

## **Contribution d'un système d'information à référence spatiale à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc)**

**Université de Genève**  
**Zine El Abidine EL MORJANI,**  
**Walter WILDI,**  
**Jean-Michel JAQUET**

**Université de Neuchâtel**  
**Mahmoud BOUZELBOUDJEN**

**Université Ibn Zohr**  
**Lhoussaine BOUCHAOU**

### **Résumé**

La gestion de l'environnement dans un esprit de développement durable est un besoin vital de notre société. Sa mise en œuvre exige une approche pluridisciplinaire et interdisciplinaire, sur la base d'un concept approprié, ainsi que d'une base de données exhaustive. Dans ce cadre, il est indispensable d'acquérir des informations détaillées, fiables et bien organisées sur l'état de l'environnement et du territoire. Le projet SIRS Souss (SIRSS) vise à élaborer une approche optimale de gestion de l'environnement intégrant le concept de développement durable. Il permet la spatialisation des différents facteurs techniques, environnementaux, sociaux et économiques tout en mettant en œuvre des outils modernes d'analyse et de modélisation.

Le point central de ce travail concerne l'élaboration de données numériques spatiales et temporelles, contenant les informations ayant un rapport avec la gestion environnementale et l'aménagement du territoire dans la région du Souss (Sud Marocain). Cette recherche a permis la création de six documents spatiaux de base en format raster ou vecteur (la topographie, la couverture du sol, la lithologie, la pédologie, la population et la piézométrie du bassin) et l'établissement de six cartes mensuelles hydro-climatiques en format raster résultat d'une simulation de la continuité spatiale des principaux processus hydrologiques : précipitations, températures, aridité, évapotranspiration, ruissellement et infiltration. Comme méta-information, nous avons associé des cartes d'évaluation de la "qualité" des estimations. Cette méthodologie spatiale a nécessité des approches déterministes et probabilistes et le recours à diverses méthodes statistiques (régression multiple, analyse en composantes principales). La combinaison des Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) et la télédétection (TD) représente un apport original et incontestable. Ce système d'information met à la disposition des ingénieurs et gestionnaires des outils d'analyse et d'aide à la décision pour l'aménagement et la planification du territoire.

Dans le cadre de cette recherche, une démarche intégrée de traitement numérique des données spatiales a été appliquée en vue d'une sélection des meilleures installations pour le stockage des déchets ménagers et industriels (ISDMI) dans le bassin du Souss. Cette application a été motivée par les résultats d'une évaluation des risques environnementaux liés à la décharge actuelle du Grand Agadir, considérant celle-ci comme une source de danger potentiel pour la santé de la population riveraine et l'environnement. Le SIRS et l'analyse multicritère (AM) se sont avérés être

des outils et des méthodes bien adaptés à cette nouvelle problématique de nature éminemment multidisciplinaire. Le SIRS a contribué à l'évaluation d'un grand nombre d'alternatives pour la localisation d'ISDMI selon les critères d'évaluation (critères exclusifs et d'appréciation) et les méthodes d'analyse multicritères ont été utilisées, d'une part pour faire ressortir les sites les plus adéquats au stockage des déchets ménagers et, d'autre part, établir une liste de priorité pour les sites potentiels de stockage des déchets industriels non dangereux.

Mots-clefs : Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS), télédétection, méthodes multicritères d'aide à la décision, statistique et géostatistique, simulations conditionnelles, analyse de régression, gestion des déchets, gestion de l'environnement, concept de stockage des déchets, climat aride, climat semi-aride, Souss, Maroc.

## Introduction

### 1.1 Intérêt et problématique

A l'instar des pays en développement, le Maroc est de plus en plus confronté à des problèmes environnementaux parmi lesquels on peut mentionner la dégradation des ressources naturelles, la salinisation, les pollutions chimiques, les sites contaminés, l'aménagement et la planification du territoire, la gestion des réseaux et des ressources en eau et celle des déchets urbains. Leur mise en œuvre se heurte à plusieurs contraintes qui sont essentiellement d'ordre institutionnel, financier, technique, socio-économique ainsi qu'un manque d'informations appropriées et de données actualisées.

Les pratiques appliquées actuellement en matières de gestion de l'environnement ne sont pas en conformité avec le concept de développement durable, qui vise à améliorer la vie des citoyens grâce au développement socio-économique et à la protection de l'environnement. Ces pratiques ont des impacts désastreux, à court et à long terme, sur l'état sanitaire des populations, les sols, l'air et les ressources hydrauliques. Le développement démographique et l'accroissement des activités économiques ne font qu'amplifier les problèmes, en contribuant à la dégradation de l'environnement et à la contamination ou l'épuisement des ressources naturelles.

Il est primordial de souligner que le domaine de la gestion de l'environnement, en tant que composante du système de gestion de l'aménagement et de planification du territoire, représente un défi majeur pour les prochaines années et un domaine prometteur pour la protection de l'environnement; il devrait en effet être intégré à tous les secteurs d'activité susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement. Dans ce cadre, nous avons mené une recherche sur l'élaboration d'un Système d'Information à Référence Spatiale (SIRS) conçu pour la gestion des risques environnementaux. Ce système a ensuite été appliqué, à titre d'exemple, à la gestion des déchets et plus précisément à la sélection des sites les plus aptes au stockage des déchets, en raison de son importance et de l'intérêt actuel des autorités publiques.

La production et l'élimination des déchets exercent une grande pression sur l'environnement. Pour des raisons financières et techniques, la politique marocaine en matière d'élimination et gestion des déchets reste précaire. Ainsi, presque tous les déchets sont déposés dans des décharges sauvages, ne répondant à aucune norme environnementale ou dans des décharges aménagées, autorisées officiellement mais non contrôlées.

Cette élimination inappropriée des déchets entraîne une pollution intolérable dans toutes les régions du royaume, notamment dans la ville Agadir par sa décharge publique. Ses effets nuisibles ont astreint les pouvoirs publics et les autorités locales à reconsidérer la question de la gestion des déchets et celle liée à leur mise en décharge, en se préoccupant à la recherche d'un nouveau site approprié à l'entreposage des déchets, respectueux et conforme à l'environnement et à la santé publique, susceptible de répondre à cet urgent besoin.

Le choix d'une ou de plusieurs installations appropriées au stockage de déchets ménagers et industriels (ISDMI) est complexe du point de vue technique et conflictuel du point de vue social, économique et politique (Rey, 1994); il est confronté à la pluridisciplinarité et au devoir d'information. La solution la plus optimale se trouve dans un équilibre entre les différents facteurs

techniques, sociaux, économiques et politiques. Les systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS), la télédétection (TD) et l'analyse multicritère (AM) se proposent comme des outils et des méthodes bien adaptés à cette problématique et illustrant le mieux l'approche multidisciplinaire à la gestion des risques environnementaux et à la sélection des sites de stockage des déchets. En effet, les SIRS sont spécialisés dans la saisie, le stockage et l'analyse de l'information, alors que les méthodes d'AM sont conçues pour fournir une information synthétique (Joerin, 1998).

Conscients que le choix d'un site d'implantation constitue une pierre d'achoppement, l'Institut F.A.Forel et UNEP/GRID ont proposé conjointement un projet pilote (SIRS-Souss) pour développer un outil d'aide à la décision, en vue de la sélection des sites de stockage les plus favorables, en combinant la télédétection, les SIRS et les techniques d'analyse multicritère. Ce projet est mené en collaboration avec d'autres institutions pour réaliser une première application dans la région semi-aride marocaine du Souss. La réalisation d'une maquette conceptuelle et numérique sur cette région permettrait ensuite d'appliquer la méthode développée à l'échelle nationale du Maroc.

## 1.2 Objectifs de la recherche

Ce projet a pour objectif principal de concevoir un prototype de SIRS couplé à l'analyse multicritère, comme outil d'aide à la décision dans le domaine de la gestion des risques environnementaux, outil qui devrait notamment permettre aux gestionnaires de gérer et d'analyser les informations nécessaires pour la sélection de sites adéquats au stockage des déchets ménagers et industriels dans un contexte de zone aride à semi-aride. Il contribuera ainsi à la protection de l'environnement, à la santé publique et à la diminution des obligations imposées aux générations futures, en limitant la prolifération des décharges sauvages. Cette approche devrait être simple et facilement transposable à toutes les régions arides et semi-arides.

Cette recherche de nature pluridisciplinaire et interdisciplinaire, intégrant le concept de développement durable (une harmonie entre les activités économiques, la satisfaction des besoins sociaux et le souci de préserver l'environnement) consiste à :

- Structurer et à réaliser une base de données cartographiques, c'est-à-dire d'analyser et d'évaluer de manière explicite les paramètres naturels et anthropiques (topographiques, géologiques, hydrogéologiques, climatologiques, réseau hydrographique, infrastructures) pour assurer un stockage permanent en toute sécurité. Nous avons tenu compte des aspects environnementaux (adéquation de la couverture du sol, protection de la nature et du paysage, conservation de la forêt, protection des eaux, conservation des sols, proximité des fournisseurs de déchets), des aspects sociaux (sensibilité de la population, exposition visuelle) sans oublier d'autres facteurs économiques.
- Proposer des modèles pour créer et spatialiser d'autres plans d'information dérivés (précipitations, évapotranspiration, ruissellement, infiltration, densité de population, ...),
- Conceptualiser et "alimenter" le SIRS-Souss pour combler les lacunes liées au manque d'informations, puis l'utiliser en tant qu'outil d'aide à la décision, permettant l'examen des interactions entre les différents plans d'information,
- Proposer et appliquer les méthodes d'analyse multicritère pour planifier sur l'ensemble du territoire étudié, les meilleurs sites pour l'élimination correcte des déchets, suivant des scénarios basés sur la variation de l'importance relative des facteurs de décision.

## 1.3 Choix du bassin versant du Souss

Dans le but d'appliquer et de tester cette approche, nous avons choisi la région du Souss (dont Agadir est la capitale), qui nous semble réunir des atouts essentiels pour cette recherche : 1) région touristique par son climat tempéré et premier centre balnéaire du Maroc, 2) région forestière, peuplée principalement par l'arganier, dernier vestige d'une flore subtropicale que l'on y rencontre uniquement, 3) zone à fort risque sismique, 4) région à risque de crue, 5) région industrielle et agricole et 6) région à forte densité de population.

Outre ces caractéristiques climatiques, économiques, sociales, environnementales et

démographique, notre choix a été renforcé par la disponibilité d'une grande quantité de données, la disponibilité d'images satellitaires couvrant la région et par l'intérêt des autorités pour la recherche de nouveaux sites de décharges plus adéquats, respectueux et conformes aux principes de la protection de l'environnement. Les décharges actuelles de la région présentent un impact considérable sur l'environnement, notamment sur l'air, les sols et les nappes phréatiques et sur la santé des populations.

Le bassin versant étudié se situe dans le sud-ouest marocain (figure 1), soit approximativement entre 9,6 et 7,47 degré de longitude ouest et entre 29,70 et le 31,11 degré de latitude nord. Il est délimité par l'Océan atlantique à l'ouest, le massif éruptif de Siroua à l'est, la chaîne alpine du Haut Atlas au nord et le bombement anticlinal de l'Anti-Atlas occidental au sud (figure 2).

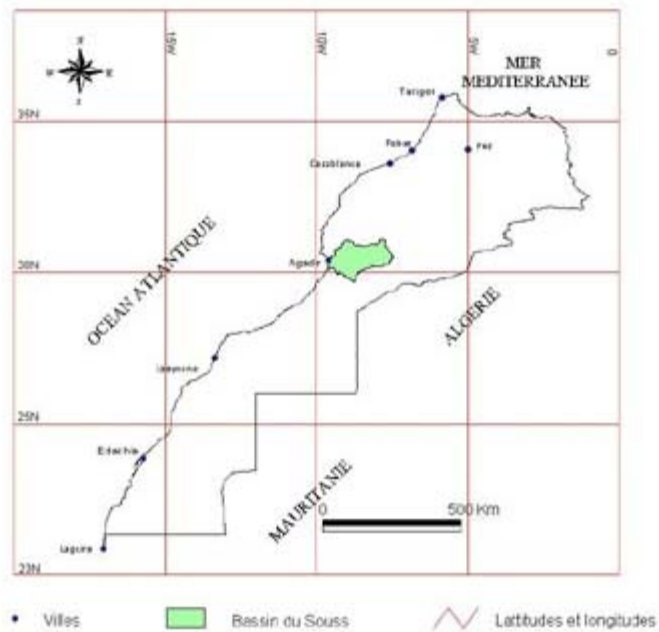


Figure 1 : Localisation du bassin du Souss au Maroc

Le territoire ainsi délimité couvre une superficie de 17 986 km<sup>2</sup> soit l'équivalent de 2.5% du territoire national. L'Oued Souss représente l'affluent principal du bassin.

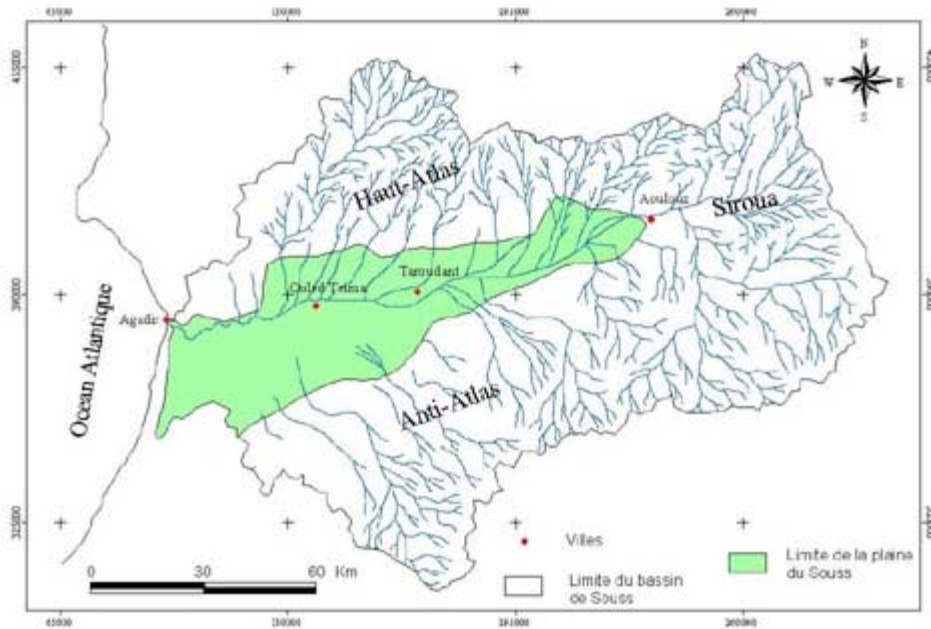


Figure 2 : Situation géographique du bassin versant et de la plaine du Souss

Sur le plan administratif, le bassin du Souss s'étend principalement sur la région Souss-Massa-Drâa dont il occupe 96.9%; le reste est réparti sur les régions Marrakech-Tensift-Al Haouz et Guelmim-Es-Smara. Il regroupe donc la wilaya d'Agadir (les préfectures d'Agadir Ida Outanane, d'Inezgane Aït Melloul et la province de Chtouka Aït Baha) et les provinces de Taroudant, Ouarzazate, Chichaoua, Al Haouz et Tata; soit 14 cercles englobant 130 communes (115 communes rurales et 15 communes urbaines), soit à peu près 7.5% de l'ensemble des communes à l'échelon national.

La population de la région du Souss (wilaya d'Agadir et province de Taroudant) est de 1 793 000 habitants selon les projections de 1999, basées sur les résultats du recensement de 1994, soit 6.2% de la population totale du Maroc. La part des populations urbaines ne représente que 48%.

La densité moyenne de peuplement est de l'ordre de 82hab/km<sup>2</sup>, très supérieure à la moyenne nationale (39.7 hab/km<sup>2</sup>). Elle varie selon les provinces, les communes urbaines et rurales, les ressources hydrauliques, la topographie et l'occupation du sol. En milieu urbain, la densité est très forte et atteint 2642 hab/km<sup>2</sup> contre 43 hab/km<sup>2</sup> en moyenne en milieu rural.

La croissance démographique accélérée qu'a connue la région induit une expansion des centres urbains, un accroissement de la demande en eau et une augmentation des déchets urbains (eaux usées et déchets solides).

## 2 Méthodologie

La sélection de sites pour le stockage des déchets ménagers et industriels (ISDMI) correspond à une des opérations clef de la mise en œuvre d'une stratégie de gestion des déchets.

La démarche appliquée dans le cadre de cette recherche (figure 3) nécessite une compilation des données géographiques relatives à plusieurs disciplines comme la géomorphologie, la géologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie, la climatologie, la télédétection, la pédologie, la botanique et la démographie. Dans chacune de celles-ci, nous avons utilisé des techniques variées de spatialisation comme la géostatistique, la régression multiple, l'analyse en composantes principales, les classifications supervisées ou non supervisées. Ces techniques ont permis la création de six documents spatiaux de base en format raster ou vecteur (le modèle numérique d'altitude et ses dérivés, l'occupation du sol, la carte lithologique et ses dérivés, la carte des sols, la carte de population et la carte piézométrique du bassin) et l'établissement de six cartes

mensuelles hydro-climatiques en format raster exprimant une simulation de la continuité spatiale des principaux processus et paramètres hydrologiques : précipitations, températures, aridité, évapotranspiration, ruissellement et infiltration. Le caractère multidisciplinaire intervient à la fois au niveau de l'information collectée sur la zone d'étude et à celui de l'analyse (Collet, 1992). Ces plans d'information ont été par la suite combinés par des méthodes d'analyse multicritère pour produire une information synthétique sur les sites les plus appropriés au stockage de déchets.

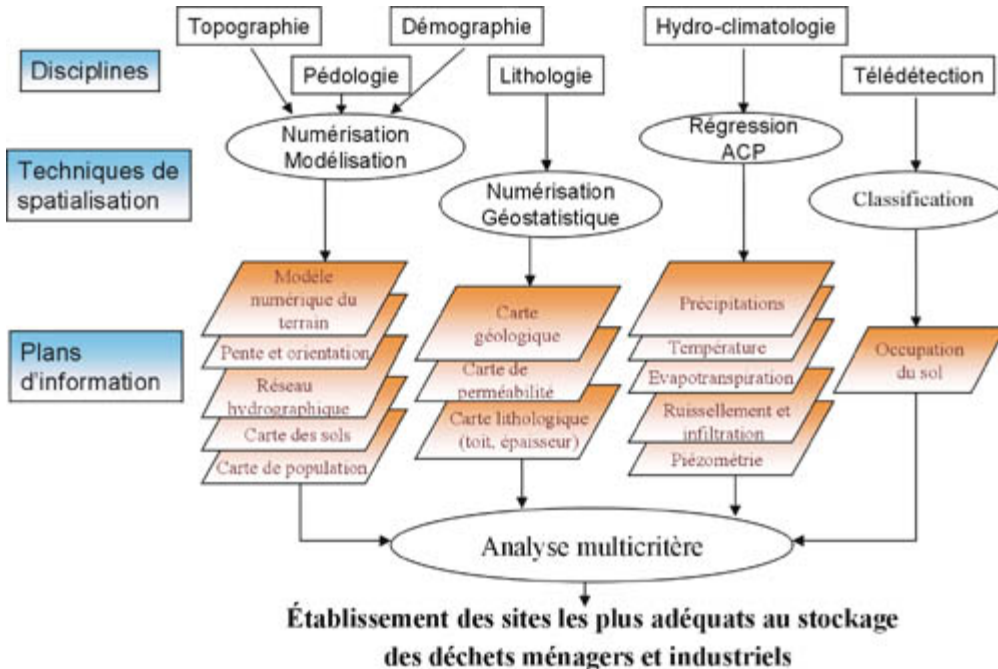


Figure 3: Schéma général présentant la démarche de l'étude

## 2.1 Elaboration des plans d'information du SIRS Souss pour la gestion environnementale

Dans le cadre de cette recherche, une attention particulière a été portée à l'élaboration des plans d'information numériques comme la topographie, la couverture du sol, la lithologie, la pédologie, la population, l'hydro-climatologie et l'hydrogéologie, en précisant chaque fois leurs qualités. Plusieurs logiciels (ArcInfo 8.0.1, Arc View 3.2, Idrisi 32, Erdas Imagine 8.4, S-Plus 2000, Isatis) ont été utilisés pour la saisie, l'analyse, la modélisation ou la représentation des données.

### 2.1.1 Topographie

Le modèle numérique de terrain constitue l'élément de base du SIRS; il intervient dans la maîtrise de problèmes aussi divers que la gestion de l'eau (distribution, assainissement, délimitation de bassins versants et ruissellement), l'aménagement du territoire, le remaniement parcellaire et finalement la gestion des déchets. Le relief est en conséquence l'un des premiers critères conditionnant l'emplacement d'une décharge.

Le modèle du relief de la région du Souss a été produit à des résolutions de 100, 50 et 20 mètres par interpolation de données numériques (courbes de niveaux, points cotés) saisies sur les cartes topographiques à l'échelle 1:50.000. Nous avons par la suite analysé la qualité selon deux approches de validation interne et externe dont chacune débouche sur une série de critères d'évaluation. Le résultat nous a permis de retenir les MNA de résolution 20 et 50m, émoussées par un filtre de fenêtre 9\*9. L'analyse hydrologique sur ces derniers démontre que le MNA d'une résolution de 50m est le plus fiable et le plus proche de la surface réelle. Cette constatation a été confirmée lors d'une comparaison avec des données altimétriques de sources différentes.

### 2.1.2 Couverture du sol :

La carte thématique de la couverture du sol est un paramètre déterminant de l'utilisation et de la gestion du territoire. Elle est susceptible d'éclairer toute prise de décision d'aménagement sur le

territoire et d'élaborer les grandes orientations en matière de développement régional. Elle conditionne donc grandement l'emplacement optimal des sites de décharges.

Etant donnée de la grande superficie du bassin, nous avons choisi une méthode cartographique basée sur le traitement des images satellitaires pour produire une carte d'occupation du sol. La démarche méthodologique adoptée comporte trois étapes principales qui sont :

- Une étape d'analyse, permettant d'élaborer plusieurs cartes de couverture du sol en utilisant la classification non dirigée assistée et la classification dirigée classique et une combinaison de deux logiciels (Erdas Imagine et Idrisi).
- Une étape de synthèse visant le regroupement de l'ensemble des thèmes précédemment évalués à d'autres thèmes de SIRSS pour proposer une seule carte de couverture du sol en accord avec notre problématique.
- Une étape de validation de la carte de couverture du sol précédemment obtenue en se basant sur deux critères : statistique avec l'appréciation de l'homogénéité des thèmes et géographique, avec l'appréciation de la taille des objets cartographiques.

### 2.1.3 Lithologie

Les formations géologiques ont une influence non seulement sur la répartition des écoulements superficiels et souterrains, mais aussi sur le choix de sites adéquats à l'enfouissement de déchets. Le substrat d'une décharge doit être étanche et suffisamment épais, ne présentant aucune fissure afin d'éviter toute pollution des eaux souterraines. C'est dans cet esprit que nous avons adopté une approche probabiliste pour la modélisation de la continuité spatiale des paramètres géométriques des différentes couches lithologiques constituant les sondages dans la plaine (les cotes des toits, les profondeurs par rapport au sol et les épaisseurs). La cote du toit a été utilisée pour connaître l'altitude de la couche imperméable (aquiclude) recouvrant la nappe phréatique. Quant à l'épaisseur, elle sera utilisée comme critère d'exclusion à la sélection des sites de stockage des déchets.

Cette modélisation s'est déroulée en plusieurs étapes itérativement (Journal, 1978, Oukaci, 1997), à savoir (figure 4) :

- Exploration des données.
- Construction des variogrammes expérimentaux.
- Elaboration d'un modèle structural synthétique.
- Validation croisée du modèle.
- Interpolation par krigeage.
- Simulations conditionnelles et probabilités.

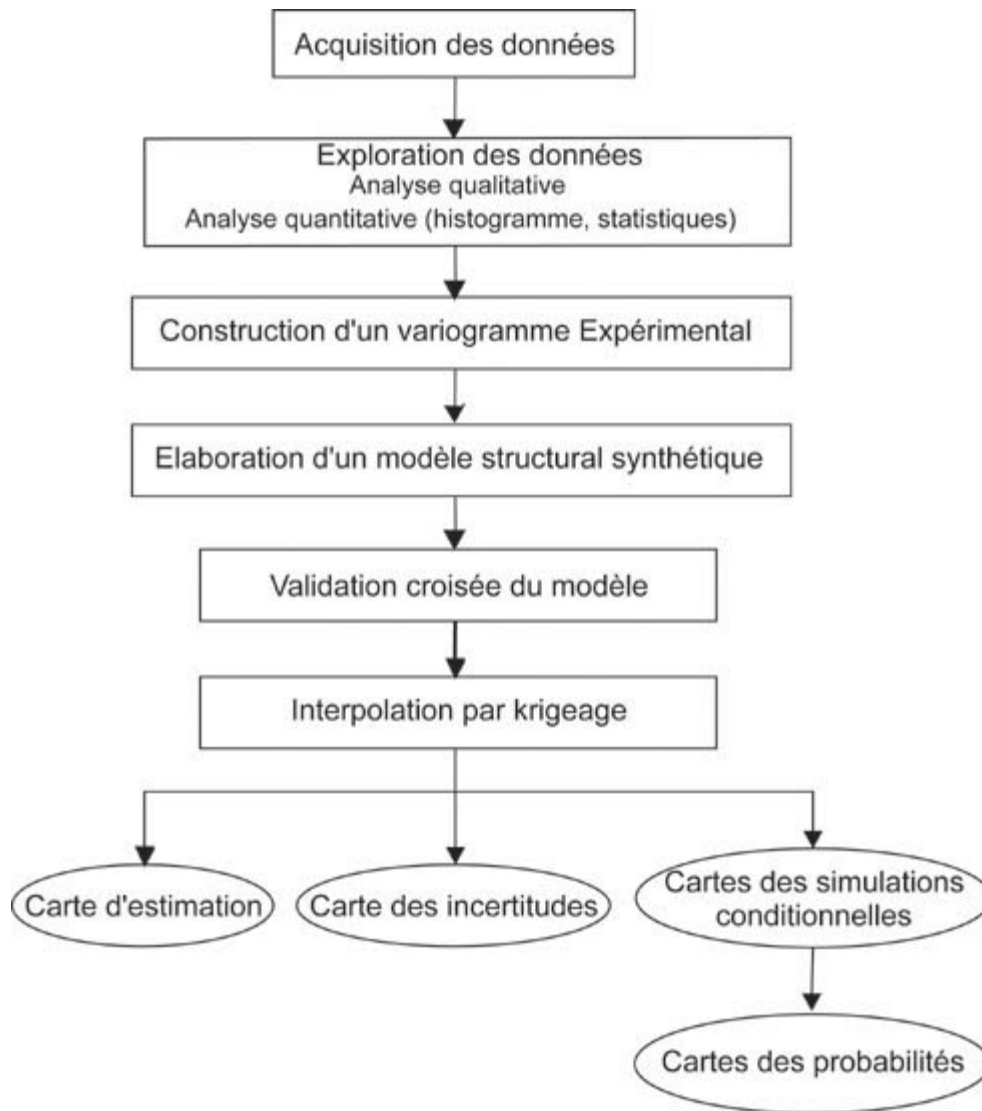


Figure 4 : Approche géostatistique pour la modélisation de la géométrie des données lithologiques

#### 2.1.4 Pédologie

La pédologie est un autre plan d'information de grand intérêt dans la gestion de l'environnement et des ressources en eau. Elle peut servir comme un document de base pour trouver des solutions appropriées à des problèmes spécifiques tels que l'aménagement, la fertilisation, la prévention des dégradations et de l'érosion des sols.

La démarche méthodologique adoptée pour élaborer un document de base qui servira comme outil d'aide à l'affectation adéquate des sols aux différents usagers, comporte trois étapes principales qui sont :

- Numérisation de la carte du sol à l'échelle de 1 : 100000 établie par Staimesse (1975). Cette carte comporte 85 unités dont chacune est reliée à une base de donnée contenant la superficie, le périmètre, la texture du sol, son épaisseur, le groupe à qui il appartient et la roche-mère. Aucune analyse physico-chimique n'a été associée à ces unités.
- Analyse des classes de sols sur la base de la couverture du sol.
- Élaboration d'autres cartes thématiques à partir de la carte du sol :

1. carte de substrat géologique,

2. carte de profondeur du sol,
  3. carte de texture du sol
  4. carte de potentialité du sol, en classant les sols en cinq niveaux en fonction de leur qualité vis-à-vis de l'agriculture
  5. carte d'aptitude agricole en couplant la carte de potentialité des sols avec celles des pentes et de la superficie de rentabilité des cultures.
- Évaluation de la précision et de la qualité de la carte des sols en se basant sur la carte de couverture du sol dérivée à partir de traitement des imageries satellitaires de résolution de 20m. Cette dernière est prise comme référence à cause de sa qualité déduite lors de la vérification du terrain et de la précision de ses coordonnées géographiques déterminées par rééchantillonnage sur la base des cartes topographiques à grande échelle.

### 2.1.5 Population :

Le critère "population" constitue un des paramètres clef de la présente étude et sera utilisé comme outil d'aide à la décision dans la sélection des sites de stockage des déchets. En effet, ce paramètre permet d'assurer d'une part la conformité hygiénique vis-à-vis des populations avoisinantes, en respectant et en protégeant aussi bien leur santé que leurs biens et d'autre part pour identifier les lieux de production des déchets.

C'est dans ce sens que nous avons élaboré une carte de distribution spatiale de la population de la région du Souss basée sur "l'indice d'accessibilité", et des informations sur les limites des unités administratives et la population au niveau du district. La démarche méthodologique adoptée comporte cinq étapes principales qui sont:

- Une étape de saisie des données. Nous avons numérisé le réseau de transport et les centres urbains et ruraux associés à une base de donnée sur la population de 1994, ainsi que les unités administratives du bassin du Souss.
- Une étape de modélisation basée sur l'approche de Deichmann et Eklundh (1991) qui consiste à utiliser les plans d'information concernant les routes et les centres d'agglomération pour calculer un indice d'accessibilité pour chaque nœud du réseau de transport appelé aussi "population potentielle". Cette dernière a été déterminée par la somme de la population des quatre centres d'agglomération situés à proximité du nœud routier normalisée par une fonction exponentielle du temps. Cette approche tient compte du fait que les gens ont tendance à se concentrer à proximité des centres urbains et ruraux existants, ainsi que le long des infrastructures de transport. Ce modèle réaliste de type "sans frontière" conduit d'un point de vue conceptuel à remplacer la notion d'appartenance territoriale (quantité de population limitée dans un district) par la notion d'accessibilité spatiale (éloignement d'un lieu à un ensemble de centres de population).
- Une étape d'interpolation permettant d'élaborer des cartes de population potentielle de 1994 pour une résolution de 50 et 500m.
- Une étape d'ajustement visant à incorporer des plans d'information supplémentaires comme le modèle numérique de terrain, les plans d'eau, les surfaces cultivées ou protégées, les zones inhabitées, pour ajuster les cartes de population potentielle créées précédemment.
- Et enfin une étape de distribution permettant d'utiliser le plan d'information du découpage administratif pour distribuer la population totale de chaque unité administrative proportionnellement à l'indice d'accessibilité calculé pour chaque cellule de la grille de 50 et de 500m. L'effectif de la population dans chaque pixel a été converti par la suite en densité pour une éventuelle analyse.

### 2.1.6 Hydro-climatologie

Disposant, déjà dans le bassin du Souss, d'un grand nombre d'informations spatiales concernant les paramètres conditionnant la gestion de l'environnement, nous pensons qu'une estimation correcte des ressources en eau est également indispensable pour notre étude. C'est dans cet esprit que nous avons adopté l'approche cartographique de régionalisation des variables hydro-climatiques basée sur des lois empiriques, afin de simuler les principaux processus hydrologiques : précipitations, températures, évapotranspiration, ruissellement et infiltration (figure 5). Cette approche de modélisation, basée sur la construction d'une information spatiale continue en format raster à partir de données ponctuelles issues des réseaux d'observation de densité variable, conduit à rechercher des lois et des propriétés statistiques. Ces dernières permettent de mieux comprendre la spatialisation des paramètres hydro-climatiques avec l'environnement physique (MNA, pente, exposition, couverture du sol, type de sol, y compris la capacité de stockage, géologie, proximité de l'océan, latitude et longitude).

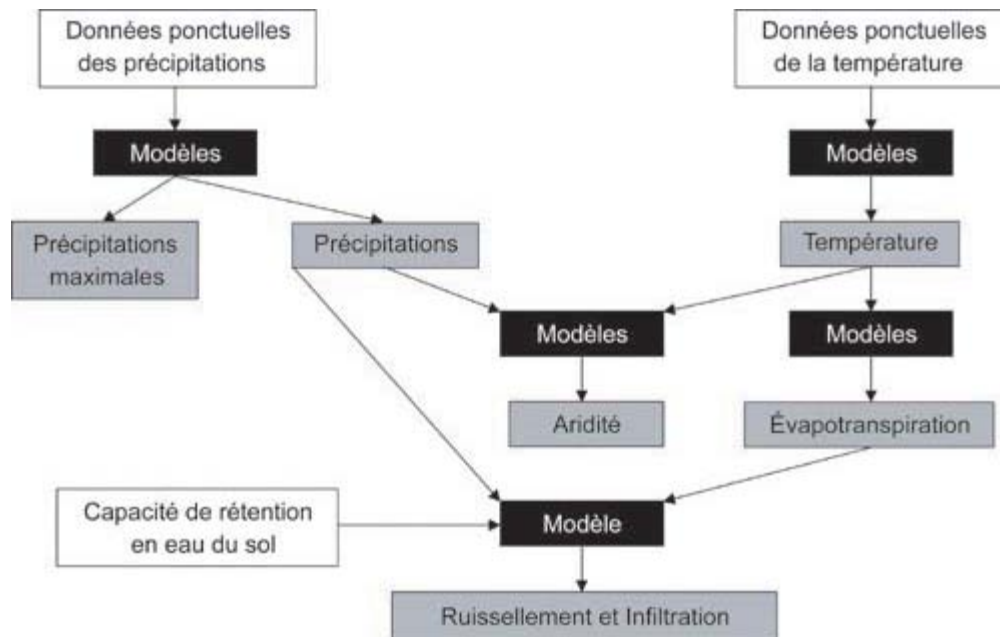


Figure 5 : Schéma montrant l'approche de modélisation utilisée pour spatialiser les principaux processus hydrologiques

### 2.1.7 Hydrogéologie

Dans le but de prévoir et de minimiser l'impact du futur site de stockage de déchets sur les eaux souterraines, déjà menacées dans la région du Souss où les eaux superficielles sont rares, nous avons dans le cadre de ce travail, tenu compte des nappes phréatiques. Ces dernières sont fortement sollicitées pour l'approvisionnement en eau potable et pour l'irrigation des surfaces cultivées, et sont touchées par la pollution des eaux usées d'origine domestique, industrielle et agricole. Dans la région du Souss, les réserves en eau potables sont très réduites à cause des aléas climatiques (sécheresse) et du pompage intensif de l'eau pour l'agriculture moderne. C'est pourquoi toute dégradation de la qualité de ces eaux induite par l'activité humaine peut limiter sérieusement les quantités d'eaux exploitables et peut aussi préjudicier la santé de la population.

Dans cette étude, nous avons tout d'abord relié au travers d'un SIRS chacun des 390 piézomètres à une base des données contenant les coordonnées, l'altitude, la profondeur de la nappe par rapport au sol et la cote piézométrique; ensuite nous avons établi un modèle géostatistique de la géométrie de la nappe phréatique libre en passant par les étapes suivantes:

- Exploration des données
- Construction des variogrammes expérimentaux
- Elaboration d'un modèle structural synthétique
- Validation croisée du modèle

- Interpolation par krigeage
- Simulations conditionnelles et probabilités.

Les variables utilisées pour la description de la géométrie de cette nappe sont la profondeur de la surface de la nappe par rapport au sol et la cote piézométrique, issues des deux campagnes piézométriques de décembre 1994 (hautes eaux) et de juillet 1996 (basses eaux).

## 2.2 Application du SIRS à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets dans le bassin du Souss

Cette application a été stimulée, principalement par les risques environnementaux que représente la décharge publique du Grand Agadir. Celle-ci a une superficie de 20 ha, et est située à 5 km au SE du centre de la ville d'Agadir, à 700 m de la route principale 41 reliant Agadir à Marrakech et à 1.5 km de l'Université d'Agadir et du quartier de Dakhla. Ces risques environnementaux ont été évalués par une méthode d'évaluation préliminaire et intermédiaire des sites potentiellement contaminés (El Morjani, 1996). Cette méthode a montré que la décharge actuelle représente un risque très élevé de pollution atmosphérique (tableau 1). La préoccupation des riverains s'avère donc justifiée à ce niveau. Ses effets nocifs ont astreint les pouvoirs publics à reconsidérer la question de la gestion des déchets et celle liée à leur mise en décharge, en s'engageant dans la recherche d'un nouveau site approprié à l'entreposage des déchets, respectueux et conforme à l'environnement et à la santé publique. C'est de là que vient l'idée d'utiliser les potentialités du SIRS à la recherche d'une ou de plusieurs installations appropriées au stockage de déchets ménagers et industriels (ISDMI) en utilisant les techniques d'analyse multicritères. Ce choix est très complexe du point de vue technique, et conflictuel du point de vue social et économique. Par exemple, la minimisation des nuisances olfactives et auditives par éloignement des sites vis-à-vis de la population est en contradiction avec le coût de transport des déchets : c'est un argument de plus pour l'utilisation de méthodes multicritère.

		Eaux souterraines	Eaux superficielles	Air	Sol
	Pondération	1	1	1	1
PP	1	10			
PMP	1	1	1	10	
PTPB	1	7	6	10	10
PTBUB	1	6	1	10	1
PUR	1	1	1	10	1
<b>Evaluation finale</b>		<b>3</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>3</b>
<b>Evaluation globale</b>		<b>5</b>			

Tableau 1 : Evaluation de la décharge de Grand Agadir par WasteEva (El Morjani, 1996) (Chaque potentiel est évalué indépendamment en fonction de chaque secteur de l'environnement (eaux souterraines, eaux de surface, air et sol) et est défini par une valeur numérique situé dans une échelle entre 1 et 10 dont 1 représente un faible potentiel de mise en danger et 10 un potentiel de mise en danger élevé)

La méthodologie que nous avons adoptée pour la recherche de sites d'ISDMI comprend les étapes suivantes (figure 6) :

- Etablissement d'une liste des critères de décision (critères exclusifs et d'appréciation) et leur évaluation (tableau 2) .
- Application des critères exclusifs "durs" pour exclure les zones impropres aux ISDMI, en se basant sur des restrictions légales ou d'impraticabilité physique. Par exemple, certains domaines comme les zones protégées, les surfaces d'eau qui de prime abord, sont en conflit avec ces zones, doivent être exclus.

- Evaluation des différentes alternatives, issues de l'étape précédente, au travers des critères d'appréciation. Ces derniers permettent de renforcer ou de réduire la pertinence des sites retenus lors de l'étape précédente.
- Agrégation des critères pour classer par ordre croissant les alternatives, et dégager ainsi les meilleurs sites. Deux types de procédures d'agrégation multicritères ont été employés dans cette approche.
  - La somme pondérée (agrégation complète) pour créer des indices d'aptitude à l'ISDMI sur la base de cinq types de scénarios, conçus sur la variation de l'importance relative des quatre facteurs de décision (environnementaux, hydro-climatologiques, sociaux, économiques).
  - La méthode de surclassement ELECTRE II (agrégation partielle) pour ranger les sites retenus, lors d'une reconnaissance de terrain, au stockage potentiel des déchets industriels non dangereux (Maystre et al., 1994).

Dans les deux premières étapes, nous avons utilisé le SIRS, à travers ses fonctions d'analyse spatiale pour contribuer à l'évaluation des distances, des pentes et aussi à la création d'informations dérivées. Le SIRS a permis, en outre, de combiner les plans d'information pour exclure les surfaces non appropriées. En revanche, dans les deux dernières étapes, ce sont les méthodes d'analyse multicritères qui ont été appliquées pour fournir une information synthétique d'aide à la sélection des meilleurs sites potentiels pour l'installation d'ISDMI. Ainsi le SIRS et les méthodes d'analyse multicritères se révèlent complémentaires dans le choix de la sélection des sites potentiels d'entreposage des déchets.

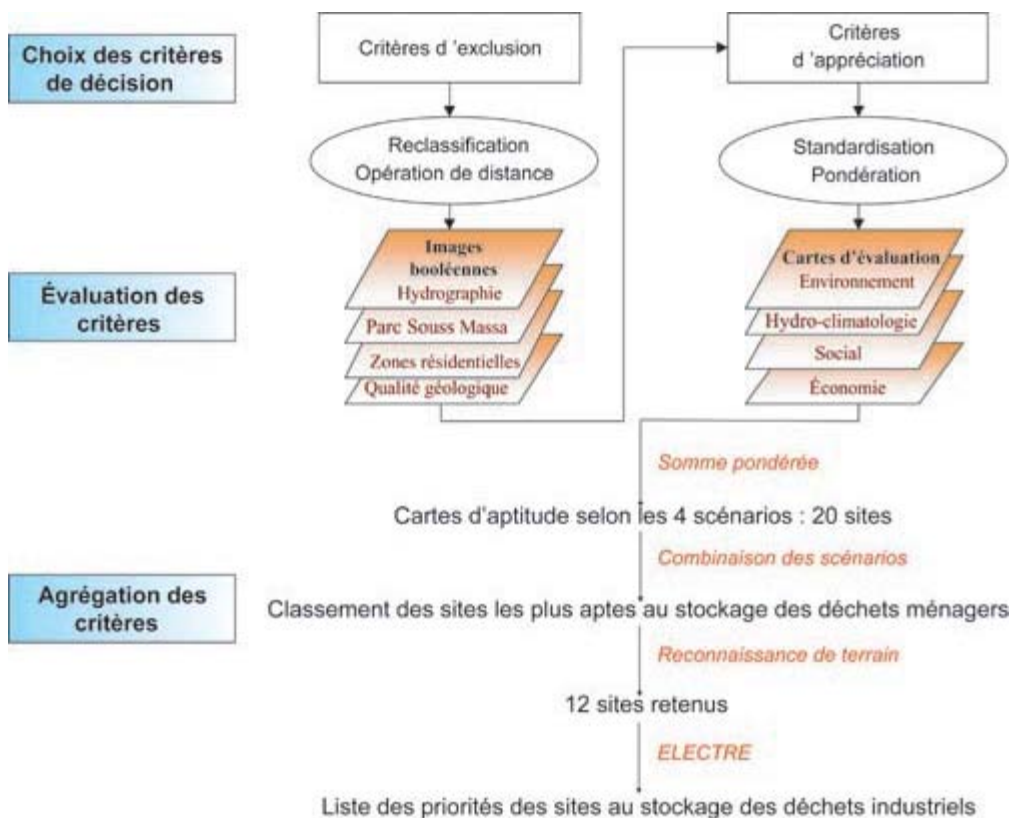


Figure 6 : Procédures générales pour la sélection des sites au stockage des déchets ménagers et industriels

Facteurs de décision	Sous-facteurs	Critères d'exclusion	Critères d'appréciation
	Perméabilité	*	
	Épaisseur de la roche		

Hydrogéologie/ géologie	imperméable	*	
	Pente	*	
	Profondeur de la nappe	*	
	Puits d'approvisionnement en eaux potables	*	
Hydro-climatologie	Oueds	*	*
	Barrages, Océan	*	
	Précipitations maximales		*
	Evapotranspiration		*
Environnement	Occupation du sol	*	*
	Zones protégées	*	
	Installation d'assainissement (décharge actuelle, usine de compostage)		*
	Impact visuel	*	
SocialAspects sociaux	Population		*
	Aires résidentielles	*	*
	Aéroport	*	
Economie	Proximité de source de déchets		*
	Proximité du réseau routier		*

Tableau 2 :Liste des critères de décision pour la sélection des meilleurs ISDMI

Cette démarche a pour objectif de planifier sur l'ensemble du territoire de la région, et en fonction des besoins dans le cadre du découpage administratif, de l'économie et de la protection de la nature, les meilleurs sites pour l'élimination correcte des déchets. Ceci permettra d'éviter la prolifération des décharges sauvages et de répartir adéquatement les décharges sur l'ensemble du territoire.

Nous sommes conscients que l'aspect politique doit être intégré dans ce processus de décision pour limiter au maximum le risque du blocage ou de refus du projet (Rey, 1994). Cet aspect n'a pas fait l'objet de cette étude préliminaire. Cependant, une étude "scientifique", basée sur des critères pertinents, constitue la base incontournable à la prise d'une bonne décision.

### Résultats et discussion

#### 3.1 Les plans d'information du SIRS Sous

##### 3.1.1 Topographie

Le MNA du bassin du Souss crée par la méthodologie décrite au 2.1.1 est représenté dans la figure 7, à partir duquel, nous avons un certain nombre de produits comme la carte des pentes, la carte d'orientation des pentes, la carte du relief ombré, la carte du réseau hydrographique virtuel,

et nous avons délimité le bassin versant du Souss avec ses sous-bassins. La surface et le périmètre du bassin global valent respectivement 17916 km<sup>2</sup> et 761 km, avec un indice de compacité de 1.6 (tableau 3). Le bassin du Souss a donc une forme allongée, six fois plus longue que large, ce qui est normal pour des oueds comme celui du Souss qui ont un long trajet (219 km). Cette forme favorise donc les faibles débits de pointe de crue avec un temps important d'acheminement de l'eau à l'exutoire.

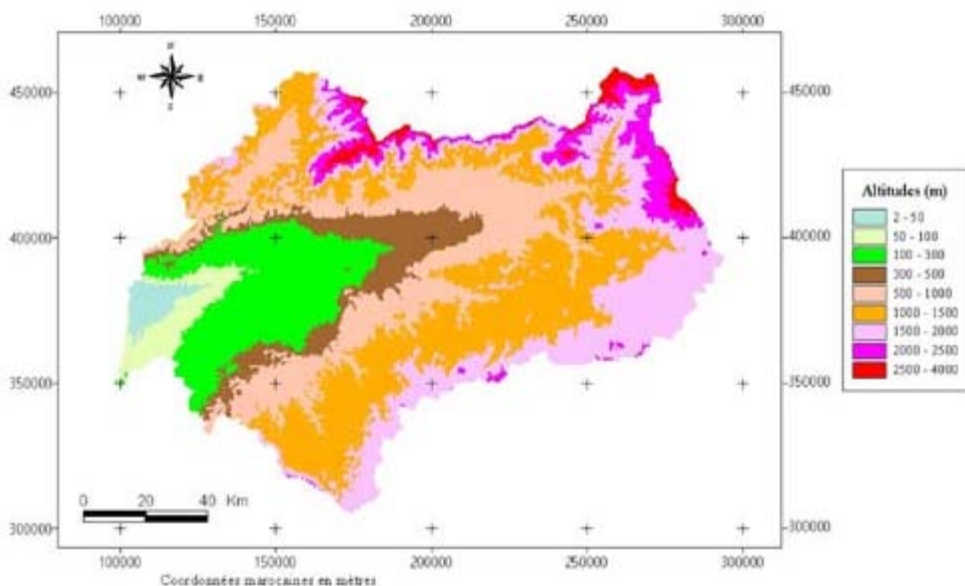


Figure 7 : MNA du Bassin du Souss

Paramètres	Valeurs des sous-bassins			
	Haut-bassin	Bassin du Souss à Taroudant	Bassin du Souss à Oued Issen	Bassin global
Superficie (km <sup>2</sup> )	4462	9774	15693	17916
Périmètre (km)	363	479	694	761
Indice de compacité	1.52	1.36	1.55	1.59
Longueur du rectangle équivalent (km)	152	187	294	325
Largeur de rectangle équivalent (km)	29	52	53	55
Altitude maximale (m)	3998	3998	3998	3998
Altitude minimale (m)	709	196	79	2
Altitude moyenne (m)	1665	1309	1179	1072
Altitude médiane (m)	*	*	*	1093
Longueur de l'Oued principal (km)	50	141	179	219
Densité de drainage (km/km <sup>2</sup> )	0.32	0.3	0.28	0.25
Pente moyenne (%)	12	11	11	10
Orientation moyenne (° Nord)	198	199	201	203

Tableau 3 : Caractéristiques géométriques des sous-bassins versant du Souss

Dans un contexte d'évolution géomorphologique, la courbe hypsométrique de la figure 8 illustre une forte superficie à proximité des Oueds liée aux faibles variations d'altitude: ceci indique un faible potentiel érosif et par conséquent un fort potentiel de sédimentation. Selon le modèle de Strahler (1952), cette structure indique que le bassin du Souss a dépassé le stade de maturité et se rapproche de la vieillesse.

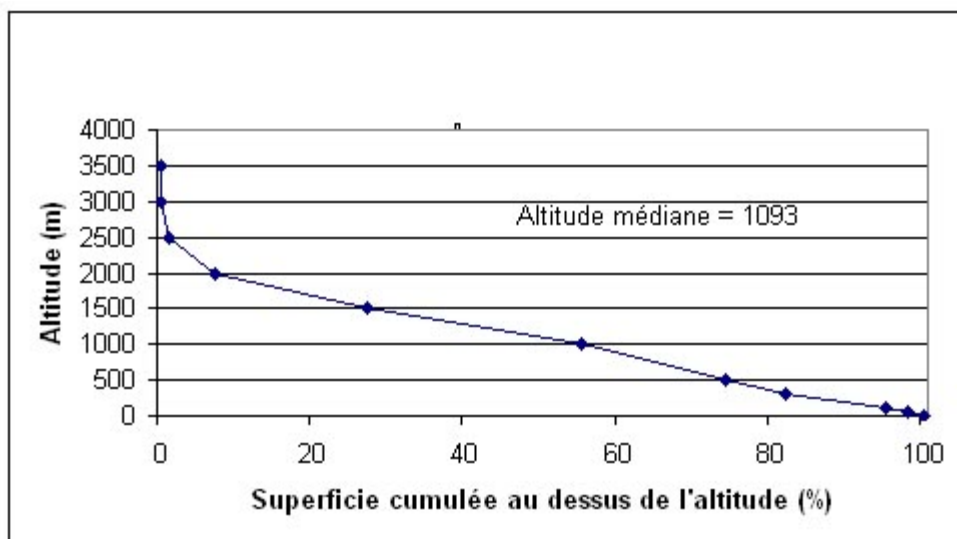


Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant du Sous

Par ailleurs, ce MNA peut être utilisé pour tout type d'étude nécessitant la connaissance du relief (hydrologie, pluviométrie, aménagement du territoire, gestion des déchets etc.).

### 3.1.2 Couverture du sol

La méthodologie citée en 2.1.2 a permis d'élaborer une carte d'occupation du sol comprenant 14 catégories : 11 classes de couvertures du sol et 3 classes des routes (figure 9).

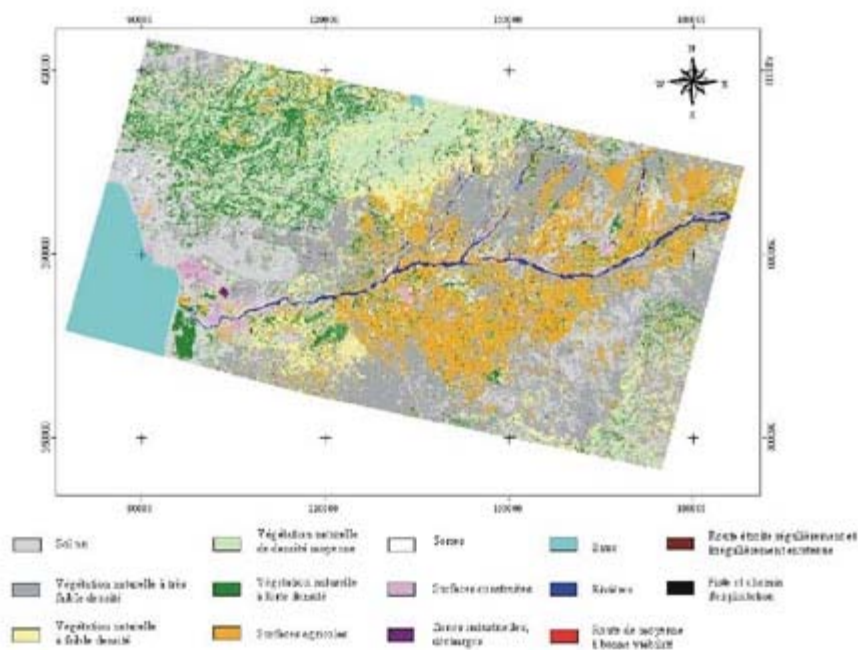


Figure 9 : Carte d'occupation du sol de la région du Sous

1	: Sol nu	8	: Végétation naturelle à faible densité
2	: Serres	9	: Végétation naturelle à très faible densité
3	: Eaux	10	: Zones industrielles, décharges

4	<b>: Surfaces construites</b>	11	<b>: Graviers des Oueds</b>
5	<b>: Surfaces agricoles</b>	12	<b>: Route de moyenne à bonne viabilité</b>
6	<b>: Végétation naturelle de forte densité</b>	13	<b>: Route étroite régulièrement et irrégulièrement entretenue</b>
7	<b>: Végétation naturelle de densité moyenne</b>	14	<b>: Piste et chemin d'exploitation</b>

La précision cartographique globale de ce document est de l'ordre de 84% avec un coefficient de Kappa de 0.82, ce qui atteste une qualité satisfaisante de la classification des images satellitaires par la procédure choisie lors de ce travail. Les erreurs de commission et d'omission sont dues essentiellement aux problèmes de l'hétérogénéité du secteur agricole, à la définition des seuils de densité de végétation, ainsi qu'au décalage temporel entre les images (1992 et 1997) et la vérité de terrain datée de 1999, ce qui a conduit à la confusion entre les deux catégories "végétation naturelle de faible densité" et "végétation naturelle de très faible densité". En regroupant ces deux types de couvertures, nous obtenons 90% de concordance avec la réalité du terrain.

Par une analyse de cette carte évaluée, nous avons estimé la proportion de la superficie de chacune des catégories illustrées dans la figure 10. Dans ces statistiques, nous n'avons pas tenu compte dans la catégorie "Eaux" de la superficie occupée par l'océan atlantique.

- 61% de la superficie de la zone cartographiée sont partagées entre les catégories "Végétation naturelle à très faible densité" (33%), "Végétation naturelle à faible densité" (9%) et "Sol nu" (19%). Ce constat témoigne de l'aridité, du surpâturage et de la dégradation forestière dont souffre la région du Souss. Ce phénomène est lié directement à l'activité humaine et aux conditions climatiques.
- 22% de la surface sont réparties entre deux catégories de bois "Végétation naturelle de densité moyenne" (13.7%) et "Végétation naturelle de forte densité" (8.1%). Ces deux classes se trouvent essentiellement en dehors de la plaine, au-dessus de 500m environ. Cette superficie non négligeable est à mettre en relation avec les efforts de reboisement entrepris par l'office des Eaux et Forêts et par des textes législatifs généraux et spéciaux relatifs à la forêt et à l'arganier.
- 15% environ de la carte de couverture du sol sont occupées par des céréalicultures, des cultures maraîchères en plein champ ou sous serre, ainsi que par les agrumes. Ceci confirme la réputation de la région du Souss comme la première zone primeuriste et agrumicole du Maroc.
- Les surfaces construites occupent moins de 1% de la surface cartographiée.
- Seulement 0.09% de cette carte est couverte par des eaux superficielles. Ceci est justifié par le climat de la région de type aride dont les précipitations moyennes sont de l'ordre de 250mm/an

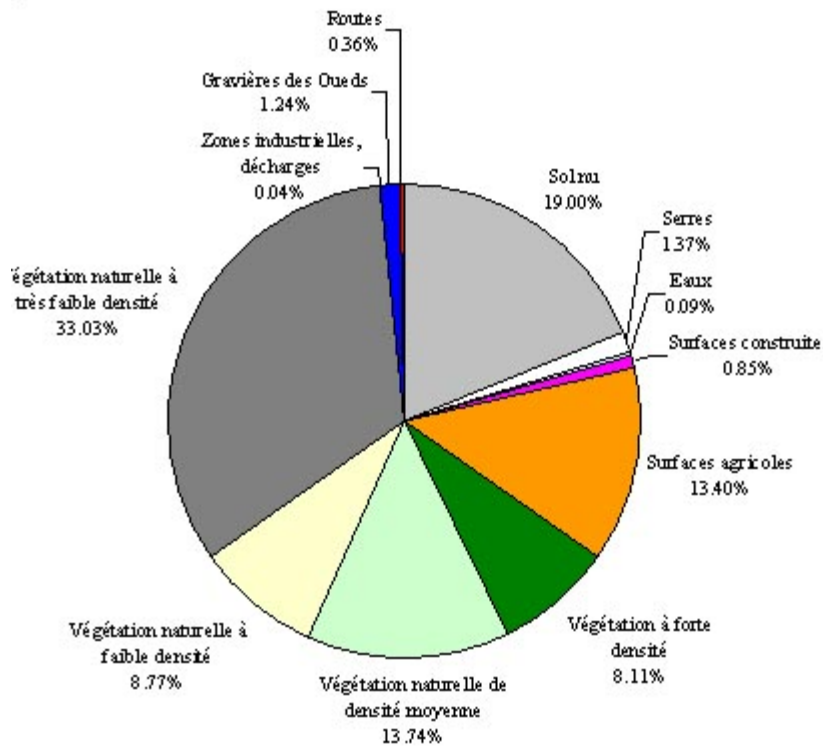


Figure 10 : Proportion de la superficie des différentes catégories de couverture du sol sur la surface totale de la carte de couverture du sol

### 3.1.3 Lithologie

Les techniques géostatistiques couplées avec celles du SIRS ont fourni des cartes numériques de distributions latérales des valeurs des variables lithologiques associées à des cartes d'évaluation de la "qualité" des estimations. Ces cartes d'incertitudes peuvent être utilisées comme support pour la connaissance approfondie du sous-sol de la plaine du Souss en ajoutant des sondages dans les zones où l'erreur est importante, ou les éliminer pour diminuer les redondances ainsi que le coût d'investissement.

Sur la base de ces cartes d'estimation, nous avons tracé des profils géologiques comprenant 7 couches (limons, alluvions, argiles, argiles et graviers, marno-calcaire, calcaire et marne) interpolées suivant plusieurs directions dans la plaine du Souss, en utilisant la commande de [Stackprofile](#) du module [ArcPlot](#) d'[ArcInfo](#). Des exemples de ces coupes sont représentés dans la figure 11.

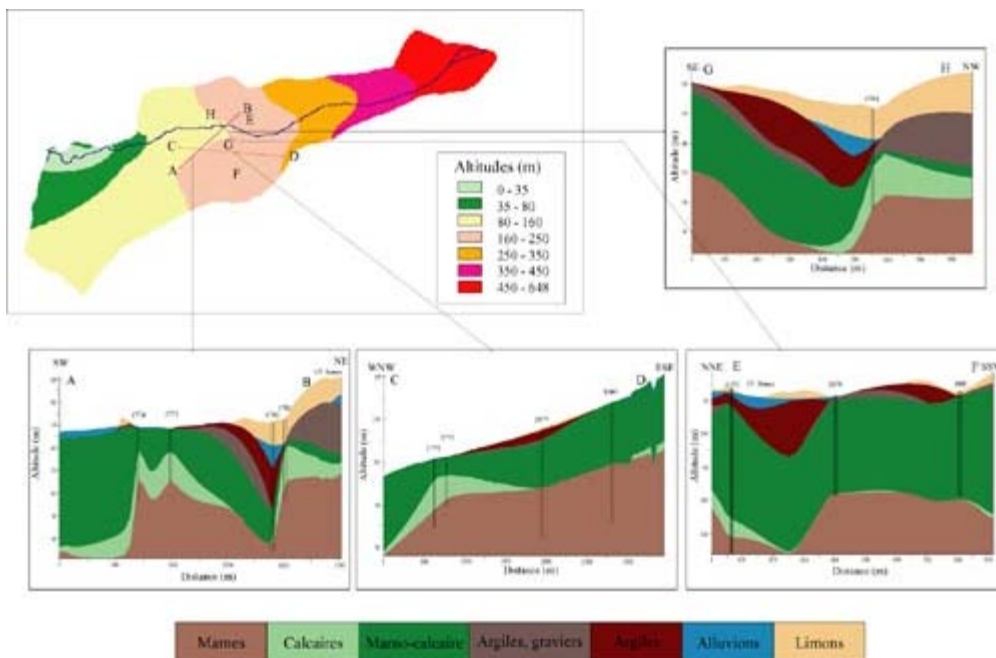


Figure 11 : Modèle numérique d'altitude avec les coupes lithologiques réalisées dans la vallée du Souss entre Ouled Teima et Taroudant

Dans le cadre de ce travail, les estimations locales des descripteurs lithologiques, hydrologiques ou hydrogéologiques sont insuffisantes pour prendre une décision dans la gestion de l'environnement. Les décideurs ou les politiciens ont souvent besoin d'autres informations pour prévoir les variations de ces descripteurs dans l'espace et représenter la fiabilité des valeurs estimées. Pour cette raison, nous avons estimé des cartes de probabilité pour différents seuils de valeurs de descripteurs lithologiques. Ces cartes (figure 12) résultant du traitement géostatistique par simulation conditionnelle; serviront comme documents de base pour nous indiquer quels sont les emplacements où la profondeur et l'épaisseur de la formation argileuse sont très probables et favorables pour le stockage de déchets.

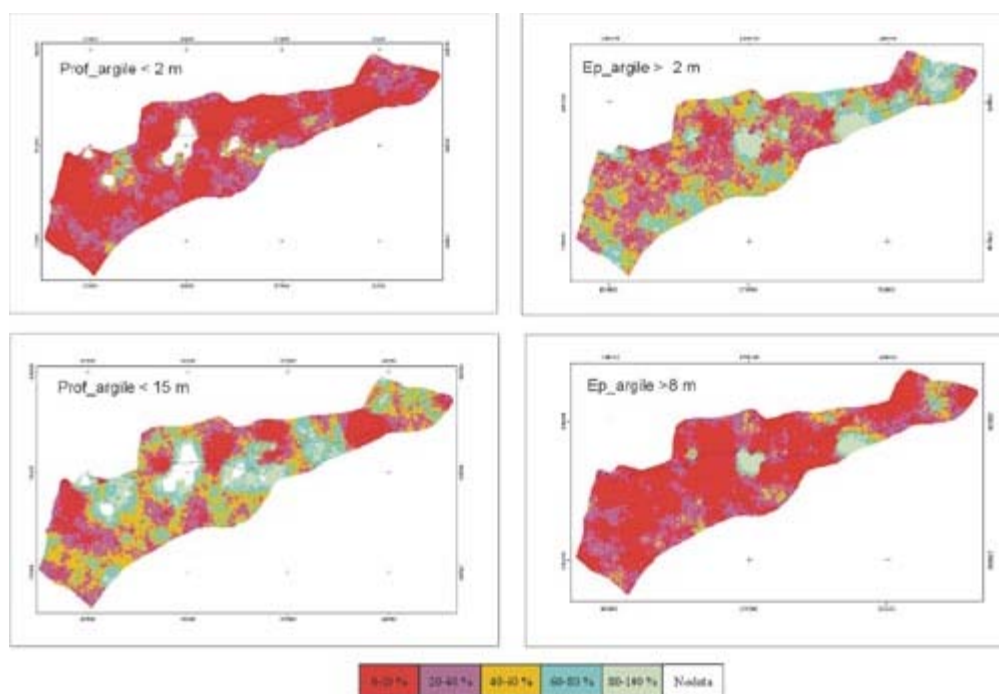


Figure 12 : Extrait des cartes des probabilités des profondeurs (prof\_argile) et des épaisseurs de la formation argileuse (ep\_argile)

### 3.1.4 Pédologie

Ce travail a permis d'élaborer une carte numérique de pédologie dont l'analyse a montré la proportion de la couverture du sol (cultures, zones construites...) qui se développe sur ces types de sols (tableau 4).

<b>Matrice de croisement</b>	Sols nus	Serres	Surfaces construites	Cultures	Végétations naturelles de couverture moyenne à dense	Végétations naturelles de faible à très faible couverture	Rivières
Sols minéraux bruts d'apport	<b>19</b>	12	9	4	<b>17</b>	8	<b>7</b>
Sols peu évolués d'apport	<b>18</b>	10	8	13	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>9</b>
Sols rendziniiformes	8	<b>18</b>	16	12	<b>11</b>	6	0
Sols châtaîns	5	4	8	6	<b>18</b>	<b>17</b>	1
Sols bruns	12	<b>18</b>	11	<b>26</b>	<b>14</b>	<b>12</b>	1
Sols siérozems	6	<b>21</b>	3	<b>31</b>	8	<b>16</b>	1
Sols rouges	1	3	0	3	3	11	2
Sols halomorphes	1	1	0	1	0	1	0
Complexes	<b>23</b>	8	9	2	10	11	1
Zones urbanisées	2	1	<b>36</b>	0	1	0	0
Rivières	4	4	0	2	2	2	<b>79</b>
Total (pixels)	2283730	164450	109344	1612085	2617598	5015326	148871

Tableau 4 : Matrice de croisement entre la carte des sols (lignes) et celle de la couverture du sol dérivée de l'imagerie satellitaire (colonnes) (en %)

- Les sols peu ou pas évolués couvrent une importante superficie de la vallée du Souss, soit 26%. Le croisement entre la carte des sols et celle de couverture du sol de 1992-1997 dérivée de l'imagerie satellitaire montre que 17% des surfaces agricoles (cultures de bœuf) s'étendent sur ces types de sols, en particulier sur les sols peu évolués.
- les rendziniiformes réservés autrefois à la forêt d'arganiers sont soustraits actuellement à cette dernière pour être couverts de routes, aéroport et autres constructions. Le croisement entre la carte des sols et celle de la couverture du sol confirme ce constat : 16% des surfaces construites se développent dans ces sols.
- les sols isohumiques présentent une grande valeur agricole et constituent d'excellentes terres pour le maraîchage, la céréaliculture et l'agrumiculture, soit 26% pour les sols bruns et 31% pour les siérozems.
- Les sols halomorphes sont très peu étendus et ne présentent aucun intérêt de point de vue agricole.

Cette analyse a permis de déterminer et de distinguer les sols qui présentent une grande valeur agricole à ceux qui n'en présentent pas. Sur cette base, des cartes de potentialité des sols et d'aptitude culturale ont été créées. Ainsi, pourrions-nous réserver les meilleurs sols pour

l'agriculture et les autres pour les sites de stockages des déchets, pour la construction des routes ou l'extension des agglomérations.

Quant à la qualité du positionnement spatial des limites du sol, elle a été jugée de bonne qualité sur la base de la carte de la couverture du sol, dérivée à partir du traitement des imageries satellitaires.

### 3.1.5 Population

L'approche utilisée dans le cadre de ce travail a permis de produire plusieurs cartes de distribution spatiale de la population en mode raster et de densité de population d'une résolution de 50 et 500m. L'analyse de celles-ci fournit les enseignements suivants :

- Le bassin du Souss abritait 1 246 703 habitants en 1994, soit 5% de la population totale du Maroc,
- La densité moyenne de peuplement est de l'ordre de 76 habitants au km<sup>2</sup>, ce qui est nettement supérieure à la moyenne nationale de 39ha/km<sup>2</sup>.
- Les principales concentrations de population sont situées dans les zones où les secteurs agricoles, halieutique, industriel et touristique sont développés. Ainsi à elle seule, la ville de Dcheira avec ses quelque 9.8 km<sup>2</sup> de surface rassemble environ 72 479 habitants. Il en résulte une densité moyenne de l'ordre de 7396 ha/km<sup>2</sup>, la plus élevée des municipalités dans le bassin du Souss. La municipalité d'Inezegane s'en approche avec 6521 ha/km<sup>2</sup>. Certes, d'autres régions aux alentours des oueds, apparaissent relativement densément peuplées afin de bénéficier des usages de l'eau, mais le contraste est très marqué entre les noyaux et axes de forte densité et les grandes zones vides ou quasi-vides. Celles-ci se situent surtout sur les zones montagneuses et les surfaces de faibles ressources hydrauliques.

Ces cartes ainsi produites pourraient être utilisées comme document de base pour l'élaboration des programmes d'expansion agricole et de redistribution interne de la population de la région du Souss. Dans le cadre de ce travail, elles sont utilisées comme aide à la décision pour la recherche d'un emplacement optimal des sites de décharges.

### 3.1.6 Hydro-climatologie

#### 3.1.6.1 Précipitations et températures

Les cartes pluviométriques et de températures mensuelles pour la période de 38 ans (1960-1998) ont été réalisées par la technique de la régression ascendante (*stepwise regression*). Les équations générales des modèles retenues ainsi que les ajustements finalement adoptés pour le mois d'octobre par exemple sont présentés dans le tableau 5. Ces derniers ont été appliqués sur les plans d'information correspondant à la topographie et à la situation géographique pour une résolution de 500m. La figure 13 illustre le résultat obtenu de la spatialisation des précipitations pour le mois d'octobre. L'examen de ces cartes nous a permis de dégager un ensemble de constats concernant la régionalisation du paramètre de précipitations et de températures:

#### Précipitations

Variable	Coefficient de régression	Erreur standard	Valeur t-statistique	Probabilité niveau de signification
<b>X</b>	0.1382	0.0548	2.5200	0.0191
<b>Y</b>	0.0485	0.0044	10.9412	0
<b>Z<sub>9</sub></b>	0.0011	0.0007	1.6346	0.1157

<b>d_ocean</b>	-0.1450	0.0608	-2.3860	0.0257
<b>Erreur standard d'estimation</b>	0.97			
<b>Degré de liberté</b>	23			
<b>Coefficient de détermination</b>	0.97			
<b>F-statistique</b>	166.5			
<b>Probabilité (F-statistique)</b>	0.0000			
<b>Expression du modèle</b>	<b><math>P = (0.1382 X + 0.0485 Y + 0.0011 Z_9 - 0.145 d\_ocean)^2</math></b>			

### Température

<b>Variable</b>	<b>Coefficient de régression</b>	<b>Erreur standard</b>	<b>Valeur t-statistique</b>	<b>Probabilité niveau de signification</b>
Coordonnée à l'origine	20.4978	0.3535	57.9909	0.0003
Z	-0.0053	0.0004	-13.9694	0.0051
d_ocean	0.0269	0.0047	5.6892	0.0295
aspect	-0.1298	0.0135	9.6187	0.0106
Erreur standard d'estimation	0.386			
Degré de liberté	2			
Coefficient de détermination	0.99			
F-statistique	86.28			
Probabilité (F-statistique)	0.011			
<b>Expression du modèle</b>	<b><math>T = (-0.0053 Z + 0.0269 d\_ocean - 0.1298 aspect) + 20.48</math></b>			

Tableau 5 : Ajustement des modèles de précipitations et de températures en fonction des situations géographiques et de l'environnement topographique pour le mois d'octobre

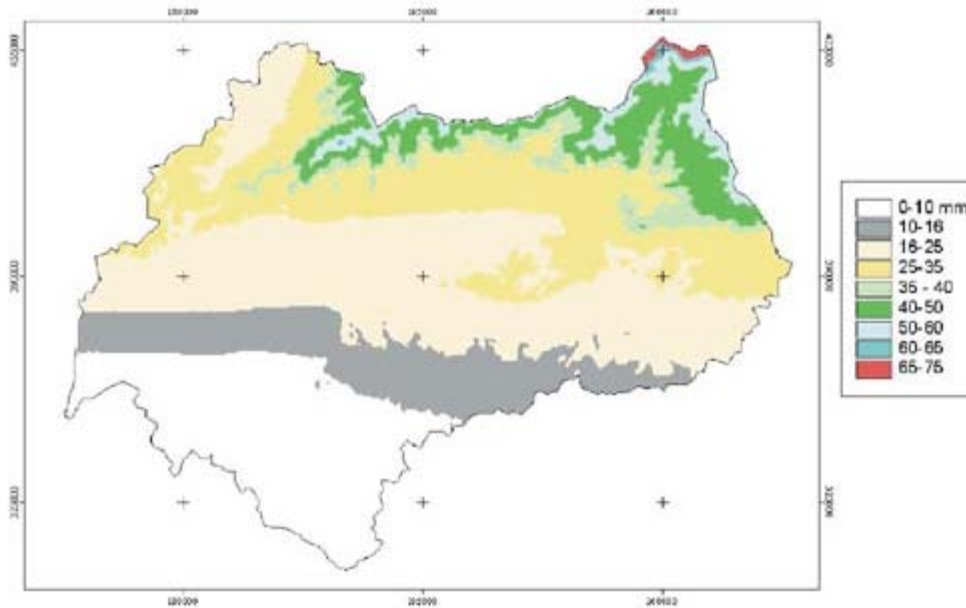


Figure 13 : Carte de répartition des précipitations moyennes pour le mois d'octobre (1960-1998)

## A. Précipitations

- L'augmentation de la pluie du sud vers le nord, la pluviométrie dans l'Anti-Atlas étant beaucoup plus faible que dans le Haut-Atlas malgré son altitude ce qui témoigne de l'influence saharienne sur la répartition spatiale des pluies.
- Dans le Haut-Atlas, la pluviométrie est d'autant plus importante que l'effet de crête est marqué et, inversement, d'autant plus faible par un effet d'encaissement. Cela signifie qu'une vallée encaissée orientée Nord-Sud, comme le cas de l'oued Issen, constitue un effet d'abri contre les masses d'air venues de l'Atlantique, par conséquent elle présentera une pluviométrie plus faible.
- Dans la plaine, la pluviométrie est relativement homogène et ne dépend que de la latitude et de l'altitude.
- A l'échelle de notre étude, ces cartes confirment l'influence négligeable des masses nuageuses chargées en humidité venues de l'atlantique.

Il apparaît que la répartition spatiale des précipitations dans le bassin du Souss est essentiellement conditionnée par le relief et la latitude. Ce résultat suggère que le principal mécanisme responsable des précipitations est l'ascendance forcée par effet orographique des masses d'air chargées d'humidité soufflant par les brises atlantiques.

## B. Température

- Le rôle déterminant du relief dans la structure spatiale de la température. La température dans le Haut-Atlas est beaucoup plus basse que dans l'Anti-Atlas.
- Dans la plaine, la température moyenne est conditionnée par la proximité de l'océan. Les zones côtières jouissent d'un climat océanique doux et plus frais que les zones intérieures. Ceci est très marqué surtout aux mois de mai à septembre.
- L'influence de la pente et de sa direction sur la répartition de la température. La température est d'autant plus importante que l'exposition Est est marquée et inversement d'autant plus amoindrie par une exposition Ouest.

- L'écart mensuel de température moyenne entre le mois d'août et de janvier est beaucoup plus fort dans le Haut-Atlas que dans l'Anti-Atlas. Il diminue en se rapprochant de l'océan atlantique. Ce dernier atténue les écarts de température et tempère les saisons.

### 3.1.6.2 Aridité du bassin

Afin de mieux évaluer quantitativement le degré d'aridité qui règne dans la région, nous avons calculé successivement l'indice d'aridité de De Martonne pour toutes les surfaces de la plaine, du haut-atlas, de l'anti-atlas ainsi que pour la surface entière du bassin versant en utilisant des cartes de précipitations et de températures moyennes mensuelles. Le résultat est présenté dans le tableau 6.

	P (mm)	T (°C)	I	Climat
<b>Plaine</b>	188.6	19.6	6	<b>aride</b>
<b>Haut-Atlas</b>	377.5	17.4	14	<b>Semi-aride</b>
<b>Anti-Atlas</b>	185	17.2	7	<b>Arde</b>
<b>Bassin</b>	243	17.8	9	<b>Arde à semi-aride</b>

Tableau 6 : Indice de De Martonne pour les surfaces des sous-bassins et du bassin versant

Si on se base sur l'indice de De Martonne, le bassin versant du Souss est soumis à un climat aride avec tendance à semi-aridité. La plaine et l'Anti-Atlas se trouvent dans un climat aride avec une tendance à l'hyper-aridité et le Haut-Atlas est caractérisé par un climat semi-aride, ce qui en fait la région la plus arrosée du bassin.

L'examen des cartes d'indice d'aridité mensuelle a mis en évidence le phénomène saisonnier de l'aridité : ainsi notons-nous dans le bassin du Souss la présence de deux saisons dont la durée varie selon la persistance climatique :

- une saison sèche qui s'étale sur sept mois (avril à octobre). Dans la plaine, cette période est caractérisée par un climat hyper-aride à aride avec une absence presque totale de précipitations et de température moyenne de 22.5°C, le maximum étant de 31°C atteint au mois d'août. Dans le Haut-Atlas, elle se trouve dans un climat aride à semi-aride. En revanche dans l'Anti-Atlas, le degré d'aridité devient très sévère par rapport à la plaine et la saison sèche est caractérisée par un climat hyper-aride à aride.
- une saison fraîche et pluvieuse s'étendant de novembre à mars avec un indice mensuel le plus faible se situant en mois de décembre. Elle est caractérisée dans la plaine par un climat semi-aride à semi-humide avec une température moyenne inférieure à 16°C et de précipitation moyenne de 30mm. Durant cette période, le climat est semi-humide à humide dans le haut-atlas et varie de l'hyper-aridité à semi-aridité en dirigeant de sud-ouest au nord- est dans l'Anti-Atlas.

Dans le but de bien préciser et de confirmer la durée de ces deux saisons, nous avons utilisé le diagramme ombrothermique des Bagnouls et Gaussen (1953). Celui-ci précise que, dans le bassin du Souss, la saison sèche s'étale sur 8 mois de mars à octobre (température moyenne de 17°C, maximale de 27°C atteint au mois d'août). La saison humide n'est représentée que par quatre mois (figure 14).

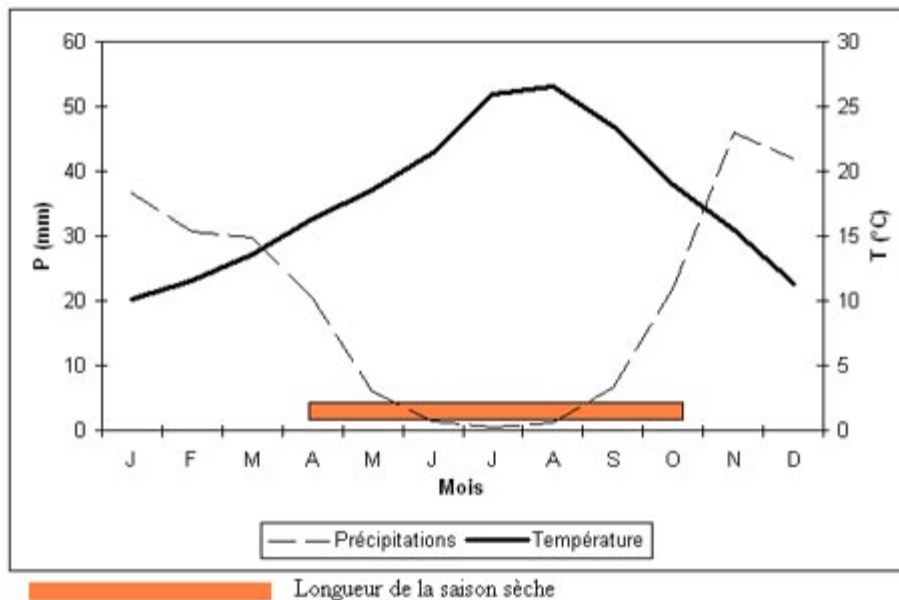


Figure 14 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953) pour la surface du bassin du Souss.

L'aridité dans le bassin du Souss représente sans doute un risque majeur pour toutes les formes de mise en valeurs. Ainsi, les cartes d'aridité mensuelles et les données sur la longueur de la saison sèche pourraient servir comme documents de base à de nombreuses applications à l'agriculture (mise en évidence du stress hydrique, choix des cultures), à la lutte contre les incendies de forêt, à la gestion des réservoirs des barrages ou à celle de déchets.

### 3.1.6.3 Evapotranspiration potentielle

Une étude comparative des 10 méthodes pour l'estimation de l'évapotranspiration dans le bassin du Souss a permis de déceler que la méthode de Penman (FAO) présente le plus grand degré d'adaptation aux conditions agroclimatiques de cette région pour l'estimation de l'ETP, suivie de la méthode du bac classe A et de la formule de Blanney-Criddle (SCS) (Blanney and Criddle, 1950). Malgré la performance de la méthode de Penman, il nous apparaît très difficile de spatialiser l'ETP en appliquant ce modèle. En effet, sa spatialisation nécessiterait avant tout, la régionalisation des paramètres (humidité relative moyenne, vitesse du vent, durée d'isolation) pour lesquelles les données du terrain sont limitées en quantité (quatre stations météorologiques). Pour cette raison, nous avons choisi la méthode de Blanney-Criddle (SCS) qui présente d'une part un meilleur classement après le modèle de Penman et d'autre part est basée sur le paramètre régionalisable de la température. Ce modèle a donc été appliqué pour régionaliser l'ETP mensuelle dans le bassin du Souss, quant au modèle de Penman et les méthodes directes des bacs de classe A et de Colorado ont été utilisées pour évaluer et juger la qualité de cette spatialisation.

Il ressort dans les résultats des cartes de ce paramètre que les valeurs journalières extrêmes moyennes de l'ETP se situent entre un peu moins de 1mm/jour en hiver jusqu'à 10 mm/jour en été alors que les valeurs moyennes dans le bassin varient entre 1.7 et 6mm/jour. Ces valeurs confirment bien l'aridité qui règne dans la région. Nous signalons que le régime d'évaporation est relativement plus stable d'une année à l'autre que le régime pluviométrique. Il s'ensuit donc que les besoins en eau des cultures sont assez prévisibles d'une année à l'autre.

Par la suite, nous avons évalué la qualité des modèles en calculant l'écart en pourcents entre les moyennes des valeurs déduites et mesurées (par le modèle de Penman et les méthodes de bacs (classe A ou Colorado) dans les stations de mesure), et les valeurs estimées par le modèle Blanney-Criddle (SCS) pour chacun des mois de l'année. Il en ressort qu'à l'exception des mois de la saison du printemps, les autres mois présentent de faibles écarts. En générale, l'erreur moyenne est aussi faible, de l'ordre de 11% avec 57% des valeurs ayant une erreur inférieure à 10%, 87 % des valeurs une erreur inférieure à 20% et 97% des valeurs une erreur inférieure à 30 %. Le coefficient de corrélation entre les moyennes de l'ETP calculées à partir des méthodes les

plus performants et celles modélisée par la méthode Blaney-Criddle (SCS) est significatif avec un coefficient de l'ordre de 0.95.

Sur la base de ces critères d'évaluation, nous pouvons donc témoigner de la bonne qualité des cartes des ETP moyennes mensuelles.

#### 3.1.6.4 Ruissellement et infiltration

Pour la quantification de la fraction de la pluie totale qui va effectivement participer au ruissellement des masses de déchets et la contamination des nappes souterraines, nous nous sommes orientés vers une approche très simple qui consiste tout d'abord à estimer le potentiel de surplus, la quantité d'eau contenue dans le sol et la variation de stockage en eau dans le sol de chaque pixel et pour chacun des mois de l'année, en nous basant sur le modèle du bilan hydrique "vertical" décrit par Thornthwaite et Mather (1957) ; c'est donc un modèle de production spatialement statique. Ensuite nous avons estimé le volume d'eau ruisselé à l'exutoire du bassin en tenant compte du transfert latéral de l'eau de pixel à pixel, cette partie étant considérée comme spatialement cinématique, reproduisant les écoulements dans les oueds : modèle de transfert (Ebener, 2000). Ce modèle a permis de créer quatre types de cartes : l'infiltration, ruissellement verticale, ruissellement horizontale et l'évapotranspiration réelle (Figure 15).

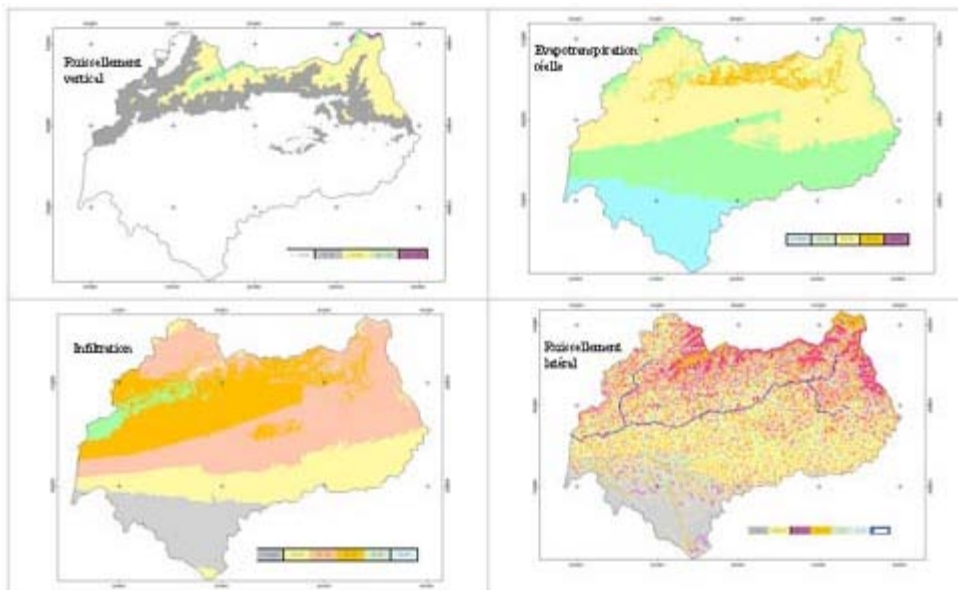


Figure 15 : Cartes de répartition de l'intensité des différents processus modélisés en mois de Décembre

#### 3.1.7 Hydrogéologie

Le résultat de l'étude géostatistique a permis de produire par krigeage des cartes de distribution latérale des valeurs des paramètres géométriques de la nappe et de leurs incertitudes, ainsi que des cartes de probabilité à travers des simulations. Ces cartes constitueront une aide précieuse à la sélection des sites les plus favorables pour le stockage de déchets en minimisant les risques de contamination de la nappe par les lixiviats.

Une analyse de ces documents a permis de mettre en évidence les points suivants :

- L'écoulement des eaux souterraines s'effectue globalement suivant l'axe de la vallée de l'Est vers l'Ouest, matérialisé par l'oued Souss qui joue le rôle d'un véritable drain dans les années pluvieuses notamment vers l'aval. D'autres axes de drainage naturels existent et leurs directions sont conformes avec celles de l'écoulement des affluents atlasiques de l'oued Souss. Ils sont orientés NE-SW sur la rive droite, et SE-NW ou ESE-WNW sur la rive gauche.
- La profondeur de la nappe varie en fonction des secteurs. La nappe est peu profonde, inférieure à 10m, dans la partie proche de l'estuaire, ce qui confirme le risque de contamination de la nappe par les eaux marines. Dans l'axe de la vallée, elle varie entre 10

et 50m de profondeur et tend à s'approfondir au fur et à mesure qu'on s'éloigne de part et d'autre du lit du Souss pour atteindre les 140m au niveau du piémont de l'Anti-Atlas et 70m à la bordure du Haut-Atlas. Dans les secteurs d'Ouled Teima et de Sebt El Gerdane, en rive gauche, les courbes isobathes montrent des dépressions provoquées par des pompages agricoles intensifs, la profondeur d'eau dans ces zones surexploitées dépassant les 100m. Ces secteurs sont, en plus, caractérisés par de mauvaises perméabilités. Dans la zone côtière, la profondeur n'est pas négligeable et peut atteindre les 50m en raison de l'existence des dunes anciennes très élevées. Cette carte de profondeur peut être assimilée à une carte de l'épaisseur moyenne du recouvrement de la nappe, et nous renseigne sur la capacité d'absorption et d'amortissement que présenterait la zone non saturée face aux infiltrations des eaux venant de la surface du bassin versant.

- A ces cartes de distribution spatiale des valeurs des paramètres géométriques de la nappe, nous avons associé des cartes d'incertitude. Elles montrent clairement que la prédiction des valeurs de ces paramètres est peu fiable dans les zones où nous ne disposons pas des points de mesures. Les valeurs locales de la profondeur de la nappe sont prédites avec une précision moyenne de l'ordre de 8m, relativement faibles par rapport à la cote piézométrique d'incertitude moyenne de 10m. Ainsi les fortes valeurs de la variance de krigeage permettent-elles de localiser les zones sous-échantillonnées sur la carte et d'implanter des nouveaux piézomètres afin de diminuer la variance de l'erreur. Ces cartes peuvent être utilisées comme support pour optimiser le réseau de surveillance du niveau et de la qualité des eaux de la nappe libre dans la plaine du Souss, en ajoutant des puits dans les zones où l'erreur est importante, ou les éliminant pour diminuer les redondances.
- Le gradient hydraulique moyen, assimilable à la pente de la carte piézométrique, décroît, dans l'ensemble, de l'amont vers l'aval, la moyenne étant de 4‰. Cette variation des pentes peut être expliquée par des variations latérales connues des perméabilités des réservoirs et aussi par le dénivelé topographique qui conditionne la dénivellation de la nappe

### 3.2 Analyse multicritère d'aide à la décision

La combinaison linéaire pondérée des couches facteurs de décision a permis de sélectionner 20 secteurs appropriés au stockage des déchets ménagers sur la base de quatre types de scénarios qui sont conçus sur la variation de l'importance relative des facteurs de décision. Par une reconnaissance de terrain sur la base des critères d'exclusion, nous n'avons retenu que 12 secteurs dont les plus appropriés sont situés à (figure 16) :

- 15 km au nord-est d'Agadir : secteur **1** (centre d'Agadir-Banlieue);
- 4 km au nord-est de Biougra : secteur **11** (centre de Biougra);
- 9 km au sud-est d'Ait-laza : secteur **18** (centre de Taroudant) et à
- 12 km au nord-est d'Ait-laza : secteur **17** (centre de Taroudant).

Ces 12 secteurs ont par la suite subi une nouvelle évaluation par l'approche de surclassement ELECTRE II (agrégation partielle). Celle-ci a permis d'identifier trois secteurs : (i) **15** à 10 km de l'ouest de Taroudant, (ii) **18** à 9 km au sud-est d'Ait-laza (cercle de Taroudant) et (iii) **12** à 25 km à l'est de Biougra (cercle de Biougra) comme secteurs potentiels appropriés aux stockages de déchets industriels (figure 16).

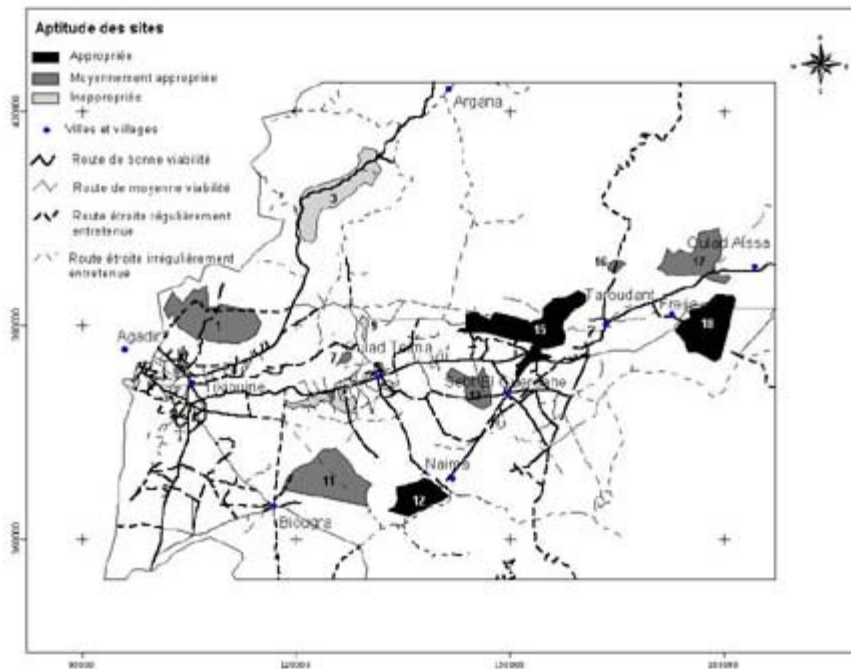


Figure 16: Classement des sites par l'algorithme d' ELECTRE pour le stockage des déchets industriels

#### 4 Conclusions

Dans le cadre de la mise en place d'une gestion environnementale, l'autorité a besoin d'informations détaillées, fiables et bien organisées sur l'état de l'environnement et du territoire. Le projet SIRS Souss (SIRSS) répond à cette demande en produisant une série de thèmes environnementaux spatiaux et temporels sous forme de cartes numériques. Les systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIG), la télédétection, l'analyse multicritère et diverses méthodes statistiques ont été utilisés comme des outils et des techniques bien adaptés à cette nouvelle problématique et illustrant le mieux l'approche multidisciplinaire pour la sélection de sites de stockage de déchets. Cette recherche, intégrant le concept de développement durable, a été réalisée en deux étapes :

##### *1.- Conception des plans d'information spatiaux et temporels pour la gestion environnementale et l'aménagement du territoire du Souss*

S'agissant du premier SIRS dans la région du Souss, nous avons porté une attention particulière à la régionalisation des plans d'information numériques à diverses échelles, en précisant chaque fois leur qualité. En effet, face à la complexité et à la diversité de ces données, nous avons dû consacrer beaucoup d'effort à la collecte, la saisie, l'analyse et la gestion ainsi qu'à la maîtrise d'un grand nombre d'outils informatiques. Cette méthodologie spatiale nécessite par ailleurs l'utilisation de techniques variées comme les approches déterministes et probabilistes, la régression multiple et l'analyse en composantes principales. La combinaison des Systèmes d'Information à Référence Spatiale et de la télédétection représente un apport incontestable. Les documents à référence spatiale (topographie, couverture du sol, lithologie, pédologie, population, hydro-climatologie, hydrogéologie) serviront comme support de base pour toute étude ultérieure et permettront à des utilisateurs de SIRS et aux gestionnaires un accès facile et la mise à jour. Ils constituent ainsi un outil efficace d'aide à la décision pour la gestion et la protection de l'environnement.

##### *2.- Application du SIRS à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets dans le bassin du Souss*

Disponibles sous forme numérique, les plans d'information du SIRS ont été appliqués à la sélection d'éventuelles installations pour le stockage de déchets ménagers et industriels (ISDMI) dans le bassin du Souss. Cette application a été stimulée par une analyse des risques

environnementaux que représente la décharge actuelle du Grand Agadir, identifiée comme une source de danger pour la santé de la population riveraine et l'environnement.

- L'approche de sélection proposée englobe d'une part le SIRS qui, à travers ses fonctions d'analyse spatiale, a contribué à l'évaluation d'un grand nombre de sites potentiels pour l'ISDMI selon les critères d'évaluation (critères exclusifs et d'appréciation) et, d'autre part, les méthodes d'analyse multicritères qui ont été utilisées pour classer ces alternatives. Deux types de procédures d'agrégation multicritères ont été employés dans cette approche. La somme pondérée (agrégation complète) a permis de créer des indices d'aptitude à l'ISDMI sur la base de cinq types de scénarios, conçus sur la variation de l'importance relative des quatre facteurs de décision (environnementaux, hydro-climatologiques, sociaux, économiques). Nous avons confirmé, après une reconnaissance de terrain, que tous ces scénarios s'accordent sur la présence de 12 secteurs pour le stockage des déchets.

Ces 12 secteurs ont été par la suite rangés par la méthode de surclassement ELECTRE II (agrégation partielle). Celle-ci a permis d'identifier trois secteurs : (i) **15** à 10 km de l'ouest de Taroudant, (ii) **18** à 9 km au sud-est d'Ait-laza (cercle de Taroudant) et (iii) **12** à 25 km à l'est de Biougra (cercle de Biougra) comme secteurs potentiels appropriés aux stockages de déchets industriels.

Cette approche pluridisciplinaire a permis de planifier sur l'ensemble du territoire de la région, en fonction des besoins dans le cadre du découpage administratif, de l'économie et de la protection de la nature, les meilleurs sites pour l'élimination des déchets. Toutefois, il s'agit d'une évaluation préliminaire et le choix final nécessitera des travaux techniques détaillés (sondages, essais de pompage des eaux, études géotechniques).

Enfin, ce projet pilote débouche sur un outil d'aide à la décision dans le domaine de la gestion de l'environnement et des déchets. Il contribuera ainsi à la protection de l'environnement, à la santé et à la diminution des obligations imposées aux générations futures, en limitant la prolifération des décharges sauvages.

Il conviendrait d'appliquer et de valider cette approche pour l'ensemble du bassin du Souss. Ainsi, les cartes de couverture du sol et de la pédologie sous formes numériques couvrant l'ensemble du bassin seront-elles nécessaires.

Cette méthode mériterait par ailleurs d'être testée sur d'autres bassins versants arides à semi-arides.

Certes, le SIRSS n'est pas exhaustif et, pour l'enrichir, nous proposons de réaliser :

- i. Une étude de la vulnérabilité à la pollution des aquifères par approche SIRS (l'activité agricole est très intense dans la région du Souss).
- ii. Une modélisation des écoulements souterrains en trois dimensions pour identifier le cheminement de l'eau souterraine et comprendre les échanges hydrauliques entre les quatre aquifères de la nappe phréatique.
- iii. Une analyse de risque sismique par la réalisation des cartes de zonage sismique. Cette analyse n'a pas été réalisée dans le cadre de ce travail à cause du manque de données des séismes historiques et instrumentaux dans l'ensemble du bassin.

Nous proposons également d'approfondir l'analyse multicritère en intégrant l'aspect politique et en consultant plusieurs partenaires concernés par l'ISDMI (autorités communales et municipales, associations de protection de la nature et de l'environnement, agriculteurs, forestiers, industriels, experts..) pour une meilleure sélection des sites.

Bagnouls, F. & Gaussen, H. (1953) : Saison sèche et indice xéothermique. Bull. Soc. Hist. Nat. 88, Toulouse, pp. 193-239.

Blannay, H.F. & Criddle, W.D. (1950) : Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA-SCS. TP-96, 49p.

Collet, C. (1992) : Systèmes d'information géographique en mode image. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Suisse, 186p.

Deichmann, U. & Eklundh, L. (1991) : Global digital data sets for land degradation studies : A GIS approach. United Nations Environment Programme, Global Resource Information Database, Case Study N°4, Nairobi, Kenya.

El Morjani, Z. (1996) : Méthodes d'évaluation préliminaire et intermédiaire des sites potentiellement contaminés : Cas des décharges. Diplôme d'études supérieures en sciences naturelles de l'environnement, Universités de Genève et de Lausanne, 123p + annexes.

El Morjani, Z. (2003) : Conception d'un système d'information à référence spatiale pour la gestion environnementale ; application à la sélection de sites potentiels de stockage de déchets ménagers et industriels en région semi-aride (Souss, Maroc). Thèse de doctorat, université de Genève. Terre et Environnement Vol. 42, 300p.

Joerin, F. (1998) : Décider sur le territoire, proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère. Génie Rural. Lausanne, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.

Journel, A. G. & Huijbregts, Ch. J. (1978) : Mining geostatistics. Academic press, 600p.

Maystre, L.Y., Lucien, Y. Pictet, J. & Simos, J. (1994) : Méthodes multicritères ELECTRE : Description, conseils, pratique et cas d'application à la gestion environnementale. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 319p.

Oukaci, S. (1997) : SIG, géostatistique et simulation numérique des écoulements souterrains. Application au système aquifère de la plaine du Rhône (Valais, Suisse). Diplôme post-grade en hydrologie et hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 25p.

Rey, M. (1994) : Pour une gestion stratégique du processus de décision en aménagement du territoire et en environnement. Réflexions et enseignements, à l'exemple de la recherche des sites pour une installation de stockage pour déchets stabilisés en Suisse romande. CEAT

Staimesse, J.P. Billaux, P. & al. (1975) : Carte pédologique de la région du Souss (Agadir-Aït Baha) 1:100000. Service cartographique de l'ORSTOM.

Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. (1957) : Instruction and Tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Inst. Technol. Publ. Clim., X(3).