,7,9)	(1/5,1/7,1/9)
Intermediate	(4,6,8)	(1/4,1/6,1/8)
Strongly preferred	(3,5,7)	(1/3,1/5,1/7)
Intermediate	(2,4,6)	(1/2,1/4,1/6)
Moderately preferred	(1,3,5)	(1,1/3,1/5)
Intermediate	(1,2,4)	(1,1/2,1/4)
Equally preferred	(1,1,1)	(1,1,1)

Tableau 4.2. Echelle de Saaty fuzzyfiée selon (Hepu Deng ,1999).

Fuzzy number	Membership function
$\bar{1}$	1,1,3
\bar{x}	$x - 2, x, x + 2$ for $x = 3,5,7$
$\bar{9}$	7,9,11

L'analyse FAHP selon l'extension de Chang explicité dans la section précédente est utilisée pour le calcul des poids et par conséquent le rang flou de chaque action. Afin de ramener la valeur floue exprimée par des (TFN) de 3 dimensions représentant le rang flou en un réel d'une seule dimension (rang finale d'une zone), nous procédons à la défuzzification. Avec la concertation du décideur, nous avons utilisé tout simplement la fonction moyenne pour défuzzifier.

Pour le poids flou (l, m, q) le poids final est donné par la formule : $(l + m + q)/3$.

4.4 Système d'Aide à la Décision Spatial (SDSS)

En s'inspirant de l'Architecture générale du Système d'Aide à la Décision proposé par **Guisseppi et Forigionne (2009)** et **Chakhar et Martel (2004)**, en prenant en compte l'aspect géographique des données. L'architecture du système proposé dans cette thèse est illustrée dans la figure 4.6.

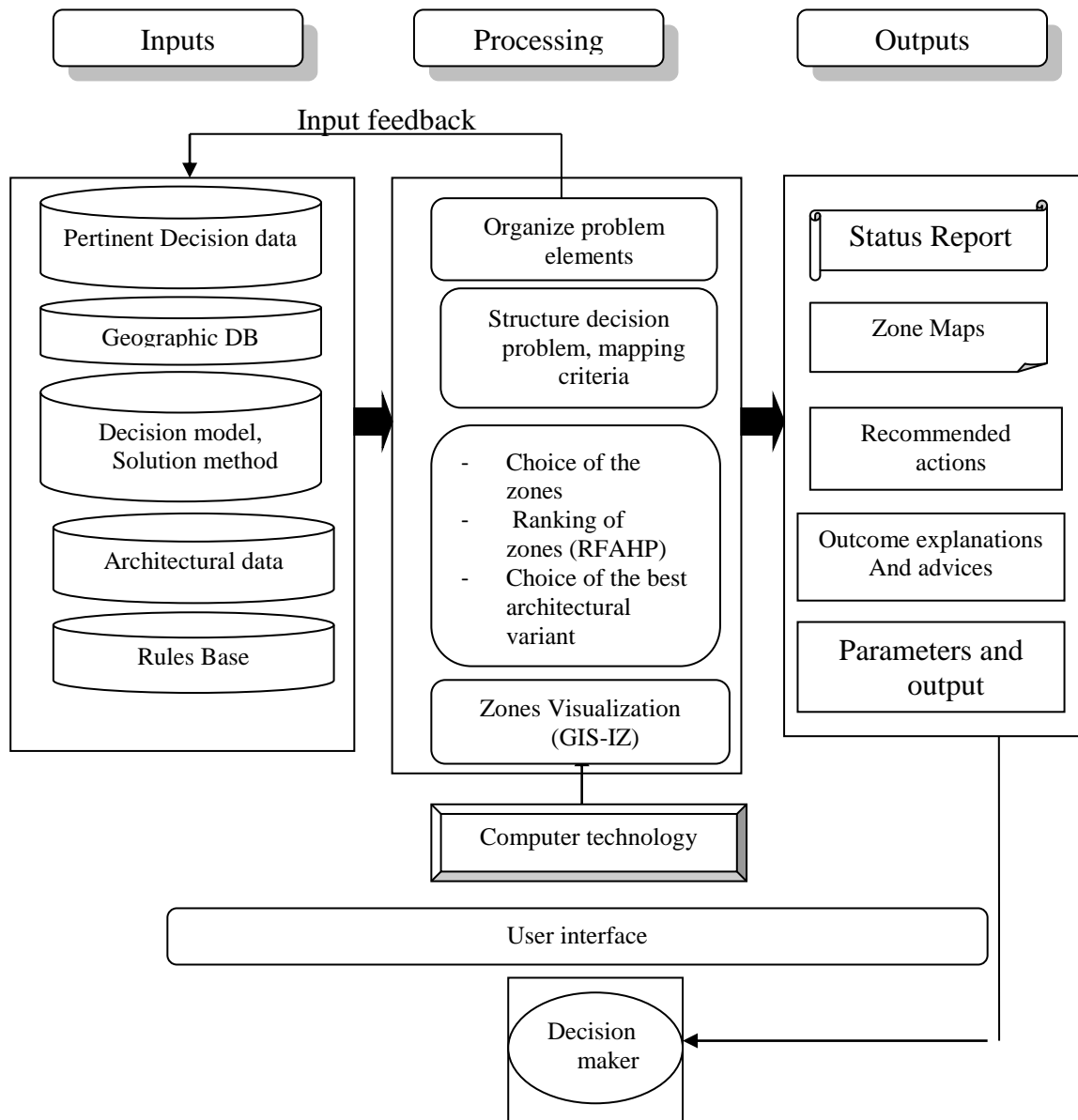


Figure 4.6. Architecture du système d'aide à la décision spatiale proposé.

4.4.1 Input du SDSS

Les données nécessaires sont : les données décisionnelles pertinentes, les données concernant les critères géographiques et les actions qui peuvent être introduites à partir des bases de données géographiques disponibles ou même à partir des archives sur le climat, sur la géologie, sur l'hydrologie ... des régions concernées. Le décideur accède via une interface utilisateur pour accéder aux bases de données ou exécuter les traitements.

4.4.2 Les traitements

Le traitement se fait en trois phases et concerne les trois dernières étapes dans le processus de décision, la préparation des données pour la visualisation se fait aussi dans ce module.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

- Première phase (choice of the zones): Dans cette phase, l'aptitude des zones candidates est déterminée, les zones non aptes sont éliminées. L'aptitude zonale est définie par les propriétés d'une zone ou d'un objet spatial à répondre à un besoin, à satisfaire des conditions préalablement établies ou à être favorable au développement d'un phénomène donné (Caloz et Collet, 2011).

Il y a beaucoup de questions qui concernent l'aptitude zonale dont les réponses sont complexes et nécessitent une aide à la décision, comme par exemple : Comment établir un plan communal ? Quelle est l'aptitude d'une zone pour implémenter des industries ? Quelles sont les zones sismiques d'un pays ?.... Le champ d'investigation d'une analyse spatiale d'aptitude et d'une démarche d'aide à la décision associée, repose sur la contribution de chacun des dimensions de l'information géographique disponible (Caloz et Collet, 2011) :

- Dimension thématique : les propriétés a-spatiales impliquées dans l'analyse des zones.
- Dimension géométrique : les propriétés de taille, de forme et de voisinage par la topologie des zones.
- Dimension spatiale : Les propriétés combinées thématique et géométrique des zones.
- Dimension temporelle : L'évolution dans le temps sur le plan géométrique et thématique des zones.

L'aptitude d'une zone s'exprime par sa capacité à satisfaire un objectif, l'indice qui exprime l'aptitude est soit binaire (zone apte ou inapte) ou sous forme d'un degré d'aptitude formulé selon une échelle de mesure. Par exemple, une zone j ne peut satisfaire l'installation d'une décharge seulement si sa pente est inférieure à 20° , ainsi l'indice d'aptitude est noté par $C_{slope,j}$, la règle d'aptitude est noté par :

$$\text{Si } C_{slope,j} < 20^\circ \text{ alors } 1 \text{ (apte) sinon } 0 \text{ (inapte)}. \quad (4.12)$$

Un indice d'aptitude peut être calculé par la combinaison de plusieurs critères, l'indice qui synthétise l'aptitude d'une zone j est l'intersection logique de tout les critères, noté ainsi :

$$I_{apt,j} = C_{1,j} \cap C_{2,j} \cap \dots \cap C_{k,j} \quad (4.13)$$

$C_{k,j}$ est la valeur d'aptitude binaire de la zone j selon le critère K .

- Deuxième phase : c'est l'objectif de ce travail, qui consiste à intégrer un ensemble de règles de décision, les SIG et FAHP pour développer un rangement total des zones aptes.
- Troisième phase : Consiste à choisir une des trois variantes architecturales réalisé par les architectes de l'ANIREF, les critères de sélection sont : l'architecture, le coût d'aménagement, la nature de l'investissement etc.
- La visualisation : Le module GIS-IZ assure la visualisation des zones sur la carte géographique avant et après chaque phase décisionnelle. Pour accomplir cette tâche, le mode vecteur est utilisé, chaque zone est une entité géographique représenté par le type abstrait de donnée spatial "POINT", elle est représenté sur carte à l'aide de ses coordonnées spatiales (latitude et longitude) en utilisant Geo-Tools en trois étapes :
 - 1- Introduire le fichier d'extension shapefile (SHP) qui caractérise la carte géographique de l'Algérie
 - 2- Introduire un autre fichier d'extension shapefile (SHP) qui caractérise la carte géographique des zones industrielles.

3- Faire une superposition (Overlay) des deux cartes géographiques.

4.4.3 OUTPUT du SDSS

Le module GIS-IZ assure l'affichage des zones par leur rang et selon leurs références spatiales sur la carte géographique de l'Algérie, (Figure 4.7).

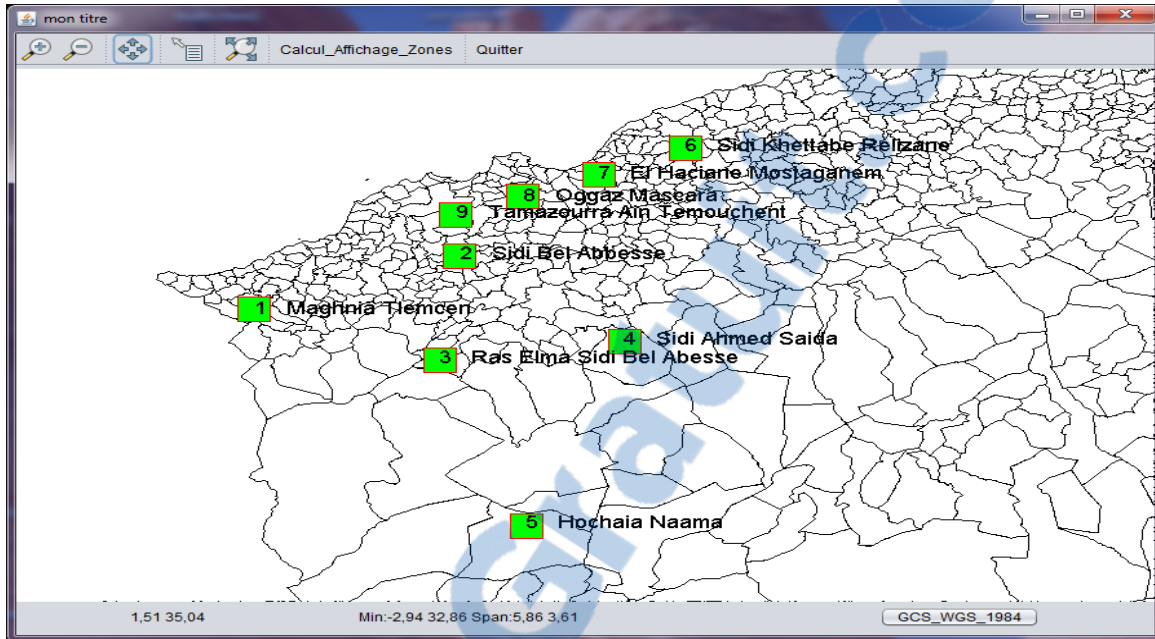


Figure 4.7. Interface de visualisation.

4.5 Application au rangement des zones industrielles en Algérie

4.5.1 Programme des nouvelles zones

Les pouvoirs publics ont confié à l'ANIREF un ambitieux programme d'aménagement de 49 nouveaux parcs industriels totalisant une superficie de 11.622 ha repartis à travers 39 wilayas qui couvrent 9 espaces de programmation territoriale du SNAT (Schéma National d'aménagement du territoire), la figure 4.8 illustre la localisation géographique de ces sites. Ces infrastructures sont conçues dans un objectif de:

- Structuration du territoire,
- Promotion de l'investissement productif,
- Vecteur de développement local,
- Mise en synergies des acteurs et des filières,
- Confortement de la politique d'équilibre régional.

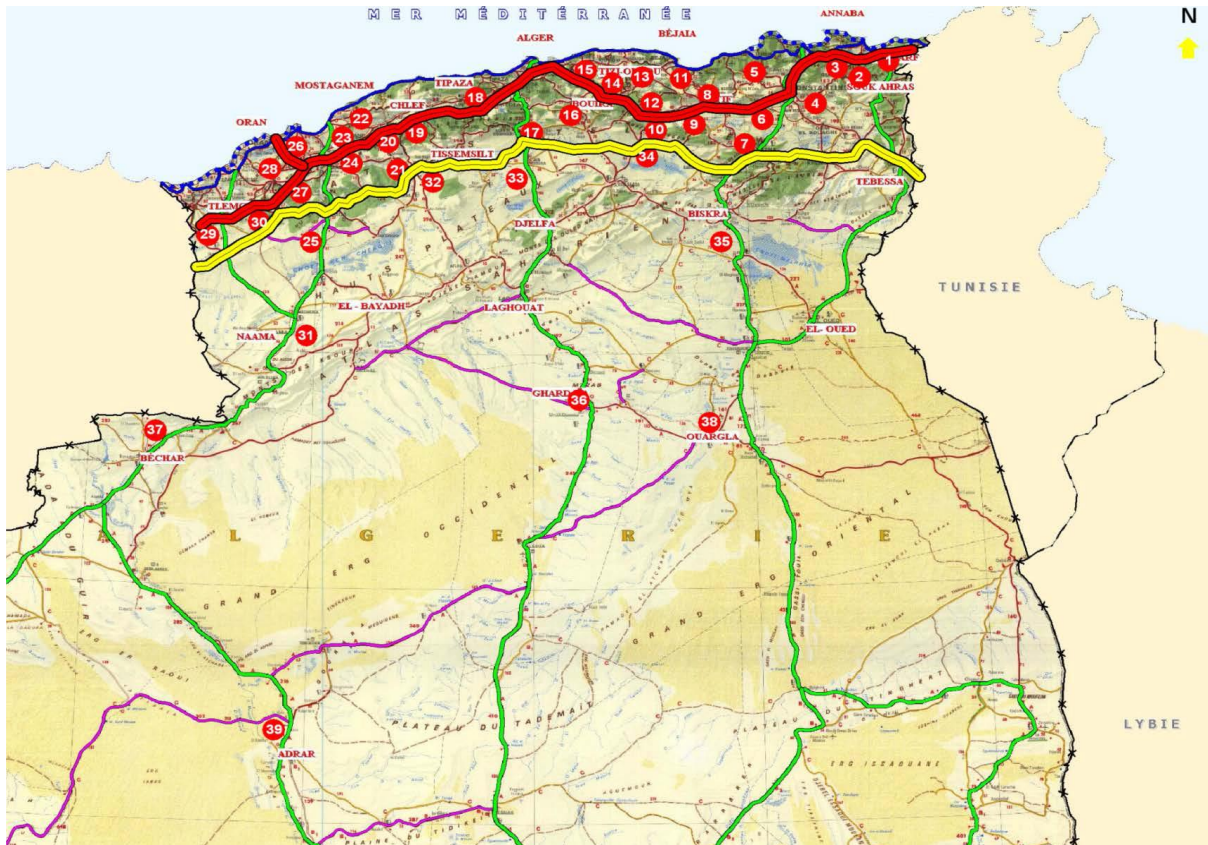


Figure 4.8. Localisation géographique des zones industrielles programmées.

4.5.2 Les enjeux du programme :

Les enjeux du lancement des 49 nouvelles zones industrielles prévues se résument dans les points suivants :

- Créer un climat des affaires de classe mondiale comme le modèle chinois de la zone de Shenzhen avec une administration indépendante et spécifique à ces zones. Concevoir et mettre en place rapidement des parcs industriels pour l'établissement des pôles de compétitivité. Ces parcs pourront être des laboratoires d'efficacité administrative en y appliquant des processus fluides et un environnement des affaires de classe mondiale.
- Une fois le savoir-faire en matière d'administration de ces zones consolidé, il pourra être étendu à tout le territoire.

4.5.3 Le rangement des zones

Notre étude c'est porté sur quelques zones de l'ouest. Chaque zone est une action (alternatives) en langages d'AMC, des critères socio-économiques et environnementaux, des contraintes naturelles et climatiques ont été proposés comme base de rangement.

4.5.3.1 Les actions

Les zones industrielles (Actions) à étudier sont : Action1 (A1): SBA, Action2 (A2): Horchaia, Action3 (A3): Ras Elma, Action4 (A4): Maghnia, Action5 (A5): Kolea.

4.5.3.2 Les critères

Les critères utilisés dans cette étude sont classifiés en quatre catégories : Risques naturels (Cr1), Socio-économiques (Cr2), Impact Environnemental (Cr3) et les caractéristiques Climatiques Cr4). Selon ces quatre catégories, 11 critères ont été définis, la figure 4.9 illustre la structure hiérarchique du problème de rangement des zones industrielles selon la méthode AHP.

(Cr11): pollution des nappes sous terraines.

(Cr12): Protection faune et flore.

(Cr13): Nuisances sonores des citoyens.

(Cr21): sismicité.

(Cr22): inondation.

(Cr31): Température.

(Cr32): pluviométrie.

(Cr33): étages bioclimatiques.

(C41): cout d'aménagement.

(Cr42): potentialités d'équipement et de développement.

(Cr43): Infrastructure du transport.

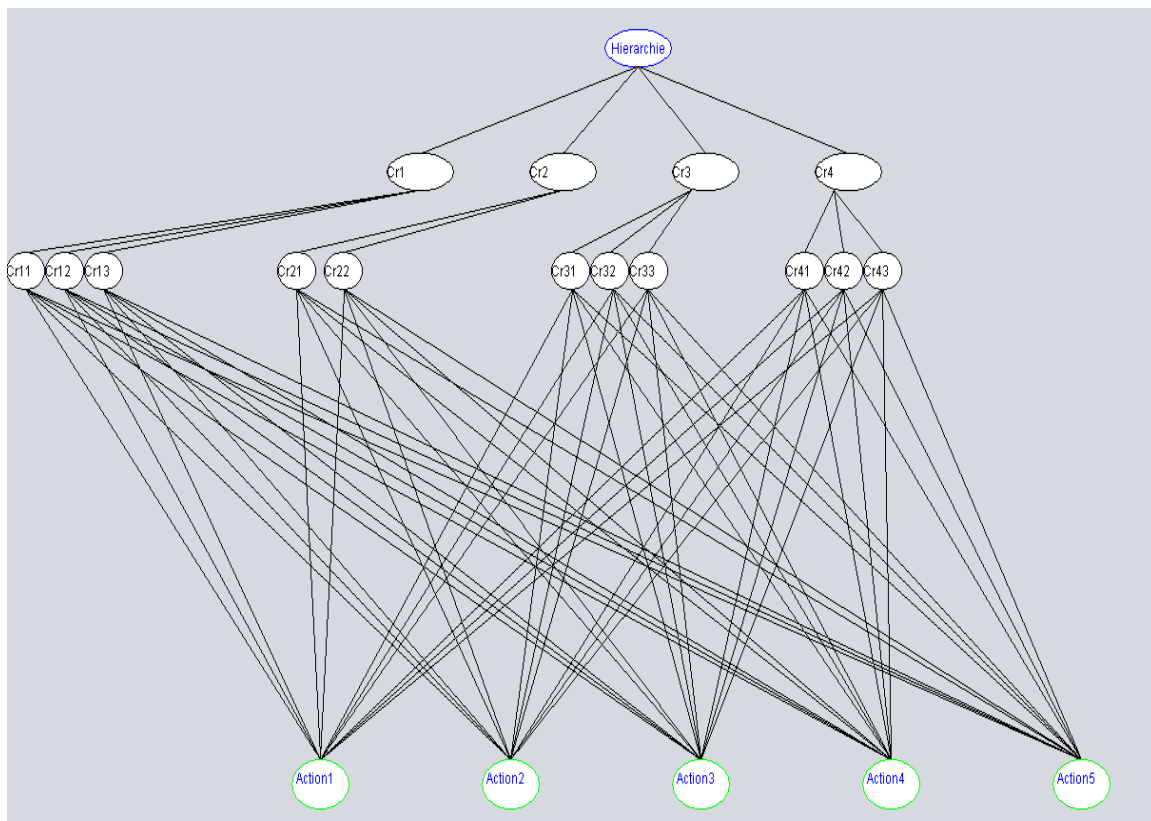


Figure 4.9. Structure de la hiérarchie du problème incluant l'arborescence des critères.

La majorité des critères sont géographiques comme le montre les figures 4.10 et 4.11. Le décideur ou l'analyste utilise la technique d'OVERLAY ou de superposition des cartes thématiques des critères avec la carte de position géographique des zones pour donner ces

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

jugements en ratio, selon l'échelle de Saaty. Pour le critère non géographique il peut se référer à la table de performance dans (Taïbi et Atmani, 2016).

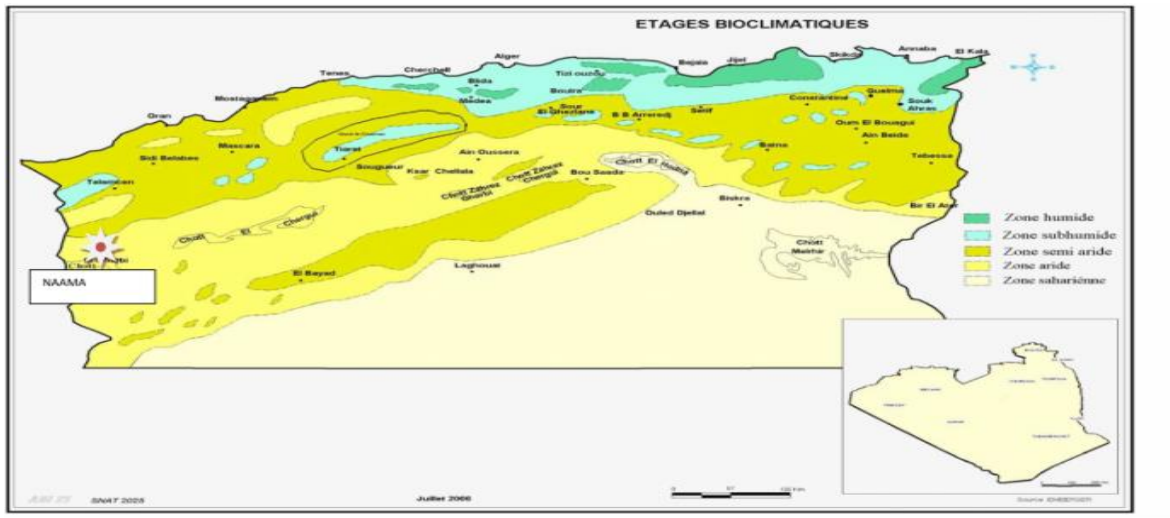


Figure 4 .10. Étages bioclimatiques de d'Algérie.

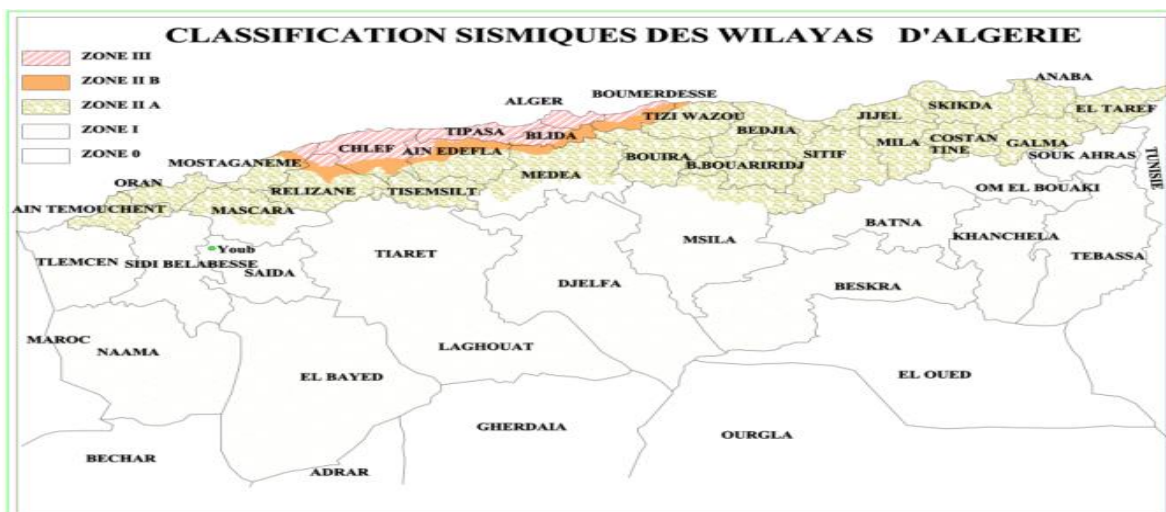


Figure 4 .11. Classification sismiques des wilayas d'Algérie.

4.5.3.3 La base de règles

La base de règles est spécifique pour le problème de sélection des zones industrielles. Lors de la construction de cette base, nous avons rencontré les problèmes suivants :

- Le nombre de règles nécessaires pour traiter le problème augmente en proportion avec l'augmentation du nombre des critères.
- Le nombre de prémisses pour chaque règle augmente en proportion avec les valeurs possibles des critères.
- Des difficultés pour assurer la cohérence et la complétude des règles.

Pour surmonter ces problèmes, des règles plus générales sont considérées et des intervalles sont utilisés comme prémisses de règle au lieu des valeurs simples.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

Ci-dessous l'ensemble de règles :

1. Règles selon le critère : Impact Environnemental (Cr1)

Structure de la règle :

En conclusion de la règle, l'impact environnemental (Cr1) peut être strong, low ou moderate.

Les prémisses de la règle contiennent une combinaison des valeurs des critères suivants:

(Cr11): pollution nappe sous terrain (présent, absent)

(Cr12): Problème de la phytologie et de flore (existant, inexistant)

(Cr13): Nuisance citoyens (strong, low)

Règles proposées :

R1: If (Cr11= present) and (Cr12= exist) and (Cr13= strong) Then Cr1= strong.

R2: If (Cr11 = present) and (Cr12 = inexistant) and (Cr13= strong) Then Cr1 = strong.

R3: If (Cr1=absent) and (Cr2= inexistant) and(Cr3= low) Then Cr1 = low. In other cases, Cr1 = moderate.

2. Règles selon le critère : Risques naturels (Cr2)

Structure de la règle :

En conclusion de la règle, le risque naturel (Cr2) peut être strong, low ou moderate.

Les prémisses de la règle contiennent une combinaison des valeurs des critères suivants:

(Cr21): Sismicité (low to moderate, low, strong)

(Cr22): Inondation (low, moderate, strong)

Règles proposées :

R1: If (Cr21 = low to moderate) and (Cr22 = moderate) Then Cr2 = moderate.

R2: If (Cr21 = strong) and (Cr22 = strong) Then Cr2 = strong.

R3: If (Cr21 = strong) and (Cr22 = moderate) Then Cr2 = strong.

R4: IF (Cr21 = strong) and (Cr22 = low to moderate) Then Cr2= strong.

R5: If (Cr21 = low and Cr22= low to moderate) Then Cr2 = moderate.

Dans les autres cas, Cr2= moderate.

Règles selon le critère : caractéristiques climatiques (Cr3)

Structure de la règle :

En conclusion de la règle, les caractéristiques climatiques (Cr3) peuvent être favorable, unfavorable or little favorable.

En prémisses des règles, une combinaison des valeurs de critères suivants:

(Cr31): température (valeur numérique)

(Cr32): pluviométrie (intervalle numérique)

(Cr33): étage Bioclimatique (Arid, Semi Arid).

Règles proposes:

R1: If (15 < Cr31 < 20)and(50<Cr32<200)and(Cr33 =semiarid) Then Cr3= favorable.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

R2: If $(15 < Cr31 < 40)$ and $(Cr32 < 400)$ and $(Cr33 = \text{semi arid})$ Then $Cr3 = \text{favorable}$.

R3: If $(Cr31 < 10)$ Then $Cr3 = \text{unfavorable}$.

R4: If $(Cr31 > 50)$ Then $Cr3 = \text{unfavorable}$.

Dans les autres cas, $Cr3 = \text{little favorable}$

3. Règle selon le critère socio-économique (Cr4)

Structure de la règle :

En conclusion de la règle, le critère socio économique (Cr4) peut être : very favorable, favorable, little favorable or unfavorable.

Les prémisses des règles contiennent une combinaison des valeurs de critères suivants:

(Cr41): Frais d'aménagement (valeur numérique)

(Cr42): Potentialité de développement (encouraging, not encouraging, little encouraging).

(Cr43): Infrastructure de transport (available, few available, unavailable)

Les règles proposées :

R1: If $(Cr41 > 3E+9)$ and $(Cr42 = \text{not encouraging})$ $(Cr43 = \text{Few available})$ Then $Cr4 = \text{unfavorable}$.

R2: If $(Cr41 > 3E+9)$ and $(Cr42 = \text{encouraging})$ and $(Cr43 = \text{few available})$ Then $Cr4 = \text{few favorable}$.

R3: If $(Cr41 > 3E+9)$ and $(Cr42 = \text{encouraging})$ and $(Cr43 = \text{available})$ Then $Cr4 = \text{favorable}$.

R4: If $(15E+8 < Cr41 < 3E+9)$ and $(Cr42 = \text{encouraging})$ and $(Cr43 = \text{few available})$ Then $Cr4 = \text{favorable}$

R5: If $(Cr41 < 15E+8)$ and $(Cr42 = \text{encouraging})$ and $(Cr43 = \text{available})$ Then $Cr4 = \text{very favorable}$.

R6: If $(Cr41 < 15E+8)$ and $(Cr42 = \text{not encouraging})$ and $(Cr43 = \text{unavailable})$ Then $Cr4 = \text{not favorable}$.

R7: If $(Cr41 < 1E+9)$ and $(Cr42 = \text{not encouraging})$ and $(Cr43 = \text{available})$ Then $Cr4 = \text{very favorable}$.

Après exécution d'un seul chaînage en avant la hiérarchie du problème devient de la forme illustrée dans figure 4.12.

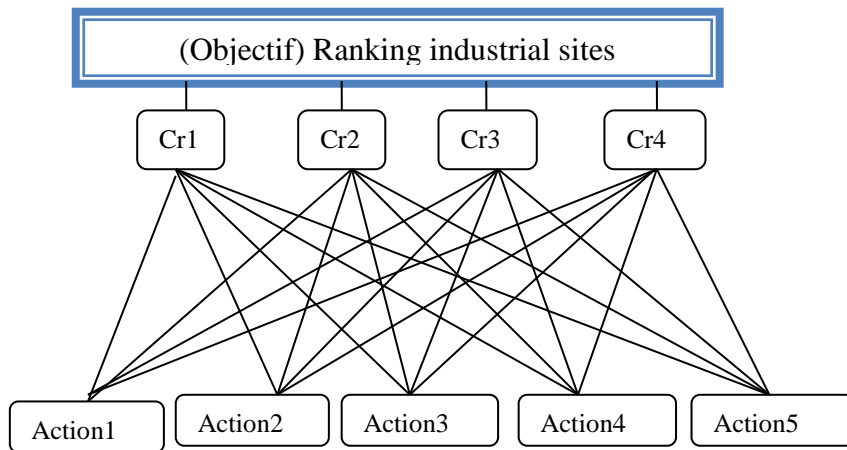


Figure 4.12. Hiérarchie après réduction des critères.

4.5.3.4 Les comparaisons par pair

Selon la hiérarchie illustrée par la figure 4.14, le décideur doit donner ses jugements dans la limite de l'échelle de Saaty, sous forme de 5 matrices de comparaison par pair, la première est destinée à comparer tout les critères par rapport à eux même selon l'objectif, les quatres dernières sont destinés a comparer les actions par rapport à elle-même selon chacun des quatre critères.

Les matrices obtenues sont fuzzyfiée et illustrées dans le tableau 4.1.

Le calcul des priorités se fait sur les matrices fuzzifiées selon l'extension flou de Chang (**Chang, 1996**) discuté dans le paragraphe précédent.

Les rangs flous obtenu en résultat d'analyse vont être defuzzyfiées . La Figure 4.13 illustre le processus de fuzzyfication des matrices de comparaison par pair et la defuzzyfication des rangs obtenus après l'analyse.

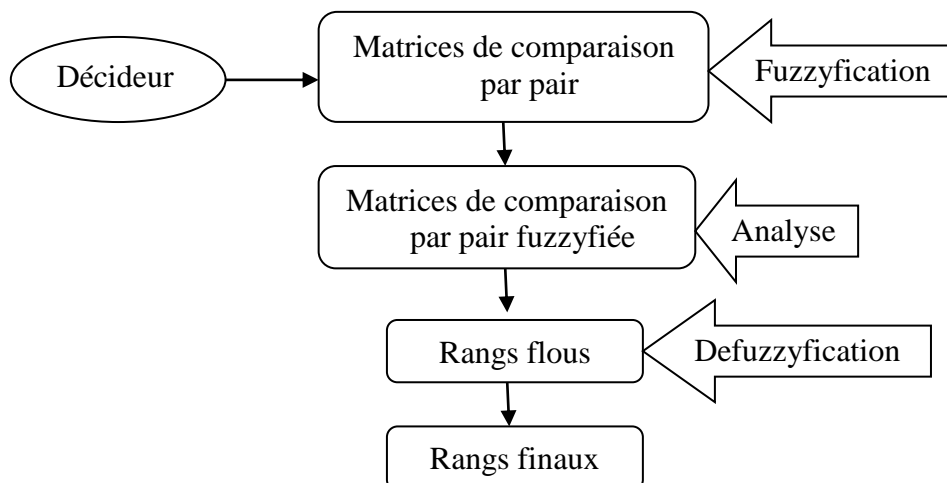


Figure 4.13. Fuzzification/Défuzzification des matrices de comparaison par pair.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

La matrice de comparaison par pair des critères de jugement pour la sélection des zones industrielles est présentée dans le tableau 4.3

Tableau 4.3. Matrice de comparaison par pair des critères principaux.

Criterion	Env-impact (Cr1)	Nat-risk (Cr2)	Climate (Cr3)	Soc-eco (Cr4)
Env-impact(Cr1)	1	5	3	1/3
Nat-risk(Cr2)	1/5	1	1/3	1/7
Climate(Cr3)	1/3	3	1	5
Soc-eco(Cr4)	3	7	1/5	1
Total	4,53	16	4,53	6.47

La matrice de comparaison par pair présentée dans le tableau 4.3 est fuzzyfiée selon l'échelle proposé, le résultat est présenté dans le tableau 4.4

Tableau 4.4. Matrice de comparaison par pair fuzzyfiées pour les critères de Jugements.

Criterion	Env-impact (Cr1)	Nat-risk (Cr2)	Climate (Cr3)	Soc-eco (Cr4)
Env-impact(Cr1)	(1,1,1)	(2,5,7)	(1,3,5)	(1/5,1/3,1/2)
Nat-risk(Cr2)	(1/7,1/5,1/3)	(1,1,1)	(1/5,1/3,1/2)	(1/9,1/7,1/5)
Climate(Cr3)	(1/5,1/3,1/2)	(2,3,5)	(1,1,1)	(3,5,7)
Soc-eco(Cr4)	(2,3,5)	(5,7,9)	(1/7,1/5,1/3)	(1,1,1)

Les valeurs obtenus selon l'extension AHP sont obtenues en appliquant les équations de 1 à 5 comme le montre les formules suivantes :

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \begin{pmatrix} (4.2; 9.33; 13.5) \\ (1.45; 1.67; 2.03) \\ (6.2; 9.33; 13.5) \\ (8.14; 11.2; 15.33) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} \frac{4.2}{44.26} & \frac{9.33}{31.53} & \frac{13.5}{20} \\ \frac{1.45}{44.26} & \frac{1.67}{31.53} & \frac{2.03}{20} \\ \frac{6.2}{44.26} & \frac{9.33}{31.53} & \frac{13.5}{20} \\ \frac{8.14}{44.26} & \frac{11.2}{31.53} & \frac{15.33}{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.095 & 0.3 & 0.67 \\ 0.03 & 0.053 & 0.10 \\ 0.14 & 0.3 & 0.67 \\ 0.18 & 0.35 & 0.76 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Le dernier pas est consacré à la défuzzyfication des valeurs floues obtenues, la fonction moyenne est utilisée pour cette tâche. Le tableau 4.5 Présente les poids flous et les poids finaux des critères de jugement.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

Tableau 4.5. Rangs des critères de jugement.

Criterion	Fuzzy weight			Crisp weight
Env-impact(Cr1)	0.095	0.3	0.67	0.355
Nat-risk(Cr2)	0.03	0.053	0.10	0.061
Climate(Cr3)	0.14	0.3	0.67	0.37
Soc-eco(Cr4)	0.18	0.35	0.76	0.43

Les matrices de comparaison par pair fuzzifiées de toutes les actions selon Cr1, Cr2, Cr3 et Cr4 sont illustrées dans la tableau 4.6.

Les poids et par conséquent les rangs des actions selon chaque critère séparément sont présentés dans le tableau 4.7.

Tableau 4.6. Matrices de comparaison pour les actions selon les critères Cr1, Cr2, Cr3, Cr4

Cr1	A1	A2	A3	A4	A5
A1	(1,1,1)	(1,3,5)	(1/6,1/4,1/2)	(1/5,1/3,1)	(1/9,1/7,1/5)
A2	(1/5,1/3,1)	(1,1,1)	(1,3,5)	(1/7,1/5,1/3)	(3,5,7)
A3	(2,4,6)	(1/5,1/3,1)	(1,1,1)	(1/9,1/7,1/5)	(3,5,7)
A4	(1,3,5)	(3,5,7)	(5,7,9)	(1,1,1)	(1,2,4)
A5	(5,7,9)	(1/7,1/5,1/3)	(1/7,1/5,1/3)	(1/4,1/2,1)	(1,1,1)
Cr2	A1	A1	A1	A1	A1
A1	(1,1,1)	(1/4,1/2,1)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(2,4,6)
A2	(1,2,4)	(1,1,1)	(1/5,1/3,1)	(1/5,1/3,1)	(1/4,1/2,1)
A3	(1,3,5)	(1,3,5)	(1,1,1)	(1/6,1/4,1/2)	(1,3,5)
A4	(1,3,5)	(1,3,5)	(2,4,6)	(1,1,1)	(1,3,5)
A5	(1/6,1/4,1/2)	(1,2,4)	(1/5,1/3,1)	1/5,1/3,1)	(1,1,1)
Cr3	A1	A1	A1	A1	A1
A1	(1,1,1)	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)	(1/4,1/2,1)
A2	(1/5,1/3,1)	(1,1,1)	(1/4,1/2,1)	(2,4,6)	(1/5,1/3,1)
A3	(1/7,1/5,1/3)	(1,2,4)	(1,1,1)	(1/9,1/7,1/5)	(1/5,1/3,1)
A4	(1/5,1/3,1)	(1/6,1/4,1/2)	(5,7,9)	(1,1,1)	(1/5,1/3,1)
A5	(1,2,4)	(1,3,5)	(1,3,5)	(1,3,5)	(1,1,1)
Cr4	A1	A1	A1	A1	A1
A1	(1,1,1)	(3,5,7)	(4,6,8)	(1/7,1/5,1/3)	(1/5,1/3,1)
A2	(1/7,1/5,1/3)	(1,1,1)	(1/7,1/5,1/3)	(1,2,4)	(5,7,9)
A3	(1/8,1/6,1/4)	(3,5,7)	(1,1,1)	(1,3,5)	(1/6,1/4,1/2)
A4	(3,5,7)	(1/4,1/2,1)	(1/5,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1/7,1/5,1/3)
A5	(1,3,5)	(1/9,1/7,1/5)	(2,4,6)	(3,5,7)	(1,1,1)

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

Tableau 4.7. Poids flous et rang de chaque action selon Cr1, Cr2, Cr3 et Cr4.

Cr1	Fuzzy weight			Crisp weight	Rank
A1	0.032	0.091	0.243	0.122	5
A2	0.0713	0.184	0.45	0.235	4
A3	0.084	0.2	0.48	0.25	3
A4	0.147	0.34	0.82	0.43	1
A5	0.0872	0.34	0.36	0.26	2
Cr2	Fuzzy weight			Crisp weight	Rank
A1	0.11	0.16	0.44	0.23	3
A2	0.041	0.10	0.35	0.1636	4
A3	0.065	0.26	0.73	0.3516	2
A4	0.093	0.36	0.97	0.47	1
A5	0.04	0.10	0.33	0.156	5
Cr3	Fuzzy weight			Crisp weight	Rank
A1	0.092	0.29	0.795	0.3923	1
A2	0.053	0.14	0.42	0.20	4
A3	0.036	0.08	0.27	0.13	5
A4	0.096	0.20	0.52	0.272	3
A5	0.0735	0.27	0.83	0.3911	2
Cr4	Fuzzy weight			Crisp weight	Rank
A1	0.11	0.20	0.53	0.28	2
A2	0.097	0.17	0.45	0.24	3
A3	0.07	0.153	0.42	0.214	4
A4	0.06	0.11	0.30	0.1566	5
A5	0.095	0.21	0.588	0.297	1

Pour calculer le rang final de chaque action A_i ($i = 1...5$) par rapport à l'objectif principal, tous les chemins qui lient chaque action avec l'objectif dans la hiérarchie de la figure 4.14 sont considérés en utilisant la formule :

$$Poid_{Flou}(A_i) = ((Poid_{C_1} \otimes Poid_{C_{1A_i}})(Poid_{C_2} \otimes Poid_{C_{2A_i}}) \oplus (Poid_{C_3} \otimes Poid_{C_{3A_i}}) \oplus (Poid_{C_4} \otimes Poid_{C_{4A_i}}))$$

Par exemple, le poids flou et le poids final de la zone A1 (SBA) sont calculés ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 Poid_{Flou}(SBA) &= \\
 &((0.09 \quad 0.3 \quad 0.67) \otimes (0.03 \quad 0.09 \quad 0.24)) \oplus \\
 &((0.03 \quad 0.05 \quad 0.10) \otimes (0.11 \quad 0.16 \quad 0.44)) \oplus \\
 &((0.14 \quad 0.3 \quad 0.67) \otimes (0.09 \quad 0.29 \quad 0.79)) \oplus \\
 &((0.18 \quad 0.35 \quad 0.76) \otimes (0.11 \quad 0.20 \quad 0.53)) = \\
 &(0.0027 \quad 0.027 \quad 0.1603) \oplus \\
 &(0.0033 \quad 0.008 \quad 0.044) \oplus \\
 &(0.0126 \quad 0.087 \quad 0.53) \oplus
 \end{aligned}$$

(0.02 0.07 0.4028)

$$Poid_{Flou}(SBA) = (0.0386 \quad 0.192 \quad 1.1371)$$

Normalisation

$$\implies Poid_{Floue}(SBA) = (0.028 \quad 0.14 \quad 0.83)$$

De la même manière, les poids et les rangs des actions A₂, A₃, A₄ et A₅ sont calculés et présentés dans le tableau 4.8.

4.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle basé sur l'intégration SIG-AMC, de la logique floue et des règles de décision pour bien mesurer la localisation des zones industrielles. Nous avons proposé au décideur un processus de décision en quatre étapes (Sélection politique, Analyse d'aptitude, Rangement et Aménagement) et une approche de rangement en deux phases (Analyse et Evaluation). Les SIG sont utilisés dans les deux phases alors que AHP est utilisée pour l'agrégation multicritère dans la phase d'évaluation. Nous avons essayé d'alléger l'incertitude et le flou qui entachent les données préférentielles par l'introduction de la logique floue. Un filtrage des critères en INPUT d'AHP est proposé pour répondre au problème d'incohérence et de complexité dû à l'utilisation d'un grand nombre de critères.

Dans le tableau 4.8, nous proposons une comparaison entre les rangs obtenus par AHP toute seule intégrée au SIG d'une part et les rangs obtenus par l'application de notre modèle (Intégration de : AHP, SIG, logique floue et Règles de décision) d'autre part.

Tableau 4.8. Résultats obtenus avec AHP toute seule et AHP flou avec prétraitement par base de règles.

Industrial zones	AHP Weights (%)	AHP Ranks	FAHP Weights (%)	FAHP Ranks
SBA (A1)	21.4	3	(2 14 83)	3
Hourchia (A2)	17.02	4	(3 16 95)	1
Koléa (A3)	11.38	5	(2 14 89)	2
Ras Elma (A4)	25.7	1	(2 14 82)	5
Maghnia (A5)	21.50	2	(2 16 81)	4

Le tableau 4.9 ci-dessous présente quelques avantages de notre approche par rapport à AHP toute seule intégrée au SIG.

Chapitre4 : Un rangement basé sur AHP Flou, SIG et règles de décision

Tableau 4.9. Avantage du modèle proposé par rapport à AHP toute seule intégrée au SIG.

AHP toute seule intégré au SIG	FAHP combiné au SIG et règle de décision
Plusieurs itérations avec retour au décideur pour rectifier ces jugements à cause des incohérences dues au grand nombre de matrices de comparaison par pair	Une seule itération donne des résultats cohérents
10 matrices de comparaisons par pair construites	Seulement 6 matrices de comparaison par pair construites
Défaillance pour la prise en charge des informations géographiques	Prise en charge totale des informations géographiques pour les critères et les actions
Hésitation et Difficulté trouvé par le décideur pour donner ces jugements,	L'introduction du flou en termes de trois variables linguistiques donne une certaine souplesse à donner ces jugements

Dans ce chapitre, AHP représente la famille des méthodes d'analyses multicritères d'inspiration anglophone. Ce sont des méthodes utilisant un critère unique de synthèse dont le principe consiste à agréger les performances d'une alternative en un seul critère. Le chapitre suivant est consacré à un modèle basé sur la méthode PROMETHEEII. Cette méthode représente la famille des méthodes de surclassement qui sont d'inspiration francophone et consiste à comparer les alternatives par paires.

Chapitre cinquième

Un rangement basé sur PROMETHEE II intégré au SIG

5.1 Introduction

Nous proposons dans ce chapitre un modèle d'aide à la décision pour la sélection des sites industriels, basé sur l'intégration de la méthode PROMETHEE II avec les SIG. PROMETHEE II est une méthode répandue dite de surclassement que nous avons proposé d'intégrer au SIG pour aider le décideur dans la sélection des sites.

Nous adoptons le mode d'intégration qualifié de mixte proposé dans le chapitre 4. Pratiquement le nombre d'actions (Zones industrielles) est augmentée à 9, parce que les méthodes de surclassement supportent un nombre élevé d'actions. Aucune réduction préalable des critères n'est proposée dans ce modèle, pour cette raison le nombre de critère de jugement adopté est réduit, l'analyse se fait à base de 8 critères.

Après l'étude détaillée de ces critères de nature géographiques, environnementaux et socio-économiques, le système proposé permet la coopération entre les SIG et la méthode PROMETHEE II pour la sélection des sites appropriés à l'installation des zones industrielles. Le résultat obtenu par le module de rangement RPRO (Ranking PROMethee) est affiné par une visualisation réalisé par le module VZI (Visualisation des Zones industrielles).

5.2 Éléments du modèle d'intégration proposé

Dans notre étude (Taibi et Atmani, 2015), (Taibi et Atmani, 2016b), (Taibi et Atmani, 2017c), la méthode PROMETHEE II et les SIG sont combinés pour fournir aux décideurs un modèle de rangement basé sur le principe de surclassement entre les alternatives (Roy, 1985) et le principe de critère généralisé (Brans et Vincke, 1985). Le même mode d'intégration entre les SIG et l'AMC proposé dans le chapitre 4 est adopté, la fuzzyfication des données PROMETHEE est proposé en perspectives.

5.2.1 La méthode PROMETHEE

Nous avons choisi PROMOTHEE pour ce deuxième modèle pour les raisons suivantes

- PROMETHEE est une méthode d'analyse multicritère simple ayant des concepts facile à comprendre et à appliquer, elle permet le rangement partiel (PROMETHEE I) et le rangement total (PROMETHEE II) et elle possède des propriétés conviviales et mathématiques (Brans et Vincke, 1985).
- Elle est utilisée avec succès pour la sélection des sites industriels et la gestion environnementale (Simon et al., 2004).
- C'est une méthode compréhensible par le décideur n'exigeant que peu d'informations de sa part.
- Les résultats obtenus par PROMETHEE sont cohérents et faciles à comprendre (Valentina, 2012).
- Elle est utilisée dans des technologies récentes comme la sélection des solutions Cloud pour accéder aux Big Data (Boutkhoul et al., 2016)
- C'est une méthode qui répond à plusieurs exigences comme :

E1 : L'amplitude des écarts entre les valeurs des actions selon chaque critère est prise en considération par le concept de critère généralisé.

Chapitre5 : Un rangement basé sur PROMETHEE II intégré au SIG

E2 : c'est une méthode facile à comprendre par le décideur et ne constitue pas une boîte noire pour lui.

E3 : C'est une méthode qui n'utilise aucun paramètre technique sans aucune signification pour le décideur.

E4 : c'est une méthode qui prend en charge le caractère conflictuel des critères.

- Etat de l'art sur l'utilisation de PROMETHEE

La méthode PROMETHEE est de plus en plus utilisée dans les travaux de recherche théoriques et dans les applications. Des statistiques récentes faites par **Mareschal , (2017)** montre l'intérêt croissant à cette méthodes, surtout pour résoudre le problème de rangement comme le cas du modèle proposé dans ce chapitre (Figure 5.1).

Parmi les 1552 articles scientifiques utilisant PROMETHEE répertoriés dans La bibliographie réalisée par Bertrand Mareschal (**Mareschal, 2017**) nous citons quelques travaux qui intègrent PROMETHEE au SIG:

- Dans (**Hassan et al., 2016**), PROMETHEE II est utilisée pour ranger les causes de désertification. Les résultats obtenus (les rangs) sont utilisés pour mener à bien les projets de réduction des effets de désertification et de la réadaptation de terrains dégradés.
- Dans (**Hamadouche et al., 2014**) les auteurs appliquent l'approche d'intégration SIG-PROMETHEE pour le souci de préservation de la biodiversité dans le Parc National AHAGAR en Algérie. Ils mettent à la disposition des décideurs un outil nommé SDMA (Spatial Decision Making Aid) dans lequel PROMETHEE est intégré dans le SIG Arcview.
- Les auteurs dans (**Balali et Abbas, 2014**), comparent AHP et PROMETHEE II pour choisir les meilleures techniques dans le domaine du bâtiment, il concluent que PROMETHEE II est la méthode appropriée puisque ses résultats sont cohérents, faciles à comprendre et exigent peu d'informations de la part du décideur.
- Dans (**Dedemen, 2013**), les deux critères : coût et risque sont utilisés principalement pour déterminer le bon chemin pour une ligne de transmission d'énergie en utilisant conjointement AHP et PROMETHEE.
- Les auteurs dans (**Nasiri et al., 2013**) cherchent à la localisation des sites appropriés pour la dispersion des inondations dans le Garabaygan de l'IRAN. Les auteurs proposent un SDMS(Spatial Decision making System) via une intégration de PROMETHEEII et AHP dans un environnement SIG.
- Les auteurs dans (**Shadman et al., 2012**) combinent PROMETHEE II avec FAHP pour explorer la sensibilité au glissement de terrain avec cartographie de la carte LSM (Landslide Susceptibility Mapping). Les auteurs intègrent sept couches thématiques : la pente, l'orientation, la distance à la rivière, la densité de drainage, la pluviométrie, et la distance à la route.
- Dans (**Snjezana et Menad, 2006**), les auteurs soulignent les obstacles causés par la pollution des mines à la relance économique. Ils proposent un DSS (Decision Support System) basé sur l'intégration SIG-PROMETHEE pour déterminer la priorité objective pour réduire les risques causaux des pollutions des mines.

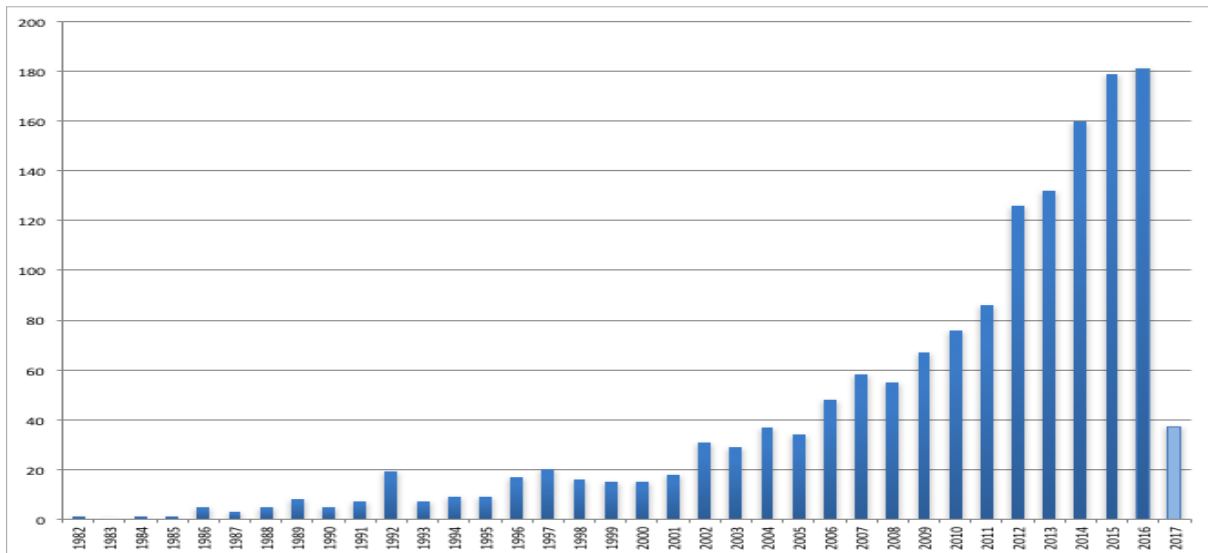


Figure 5.1 Nombre de papiers de recherche utilisant PROMETHEE de 1982 à mars 2017
Source (Mareschal, 2017)

5.2.2 Les SIG

Dans le mode d'intégration mixte proposé dans cette thèse, les SIG sont utilisés :

- Pour la Préparation des critères géographiques afin de permettre des visualisations cartographiques et des analyses spatiales pour l'aide à la construction de la table de performance requise par PROMETHEE. Les SIG commerciaux sont utilisés pour cette fonctionnalité.
- Pour la visualisation des résultats de l'analyse multicritère et l'affichage des zones industrielles rangées sur la carte géographique de l'Algérie. Cette fonctionnalité SIG est intégré directement dans le module d'analyse multicritère.

5.3 Approche globale proposé pour le rangement

L'approche proposée pour le rangement consiste aussi en deux phases : phase d'analyse (screening) et phase d'évaluation (Figure 5.2).

- Phase d'analyse

Les données recueillies disponibles au niveau de la troisième phase du processus de décision sont utilisées pour la construction de la table de performance selon les exigences de la méthode PROMETHEE. C'est une table qui comporte les évaluations des actions, chacune selon l'ensemble des critères de jugement considérés, en plus des paramètres de préférence et d'indifférence, les poids intra critères et le sens de chaque critère (critère à maximiser ou a minimiser).

- Phase d'évaluation

Dans cette phase, un rangement total des zones est réalisé. La méthode PROMETHEE II est utilisée. Les écarts $d_j(a, b)$ des évaluations des actions par pair selon chaque critère sont déterminés, puis un des six types des fonctions de préférence est choisi et enfin le calcul des flux nets détermine le rang de chaque zone industrielle.

Finalement, GIS-IZ assure l'affichage de ces zones avec leurs rangs sur la carte de l'Algérie.

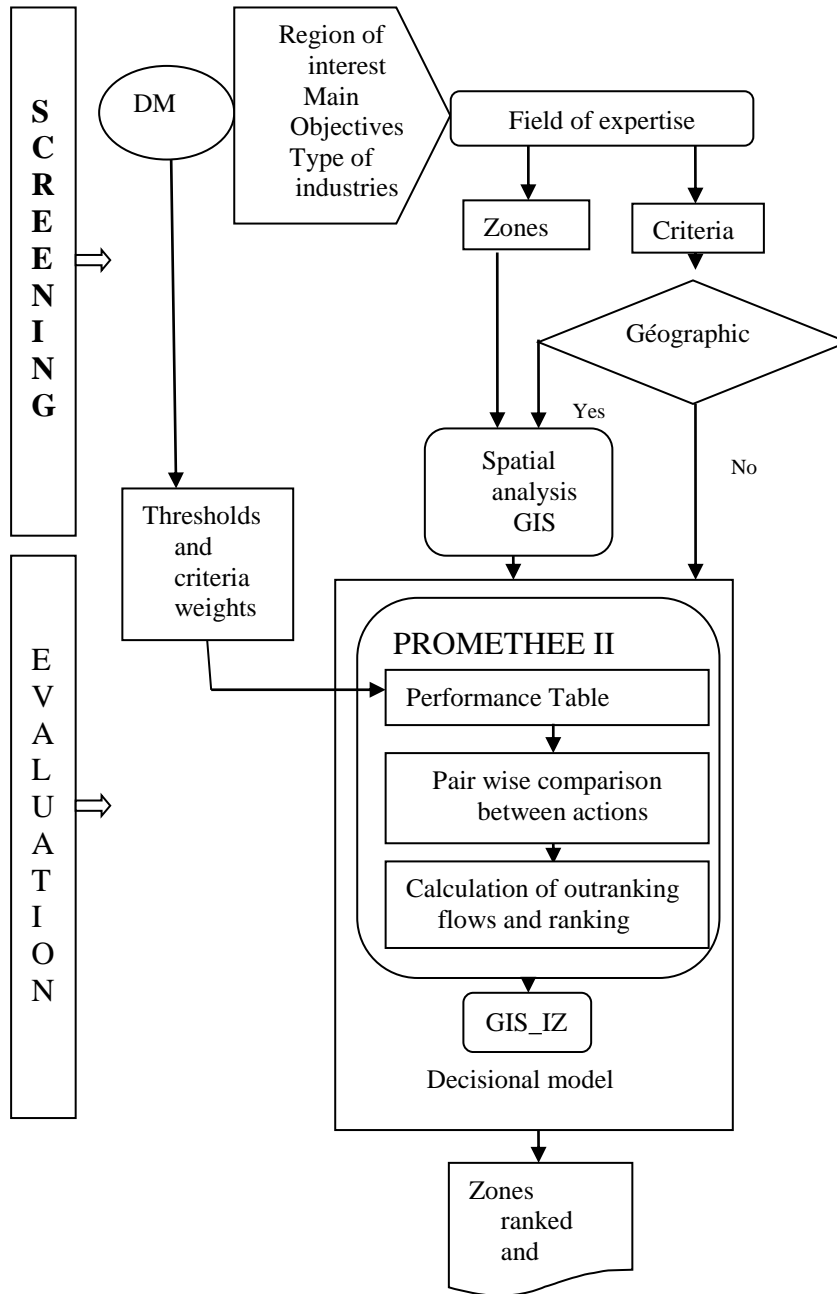


Figure 5.2 Approche proposée

5.4 Architecture du SDSS (Spatial Decision Support System).

C'est le même système proposé dans le chapitre 4, avec des changements dus à l'utilisation d'une autre méthode d'analyse multicritère sans prétraitement par la base des règles, le SDSS proposé est constitué de trois modules (Figure 5.3).

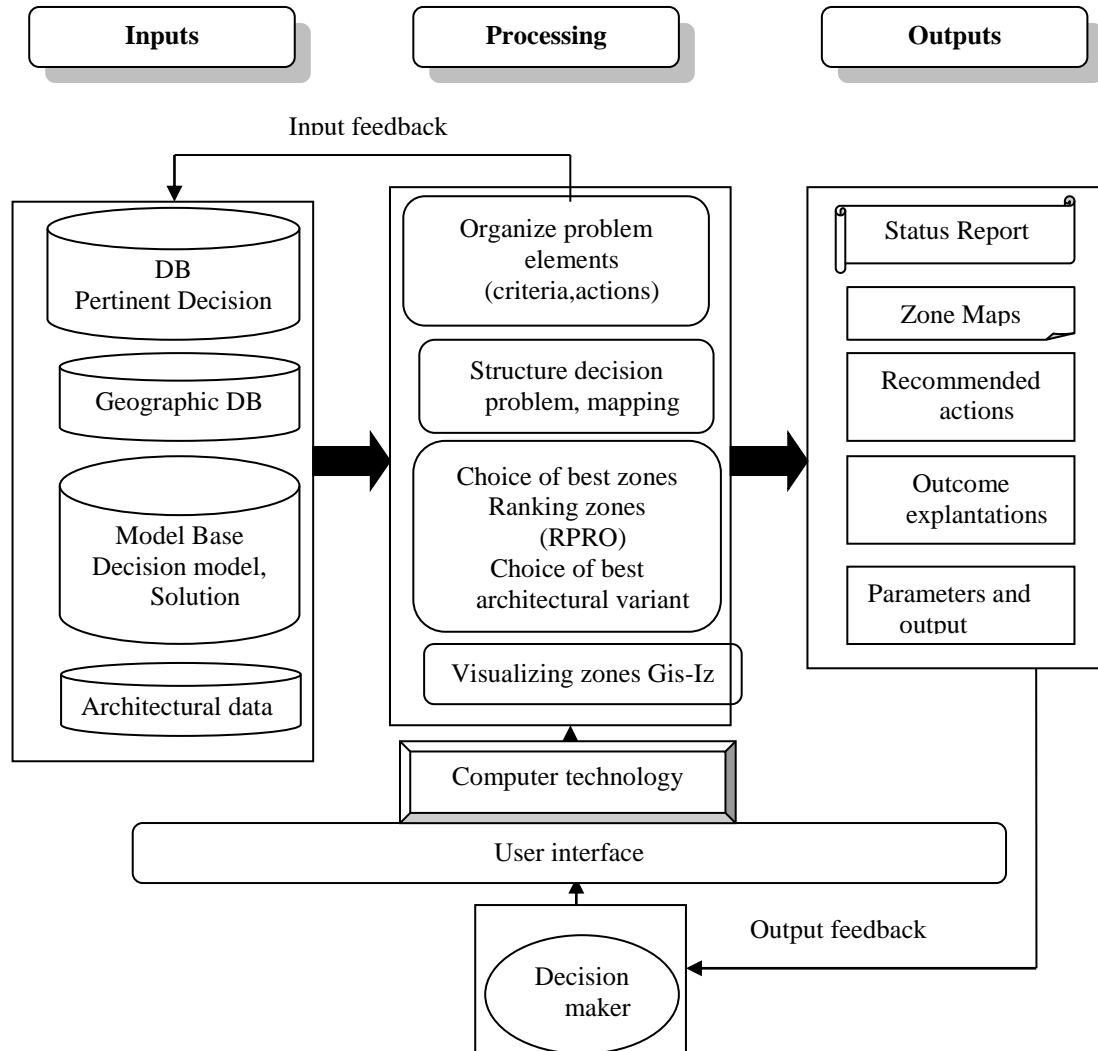


Figure 5.3. Architecture du SDSS proposé

5.4.1 Inputs SDSS

Consiste en une base de données décisionnelles et une base de données géographique couvrant les actions et les critères. Le décideur utilise une interface utilisateur pour avoir accès aux bases diverses ou exécute les traitements.

5.4.2 Les traitements

Les traitements se font sur trois phases : La première et la troisième phase sont semblables à celles décrites dans le chapitre 4, la deuxième phase est différente : Le module

Chapitre5 : Un rangement basé sur PROMETHEE II intégré au SIG

RPRO (Ranking PROMETHEE) procède au rangement total (Ranking) des zones. La figure 5.4 illustre l'interface du module RPRO qui consiste à introduire la table de performance et calculer les flux: entrant, sortant, net et les rangs des zones.

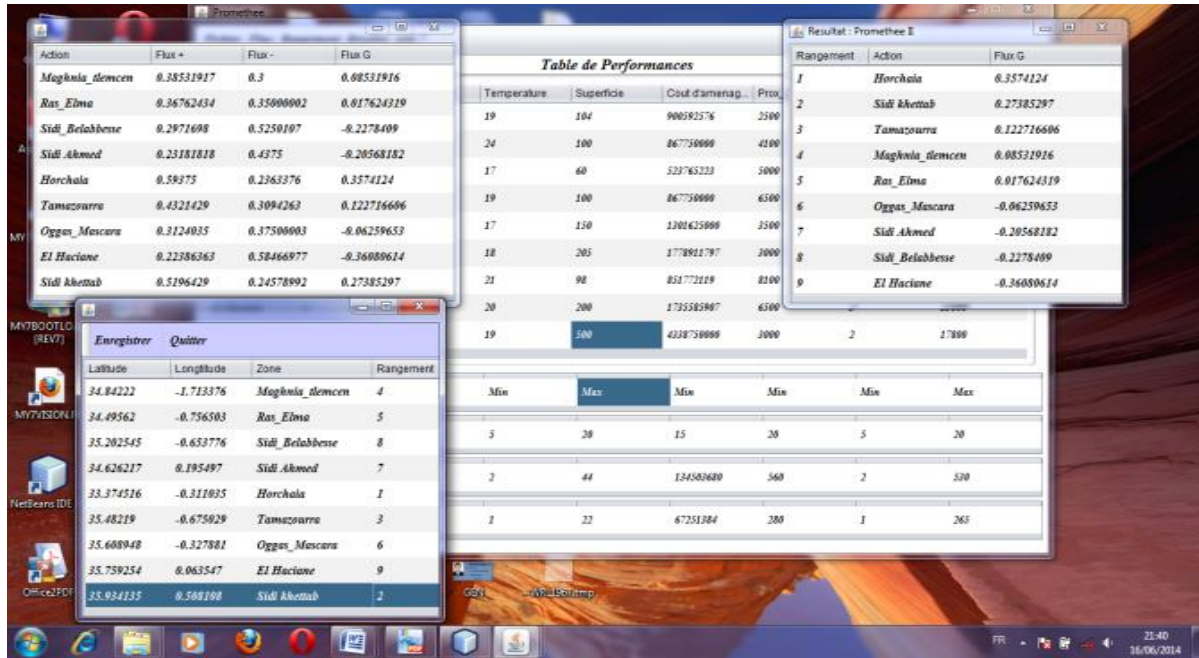


Figure 5.4 RPRO interface

5.4.3 Output du SDSS

Le module VZI assure l'affichage des résultats, les zones industrielles avec leurs rangs correspondant sont visualisées sur la carte géographique administrative de l'Algérie. La figure 5.5 illustre l'interface du module VZI.

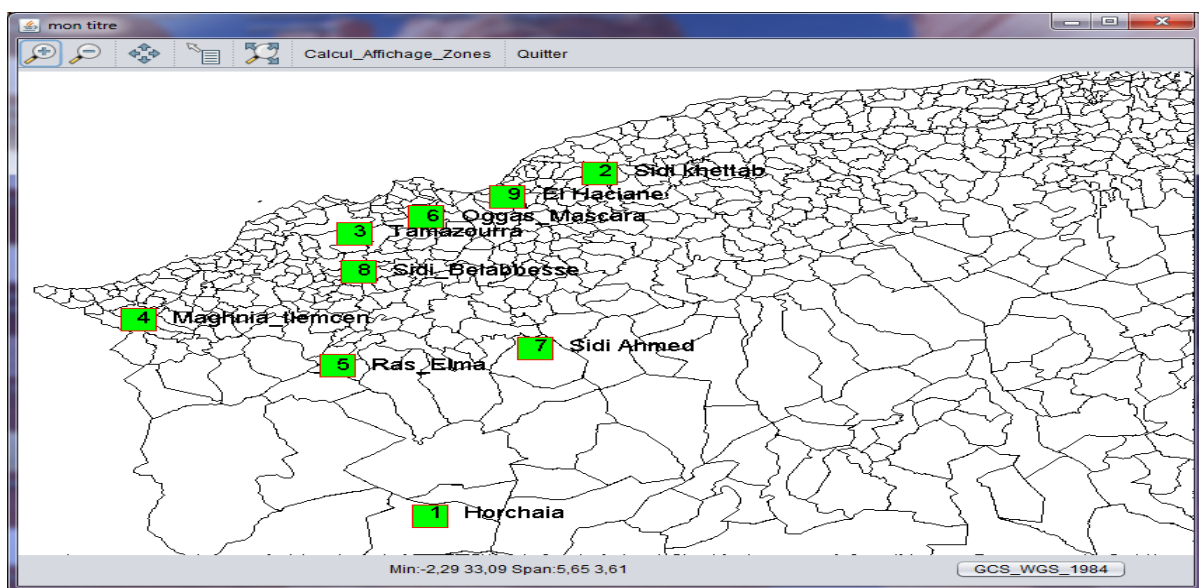


Figure 5.5 : L'interface principale du module de visualisation

5.5 Application au problème de rangement des zones industrielles

5.5.1 Les actions

Notre étude pour ce modèle s'est portée sur les 9 zones ci-dessous :

A1 : Maghnia, Tlemcen.

A2 : Sidi Bel Abbès.

A3: Ras Elma, Sidi Bel Abbès.

A4: Sidi Ahmed, Saida.

A5 : Horchaia, Naama.

A6 : Tamazzoura, Ain Témouchent.

A7 : Oggas, Mascara.

A8 : El Haciane, Mostaganem.

A9 : Sidi khettab, Relizane).

5.5.2 Les critères :

Les critères sont classifiés en trois catégories: les contraintes naturelles, les critères socio-économiques et juridiques et les contraintes environnementaux. Sous ces trois catégories, 8 critères d'évaluation différents sont définis et illustrés dans la figure 5.6.

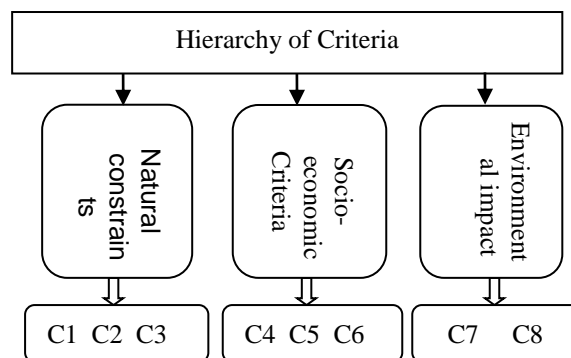


Figure.5.6 : Hiérarchie des critères de jugement.

Les critères avec leur description sont listés ci-dessous :

- (C1) : Sismicité.
- (C2) : Contrainte climatique : Pluviométrie.
- (C3) : Contrainte climatique : Température.
- (C4) : Superficie.
- (C5) : Coût d'aménagement.
- (C6) : Proximité des réseaux de transport.
- (C7) : Contrainte bioclimatique
- (C8) : Proximité au centre urbain d'habitation.

Pour évaluer les différentes Zones à ranger sur la base des critères qualitatives, on associe à chaque critère qualitatif un barème de notation (échelle de 1 à 5) de façon à en faire une

Chapitre5 : Un rangement basé sur PROMETHEE II intégré au SIG

dimension mesurable. Le principe d'Overlay (superposition des cartes thématiques) est utilisé pour évaluer les zones (actions) par rapport aux critères géographiques.

- Contraintes naturelles :

C1 : Sismicité : Le zonage sismique du territoire algérien révèle cinq zones sismiques. Pour transformer les données qualitatives en données quantitatives, l'échelle du tableau 5.1 est utilisée. Le tableau 5.2 ci-dessous regroupe les différentes valeurs utilisées pour l'évaluation des actions selon la sismicité.

Tableau 5.1. L'échelle proposée pour mesurer les zones sismiques

Sismicité	échelle [1; 5]
Zone faible	1
Zone faible à modère	2
Zone modère	3
Zone fort à modère	4
Zone fort	5

Tableau 5.2 : Evaluation des actions selon le critère (C1)

Les actions	Sismicité	Valeur Numérique
A1	faible à modère	2
A2	faible à modère	2
A3	faible à modère	2
A4	faible à modère	2
A5	Faible	1
A6	Modère	3
A7	Modère	3
A8	faible à modère	2
A9	Modère	3

C2, C3 : Contraintes climatiques : Les valeurs numériques moyennes de ces deux critères sont relevées à partir des stations climatiques installées sur le territoire (Tableau 5.3).

Tableau 5.3: évaluation des actions selon les critères : Pluviométrie et température (C2, C3).

Les actions	Pluviométrie (mm)	température C°
A1	350	19
A2	310	24
A3	410	17
A4	380	19
A5	190	17
A6	400	18
A7	320	21
A8	350	20
A9	370	19

▪ Critères socio-économique et juridique :

C4 : Superficie : C'est une donnée quantitative représentant la superficie des zones industrielles.

C5 : Cout d'aménagement : C'est une information quantitative représentant le coût d'aménagement. Il faut remarquer que la situation géographique du site (sol, pente, altitude, ...) influe directement sur le coût et indirectement sur le poids de ce critère.

C6 : Proximité aux réseaux de transport (routes, chemin de fer, aéroport) : L'évaluation de ce critère se fait par une analyse spatiale qui consiste à comparer cartographiquement les deux cartes thématiques, celle de la situation géographique des zones en question avec celle des réseaux de transport de proximité. Le tableau 5.4 présente les évaluations des actions selon les critères C4, C5 et C6.

Tableau 5.4: Évaluation selon le coût d'aménagement, superficie et proximité au réseaux de transport C4, C5, C6)

Actions	Superficie (Ha)(C4)	Cout 'aménagement (DA)(C5)	Proximité (m)(C6)
A1	104	900592576	2500
A2	100	867750000	4100
A3	60	523765223	5000
A4	100	867750000	6500
A5	150	1301625000	3500
A6	205	1778911797	3000
A7	98	851772119	8100
A8	200	1735585907	6500
A9	500	4338750000	3000

▪ Critères environnementaux:

C7: Contraintes bioclimatiques : les étages bioclimatiques de l'Algérie, le tableau 5.4 illustre les évaluations d'actions selon l'étage bioclimatique, les valeurs du critère C7 sont illustrées dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5: Evaluation des actions selon la contrainte bioclimatique des zones (C7).

Les actions	Zone Humide	Valeur numérique
A1	Zone semi aride	2
A2	Zone semi aride	2
A3	Zone semi aride	2
A4	Zone semi aride	2
A5	Zone aride	1
A6	Zone semi aride	2
A7	Zone semi aride	2
A8	Zone semi aride	2
A9	Zone aride	3

C8 : Proximité aux centres urbains d'habitation : La proximité des usines aux centres urbains cause des nuisances sonores liées à l'intensification des flux de circulation notamment des poids lourds, de propagations des gazes nocives pour la santé respiratoire des citoyens et des rejets industriels liquides et solides. Les distances approximatives des zones par rapport aux centres urbains sont illustrées dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6: Evaluation des actions selon le critère : Proximité aux centres urbains (C8).

Les Actions	Proximité (m), C8
A1	14000
A2	17000
A3	13500
A4	15000
A5	18000
A6	16500
A7	18300
A8	13000
A9	17800

5.5.3 Pondération intra-critères

Les poids des critères sont définis par l'équipe technique de la direction générale de l'ANIREF suivant les étapes suivantes :

- Classement des huit critères par ordre d'importance décroissant selon un jugement unanime issu d'une consultation entre tous les membres de l'équipe (ingénieurs, techniciens et gestionnaires).
- La deuxième étape consiste à répartir un ensemble de 100 points entre les différents critères. Les valeurs des poids finaux sont données dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7: Tableau des poids intra critères.

Critère	Description de Critère	Poids (%)	Poids (point)
C1	Sismicité.	10%	10
C2	Pluviométrie	5%	5
C3	Température.	5%	5
C4	Superficie	20%	20
C5	Cout d'aménagent	15%	15
C6	Proximité des réseaux de transport	20%	20
C7	Contraintes bioclimatiques	5%	5
C8	Proximité au centre urbain d'habitation	20%	20
Total		100%	100 point

Chapitre5 : Un rangement basé sur PROMETHEE II intégré au SIG

Notons qu'un critère peut être un facteur à maximiser pour converger vers l'optimisation de la décision ou une contrainte à minimiser. Le sens de chaque critère à été adopté selon l'avis de l'expert, cette information figure dans la table de performance présentée dans le tableau 5.8.

5.5.4 Table de performance :

Cette table illustrée dans le tableau 5.8 récapitule toute l'évaluation des zones par rapport aux différents critères, la pondération intra critère et la détermination du sens de chaque critère figurent aussi dans cette table.

Tableau 5.8: Table des performances.

Critère/Action	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	2	350	19	104	900592576	2500	3	14000
A2	2	310	24	100	867750000	4100	3	17000
A3	2	410	17	60	523765223	5000	3	13500
A4	2	380	19	100	867750000	6500	3	15000
A5	1	190	17	150	1301625000	3500	2	18000
A6	3	400	18	205	1778911797	3000	3	16500
A7	3	320	21	98	851772119	8100	3	18300
A8	4	350	20	200	1735585907	6500	3	13000
A9	3	370	19	500	4338750000	3000	2	17800
Sens de critère	Min	Min	Min	Max	Min	Min	Min	Max

5.5.5 Seuils d'indifférence et de préférence

Les seuils d'indifférence et de préférence sont des paramètres requis pour la mise en œuvre de la méthode PROMETHEE. Ces seuils doivent être fournis par le décideur ou avec sa collaboration. Dans cette étude, le seuil d'indifférence est fixé à 5% de la différence entre le plus haut score et le plus bas tandis que le seuil de préférence est fixé à 10% de la même différence, le tableau 5.9 présente les valeurs des seuils pour chaque critère.

Tableau 5.9. Seuils d'indifférence et de préférence de tous les critères.

Critère	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Préférence	2	22	2	44	134503680	560	2	530
Indifférence	1	11	1	22	67251384	280	1	265

5.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un deuxième modèle basé sur PROMETHEE en tant que méthode de surclassement pour le rangement des zones industrielles. Le décideur a constaté l'apport du concept de surclassement pour comparer les alternatives. La table de performance requise en input de PROMETHEE est très convenue pour le décideur puisqu'elle contient des données quantitatives et qualitatives avec leurs propres unités de mesure. Les flux positifs, négatifs et globaux ainsi que les rangs des zones sont présentés dans le tableau 5.10 ci-dessous.

Tableau 5.10: Flux et rangs finaux des zones.

Les Zones	Flux positif (φ^+)	Flux négatif (φ^-)	Flux Global (φ)	Rang
A1	0.38531917	0.3-	0.08531916	4
A2	0.2971698	0.5250107	-0.2278409	8
A3	0.36762434	0.35000002	0.017624319	5
A4	0.23181818	0.4375	-0.20568182	7
A5	0.59375	0.2363376	0.3574124	1
A6	0.4321429	0.3094263	0.122716606	3
A7	0.3124035	0.37500003	-0.06259653	6
A8	0.22386363	0.58466977	-0.36080614	9
A9	0.5196429	0.24578992	0.27385297	2

Le rang d'une zone ainsi obtenu constitue un index avec lequel on peut :

- Critiquer le choix de la zone.
- Alerter les aménagistes et les architectes à prendre en considération les spécificités de la zone.
- Assigner la zone aux industries appropriées.

Pour ce cas d'étude, nous avons considéré seulement un échantillon de 9 zones parmi 41 programmé par les autorités. En optimisant les critères en genre et en nombre, en apportant des solutions aux points faibles de la méthode, la totalité des zones peuvent être prise en charge. Cette étude nous a permis de constater l'utilité de l'approche d'intégration SIG-AMC pour beaucoup de secteurs où la décision est importante et dangereuse et se croise avec la géographie et même avec l'histoire.

Quoique la signification signalée du résultat provient de l'utilisation d'un algorithme PROMETHEE validé et d'un noyau de SIG spécifiques aux données réelles de ce cas d'étude, reste une analyse de sensibilité sur les seuils de préférences et d'indifférences pour valider la stabilité de la solution.

Conclusion générale et Perspectives

La sélection des sites industriels est un problème de décision à connotation géographique. Ce genre de problème est complexe, multicritère et en relation avec l'aménagement du territoire, le développement durable, l'économie, la santé etc.

Le traitement de ces problèmes requiert en entrée des données géographiques et des données décisionnelles et préférentielles. Une grande partie des données géographiques sont disponible actuellement à l'aide des nouvelles technologies géomatiques (GPS, Réseaux sociaux, SIG, Téléphonie Portable,...).

Le SIG, par sa capacité dans le stockage, la gestion, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données géographiques, se présente comme l'outil le plus adéquat pour appréhender ces problèmes. Néanmoins, la technologie SIG actuelle souffre encore de plusieurs lacunes. Par exemple les SIG ne disposent pas de capacités analytiques capables de supporter la nature multicritère des problèmes spatiaux (**Chakhar, 2006**).

L'AMC permet la prise en compte des données décisionnelles et préférentielles, y compris les critères conflictuels et les objectifs divergents.

Les chercheurs ont adopté l'idée de coupler la technologie SIG avec les fonctionnalités analytiques de l'AMC. Le système qui en résulte « GIS based MCDA » hérite les avantages et les inconvénients des deux domaines de recherche, les inconvénients des SIG ou de l'AMC constituent donc des limites de l'approche d'intégration. **Chakhar (2006)** a énuméré d'autres limites de l'approche : i) l'absence d'une méthodologie pour le choix de la méthode convenable au problème convenable, ii) La subjectivité des données, iii) les modes d'intégration entre les deux outils, iv) l'incohérence qui surgit lorsque le nombre des éléments décisionnels (critères et actions) devient grand.

Nos travaux concernent l'utilisation de l'approche d'intégration SIG-AMC pour un problème réel et crucial qui est le choix des meilleures localisations pour des nouveaux parcs industriels tout en essayant de surmonter certaines limites de l'approche. Nous avons proposé dans cette thèse deux modèles basés sur cette intégration pour la prise de décision :

- Dans les deux modèles, nous avons proposé un mode d'intégration mixte, pas d'intégration pour l'étude des critères géographiques et la préparation des données en INPUT de l'AMC et une intégration directe de la fonction de visualisation dans le module de l'AMC.
- Dans le premier modèle nous avons proposé une méthode de surclassement représentée par PROMETHEE II, dans le deuxième modèle une méthode de critère unique de synthèse (agrégation totale) représenté par AHP (Analytic Hierarchy Process) est proposé. L'objectif est de proposer au décideur deux philosophies différentes issues de deux écoles, et c'est à lui choisir celle qui lui est convenable.
- Dans le modèle basé sur AHP, nous avons proposé un ensemble de règle de production qui a conduit à une réduction considérable des critères en input de l'AHP. Cette idée a

permis une réduction des incohérences et un gain en matière de complexité. Le prétraitement par base de règle a permis aussi une transformation d'un nombre important de critères techniques issus d'une expertise objective en un ensemble réduit de critère à caractère subjectif convenable à AHP.

- Nous avons proposé aussi d'utiliser la logique floue au niveau de la construction des matrices de comparaison par pair exigée par AHP. Cela a permis d'alléger l'incertitude et la subjectivité des décideurs qui construisent ces matrices. Une étude empirique sur la façon dont le décideur pondère nous a orienté vers le choix de la fonction triangulaire pour la fuzzyfication.

Ce travail nous a permis de faire les constatations suivantes :

- Le rang d'une zone ainsi obtenu est un index pour critiquer le choix de la zone, pour alerter les aménagistes des zones et pour affecter les bons projets d'investissement au bon endroit
- Une reconnaissance de l'utilité de l'approche pour la sélection des zones industrielles de la part des décideurs.
- Rétablissement de la conscience chez le décideur envers l'importance des outils scientifique pour la sélection des sites.
- L'introduction de la logique flou lors de la construction des matrices de comparaison est jugée bénéfique pour le décideur du fait qu'il avait un intervalle de valeurs à considérer au lieu d'une seule valeur précise.
- L'effet de l'introduction de la base de règle est touché en matière de réduction de la complexité.

Cet axe de recherche ouvre beaucoup de perspectives, vu la grandeur de la géographie et l'omniprésence de la décision. Nous terminons cette conclusion en évoquant quelque perspectives de recherche que nous envisageons dans le futur.

- 1- Utiliser les techniques du Data Mining pour le choix de la méthode d'analyse appropriée. Les chercheurs ont utilisé jusqu'à maintenant quatre possibilités : (i) choix ad hoc ou non assisté, (ii) utilisation d'un arbre de classification, (iii) utilisation d'une méthode multicritère, (iv) utilisation d'un système expert ou (v) d'un système informatisé d'aide à la décision (SIAD).
- 2- **Malczewski et Rinner, (2015)** proposent le « Web based GIS-MCDA » pour distribuer les fonctionnalités du système intégré sur INTERNET afin d'aider à la décision du groupe. En perspective de notre travail et pour raffiner la sélection des zones industrielles nous voulons introduire l'avis des citoyens qui habitent aux alentours de ces zones. Les avis sont filtrés et agrégés a partir d'un corpus géo-localisé des tweets. L'objectif est d'une part de démocratiser la sélection des sites pour les fins industrielles et d'autre part pour raffiner les résultats d'une approche d'aide à la décision basée sur une méthode d'analyse multicritère intégrée aux systèmes d'information géographiques.
- 3- Une partie des données requises par les méthodes d'analyse multicritères est entachée de subjectivités, d'incertitudes et d'hésitation. Pour PROMETHEE II qui est une méthode de surclassement et de rangement, ce problème se présente dans les seuils et les poids intra

critères fournis par le décideur. L'une de nos perspectives est de résoudre ce problème en faisant appel à la logique floue.

- 4- Nous projetons d'utiliser le Data Mining pour la construction de la base des règles. Les règles conjonctives obtenues après apprentissage seront utilisées pour le prétraitement et la réduction des critères en exploitant la fonction de transition de la machine cellulaire CASI (Cellular Automation for Symbolic Induction) (**Atmani. B et al., 2007**), (**Benfriha et al, 2016**),

Références

- (**Abramovich , 2012**) Adriana Alicia Abramovich , "Using GIS to Assist Location and Site Selection Decisions" , A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Urban Planning , University of Washington, 2012.
- (**AFIGEO, 2017**) Association Française pour l'information Géographique, L'information géographique, 2017, <http://www.afigeo.asso.fr/information-geographique.html>,
- (**Agouti Tarik,2009**) Agouti, Tarik, « Vers une intégration des systèmes d'information géographiques et de l'analyse multicritère pour l'aide à la décision à référence spatiale », thèse de doctorat, Université caddy Ayad Marakech, MAROC, 2009.
- (**Akbari et al., 2008**) V. Akbari, M.A. Rajabi, S.H. Chavoshi and R. Shams "Landfill Site Selection by Combining GIS and Fuzzy Multi Criteria Decision Analysis, Case Study: Bandar Abbas, Iran", World Applied Sciences Journal, Vol. 3, PP. 39-47, 2008.
- (**Aleksandar et al., 2015**) Aleksandar Rikalovic, Ilija Cosic, Ruggero Donida Labati, Vincenzo Piuri, "A comprehensive Method for Industrial Site Selection: The Macro-Location Analysis", IEEE, DOI: 10.1109/JSYST.2015.2444471, 2015.
- (**Aleksandar et al., 2013**) Aleksandar.R, Ilija. C and Djordje. L, "GIS Based Multi-Criteria Analysis for Industrial Site Selection", in Proc.24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, PP. 1054-1063, 2013,.
- (**Amir et al., 2011**) Amir Kushuaka and Vineet Kushuaka, "Location based services using Android Mobile Operating System", International journals of advances in engineering and technologies, 2011.
- (**ANIREF, 2013**) ANIREF (Agence Nationale d'Intermédiation et de REgulation Foncière), "Etude préliminaire d'aménagement du parc industriel", technical report, 2013, Alger, Algeria.
- (**Atmani. B et al., 2007**) Atmani. B, Beldjilali. B, "Knowledge Discovery in Database: Induction Graph and Cellular Automaton", Computing and Informatics Journal, Vol.26, No. 2, PP. 171-197, 2007.
- (**Azzabi et al., 2008a**) Azzabi L., Ayadi D., Kobi A., Robledo C., Boujelbene Y., "Application of Six Sigma and Promethee Multicriteria method To Select the Product System", the international conference of quality and dependability, 2008.
- (**Azzabi et al., 2008b**) Azzabi L. Ayadi D. Kobi A. Robledo C. Boujelbene Y.: «Amélioration d'un système de production complexe: intégration de la méthode Six Sigma», International Metrology Conference CAFMET, 2008.
- (**Bachta, 1995**) Bachta M.S., « Conservation des Eaux et du Sol (CES) en Tunisie. Invention des pouvoirs publics et stratégies paysannes : un éclairage économique ». In : Zekri S. (ed.), Laajimi A. (ed.). Agriculture, durabilité et environnement . Zaragoza : CIHEAM, Cahiers Options Méditerranéennes, No. 9, PP. 49-59, 1995.
- (**Balali et Abbas, 2014**) Balali,B.Z., Abbas, R. , "A Comparison of AHP and PROMETHEE Family Decision Making Methods for Selection of Building Structural System", American Journal of Civil Engineering and Architecture, vol. 2, No. 5,PP. 149-159, 2014.

- (Bana et Costa, 1996)** C. Bana et Costa, « Les problématiques de l'aide à la décision: Vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement », Recherche opérationnelle/Operations Research, Vol. 30, No. 2, PP. 191–216, 1996.
- (Banai, 1993)** Banai R. 1993, "Fuzziness in geographical information systems: Contributions from the analytical hierarchy process", International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 7 , PP. 315–329, 1993.
- (Batty et al., 1999)** M. Batty, Y. Xie, and Z. Sun, "Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata", Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 23, No. 3, PP. 205–233, 1999.
- (Bedard, 2004)** Bédard, Y., S. Larrivée, M.J. Proulx et M. Nadeau, "Modeling Geospatial Databases with Plug-Ins for Visual Languages: A Pragmatic Approach and the Impacts of 16 Years of Research and Experimentations on Perceptory", S., Wang et al., (Eds.): COMOGIS Workshops ER2004, LNCS 3289, PP. 17–30, Shanghai, China, 2004.
- (Beinat et Nijkamp, 1998)** E. Beinat and P. Nijkamp, "Land-use management and the path toward sustainability", In E. Beinat and P. Nijkamp, editors, Multicriteria Analysis for Land-Use Management, PP. 1–13. Kluwer, 1998.
- (Benfriha et al., 2016)** Benfriha. H, Barigou. F and Atmani. B , "A text categorization framework based on concept lattice and cellular automata", Int. J. of Data Science, Vol.1, No.3, pp.227 –246, 2016.
- (Bennis et al., 2016)** Kaoutar Bennis & Lahcen Bahi, « Application de la logique floue à l'aide à la décision participative pour l'évaluation de l'impact sur l'environnement – cas de Tanger », Journal of Décision Systems Vol. 25, No. 1, 2016
- (Ben mena, 2000)** Ben Mena, S., « Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision » Biotechnol, Agron. Soc. Environ, Vol. 4, No. 2, PP. 83–93, 2000.
- (Ben mena, 2001)** Ben Mena , S., « Méthodes multicritères d'aide à la décision : méthodes de surclassement : Note sur les principes des méthodes multicritères de surclassement, 2001.
- (Bennett et al., 1996)** D.A. Bennett, M.P. Armstrong, and G.A.Wade, "Agent mediated consensus-building for environmental problems : A genetic algorithm approach", In Proceedings of the Third International conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Barbara, CA, Santa Fe, NM, National Center for Geographic Information and Analysis, 1996.
- (Bernadette, 2007)**, Bernadette Mérenne-Schoumaker , « La localisation des grandes zones de logistique », Bulletin de la Société géographique de Liège, No. 49, PP. 31-40, 2007.
- (Bin et Yao, 2006)** Bin Jiang , Xiaobai Yao , "Location-based services and GIS in perspective, Computers, Environment and Urban Systems Vol. 30, PP. 712–725, 2006.
- (Boutkhoul et al., 2016)** Omar Boutkhoul, Mohamed Hanine and Tarik Agouti , Abdessadek Tikniouine, "Selection problem of cloud solution for big data accessing: fuzzy AHP-PROMETHEE as a proposed methodology", Journal of Digital Information Management, Vol.14, No. 6, 2016.
- (Boutkhoul et al., 2015)** Omar Boutkhoul, Mohamed Hanine, Tarik Agouti and Abdessadek Tikniouine, "An improved hybrid multi-criteria multidimensional model for strategic industrial location selection: Casablanca industrial zones as a case study". Springer Plus, 2015.

- (Bouyssou, 1993)** D. Bouyssou, “Décision multicritère ou aide multicritère ? newsletter of the European Working Group”, *Multicriteria Aid for Decisions Series Vol. 2, No. 2*, PP. 1–2, Spring 1993.
- (Brans et Vincke, 1985)** J. P. Brans and Ph. Vincke, “A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making”, *Management Science*, Vol. 31, No. 6, PP. 647-656, 1985.
- (Brans et al., 1984)** J.P. Brans, B. Mareschal, and Ph. Vincke. PROMETHEE “A new family of outranking methods in multicriteria analysis”, In J.P. Brans, editor, *Operational Research, Vol. 84*, PP. 408–421, North Holland, Elsevier Science Publishers, B.V, 1984.
- (Brooks, 2001)** C.J. Brooks, “A genetic algorithm for designing optimal patch configurations in GIS”, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 15, No. 6, PP. 539–559, 2001.
- (Brown et al., 1994)** S. Brown, H. Schreier, and L. Vertinsky. Linking multiple accounts with GIS as decision support system to resolve forestry wildlife conflicts, “*Journal of Environmental Management*”, Vol. 42, No. 4, 1994.
- (Brunet, 1980)** Brunet, R., « La composition des modèles dans l’analyse Spatiale », *L’espace Géographique*, No. 4, Paris-VIème, 1980.
- (Buckley, 1999)** J.J. Buckley, “Ranking alternatives using fuzzy numbers”, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.15, PP. 1-31, 1985.
- (Burrough, 1990)** P.H.A. Burrough, “Methods of spatial analysis in GIS”, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 4, No. 3, PP. 221–223, 1990.
- (Burrough, 2001)** P.A. Burrough. “GIS and geostatistics, Essential partners”. *Environmental and Ecological Statistics*, Vol. 8, PP. 361–377, 2001.
- (Caloz et Collet, 2011)** Régis, Caloz et Claude collet, *Analyse spatiale de l’information géographique*, Presse polytechniques et universitaires romandes, 2011.
- (Cambell et al., 1992)** J.C. Cambell, J. Radke, J.T. Gless, and R.M. Whirtshafter, “An application of linear programming and geographic information systems: Cropland allocation in Antigua”, *Environment and Planning*, Vol. 24, PP. 535–549, 1992.
- (Can, 1993)** Can A, “Residential quality assessment : Alternative approaches using GIS”, In M.M. Fischer and P. Nijkamp, editors, *Geographic Information Systems, Spatial Modelling and Policy valuation*, 1993.
- (Carmen et al., 2007)** M Carmen Ruiz Puente, Inmaculada Fernández Diego, Juan José Ortiz Santa María, M Antonia Pérez Hernando & Pablo Fernández de Arróyabe Hernández, “The Development of a New methodology Based on GIS and Fuzzy Logic to Locate Sustainable Industrial Areas, 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Aalborg University, Denmark, 2007.
- (Carlo et al., 2003)** Carlo.Prévil, Marius.Thériault and Joël.Rouffignat, “Analyse multicritère et SIG pour faciliter la concertation en aménagement du territoire : vers une amélioration du processus décisionnel”. *Les Cahiers de géographie du Québec*, Vol.. 47, No. 130, PP. 35-61, 2003.
- (Caro et al., 1992)** F. Caro, T. Shirabe, M. Guignard, and A. Weintraub, “School redistricting : Embedding GIS tools with integer programming”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 55, No. 8, PP 836–849, 2004.

- (**Carver, 1991**) S. Carver, “Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems”, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 5, No. 3, PP. 321–339, 1991.
- (**Chakhar, 2006**), Chakhar.S, “Cartographie Décisionnelle Multicritère : Formalisation Et Implémentation Informatique ”, Thèse de doctorat, D.F.R. sciences des organisations. , Université paris dauphine., France, 2006.
- (**Chakhar et Martel , 2004**) Salem Chakhar, Jean-Marc Martel, “Towards a Spatial Decision Support System: Multi-Criteria Evaluation Functions Inside Geographical Information Systems”, *Annales du LAMSADE*, No.2, PP. 97–123, 2004.
- (**Chakhar , 2001**) S. Chakhar, “Toward a spatial decision support system : Multi-criteria evaluation functions into geographical information systems”, *Mémoire de DEA, Institut Supérieur de Gestion, Université de Tunis*, 2001. 79 pages.
- (**Chakhar et Martel , 2003**) S. Chakhar and J.-M. Martel. “Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions”, *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, vol. 7, No. 2, PP. 47–71, 2003.
- (**Chakhar et Mousseau, 2007**) Chakhar S. et Mousseau V. , « MCD-GIS : Un SIAD pour l’Aide Multicritère à la Décision à Référence Spatiale », *LAMSADE, Université Paris Dauphine*, 2007.
- (**Chang, 2017**) Chang, K.-T., “Geographic Information System”, *The International Encyclopedia of Geography*. 1–9, 2017.
- (**Chang, 1996**) Da.Yong Chang , “Theory and methodology ,Application of the extent analysis method on fuzzy AHP” , *European journal of operational research*, Vol. 95, PP. 649-655, 1996.
- (**Chang, 1992**) D. Y. Chang.D, "Extent analysis and synthetic decision", *Optimization Techniques and Application*, Vol 1. PP. 352, 1992.
- (**Cheng et Malcolm, 2005**) Yu-Cheng Tang and Malcolm J. Beynon, “Application and Development of a Fuzzy Analytic Hierarchy Process within a Capital Investment Study”, *Journal of Economics and Management*, Vol. 1, No. 2, PP. 207-230, 2005.
- (**Cheng , 1996**) C.H. Cheng, “Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value of membership function”, *European Journal of Operational Research* , Vol. 96, PP. 343-350, 1996.
- (**Chien et al., 2013**) Chien-Chang Chou and Ker-Wei Yu3 ,”Application of a New Hybrid Fuzzy AHP Model to the Location Choice”, *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering journal*, Article ID 592138, 12 pages, 2013.
- (**Church , 2002**) Richard L. Church, *Geographical information systems and location science*, *Computers & Operations Research*, Vol. , PP. 541-562, 2002
- (**Church, 1997**) R.L Church, “Location modeling and GIS “, chapitre book location modeling and GIS. https://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/gis_book_abridged/.../ch20.pdf , 1997.
- (**Christine et Jean-Pierre, 2005**) Christine, Voiron et Jean-Pierre, Chery, « Espace géographique, spatialisation et modélisation en Dynamique des Systèmes », 6^{ème} congrès européen de science des systèmes, 2005.

- (Chuvieco, 1993)** E. Chuvieco. “Integration of linear programming and GIS for land use modeling”, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 7, No. 1, PP. 71–83, 1993.
- (Clark Labs, 2015)** Clark Labs, Clark University 950 Main St., Worcester MA 01610 USA, 2015, <https://clarklabs.org/terrset/idrisi-gis/>.
- (Clímaco et al., 1993)** J.N. Clímaco, C.H. Antunes, and M.J. Alves “Interactive decision support for multi objective transportation problems, *European Journal of Operation Research*, Vol. 65, No. 1, PP. 58–7, 1993.
- (Collet, 2005)**, Claude Collet, « Analyse spatiale, géomatique et système d’information géographique ». *Revue International de Géomatique*, PP 393-414, 2005.
- (Couclelis, 1992)** Couclelis Helen, “People manipulate objects (but cultivate fields) : beyond the raster-vector debate in GIS”, In: FRANK Andrew, CAMPARI Irene et FORMENTINI Ubaldo. *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space: International Conference Gis-From Space to Territory : Theories and Methods*, Berlin: Springer Verlag, PP. 65-77, 1992.
- (Daniel et al., 2015)** Daniel Magaña Martínez and Juan Carlos Fernández. Rodríguez, “Artificial Intelligence applied to project success: a literature review”, *international Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia*, Vol. 3, No. 5, PP. 77-82, 2015.
- (Dedemen , 2013)** Dedemen, Yiğit, “A multi-criteria decision analysis approach to GIS-based route selection for overhead power transmission lines”, Thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university, Department of Geodetic and Geographic Information Technologies, 2013.
- (DelVecchio, 2006)** S.DelVecchio, *Mesure quantitative des impacts de risques en contexte d’impartition, mémoire présenté en vue de l’obtention de maitre ès science*, université de Montréal, 2006.
- (Denegre et Salgé, 1997)** Denegre, Jean et Salge, François, « Les systèmes d’information géographique », 2nd Ed, Presses Universitaires de France, 128 p, Paris, 1997.
- (Diamond et Wright, 1988)** .T. Diamond and J.R. Wright, “Design of an integrated spatial information system for multiobjective land-use planning” *Environment and Planning B*, Vol.15, No.2, PP. 205–214, 1988.
- (Dorra ,2010)** Dorra Ayadi, « Optimisation Multicritère de la fiabilité : Application du modèle de goal programming avec les fonctions de satisfactions dans l’industrie de traitement de gaz », Thèse d’état Université d’Angers, 2010.
- (Dubois, 2011)** Dubois, D. (2011) "The role of fuzzy sets in decision sciences: Old techniques and new directions", *Fuzzy Sets and Systems* Vol. 184, PP. 3-28, 2011.
- (Ducheyne et al., 2006)** E.I. Ducheyne, R.R. De Wulf, and B. De Baets “A spatial approach to forest management optimization : Linking GIS and multiple objective genetic algorithms, *International Journal of Geographic Information Science*, Vol. 20, No. 8, PP. 917–928, 2006.
- (Eastman et al., 1993)** Eastman R.J, Kyem P.A.K, and J. Toledno, “A procedure for multiple-objective decision making in GIS under conditions of conflicting objectives”, In J. Hents, H.F.L. Ottens, and H.J. Scholten, editors, *Fourth European Conference on GIS (ESIG’93) Proceedings*, Vol. 1, PP. 438-447, 1993.

- (Egenhofer et Frank, 1990)** M.J. Egenhofer and A.U. Frank, “LOBSTER : Combining AI and database techniques for GIS”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56, No. 6, PP. 919–926, 1990.
- (Egenhofer, 1989)** Egenhofer M.J A, “Formal Definition of Binary Topological Relationships”, In Proceedings of the 3th International Conference on Foundations of data Organization and Algorithms, Paris, France : Lecture Notes in Computer Science 367, PP. 457-472, 1989.
- (ESRI, 2017)** ESRI, 2017, ARCGIS, <https://www.esrifrance.fr/sig3.aspx>
- (Fleming et al., 2007)** G. Fleming, M. van der Merwe, and G. McFerren, “Fuzzy expert systems and GIS for cholera health risk prediction in southern Africa”, Environmental Modelling & Software, Vol. 22, No. 4, PP. 442–448, 2007.
- (Forman, 1993)** Forman, E. H., “Facts and fictions about the analytic hierarchy process, Mathematical and Computer Modelling, Vol. 17, No. 4-5, PP. 19–26, 1993.
- (Frakling, 1996)** Kary Frakling , “Modélisation et apprentissage des préférences par réseaux de neurones pour l’aide à la décision multicritère“. Thèse doctorat, Ecole nationale des mines de Saint-Etienne, 1996.
- (Francis , 2013)** Francis MACARY, « Évaluation des risques de contamination des eaux de surface sur des bassins versants agricoles. Approches multiscalaires par modélisation spatiale et analyse multicritère pour l'aide à la décision », these de doctorat de l’université de TOULOUSE , Frances, 2013.
- (Gianluca et al., 2014)** Gianluca. Massei, Lucia. Rocchi, Luisa. Paolotti, Salvatore. Greco and Antonio. Boggia, “Decision Support Systems for environmental management: A case study on wastewater from agriculture”, Journal of Environmental Management Vol. 14, No.6, PP. 491-504, 2014.
- (Gimblett , 2002)** H.R. Gimblett, editor, “Integrating geographic information systems and agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes”, Oxford University Press, London, 2002.
- (Goodchild , 1991)** M.F Goodchild, “Process on the GIS research agenda”, In Second European Conference on GIS (ESIG’91) Proceedings, vol. 1, PP. 342–350, Brussels, Belgium, April 2-5 1991.
- (Goodchild et al., 1992)** M.F. Goodchild, R. Haining, and S. Wise, “Integrating GIS and spatial data analysis: Problems and possibilities”, International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 6, PP :407–423, 1992.
- (Gourion, 2012)** Gourion, « Modèle robuste pour la localisation d'un centre de traitement des déchets. comparaison de méthodes d'analyse multicritères », Annales de l'ISUP, vol. 56, PP.2-3, 2012.
- (Greco et al., 2005)** S.Greco, B.Matarazzo and R.Słowiński, “Decision rule approach”, New York: Springer-Verlag, 2005, chap. 13 PP. 507-562, 2005.
- (Guezo, 2011)** Conchita G. Kedowide Mevo Guezo, « SIG et analyse multicritère pour l’aide à la décision en agriculture urbaine dans les pays en développement, cas de Ouagadougou au Burkina Faso » , Thèse de doctorat, aménagement de l’espace, urbanisme, Université, Paris 8, 2011.

- (Giupponi et al., 1999)** Giupponi C,B. Eiselt, and P.F. Ghetti, “A multicriteria approach for mapping risks or agricultural pollution for water resources: They Venice Lagon watershed case study”, *Journal of Environmental Management*, PP. 259–269, 1999
- (Guinting , 2000)**, R.Ginting, « Intégration du système d'aide a la décision multicritere et du système d'intelligence économique dans l'ère concurrentielle , Thèse pour l'obtention du Doctorat de l'Université de droit et des sciences d'Aix-Marseille, 2000.
- (Guisseppe et Forigionne, 2009)** Guisseppi, A. and Forgionne, R. R., “Effective DMSS Guidance for Financial Investing”, *International Journal of Decision Support System Technology,(IJDSST)*, Vol. 1, No. 1, PP. 1-14, 2009.
- (Gumus , 2009)** Gumus AT “Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology”, *Expert Syst Appl*, Vol. 36, PP. 4067–4074, 2009.
- (G.Weger, 1999)** G.Weger, « Cartographie: Rapport de sémiologie graphique et conception cartographique (tograph) », Vol.1, Paris, 1999.
- (Hadeal et al., 2015)** Hadeal H. Alzamili, Mahmoud El-Mewafi , Ashraf M. Beshr, Ahmed Awad, “GIS Based Multi Criteria Dicesion Analysis for Industrial Site Selection in Al- Nasiriyah City in Iraq”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 6, No. 7, PP. 1330-1337, 2015.
- (Hamadouche et al., 2014)** M. A. Hamadouche, K. Mederbal, L. Kouri Z. Regagba, Y. Fekir D. Anteur. (2014) ,” GIS-based multicriteria analysis: an approach to select priority areas for preservation in the Ahaggar National Park, Algeria”, *Arabian journal of geoscience* , Vol. 7, No. 2, PP. 419–434, 2014.
- (Hassan et al., 2016)** Mohammad Hassan Sadeghravesh, Hassan Khosravi, Azam Abolhasan, Sahar Shekoohezadeghan, “Evaluation of Combating Desertification Alternatives Using Promethee Model”, *Journal of Geography and Geology*; Vol. 8, No. 2, 2016.
- (Hepu Deng ,1999)** Hepu Deng, “Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison”, *International Journal of Approximate Reasoning*, Vol. 21, PP. 215-231,1999.
- (Hua et al., 2008)** Hua Z. et Gong B. et Xu X. : “A DS–AHP approach for multi attribute decision making problem with incomplete information”, *Expert Systems with Applications* Vol. 34, PP. 2221–2227,2008.
- (Ibrahim et al., 2011)** E. H. Ibrahim,S. E. and A. A. Atwan, “Combining fuzzy analytic hierarchy process and Gis to select the best location for a wastewater lift station in Elmahalla el-kubra, north Egypt”, *International Journal of Engineering & Technology* Vol.11, No. 05, PP.37-43, 2011.
- (Ishizaka et Labib, 2011)** Ishizaka A., Labib A, “Review of the main developments in the analytic hierarchy process”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No.11, PP. 14336-14345, 2011.
- (Islam et al., 2016)** Islam, S., Rahman, S., Hassan, M. & Azam, G. ”Municipal Solid Waste Management using GIS Application in Mirpur Area of Dhaka City, Bangladesh”, *Pollution*, Vol.2 No. 2, PP. 141-151.
- (Itami et al., 2000)** Itami R.M, G.S. Mac Laren, and K.M. Hirst, “Integrating the analytical hierarchy process with GIS to capture expert knowledge for land capability assessment”. In *Proceedings 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling*

- (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs, Banff, Canada, September 2-8 2000.
- (Jain et al., 1995)** Jain D.K., U.S. Tim, and R. Jolly, “Spatial decision support system for planning sustainable livestock production”, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 9 No. 1, PP. 57–75, 1995.
- (Jankowski et al., 1997)** Jankowski P, T.L. Nyerges, A. Smith, T.J. Moore, and E. Horvath, “Spatial group choice : A SDSS tool for collaborative spatial decision-making”, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 11, PP. 566–602, 1997
- (Jankowski, 1995)** P. Jankowski, “Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods, *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 9, No.3, PP. 251–273, 1995.
- (Jankowski et al., 2001)** Jankowski P N, Andrienko, and G. Andrienko, “Map-centered exploratory approach to multiple criteria spatial decision making”, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 15, No. 2, PP. 101–127, 2001.
- (Jankowski et Richard. 1994)** Jankowski P. and L. Richard, “Integration of IS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection”, *Environment and Planning B*, Vol. 21, PP. 323–340, 1994.
- (Janssen et Rietveld, 1990)** R. Janssen and P. Rietveld. Multicriteria “analysis and geographical information systems : An application to agriculture land-use in Netherlands”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, PP. 129–139. 1990.
- (Jia et al., 2013)** Jia, L., Zhang, Y., Tao, L., Jing, H., Bao, S. (2013) "A methodology for assessing cleaner production in the vanadium extraction industry." *Journal of Cleaner Production*, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.016>.
- (Jiang et Esatm, 2000)** Jiang H. and J.R. Esatman, “Applications of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS”, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 14, No. 2, PP. 173–184, 2000.
- (Jiménez et al., 2007)** Jiménez A. Mateos A. Ríos-insua S.: « Missing consequences in multiattribute utility theory», the international journal of management science, (2007).
- (Joerin et al., 2001a)** Joerin F., Rey M-C., Desthieux G., et Nembrini A., « Information et participation pour l’aménagement du territoire. Rôle des instruments d’aide à la décision ». *Revue internationale de géomatique*, vol. 11, (3-4), PP. 7-30, 2001.
- (Joerin et al., 2001b)** Joerin.F, Marius and Andre,M. “Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment”, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 15, No. 2, PP. 153-174, 2001.
- (Joerin, 2001)** Joerin.F, M. Thériault, and A. Musy. “Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 15, No. 2, PP. 153-174, 2001.
- (Joerin , 1997)** Joerin. F, « Décider sur le territoire. Proposition d’une approche par utilisation de SIG et de méthodes d’analyse multicritère ». Thèse de Doctorat ès sciences techniques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, département de génie rural, 269 p.
- (Joerin et Metzger, 2004)** Joerin.F et Metzger Richard, ELECTRE TRI dans MapInfo, Chaire de recherche du Canada en aide à la décision territoriale, Université de Laval,

- (Joerin et Musy, 2000)** Joerin.F and A. Musy, “Land management with gis and multicriteria analysis”, International Transactions on Operational Research, Vol.7 ,PP. 67–87, 2000.
- (Jun , 2000)** C. Jun, “Design of an intelligent geographic information system for multi-criteria site analysis”, URISA Journal, vol.12, PP. 5–17, 2000.
- (Karimi et Houston, 1996)** Karimi et Houston, GIS: Current trends and future needs. Computers, Environment and Urban Systems, Vol.20, No.6, PP.413–425, 1996.
- (Keeney, 1992)** R.L. Keeney, “Valued-focused thinking: A path to creative decision, Harvard University Press, Cambridge, USA, 1992.
- (Khalid, 2013)** Khalid.E, “Exploring multi-criteria decision strategies in GIS with linguistic quantifiers: An extension of the Analytical Network Process using Ordered Weighted Averaging operators”, International Journal of Geographical Information Science, 815356, 2013.
- (Khalid, 2006)** Khalid. Eldrandaly, “A COM-based expert system for selecting the suitable map projection in ArcGIS”, “Expert Systems with Applications, Vol. 31, No. 1, PP. 94–100, 2006.
- (Khalid, 2003)** Khalid.E ,“A COM-based Spatial Decision Support for Industrial Site Selection”, Journal of Geographic Information and Decision Analysis , Vol. 7, No. 2, PP. 72 – 92, 2003.
- (Khalil et al., 2003)** W. A.-S. Khalil, A. Goonetilleke, and S. Kokotans S. Carroll, “Use of chemometric methods and multicriteria decision-making for site selection for sustainable on-site sewage effluent disposal. Analytica Chimica Acta, Vol. 506, No 1, PP. 41–56, 2003.
- (Kiker et al., 2005)** G.A. Kiker, T.S. Bridges, I. Linkov, A., Varghese, and T. Seager, “Application of multicriteria decision analysis in environmental decision-making, Integrated Environmental Assessment and Management, Vol.1, No. 2, PP. 1–14, 2005.
- (Koeln et cowardin, 1994)** Koeln GT & Cowardin , L.M., “Geographic information systems” In: Bookhout TA Research and management techniques for wildlife and habitats. The Wildlife Society, Bethesda, MD, 1994.
- (Koo et Connell, 2006)** B.K. Koo and P.E. O., Connell, “An integrated modeling and multicriteria analysis approach to managing nitrate diffuse pollution : 1. Framework and methodology. International Journal of Science of the Total Environment, Vol. 359, No.1-3, PP. 1–16, 2006.
- (Kothuri et al., 2011)** Ravi Kothuri, Albert Godfrind, et Euro Beinat , “Pro Oracle Spatial for Oracle Database 11g”, Printed and bound in the United States of America 98754321, Distributed to the book trade worldwide by Springer-Verlag New York,2011.
- (Kutlu et Ekmekçioğlu, 2012)** Kutlu, A. C., Ekmekçioğlu, M. (2012) "Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP." Expert Systems with Applications Vol. 39, No.1, PP. 61, 2012.
- (Martin, 2004)** Martin, Paegelow, « Geomatique et géographie de l'environnement : De l'analyse spatiale a la modélisation prospective », Géographie, Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2004.
- (Laaribi, 2000)** A. Laaribi, « SIG et analyse multicritère »,Hermès Sciences Publications, Paris, 2000.

- (Laaribi et al., 1993)** A. Laaribi, J.J. Chevallier, and J.-M. Martel, « Méthodologie d'intégration des SIG et de l'analyse multicritère ». *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 3, No. 4, PP. 415–435, 1993
- (Laaribi et al., 1996)** Laaribi A, J.J. Chevallier, and J.-M. Martel, “A spatial decision aid : A multicriterion evaluation approach”, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 20, No. 6, PP. 351–366, 1996.
- (Lagreze et Roy, 1980)**, E. Jacquet-Lagreze, B., ROY, « Aide a la Decision Multicritere et Systemes Relationnels de Preferences, cahier du Lamsade (Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision, Université Paris-Dauphine, 1980.
- (Lahdelma et al., 2000)** R. Lahdelma, P. Salminen, and J. Hokkanen, “Using multicriteria methods in environmental planning and management, *Environment Management*, Vol. 26, No.6, PP. 595–605, 2000.
- (Langevin et al., 1991)** Langevin, C., Pernel, F. and Pointet, T., “An aid to decision-making in hydrogeological exploration: multicriterion analysts in the evaluation of aquifer potential in a fractured medium”, *Hydrogeologie*, Vol.1, PP. 51–64,1991.
- (Landry, 1998)** M. Landry, « L'aide à la décision comme support à la construction du sens dans l'organisation, *Systèmes d'Information et Management*, Vol. 3, No.1, PP. 5–39,1998.
- (Lidouh, 2013)** Karim. L, “On the motivation behind MCDA and GIS integration”, *Int. J. Multicriteria Decision Making*, Vol. 3, No. 2/3, PP. 101-113, 2013.
- (Lee et al., 2013)** Lee, S. K., Mogi, G., Hui, K. S., "A fuzzy analytic hierarchy process (AHP)/data envelopment analysis (DEA) hybrid model for efficiently allocating energy R&D resources: In the case of energy technologies against high oil prices," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Vol. 21, PP. 347-355, 2013.
- (Lee et al., 2008)** Amy H.I. Lee a, Wen-Chin Chen b and Ching-Jan Chang b, “A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing industry in Taiwan” *Expert Systems with Applications* Vol. 34,PP. 96-107, 2008 .
- (Leung et Cao, 2000)** L.C. Leung, D. Cao, “On consistency and ranking of alternatives in fuzzy AHP”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 124 ,No.1, PP. 102-113, 2000.
- (Longley, et al., 2001)** Longley Paul, Goodchild Michael, Maguire David et Rhind David, “*Geographic Information Systems and Science*”. New York : John Wiley & Sons, 517 p, 2001,
- (Lounes, 2013)** Mohamed Lounes Mammeri, « Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains: Construction d'un modèle d'évaluation », thèse de doctorat en Informatique, Université Paris-Dauphine,2013.
- (MacEachren et Kraak, 2001)** MacEachren Alan M. et Kraak Menno-Jan, "Research challenges in geovisualization, *Cartography and Geographic, Information Systems*”, Vol. 6, No. 1, PP. 3-12, 2001.
- (Makram et al., 2008)** Makram. Anane, Hamadi. Kallali and Salah. Jellali “Ranking suitable sites for Soil Aquifer Treatment in Jerba Island (Tunisia) using remote sensing, GIS and AHP-multicriteria decision analysis”, *Int. J. Water*, Vol. 4, No. 1/2, 2008.
- (Malczewski et Rinner, 2015)** Jacek Malczewski, A.C. Rinner, “Multiple Criteria Decision Analysis and Geographic Information Systems, *advances in geographic information science*”, Ed springer science + busness ,New York, P311,2015/

- (**Malczewski, 2010**) Jacek Malczewski, Chapter 13, “Multiple Criteria Decision Analysis and Geographic Information Systems, Trends in Multiple Criteria Decision Analysis”, International Series in Operations Research & Management Science ,Volume 142, 2010.
- (**Malczewski, 2006**) Malczewski.j, “GIS-based multi-criteria decision analysis: a survey of the literature”, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No.7, PP. 703-726, 2006.
- (**Malczewski , 2004**) J. Malczewski, “GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview”, Progress in Planning, Vol. 6, No. 2:3, P. 65, 2004.
- (**Malczewski , 1999**) J. Malczewski, “GIS and multicriteria decision analysis”, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- (**Malczewski, 1996**) Malczewski J, “A GIS-based approach to multiple criteria group decision making”, international Journal of Geographical Information Systems, Vol. 10, No. 8, PP 955–971 ;1996.
- (**Mansour et al., 2012**), Mansour, D., Essahlaoui, A., Elhmaidia A., Lotfi A., Bouabid, R. & Fassi fihri, « Outil SIG et sélection de sites potentiels de stockage des déchets ménagers de la ville d Meknes (MAROC) », International conference of GIS-Users ,Proceding book , 2014.
- (**Marc, 2002**) Marc.souris, « Les principes de systèmes d’information géographiques : Principes algorithmes et architecture du système SAVANE », These de doctorat, IRD (Institut de recherche pour le développement) ,France, 2002.
- (**Mareschal, 2017**), Bertrand Mareschal “PROMETHEE-GAIA Statistics – 1517 papers, bmaresc@ulb.ac.be <http://www.promethee-gaia.net>, 2017.
- (**Maria et al., 2011**) Maria De Lourdes Vazquez, Jean-Philippe Waub, Adrian Ilinca and Jean-Louis Chaumel, “Analyse spatiale et approche d'aide multicritères et multi acteurs a la négociation pour évaluer des scenarios d'implantation des parcs éoliens ”, présenté a la 1^{ere} Conférence Intercontinentale d'Intelligence Territoriale "Interdisciplinarité dans l'aménagement et développement des territoires", 2011, Gatineau, Canada.
- (**Marinoni , 2006**) Marinoni O., “A discussion on the computational limitations of outranking methods for land-use suitability assessment”, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No.1, PP. 69–87,2006.
- (**Marinoni, 2005**) Marinoni O., “A stochastic spatial decision support system based on PROMETHEE”, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 19, No. 1, PP. 51–68, 2005.
- (**Martel et Aouni, 1992**) J.-M Martel and B. Aouni, « Méthode multicritère de choix d’un emplacement : Le cas d’un aéroport dans le Nouveau Québec. INFOR, Vol. 30, No. 2, PP. 97–117, 1992.
- (**Martel, 1999**) J.-M. Martel, « L’aide multicritère à la décision : Méthodes et applications, In CORSSCRO Annual Conference, Windsor, Ontario, June, 7-9, 1999.
- (**Masoud et al., 2015**) Masoud Zare Naghadehi , Reza Mikaeil and Mohammad Ataei, “The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran”, Expert Systems with Applications, Vol. 36, PP. 8218-8226, 2015.
- (**Martin et al., 2003**) Martin N, B. St-Onge, and J.-P.Waub, “An integrated decision aid

system for the development of Saint-Charles River's alluvial plain, Québec, Canada" International Journal of Environmental Pollution, Vol. 12, PP. 264–279, 2003.

(Marzieh et al., 2011) Marzieh Reisi1, Lu Aye1, Alireza Soffianian, "Industrial Site Selection by GIS in Isfahan, Iran", 978-1-61284-848-8/11/\$26.00 ©2011 IEEE

(Marius, 2009), Marius Jakimavičius & Marija Burinskiene, "Assessment of vilnius city development scenarios based on transport system modeling and multicriteria analysis", Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 15, No. 4, PP. 361-368, 2009.

(Maystre, 1994) L.Y. Maystre, J. Pictet, and J. Simos. 'Méthodes multicritères ELECTRE. Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale'. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 1994.

(Mehmet Ekmekciog lu et al , 2010) Mehmet Ekmekciog lu, Tolga Kaya and Cengiz Kahraman "Fuzzy multicriteria disposal method and site selection for municipal solid waste", Waste Management journal Vol. 30, PP. 1729-1736,2010.

(Méndez et al., 2006) Méndez M. Galván B. Salazar D. et Greiner D, "Multiple-objective genetic algorithm using the multiple criteria decision making method topsis,, 7th int. conf. on multi-objective programming and goal programming, 2006.

(Meng, et al , 2011) Meng, Jacek. Malczewski and Soheil Boroushaki , "A GIS-Based Multicriteria Decision Analysis Approach for Mapping Accessibility Patterns of Housing Development: A Case Study in Canmore, Alberta", Journal of Geographic Information System, Vol. 3,PP. 50-61, 2011.

(Merenne, 1991) Merenne-Schoumaker, B, « La localisation des industries: mutations récentes et méthodes d'analyse », Edition Nathan, Paris, 1991.

(Mintzberg, 1993) Mintzberg H, « Structure et dynamique des organisations", 1er Ed, Edition d'organisation, Paris, 1993.

(Ming-Shin et al., 2006) Ming-Shin Kuo a, Gin-Shuh Liang b, Wen-Chih Huang c , "Extensions of the multicriteria analysis with pairwise comparison under a fuzzy environment" International Journal of Approximate Reasoning Vol. 43, PP. 268–285, 2006.

(Mitchell, 2005) Mitchell Andy, "The ESRI Guide to GIS Analysis: Vol. 2: Spatial Measurements and Statistics. Redlands, Californie : ESRI Press, 252 p, 2005.

(Mohamed, Sidi, Rouchdi et al., 2017) Mohamed, Sidi, Rouchdi, Mohamed, Bouziani, Mourad, El Idrissi, Abdelwahed, "Integration du SIG et de l'Analyse Hierarchique Multicritere pour l'aide dans la planification urbaine : Etude de cas de la province de khemisset, Maroc , papeles de geografía, en linea ,ISSN 0213-1781,2017.

(Mouine, 2011) Mohamed. Mouine, « Combinaison de deux méthodes d'analyse de sensibilité , mémoire de maitrise en informatique pour l'obtention du grade de maître ès sciences, département d'informatique et de génie logiciel faculté des sciences et de génie, Université laval québec, 2011.

(Murray, 2010) Alain T. Murray, "Advances in location modeling: GIS linkages and contributions", Journal of Geographical Systems , Vol.12, No. 3, PP. 335–354 , 2010.

(Musakwa et al., 2014) Musakwa.W, Makoni.E. N, Kangethe. M and gooa.L,"Developing a decision support system to identify strategically located land for land reform in south Africa", the international archives of the photogrammetric, remote sensing and spatial information sciences, Vol. 11, No.1-3, PP. 196-203, 2014.

- (**Nasiri et al., 2013**) Hossein Nasiri, Ali Darvishi Boloorani, Hassan Ali Faraji Sabokbar, Hamid reza jafari, Mohamad Hamzeh Yusef rafii (2013), “Determining the most suitable areas for artificial groundwater via an integrated PROMETHEE II -AHP method in GIS environment (Case study Garabaygan Bassin, Iran)”, *Environmental monitoring and assessment journal*, Vol. 185, No. 1, PP 707-718 , 2013.
- (**Nikolas, 2014**) Nikolas St-Jean, « Analyse multicritère du potentiel d'utilisation d'écosystèmes côtiers pour la gestion des désastres naturels en INDE », Thèse de maîtrise en environnement, Université de Sherbrook, 2014.
- (**Nyerges, 1992**) T.L. Nyerges, “Coupling GIS and spatial analytic models”, In *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Handling*, Vol. 2, PP. 534–543, charleston, South Carolina, USA, 1992
- (**Omkarprasad et al., 2006**) Omkarprasad S. Vaidya , Sushil Kumar, “Analytic hierarchy process: An overview of applications” *European Journal of Operational Research*, vol.169, PP. 1–29, 2006.
- (**Paulson, 2014**) Paulson.Michelle [wikipédia,En ligne], « système d'information géographique », [http://fr.wikipedia.org/wiki/système d'information géographique](http://fr.wikipedia.org/wiki/système_d'information_géographique), 2014.
- (**Petit et Bruno, 2009**), Petit., Olivier, et Bruno., Romagny, « La reconnaissance de l'eau comme patrimoine commun : quels enjeux pour l'analyse économique ? », *Mondes en développement*, vol. 145, No. 1, PP. 29-54, 2009.
- (**Pereira et Duckstein, 1993**) J.M.C. Pereira and L. Duckstein. ”A multiple criteria decision-making approach to GIS based land suitability evaluation”. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 7, No. 5, PP. 407–424, 1993
- (**Pohekar et al., 2006**) Pohekar SD. et Ramachandran M. “Multi-criteria evaluation of cooking devices with special reference to utility of parabolic solar cooker (PSC) in India”, *Journal: Energy*, Vol. 31, No. 8-9, PP. 1215–1227, 2006.
- (**Pohekar et Ramachandran, 2004**) S.D. Pohekar and M. ramachandran, “Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 8, No. 4, PP. 365-381, 2004
- (**Ponsard, 1988**) Ponsard, C. *Analyse économique spatiale*, Edition : PUF, Paris, 1988.
- (**Qin Xue, 2013**) Qin, Xue, “Local ideal point method for Gis-based multicriteria analysis: A case study in London, Ontario”, *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. Paper 1295, (2013)
- (**Raju et Pillai, 1999a**) K.S. Raju and C.R.S. Pillai “Multicriterion decision making in performance evaluation of an irrigation system, *European Journal of Operation Research*, Vol. 112, No. 3, PP. 479–488, 1999a.
- (**Raju et Pillali, 1999b**) K.S. Raju and C.R.S. Pillali , “Multicriterion decision making in river basin planning and development, *European Journal of Operation Research*, Vol.112, No. 2, PP. 249–257, 1999b.
- (**Raffaella et al., 2011**), Raffaella.B, Paule-Annick.D and Muriel.N, “Evolution et développement des méthodes d'Analyse spatiale multicritère pour des modèles d'aptitude : L'exemple des applications en Géosciences”, presented at *Conférence Francophone ESRI*, Oct 2011, Versailles, France.

- (Ramanathan, 2001)** R. Ramanathan, “A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact”, *assessment Journal of Environmental Management*, Vol. 63, PP. 27–35, 2001.
- (Randal et al., 2011)** Randal Greene, Rodolphe Devillers, Joan E.Luther and BriaG.Eddy (2011), “Gis-Based Multiple-Criteria Decision Analysis”, Department of geography, Memorial University of Newfoundland, Canadian Forest service, Natural resources Canada. *Geography compass* 5/6, 2011.
- (Rein et al., 2005)** Rein Alhas & Uler Mark, “Location based services- New challenges for planning and public administration”, *Futures journal* Vol. 37, No. 6, PP. 547-561, 2005.
- (Rigol et al., 2001)** J.P. Rigol, C.H. Jarvis, and N. Stuart. “Artificial neural networks as a tool for spatial interpolation”, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 15, No. 4, PP. 323– 343, 2001.
- (Rigaux, et al., 2001)** Rigaux Philippe, scholl Michel et Voisard Agnès, ”Spatial databases with application to GIS”, 2 Ed. San Francisco, CA : Morgan Kaufmann publishers Inc, 440 P, 2001.
- (Robyn, 1979)** Robyn M. Dawes, ‘The Robust Beauty of Improper Linear Models in Decision Making’ *American psychologist*”, Vol. 34, No. 7, PP. 571-582, 1979.
- (Roy, 1993)** B., Roy, “Decision science or decision-aid science?”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 66, No. 2, PP. 184–203, 1993.
- (Roy et Bertier, 1971)** B., ROY , BERTIER P, « La Méthode Electre 2, une Méthode de Classement en Présence de Critères Multiples », Note de travail 142, Direction Scientifique, Sema, Paris, 1971.
- (Roy, 1985)** Roy B. *Méthodologie multicritère d’aide à la décision*. Paris : Economica, XXII + 423 p, 1985.
- (Roy, 1968)** B. Roy. « Classement et choix en présence de points de vue multiples : La méthode ELECTRE », *Revue Française d’Informatique et de recherche Opérationnelle*, Vol.2, No. 8, PP. 57–75, 1968.
- (Saaty, 2008)** Thomas L. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process”, *Int. J. Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, PP.83-98, 2008.
- (Saaty, 2007)** Thomas L. Saaty , “Time dependent decision-making; dynamic priorities in the AHP/ANP: Generalizing from points to functions and from real to complex variables, *Mathematical and Computer Modeling* Vol.46 , PP. 860–891,2007.
- (Saaty ,1982)** Thomas L. Saaty ,”Decision-Making for leaders : the analytical hierarchy process for decisions in a complex word. *Life-time learning publications*, Belmont, 312P,1982.
- (Saaty, 1980)** Thomas L. Saaty “The Analytic Hierarchy Process”, McGraw-Hill, 1980.
- (Saaty, 1977)** Saaty, T., “A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, No. 3 , PP.234-281, 1977.
- (Sandro ,2007)** Sandro Bimonte, « Intégration de l'information géographique dans les entrepôts de données et l'analyse en ligne : de la modélisation à la visualisation, *Thèse de doctorat en Informatique*, N° d’ordre 2007-ISAL-0105, 2007.
- (Shuo et al., 2008)** Shuo-Yan Chou a, Yao-Hui Chang, Chun-Ying Shen,“A fuzzy simple additive weighting system under group decision-making for facility location selection with

objective/subjective attributes”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 189, PP.132-145, 2008.

(Sehnaz et al., 2011) Sehnaz. Sener, Erhan Sener and Remzi Karagüzel, “Solid waste disposal site selection with GIS and AHP methodology: a case study in Senirkent–Uluborlu (Isparta) Basin, Turkey”, *Environ Monit Assess journal* , 173,PP. 533-554, 2011.

(Sehnaz et al., 2010) Sehnaz. Sener, Erhan Sener, B. Bilgehan Nas and Remzi Karaguzel “Combining AHP with GIS for landfill site selection: A case study in the Lake Beys_Ehircatchment area (Konya, Turkey)”, *Waste Management journal*, Vol. 30, 2010.

(Sengupta et Bennett , 2003) R.R. Sengupta and D.A. Bennett. Agent-based modeling environment for spatial decision support. Vol.17, No.2, PP.157–180, 2003.

(Simon et al., 2004) Simon U. Bruggmann R. Buden S.: «Aspects of decision support in water management –example Berlin and postdam (Germany) I, spacially differentiated evaluation», *water research* Vol. 38, 2004.

(Simon, 1983), Simon Herbert A, « Administration et processus de décision, 1^{ère} édition, Economica, Paris, 1983.

(Simon, 1960) H.A. Simon, “The new science of management decisions, Harper & Row, New York and Evanston, 1960.

(Shadman et al., 2012) Majid Shadman, Roodposhti Saeed Rahimi, Mansour Jafar Beglou , “PROMETHEE II and fuzzy AHP: an enhanced GIS-based landslide susceptibility mapping”, *Natural hazards* , Vol. 73, No. 1 , PP. 77-95, 2012.

(Sharifi et al., 2002) Sharifi M.A., W. van den Toorn, A. Rico, and M. Emmanuel, “Application of GIS and multicriteria evaluation in locating sustainable boundary between the Tunari National Park and Cochabamba city (Bolovia)”, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, Vol. 11, No. 3, PP. 151–164, 2002.

(Shrivastava et al., 2015) P. Shrivastava, S. Mishra & S. K. Katiyar, “A Review of Solid Waste Management Techniques Using GIS and Other Technologies”, *International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), Jabalpur, PP. 1456-1459, 2015.*

(Snjezana et Menad, 2006) Snjezana. Knezic , Nenad Mladineo , “GIS-based DSS for priority setting in humanitarian mine action”, *intrenational, journal of geographic information*, Vol.20, No. 5, PP. 565-588,2006.

(Sui , 1993) D.Z. Sui, “Integrating neural networks with GIS for spatial decision making, *Operational Geographer*, Vol. 11, No. 2, PP. 13–20, 1993.

(Stefanakis et al., 1999) E. Stefanakis, M. Vazirgiannis, and T. Sellis, “Incorporating fuzzy logic methodologies into DBMS for the application domains of GIS” *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 13, No.7, PP. 657–675, 1999.

(Sumathi et al., 2008) ,V.R Sumathi, Usha Natesan et Chinmoy sarkar, “GIS based approach for optimised sitting of municipal solid wast landfill”, *Waste manegment journal*, Vol.28, No.11, PP. 2146- 2160, 2008

(Sullivan, 2009) T. Sullivan, B. Yatsolo, A. Grebenkov, I. Linkov, “Decision Evaluation for Complex Risk Network Systems (DECERNS) Software Tool”, Chapter , Oct 2009 <https://www.researchgate.net/publication/226112895>

- (Sylvian et al., 2016)** Sylvian. Kubler, Jeremy. Robert, William. Derigent, Alexandre. Voisin and Yves Le. Traon , “ Astate-of the art & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications”, *Experts systems with application*, Vol. 65, PP. 398-422, 2016.
- (Taibi et Atmani, 2017a)** Aissa Taibi and Baghdad Atmani , “Multi-Criteria Analysis Coupled with GIS and IF... THEN... Rules for Ranking Industrial Zones”, *International Journal of Applied Engineering Research (IJEAR)*, Vol. 12, No 1, PP. 22-36, 2017.
- (Taibi et Atmani, 2017b)** Aissa Taibi and Baghdad Atmani, “Combining Fuzzy AHP with GIS and Decision Rules for Industrial Site selection”, *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence (IJIMAI)*, Vol. 4, No. 6, pp. 60-69, 2017.
- (Taibi et Atmani, 2017c)**, Aissa Taibi and Baghdad Athmani, Geographic Information System-based PROMETHEE II Method: An approach for ranking industrial zones, *Journal of Digital Information Management (JDIM)* Vol.15, No. 3, PP. 148-158, 2017.
- (Taibi et Atmani, 2016a)** Aissa Taibi, Baghdad Atmani, “GIS-based Multi-Criteria Analysis and if.. then... rules for ranking industrial zones”, In *Proceeding, Third International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management in Mediterranean Countries*, Paloma Díaz, Narjès Bellamine Ben Saoud,Julie Dugdale, Chihab Hanachi (Eds.) *ISCRAM-Med 2016 Madrid*, Oct, 26.28 2016 , ISBN: 978-84-16829-03-3,2016.
- (Taibi et Atmani, 2016b)**, Aissa. Taibi and Baghdad. Atmani , “Multicriteria decision aided System for Ranking Industrial Zones (RPRO4SIGZI)”, *Proceeding of The Fourth International Conference on Database and Data Mining (DBDM 2016)* PP 11 – 27 *Computer Science & Information Technology Dubai, UAE, April 23~24, 2016*.
- (Taibi et Atmani, 2015)** Taibi . Aissa, Atmani .Baghdad, “Système d’Aide à la Décision multicritères pour le Rangement des Zones Industrielles (RPRO4SIGZI) “, *The conference on the Advanced Decisional Systems (ASD)*, Tangier, Morocco , 2015.
- (Tarek et al., 2003)** Tarek. Rashed and John. Weeks, “Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas”, *International journal of geographical information sciences*, francis and taylor edition,2003.
- (Tarp et Helles, 1995)** P. Tarp and F. Helles. “Multi-criteria decision-making in forest management planning: an overview, *Journal of Forest Economics*, Vol.1, No. 3, PP. 273–306, 1995.
- (Teclé, 1988)** A. Teclé, “A decision methodology for the resource utilization of rangeland watersheds, PhD thesis, School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, 1998.
- (Thompson et al., 2013)** A. F. Thompson, A. H. Afolayan & E. O. Ibidunmoye, “Application of geographic information system to solid waste management”, *Pan African International Conference on Information Science, Computing and telecommunications (PACT)*, PP. 206-211. Lusaka, 2013.
- (Tomlin, 1990)** Tomlin, C. Dana, “Geographic Information Systems and Cartographic Modeling”, New Jersey , Editeur : Prentice Hall, Englewood Cliff, 572 P, 1990.
- (Tsung et al., 2008)** Tsung-Yu Choua, Chia-LunHsub, and Mei-Chyi Chenc“A fuzzy multi-criteria decision model for international tourist hotels location selection”, *International Journal of Hospitality Management*, Vol. 27, PP. 293-301, 2008.

- (Vahidniaa et al., 2008)** M.H. Vahidniaa, A. Alesheikhb, A. Alimohammadic and A. Bassirid, “A Fuzzy Analytical Hierarchy Process in gis application” , the international archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol.37.part B2.Beijing, 2008.
- (Valentina, 2012)** Valentina, Ferretti, "Multiple Criteria Decision Aiding" Integrating Multicriteria Analysis and Geographic Information Systems: a survey and classification of the literature 74th Meeting of the European Working Group, Politecnico di Torino, Land, Environment and Geo- Engineering Department (DITAG), 2012.
- (Valentina et Silvia, 2011)** Valentina.F and Silvia.P, “Integrating Multicriteria Analysis and Geographic Information Systems for studying ecological corridors in the Piedmont Region” ,presented at the 74th Meeting of the European Working Group, Multiple Criteria Decision Aiding, 2011.
- (Van Laarhoven et Pedrycs, 1983)** Van Laarhoven P.J.M, and Pedrycs W., “A fuzzy extension of Saaty’s priority theory” , Fuzzy Sets and Systems, Vol. 11,PP. 229-241,1983.
- (Victor, 2013)** Victor Kagni, “Integration Analysis of the CEMAC Countries in a Multicriteria Context: Outranking Relations Approach”, International Multilingual Journal of Contemporary Research, Vol. 1 No. 2, 2013.
- (Vincke, 1989)** Vincke . Ph. , « L’aide multicritère à la décision. Éditions de l’Université de Bruxelles, Bruxelles, 1989.
- (Vincke ,1992)** Ph. Vincke. « Multicriteria decision-aid ». John Wiley & Sons, Chichester, 1992.
- (Wang et al., 1990)** F. Wang, G.B. Hall, and Subaryono, “Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software : Database design and application”, International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 4, No. 3, PP. 261–283, 1990.
- (Wise et al., 2001)** S. Wise, R. Haining, and J. Ma. “Providing spatial statistical data analysis functionality for the GIS user: the SAGE project”, International Journal of Geographic Information Vol. 15, No. 3, PP. 239–254, 2001.
- (William, 2008)** William.Ho, “Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review”, European Journal of Operational Research,Vol. 186, PP. 211-228, 2008 .
- (Wu, 1998)** F. Wu, “Simland : A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules”, International Journal of Geographical Information Science, Vol. 12, No. 1, PP. 63–82, 1998.
- (Yanar et Akyürek)** T.A. Yanar and Z. Akyürek, “The enhancement of cell-based GIS analyses with fuzzy processing capabilities”, Information Sciences, Vol. 176, No.8, PP. 1067–1085, 2006.
- (Yan.Ge et al., 2008)** Yan. Ge, Qi .Xu and Hong .Li, “The Design and Application of a Generic AHP Evaluation System”, in Proc. 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Dalian, PP. 248-252, China, 2008,
- (Yialouris et al., 1997)** C.P. Yialouris, V. Kollias, N.A. Lorentzos, D. Kalivas, and A.B. Sideridis, “An integrated expert geographical information system for soil suitability and soil evaluation”, Journal of Geographic Information and Decision Analysis, Vol.1, No. 2, PP. 89–99, 1997.

(Ying.Ming et al., 2008) Ying.Ming Wang a, Ying Luo b and Zhongsheng Hua, “On the extent analysis method for fuzzy AHP and its applications” European Journal of Operational Research, PP.735–747, 2008.

(Younsi et al., 2009) Younsi Fatima Zohra, Djamila Hamdadou¹, Bouziane Beldjilal, « Proposition d’un Système Interactif d’Aide à la Décision Spatiale : Télédétection, SIG et Analyse Multicritère, 12p, Département d’informatique, Faculté de Sciences, Université d’Oran Es-Senia, Algérie, 2009.

(Zhang et McGrath , 2004) C. Zhang and D. McGrath, “Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different points”, Geoderma, Vol. 119, PP. 261–275, 2004.

Résumé

Les praticiens de la santé confirment que les zones industrielles constituent une menace sur la santé des citoyens. Pour entreprendre ce problème de santé public à ces débuts il faut sélectionner ces zones sur des bases scientifiques. La sélection des sites industriels est un problème géo-décisionnel en relation avec l'aménagement territoriale et affecte par conséquent la santé des citoyens. Sa complexité est due à un grand volume de données géographiques. Pour le traitement de ces données, le système d'information géographique (SIG) se présente comme l'outil le plus adéquat, à travers ses capacités de stockage, de gestion, d'analyse, de modélisation et d'affichage. Néanmoins, les SIG ne disposent pas des capacités analytiques pour supporter la nature multicritère des problèmes géo-décisionnel. Afin de faire évoluer le SIG en outil d'aide à la décision spatiale, les chercheurs ont proposé l'intégration des fonctionnalités analytiques plus sophistiquées basées sur des outils de la recherche opérationnelle tels que : la programmation linéaire, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones, l'intelligence artificielle, etc. Ces outils ont permis d'améliorer les potentialités analytiques des SIG qui restent limités vis-à-vis de l'aspect multicritère des problèmes d'aide à la décision à référence spatiale. Les méthodes d'analyse multicritère (AMC) présentent l'outil le plus adapté pour surmonter cette limite. Ces méthodes offrent la possibilité de tenir en compte une diversité de critères souvent conflictuels. Depuis son émergence, l'analyse multicritère a fait l'objet d'application à de nombreux problèmes à référence spatiale même sans l'utilisation du SIG. Cependant, les méthodes d'AMC ne permettent pas la prise en compte de l'aspect spatial, alors qu'il est nécessaire d'étudier et d'analyser la distribution géographique des actions, des critères d'évaluation et de l'information préférentielle. L'intégration SIG-AMC est, donc, la solution la plus adéquate pour l'aide à la décision à référence spatiale. Dans ce travail de recherche, notre intérêt s'est porté sur le développement de solutions méthodologiques et informatiques dédiées au renforcement de ce lien légitime entre les SIG et l'AMC. Nous avons proposée une intégration SIG-AMC mixte et souple. Une consolidation du modèle décisionnel basé sur AHP (Analytic Hierarchy Process) par un ensemble de règle de production est proposée. L'utilisation des règles a conduit à une réduction considérable des critères techniques issue d'une expertise objective en un ensemble réduit de critères à caractère subjectif convenable à AHP. La logique floue est introduite au niveau de la construction des matrices de comparaison par pair. L'objectif est d'alléger l'incertitude et la subjectivité des décideurs qui construisent ces matrices. Un SDSS (Spatial Decision Support System) qui concrétise l'approche est proposé pour l'aide à la décision lors de la sélection des zones industrielles dans le cadre d'un projet étatique.

Mots clés :

SIG; Analyse multicritère (AMC); Aide à la décision; Intégration SIG-AMC; AHP; PROMETHEEII; Logique Floue; Zone industrielle; TFN; Sélection de site.