

Université d'Ottawa
Faculté des Arts
Département de Géographie

**Étude comparative entre la géostatistique et les méthodes
déterministes pour la cartographie des types de sols**

Mohammed Said Benazzouz

**Thèse de maîtrise présentée pour la F.E.S.P. comme exigence partielle
pour l'obtention du grade de M. Sc. en Géographie**

© Mohammed Said Benazzouz, Ottawa, Canada, 2011

Remerciements

J'exprime mes sincères remerciements au professeur A. Bannari pour son support scientifique et technique, pour son implication dans les travaux du terrain, et pour son support moral et financier. Je remercie également les membres de mon comité, Dr B. Lauriol et Dr A. Viau, pour leur temps, leurs corrections et leurs suggestions constructives pour cette thèse. Je suis bien reconnaissant au Département de Géographie pour l'aide administrative et pour les positions d'assistant d'enseignement qui sont importantes pour mon développement et mon épanouissement académique. Ma gratitude à monsieur Jean Bjornson pour son encadrement et son aide indispensable lors des analyses au laboratoire du Département de Géographie.

Ma reconnaissance et mes remerciements aussi aux professeurs A. El-Harti et A. El-Ghmari de la Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane, à Béni-Mellal au Maroc pour leur support professionnel sur le terrain. Je remercie l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla (ORMVAT), ainsi que monsieur Hassouna technicien de l'ORMVAT pour le support logistique sur le terrain et pour les analyses du calcaire total. En outre, je remercie le CRSNG et l'OTAN pour le support financier des campagnes d'échantillonnages sur le terrain et les analyses au laboratoire.

Finalement, j'aimerais également remercier ma femme et mes enfants qui m'ont toujours appuyé durant mes années d'étude.

Résumé

La cartographie des sols est d'une importance particulière pour bien comprendre leurs organisations, localisation, distribution spatiale, ainsi que leurs caractéristiques. Comprendre l'interrelation entre ces variables est une étape critique pour concevoir l'équilibre complexe des processus chimiques et physiques pour rendre, notamment, les écosystèmes agricoles plus productifs. Cette recherche explore le potentiel de la synergie entre les analyses au laboratoire, le GPS, les SIG et les méthodes d'interpolations déterministes (*Spline et Inverse-Distance connue sous le nom IDW*) et probabilistes (*Krigeage ordinaire et Krigeage universel*) pour cartographier les types de sols dans un environnement semi-aride. Pour atteindre nos objectifs, nous avons échantillonné 254 points répartis de façon presque régulière en considérant toutes les classes de sols couvrant notre site d'étude. Dans une première étape de cette recherche, les échantillons ont été analysés au laboratoire afin de connaître leurs caractéristiques granulométriques et leurs propriétés organiques et chimiques (pH, matière organique, calcaire total et granulométrie). La classification Américaine des textures des sols a été considérée pour la caractérisation des différentes classes texturales de nos échantillons. D'après nos analyses granulométriques nous avons identifié cinq classes texturales : 1) classe limono-argileuse, 2) classe limoneuse, 3) classe limoneuse-fine, 4) classe limoneuse-fine-argileuse, et 5) classe limono-argileuse-fine.

Dans une seconde étape et dans l'environnement SIG, le potentiel des méthodes d'interpolation déterministes (*Spline et IDW*) et probabilistes (*Krigeage ordinaire et Krigeage universel*) a été évalué pour la dérivation des cartes fractionnelles de chacune des classes texturales et de propriétés des sols considérées. Les résultats obtenus à cette étape ont mis en évidence les différentes façons dont les modèles interpolateurs traitent l'information. La méthode IDW fournit des classes iso-valeurs de manière circulaire autour des points d'observations lors de l'interpolation, mais elle garde l'intégrité des valeurs nominales des attribues obtenues lors des analyses au laboratoire pour chacun des points échantillonnés. Par contre, la méthode Spline introduit des coefficients de lissages de sorte que les valeurs estimées peuvent être inférieures à la plus petite donnée ou supérieure à la plus grande. Cette situation est due aux artefacts causés par les polynômes d'ajustement qui considèrent sous contrainte les points d'inflexions pour l'estimation d'une variable inconnue ce qui cause un biais. Par conséquent, l'interpolateur n'est plus exact du fait qu'il change significativement les limites (minimale et maximale) réelles des valeurs des attribues obtenues lors des analyses au laboratoire. En outre, par rapport à la méthode IDW, la méthode Spline affiche un fort aspect relativement lisse "ou flou" dans les zones de transitions entre les différents niveaux de concentration de l'élément sujet à l'étude. Quant aux méthodes probabilistes (*Krigeage ordinaire et Krigeage universel*), elles considèrent le territoire d'étude dans sa globalité en examinant tous les points d'échantillonnage deux par deux et en se basant sur l'hypothèse qu'il y a une certaine continuité spatiale des propriétés étudiées. Ainsi, malgré la légère différence conceptuelle entre les approches de ces deux méthodes (*Krigeage ordinaire et Krigeage universel*), elles ont dérivées les cartes de fractions de façons analogues entre elles à cause, fort probablement, du grand nombre de points connus et qui ont été échantillonné à peu près uniformément sur notre site d'étude. Ainsi, contrairement à la méthode Spline qui cause un biais d'étalement par extrapolation, le Krigeage diminue les valeurs extrêmes à cause de l'auto-corrélation spatiale qui calcule la moyenne des valeurs dominantes en éliminant les

faibles valeurs. Évidemment, cette situation reste valable et applicable indépendamment de la variable sujet à l'interpolation.

Dans une troisième et dernière étape, en se basant sur les classes texturales et celles des propriétés de nos sols, des requêtes spatiales ont été lancées en fonction des critères caractérisant les types de sols de la zone étudiée d'après le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc afin de restituer les cartes de types des sols finales. Ces dernières ont été validées par rapport à la vérité terrain qui est une carte pédologique de notre site d'étude établie par des ingénieurs pédologues en se basant sur les méthodes conventionnelles des sciences des sols. À la lumière de cette démarche scientifique, nous pouvons conclure que la carte restituée par la méthode IDW illustre mieux les différentes unités pédologiques que celle restituée par la méthode *Spline*. Bien qu'elle soit non idéale, elle est plus simple à utiliser et procure des résultats acceptables représentant relativement mieux la réalité terrain que la méthode *Spline* surtout si les observations sont ponctuelles, denses et uniformément distribuées spatialement, et couplés aux analyses au laboratoire. Toutefois, la méthode IDW est moins précise que le Krigeage qui peut différencier les principaux types de sols dans l'espace avec une bonne précision. En effet, le Krigeage représente les classes des sols de façons relativement conformes à la réalité terrain. Il repose sur des bases sérieuses afin d'étudier les relations spatiales et il en trouve ce qui lui donne la puissance par rapport aux méthodes déterministes reposant sur l'indépendance entre les variables. Nous pouvons donc conclure que le Krigeage, ou la géostatistique, représente une autre alternative ou un excellent outil de support aux méthodes conventionnelles de la cartographie des sols. Il caractérise bien la continuité des propriétés des sols et manifeste les changements de façon progressive. Par contre, il peut être non convenable lorsqu'il ya des discontinuités brutales. Il confère plus de robustesse et de malléabilité à la démarche cartographique proposée, en permettant aux procédés rigoureux d'analyses spatiales de produire des cartes représentatives. Il forme un outil de production de documents cartographiques répondant rapidement à des applications spécifiques notamment dans les pays en développement. Néanmoins, une petite faiblesse peut être notée. Autrement dit, les classes représentées par de très petites zones elles peuvent être ignorées par le Krigeage à cause de la globalité de cette méthode qui considère une forte dépendance spatiale des observations avec une certaine continuité de la propriété sujette à l'étude. Formellement, ces hypothèses ne donnent pas la chance à la représentativité des petites informations dispersées sur un large territoire.

Table des Matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	vii
Liste des acronymes.....	viii
1. Introduction.....	1
1.1 Objectifs et hypothèses de la recherche.....	4
1.2 Organisation de la thèse.....	5
2. Méthodologie de la recherche.....	7
2.1 Site d'étude.....	7
2.1.1 Les sols isohumiques.....	10
2.1.2 Les sols Calcimagnésiques.....	11
2.1.3 Les sols fersialitique.....	11
2.1.4 Les sols hydromorphes.....	12
2.1.5 Les sols peu évolués (sols complexes).....	12
2.2 Echantillonnage des sols.....	13
2.3 Éléments grossiers.....	14
2.4 Analyses au laboratoire.....	14
2.4.1 Le pH.....	14
2.4.2 La matière organique.....	15
2.4.3 Le calcaire total.....	16
2.4.4 L'analyse granulométrique.....	17
2.5 Classification des sols.....	20
2.6 Traitements des données.....	21
2.6.1 Méthode Spline.....	22
2.6.2 Méthode inverse distance (IDW).....	23
2.6.3 Méthode de la géostatistique.....	25

2.7 Analyse spatiale.....	28
3. Analyse des résultats.....	30
3.1 Analyse des cartes de fractions granulométriques.....	33
3.2 Analyse spatiale des cartes texturales.....	38
3.3 Analyse des cartes de fractions des propriétés des sols.....	42
3.4 Analyse spatiale des cartes des propriétés des sols.....	49
3.5 Restitution et validation des cartes des sols.....	56
4. Conclusions et recommandations.....	67
5. Bibliographie.....	71

Liste des Figures

Figure 1 : Organigramme méthodologique.....	8
Figure 2 : Localisation de la région d'étude, périmètre irriguée de Tadla (Région de Béni-Mellal au Maroc).	9
Figure 3 : Périmètre irriguée de Tadla avec le sous-périmètre de Béni-Amir qui forme notre site d'étude (Région de Béni-Mellal au Maroc).....	10
Figure 4 : Location spatiale des points échantillonnés sur le site d'étude et photos illustrant quelques exemples de sols.....	13
Figure 5 : Microtrac S3500.....	18
Figure 6 : Triangle de textures (d'après Christopherson and Byrne, 2009).....	19
Figure 7 : Mode de fonctionnement de la méthode Spline.	23
Figure 8 : Résultats de la classification texturale.....	31
Figure 9 : Cartes d'argile dérivées par : IDW (a), Spline (b), KO (c) et KU (d).....	33
Figure 10 : Semi-variogrammes résultants du KO et KU pour l'argile (a), le limon (b) et le sable (c).....	34
Figure 11 : Cartes du limon dérivées par : IDW (a), Spline (b), KO (c) et KU (d).....	35
Figure 12 : Cartes du sable dérivées par : IDW (a), Spline (b), KO (c) et KU (d).....	37
Figure 13 : Cartes texturales dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU (c).....	40
Figure 14 : Cartes dérivées par IDW de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).....	41
Figure 15 : Cartes dérivées par Spline de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).	42
Figure 16 : Cartes dérivées par KO de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).	44
Figure 17 : Semi-variogrammes résultants du KO et du KU pour la matière organique (a), le pH (b) le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d)	45
Figure 18 : Cartes dérivées par KU de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).....	47
Figure 19 : Cartes de la matière organique dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU (c).....	49
Figure 20 : Cartes du pH dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU.....	51
Figure 21 : Cartes du calcaire total dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU(c).....	54
Figure 22 : Cartes des éléments grossiers dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU (c).....	56
Figure 23 : Carte pédologique de la région d'étude (Source: ORMVAT).....	58
Figure 24 : Carte des types de sols restituée par la méthode <i>Spline</i>	60
Figure 25 : Carte des types de sols restituée par la méthode Inverse Distance.....	61
Figure 26 : Carte des types de sols restituée par le Krigeage.....	63

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Classes conventionnelles de la granulométrie d'après le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc, SCET-Maroc (1984).....	18
Tableau 2 : Limites (Min. et Max.) des classes texturales selon le triangle de textures.....	32
Tableau 3 : Paramètres des semi-varogrammes dérivés par Krigeage des éléments texturaux.....	35
Tableau 4 : Paramètres des semi-varogrammes dérivés par Krigerage des éléments de propriétés de sols.....	46
Tableau 5 : Normes de caractérisation des propriétés des sols de la zone d'étude, d'après le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc, SCET-Maroc (1984).....	48
Tableau 6 : Caractéristiques des types de sols de 0 à 20 cm de la zone étudiée qui sont résumées d'après les normes du Ministère de l'agriculture et de la reforme Agraire du Maroc, SCET-Maroc (1984).....	59

Liste des acronymes

ANAFID	Association Nationale des aménagements Fonciers, de l'irrigation et drainage.
CPCS	Commission de Pédologie et de la Cartographie des Sols.
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie.
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations.
GPS	Global Positioning System.
HCL	Acide chlorhydrique.
IDW	Inverse distance weighted.
KO	Krigeage ordinaire
KU	Krigeage universel.
MADRPM	Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des pêches Maritimes.
MO	Matière organique.
ORMVAT	Office Régional de la Mise en valeur Agricole du Tadla.
OTAN	Organisation du traité de l'Atlantique Nord.
RMSE	Root Mean Square Error.
SCET	Société centrale pour l'équipement du territoire.
SIG	Systèmes d'information géographique.
USDA	United States Department of Agriculture.
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
WRB	World Reference Base.

1. Introduction

Le sol est considéré comme une interface principale de la biosphère, c'est une ressource naturelle fondamentale pour le développement durable (Robert, 1996). Malheureusement, cette ressource est très peu renouvelable à l'échelle d'une génération humaine (Badraoui, 2006). Il forme la partie meuble de la lithosphère qui constitue une composante majeure de la biosphère continentale. Cette partie meuble forme une couche superficielle dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres, couvrant les substrats géologiques, elle est essentielle aussi bien pour la vie végétale que pour la vie animale. Les sols se forment de manière très lente par l'altération des matériaux géologiques, sous l'action de l'air, de l'eau et de la vie (Legros, 2007). Ils sont de natures et de types très divers, distribués en fonction de la topographie, des roches, des végétaux, des climats, et des activités humaines (Beudet *et al.*, 1967; Stengel et Gelin, 1998; Badraoui *et al.*, 2000). Selon Ruellan (2003), les sols remplissent un certain nombre de fonctions fondamentales et indispensables pour la vie, tels que : des fonctions alimentaires pour les humains et les animaux, des fonctions biologiques assurant la vie des micro-organismes dans les sols, des fonctions environnementales pour l'amélioration de la qualité des eaux souterraines et le stockage du carbone. Entre autres, en plus de fournir des matériaux de construction, les sols conservent la mémoire des peuples ainsi que des informations biologiques et climatiques depuis des millions d'années (Legros, 1996; Ruellan, 2003). Bien entendu, la connaissance des ressources en sol d'un pays et de leurs aptitudes à différentes utilisations par les communautés, les scientifiques et les décideurs est un préalable pour l'aménagement du territoire et le développement durable.

La cartographie des sols est d'une importance particulière pour bien comprendre leur organisation, leurs localisations et distributions spatiales, et de leurs caractéristiques (Legros, 1996). Ces informations sont fondamentales du fait que les sols supportent le développement durable et, comme l'eau, ils sont des ressources primaires qui jouent un rôle essentiel dans les fonctionnements biophysique et biochimique des différents écosystèmes végétaux. Comprendre la distribution spatiale et l'aménagement des sols est une étape critique pour concevoir l'équilibre complexe des processus chimiques et physiques pour rendre, notamment, les écosystèmes agricoles plus productifs (Scull *et al.*,

2003). Actuellement, il y a une très grande demande d'une information précise sur les sols par les modélisateurs de l'environnement, de l'érosion et de l'hydrologie, les ingénieurs de génie, les planificateurs en milieux urbain et rural, les forestiers, ainsi que les agriculteurs. Toutefois, l'inventaire des ressources pédologiques n'est pas toujours disponible et sa réalisation reste encore une opération très lente et coûteuse, notamment dans les pays en développement. Par exemple, au Maroc, bien que le sol soit reconnu par les pouvoirs publics comme une composante principale de la planification de l'aménagement du territoire à travers l'utilisation rationnelle des terres, il est la ressource la moins connue par rapport aux autres ressources naturelles, tels que : l'eau, les mines, les forêts, etc. (Badraoui, 2006).

Historiquement, l'étude et la cartographie des sols au Maroc ont connues deux différentes phases : avant et après l'indépendance en 1956 (Badraoui, 2006). Durant la première phase, avant l'indépendance, les géographes et les pédologues étrangers ont établi les premières notes d'observations et de cartes des sols à des fins de gestion et d'exploitation agricoles, notamment dans les grandes régions fertiles et riches en ressources hydriques. Ces régions, après les opérations du remembrement qui étaient mises en place par le protectorat français et la construction des barrages hydro-agricole, sont devenues les grands périmètres irrigués du Maroc (Prefol, 1986). En outre, dans différentes régions du pays, plusieurs autres travaux sur les comportements physico-chimiques des sols ont été réalisés de façons fragmentaires dans le cadre d'avant-projets ou de projets hydro-agricoles ou hydro-électriques (Thomann, 1952; Feodoroff, 1955). Quant à la seconde phase, après l'indépendance, elle se caractérise par la politique du développement d'une agriculture basée sur l'irrigation mise en place par S.M. Le Roi Hassan II en 1967, ce qui avait suscité la réalisation des travaux cartographiques des sols aux échelles $\geq 1 / 20\ 000$ (Badraoui, 2006). Ainsi, plus de 2,5 millions d'hectares ont été cartographiés dans les périmètres de grandes infrastructures hydrauliques (qui sont devenus par la suite les offices de mise en valeur agricole) et dans les périmètres de petite et moyenne hydraulique un peu partout au Maroc (MADRPM, 1993). Durant les années 80, le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc avait lancé un programme de reconnaissance pédologique à petites et moyennes échelles un peu partout au pays en

couvrant les zones dites “Bour”, qui sont basées sur une agriculture pluviale (Badraoui et Stitou, 2002). Toutefois, malgré ces efforts, la superficie totale ayant une couverture pédologique (toutes échelles confondues) est d'environ 20 millions d'hectares concentrée au nord et au centre du pays, soit 28 % du territoire marocain (Badraoui, 2006).

Pour la cartographie des sols, les méthodes conventionnelles sont basées sur des modèles discrets qui préconisent que les changements brutaux des sols généralisent différents types d'unités pédologiques dont les profils caractérisent les sols. Ces méthodes nécessitent la présence d'un pédologue sur le terrain d'étude en observant les attribues des sols et en les notant sur des photos aériennes servant de support cartographique. Les outils de cette procédure de levé sont simples et résident dans des outils d'observation du sol (pelle, tarière, etc.) et des données auxiliaires (cartes topographiques et géologiques). Toutefois, ces méthodes conventionnelles assurent des produits cartographiques de précision, mais elles nécessitent plus de temps et d'investissement ce qui rend la tâche titanesque. Évidemment, cette situation représente un handicap majeur pour le choix et la planification des projets d'aménagement agricole ou de conservation du sol. En plus, à l'ère de la mondialisation et de la globalisation des marchés, la connaissance des ressources naturelles en sols est désormais reconnue comme faisant partie intégrante des facteurs stratégiques pour la réalisation d'un succès économique compétitif et agressif. En effet, à l'échelle de la planète, la durabilité des systèmes de production passe nécessairement par la durabilité des ressources en sol et en eau (Badraoui *et al.*, 2000). Cependant, ce manque en matière de cartographie pédologique partout dans le monde, et notamment dans les pays en développement, avait suscité l'intérêt de la communauté scientifique afin de mettre en place des techniques et méthodes rapides et rigoureuses. En effet, de nouvelles procédures théoriques et conceptuelles liées au développement de la technologie de l'information ont permis des avancées considérables dans les techniques de cartographie des sols. Les spécialistes utilisent ces avancées pour la caractérisation des pédopaysages, le tracé des limites des sols, et l'analyse des variabilités spatiale et temporelle de plusieurs éléments des sols. Un certain nombre de technologies de l'information, tels que les systèmes d'information géographique (SIG), les systèmes de positionnement global (GPS), et la télédétection, associés aux analyses au laboratoire

permettent de cartographier les paramètres de surface ou les types de sols rigoureusement. La synergie entre le GPS, les SIG et la géostatistique offrent des outils puissants et précis pour la cartographie et l'analyse spatiale des propriétés des sols et de leurs indicateurs (Escadafal et al, 1988 et 1991; Merzouk *et al.*, 1990; Haboudane *et al.*, 2002; Chikhaoui *et al.*, 2004; Bannari *et al.*, 2008). Le GPS permet une localisation tridimensionnelle précise des points d'échantillonnage sur le terrain. Les SIG offrent des outils de manipulation des données, de l'analyse spatiale, de la combinaison des différents facteurs indicateurs de la qualité des sols, de la cartographie et de visualisation en 2D et 3D. Quant à la géostatistique, elle est établie en science des sols comme un excellent outil, non linéaire et non biaisé, de modélisation spatiale des différents indicateurs des propriétés des sols. Elle se base sur un second concept qui considère continue la variabilité spatiale du sol, ce qui préconise que les caractéristiques du sol changent lentement en fonction de l'espace et non brusquement en fonction des profils. Dans ce cas, la cartographie des sols est basée sur la notion des horizons plutôt que sur celle des profils. Ce concept de modélisation a trois avantages. Il considère le sol en trois dimensions, il prend en considération la variabilité spatiale du sol, et il permet d'analyser le modèle de superposition horizontal du sol (Boulet, 1982 ; Girard, 1983; Girard *et al.*, 1989).

Cette recherche explore le potentiel de la synergie entre le GPS, les SIG, les méthodes d'interpolations déterministes (Spline et inverse distance) et probabilistes (géostatistique : Krigeage ordinaire et Krigeage universel), et les analyses au laboratoire (granulométrie, calcaire total, pH, matière organique et éléments grossiers) pour la cartographie des sols dans un environnement semi-aride au Maroc.

1.2. Objectifs et hypothèses de la recherche

Cette recherche vise à étudier les différentes méthodes d'interpolation déterministes (Spline et inverse distance) et probabilistes (géostatistique) pour cartographier les propriétés des sols. Autrement dit, analyser le potentiel de la géostatistique par rapport aux deux autres méthodes d'interpolation pour la cartographie des types de sols. Nos objectifs sont les suivants :

- Échantillonnage sur le terrain selon un maillage séré (environ 1,5 km) en considérons les différents types de sols de notre site d'étude,
- Description morphologique et estimation des éléments grossiers, ainsi que la photographie de chaque échantillon dans son environnement naturel et sa localisation par GPS avec une précision de ± 5 m,
- Analyses au laboratoire des échantillons de sols afin de connaître leurs propriétés organiques et chimiques (granulométrie, pH, matière organique et calcaire total),
- Classification texturale des sols à l'aide du triangle de textures (classification Américaine) en se basant sur les résultats de la granulométrie,
- Restitution des cartes de fractions du pH, de la matière organique, du calcaire total, des éléments grossiers et des classes texturales à l'aide des différentes méthodes d'interpolation déterministes (Spline avec tension et inverse distance) et probabilistes (Krigage ordinaire et Krigage universel),
- Analyse spatiale à l'aide des SIG et dérivation des cartes des classes texturales et des propriétés des sols en se basant sur les résultats des étapes précédentes,
- Restitution et validation des cartes des sols obtenues par les méthodes déterministes et probabilistes par rapport à la vérité terrain.

Dans le cadre de cette recherche nous formulons les hypothèses suivantes : les méthodes d'interpolations spatiales non biaisées, basées sur la géostatistique, peuvent donner des résultats plus représentatifs de la réalité terrain que les méthodes déterministes. La synergie entre les analyses au laboratoire et la nouvelle technologie de l'information peut-être un excellent outil de cartographie des types de sols.

1.2. Organisation de la thèse

La thèse est présentée en quatre chapitres. Le premier présente la problématique qui forme le point de départ de cette recherche et formule les objectifs et les hypothèses de la recherche. Le second chapitre porte sur la démarche méthodologique, la description du site d'étude, l'acquisition et les analyses des données au laboratoire, les prétraitements des données, la description des méthodes d'interpolation et l'analyse spatiale dans un environnement SIG. Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et la validation

par rapport à la vérité terrain. Quant au quatrième chapitre, il résume les conclusions et les recommandations de cette recherche.

2. Méthodologie de la recherche

La méthodologie de cette recherche est basée sur la synergie entre le GPS, les SIG, la géostatistique, les méthodes d'interpolation déterministes et les analyses au laboratoire pour la cartographie des sols. Pour atteindre nos objectifs, nous avons échantillonné 254 points répartis de façon presque régulière sur notre site d'étude et nous avons élaborés une approche méthodologique illustrée par l'organigramme de la figure 1, que nous allons présenter dans ce chapitre.

2.1. Site d'étude

Localisé sur la côte nord-ouest du continent africain, le Maroc se caractérise généralement par un climat humide, semi-aride et aride, respectivement, en allant du nord vers le sud. Ces variabilités climatiques, topographiques, géologiques, morphologiques, ainsi que les conditions sociales et économiques font du Maroc un pays unique en Afrique du Nord. Les ressources en eau du pays sont estimées à 150 milliards de mètres cubes (ANAFID, 1993) ce qui fait de l'agriculture l'un des axes fondamentaux de l'économie marocaine. Les terres agricoles utilisées ne représentent que 12% de la surface totale du pays. Un million d'hectares sont irrigués, le reste est cultivé sous les conditions pluviales, terres dites "bour" (Badraoui et Stitou, 2003).

La région de Béni-Mellal située au centre du Maroc a su mettre à profit ses ressources hydriques importantes, son climat idéal, et ses vastes espaces cultivables pour développer une agriculture performante et diversifiée (Figure 2). Cette région abrite le périmètre irrigué de Tadla qui est le premier périmètre irrigué au Maroc. Ce périmètre est traversé par l'oued Oum-El-rabia qui le divise en deux sous-périmètres définis par des caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques différentes (Figure 3). Le premier sous-périmètre de Béni-Amir est d'une superficie de 27 000 ha est irrigué par les eaux régularisées du barrage Ahmed El-Hansali (800 Millions de m³ de capacité) sur l'oued Oum-El-rbia. Ce sous-périmètre est le site d'étude de la présente recherche. Le second sous-périmètre de Béni-Moussa est d'une superficie de 69 500 ha, il est irrigué par les eaux régularisées du barrage Bin-El-Ouidane (1,5 Milliards de m³ de capacité) sur l'oued El-Abid (Charckaoui *et al.*, 2004). L'agriculture constitue le pilier économique de la

région assurant un emploi à environ 61% de la population active. Elle approvisionne l'industrie agro-alimentaire locale et les autres régions du Maroc.

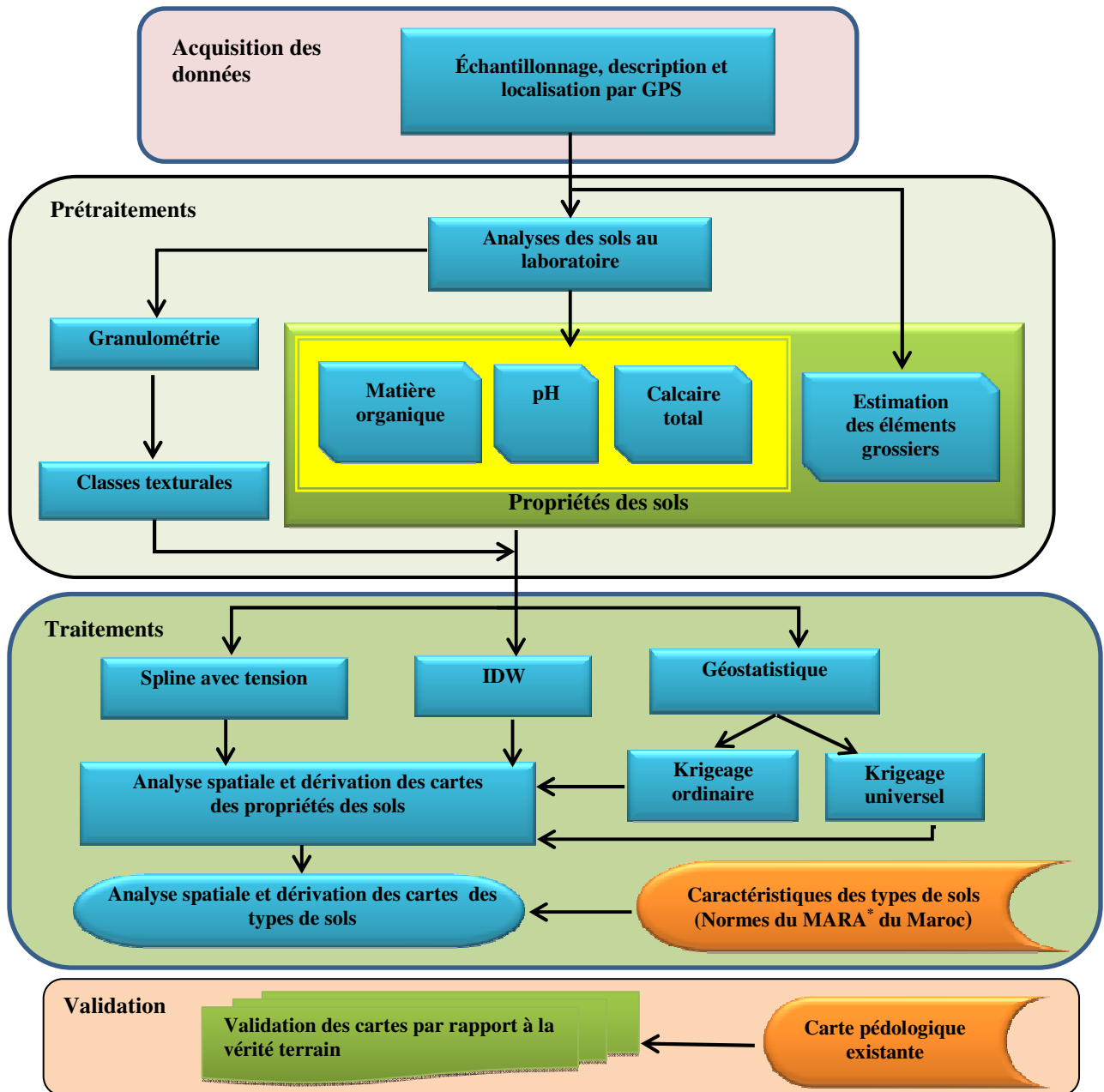


Figure 1 : Organigramme méthodologique

* : Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc (SCET-Maroc, 1984).

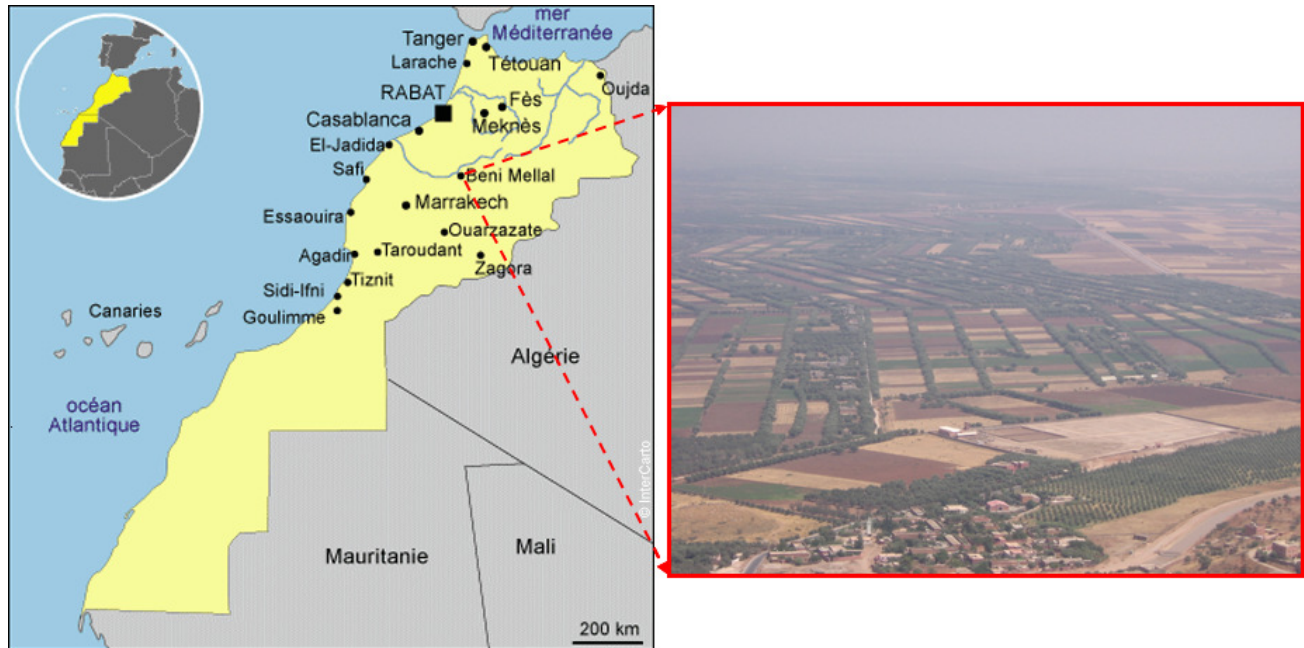


Figure 2 : Localisation de la région d'étude, périmètre irriguée de Tadla
(Région de Béni-Mellal au Maroc).

Géographiquement, le périmètre irrigué du Tadla est situé à 200 km de Casablanca ($32^{\circ} 21' N$ et $6^{\circ} 21' O$), limité au Nord par le plateau des phosphates, par la chaîne du moyen Atlas au sud, se rétrécit entre le plateau d'Oued-Zem et la retombée atlasique à l'Est, et il est limité par l'oued El Abid. Il est caractérisé par un climat de type méditerranéen, semi-aride à caractère continental avec une saison sèche d'avril à octobre et une saison pluvieuse de novembre à mars. La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 350 à 500 mm avec une forte variation dans le temps et l'espace (Massoni *et al.*, 1970). Les températures connaissent des variations saisonnières avec un maximum de $40^{\circ}C$ en août et un minimum en janvier de $3^{\circ}C$. La topographie de ce périmètre est presque plaine sauf dans une bande étroite de part et d'autre du lit encaissé d'oued Oum-EL-rabia et dans la zone de piedmont de l'Atlas. Les altitudes sont comprises entre 434 m au Nord-ouest et de 339 m au Sud, la pente généralement douce et faible : 0,4% (Loukili *et al.*, 1999). Les principaux types des sols qui dominent le périmètre irrigué de Tadla sont (Loukili *et al.*, 1999; Bellouti *et al.*, 2002; Badraoui, 2003):

1. Sols isohumiques qui représentent 83% des sols du périmètre, ils comprennent des sols bruns et châtaîns subtropicaux modaux, et des sols subtropicaux salins et salin-sodiques.
2. Sols calcimagnésiques comprenant les sols bruns calcaire et les rendziniformes qui représentent 11%.
3. Sols fersiallitiques à sesquioxydes de fer.
4. Sols hydromophes et sols peu évolués.

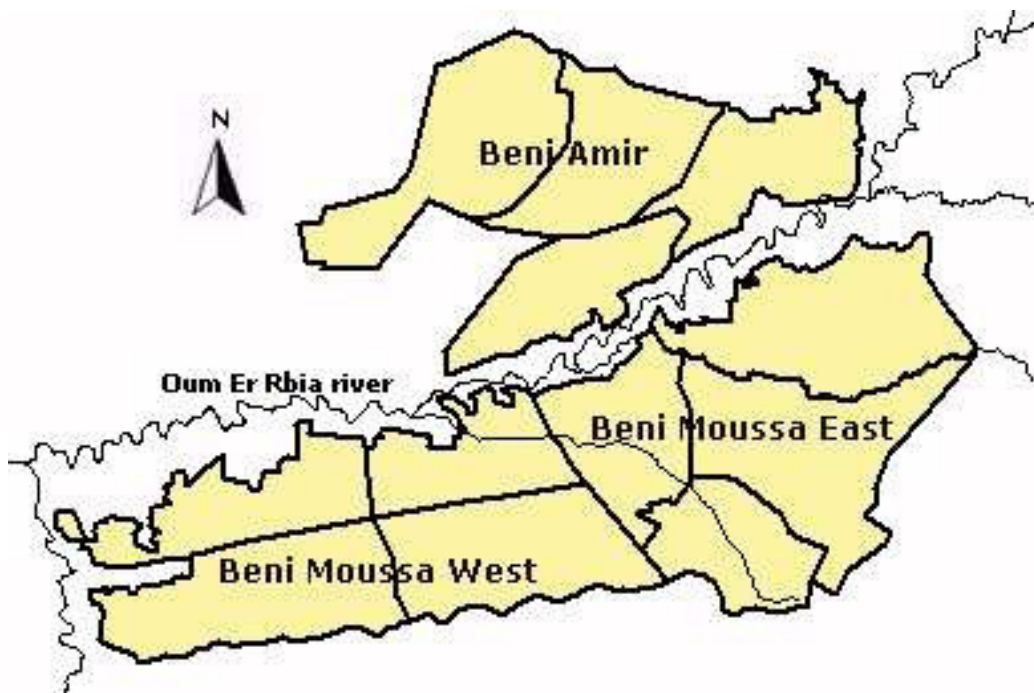


Figure 3 : Périmètre irriguée de Tadla avec le sous-périmètre de Béni-Amir qui forme notre site d'étude (Région de Béni-Mellal au Maroc).

2.1.1. Les sols isohumiques

Les sols isohumiques tropicaux sont répandus dans la majorité des plaines du Maroc. Ils ont en commun certains caractères qui les séparent nettement des autres sols du Maroc, bien que chacun de ces caractères, pris isolément, puisse se retrouver dans d'autres types de sol. D'après Billaux et Bryssine (1970), ce sont une argilisation en profondeur (teneur en argile plus forte, quelle qu'en soit l'origine), une faible rubéfaction, et un profil organique isohumique. C'est-à-dire, une matière organique faible en surface (ne dépassant que 3% rarement) et augmente progressivement en profondeur. Ainsi, cette

classe de sols se caractérise avec un profil calcaire qui se décalcarise en surface avec une accumulation en profondeur sous forme de nodules individuelles. On distingue deux groupes parmi ces sols, les sols châtaîns et les sols bruns, qui se différencient typiquement de la façon suivante (Billaux et Bryssine, 1970):

- Les sols châtaîns isohumiques subtropicaux sont plus argileux, plus rubéfiés, et ils sont totalement décalcarisés en surface. Leur structure est prismatique en profondeur, leur accumulation de calcaire par rapport à la roche-mère est importante. Ces sols sont caractérisés par une faible teneur en matière organique à la surface, environ 2 à 3%.
- Quant aux sols bruns isohumiques subtropicaux, ils restent souvent calcaires en surface et sont moins rubéfiés, leur structure est polyédrique en profondeur, leur accumulation en calcaire est généralement moins forte. La teneur en matière organique est trop faible, de l'ordre de 1 à 2%.

2.1.2. Les sols calcimagnésiques

Les sols calcimagnésiques sont formés généralement sur des roches calcaires à pente plus ou moins forte, ou sur des dépôts de pente recouvrant ces mêmes roches. Dans cette classe les sols sont formés sur des alluvions calcaires : suivant leur degré d'évolution ils font partie soient des sols peu évolués d'apport, soient des sols isohumiques. Ces sols se caractérisent par une décalcarisation partielle relativement à la roche-mère, ce qui les différencie des sols peu évolués, et par l'absence d'accumulation et d'individualisation du calcaire, ce qui les différencie des sols isohumiques (Billaux et Bryssine, 1970; Badraoui *et al.*, 1989).

2.1.3. Les sols fersiallitiques

Les sols fersiallitiques (sols à sesquioxydes de fer) sont très vieux par rapport aux autres types des sols. La particularité de leurs profils texturaux sont sablonneux en surface et argileux en profondeur avec une abondance en fer libre (Badraoui *et al.*, 1989). Ces sols sont rouges méditerranéens, non lessivés, et ils sont caractérisés par deux sous-classes. La première sous-classe regroupe les sols à caractère isohumique, sur argile à silex reposant

sur calcaire dure (Miocène et Pliocène). Quant à la seconde sous-classe, elle regroupe les sols à caractère isohumique, souvent érodés, caillouteux, sur argile à silex reposant sur calcaire dure (Miocène et Pliocène ou poudingue), avec affleurement. Globalement, dans notre région d'étude, on retrouve les sols fersiallitiques en bordure du plateau des phosphates. Ils sont rougeâtres, non calcaires, argileux, caillouteux, riches en oolithes phosphatés; la tendance prismatique de leur structure les rapproche des sols châtaîns isohumiques. Ils présentent souvent un pavage superficiel de cailloux résultant d'un décapage par ruissellement ou érosion éolienne. Localement, cette érosion a totalement dégagé le substratum calcaire. On observe également des sols rouges méditerranéens sur les conglomérats terminaux des cônes de déjection au pied du Moyen Atlas (Massoni *et al.*, 1970).

2.1.4. Les sols hydromorphes

Les sols hydromorphes existent partout au Maroc lorsque les conditions locales de topographie le permettent. Toutefois, ils ne sont largement représentés que dans le Maroc atlantique, où ils sont surtout localisés sur les bas plateaux littoraux de la Meseta côtière, sur le pourtour de la plaine du Gharb et un peu dans la plaine de Tadla. Dans cette dernière, un type particulier de sols hydromorphes sur alluvions fortement calcaire se développe dans de petites vallées mal drainées. Ces sols sont moyennement ou peu organiques. Bien qu'engorgés d'eau par une nappe phréatique haute, temporaire ou permanente, ils ne présentent que de très faibles caractères d'hydromorphie, dont le plus net est une couleur grise très claire. Ces sols, qui ne couvrent que de petites surfaces sont, sont vraiment intéressants car ils posent le problème de l'hydromorphie en milieu très calcaire (Massoni *et al.*, 1970; Billaux et Bryssine, 1970).

2.1.5. Les sols peu évolués (sols complexes)

Ces sols se caractérisent par une faible altération, ils sont les résultats de l'érosion alluvio-colluvial (Badraoui *et al.*, 1989). Il existe deux sortes : sols modaux calcimorphes sur alluvion argilo-calcaire et sols modaux calcimorphes peu profonds reposant sur poudingue. Ils sont formés sur les alluvions récentes originaires du Moyen Atlas. Sur le cône de la ville de Béni-Mellal, ces épandages varient de 0 à 1 m d'épaisseur et reposent

sur un conglomérat. A l'ouest de ce cône ils atteignent des épaisseurs bien supérieures. Les sols sont brun-clair, très calcaires, argilo-sablonneux, avec parfois quelques lits caillouteux. Le profil est d'aspect continu, les mottes sont poreuses se cassant en polyèdres fins à moyens et en éléments particuliers (Massoni *et al.*, 1970).



Figure 4 : Localisation spatiale des points échantillonnés sur le site d'étude et photos illustrant quelques exemples de sols.

2.2. Échantillonnage des sols

Les échantillons des sols ont été recueillis sur tout le sous-périmètre de Béni-Amir (Figure 3) couvrant environ 450 Km² en deux campagnes de mesures et d'échantillonnage. La première s'est déroulée entre le 13 et le 20 mai 2007 et la seconde entre 18 et 28 juin 2008. Au total, 254 points ont été échantillonnés de façon presque régulière à tous les 1000 à 1500 m en considérons toutes les classes de sols couvrant notre site d'étude. La figure 4 montre la répartition spatiale de nos points d'échantillonnage. Chaque échantillon d'environ 250 grammes a été prélevé à partir de la

couche supérieure du sol (0 à 25 cm de profondeur), puis localiser géographiquement à l'aide d'un GPS assurant une précision planimétrique de ± 5 m, et photographier à l'aide d'une caméra numérique. En outre, une description sur le terrain a été faite pour chaque échantillon : couleur, texture, matière organique et estimation des éléments grossiers.

2.3. Éléments grossiers

Les éléments grossiers sont des constituants minéraux individualisés qui peuvent être des fragments de roches poly-minéraux ou monominéraux. Il s'agit par définition de la nature granulométrique des éléments formant les sols dont la dimension peut varier des sables grossiers (0,2 à 2 mm), aux blocs (au delà de 25 cm), en passant par les granules ou les graviers (0,2 à 2 cm) et les cailloux (2 à 7,5 cm). Leur origine peut être de nature lithologique concernant les éléments grossiers résiduels de l'altération ou de la désagrégation des roches, comme elle peut être de nature pédologique concernant les éléments formés au sein même des sols (Faure, 1985). Leur nature lithologique peut être calcaire crayeux, granite, silex, gneiss, quartzite, etc. (Legros, 1996). Leur abondance (charge en éléments grossiers) est déterminée par le pourcentage du volume ou du poids de terre occupé par des éléments grossiers. Sur le terrain, l'estimation de leur pourcentage peut être visuelle en utilisant des cartons d'occupation relative similaires à ceux employés pour les taches d'hydromorphie. Elle peut être basée sur le comptage par point, en utilisant un morceau de grillage à maille carrée que l'on applique sur la surface du sol ou sur la face verticale d'un profil. Comme elle peut être une mesure directe sur le terrain en utilisant un tamis et une balance pour isoler les éléments grossiers. Dans le cadre de cette recherche nous avons estimé les éléments grossiers sur le terrain directement à l'aide de la seconde méthode en exploitant une grille de 1 m² qui était placée sur des zones bien représentatives de notre zone d'étude. Cette estimation des éléments grossiers est nécessaire dans cette étude afin de caractériser le type du sol.

2.4. Analyses au laboratoire

2.4.1. Le pH

Le pH est l'abréviation du potentiel hydrogène qui est un paramètre servant à définir si un milieu est acide ou basique. Le pH de chaque échantillon a été déterminé en utilisant

de l'eau distillée. On avait mis 5 mg de chaque échantillon dans un bécher en ajoutant 20 ml d'eau distillée. Ensuite, après des fortes agitations la solution a été laissée au repos pendant 12 h. Après, l'appareil de mesure du pH a été étalonné avec une solution étalon dont le pH doit être neutre (pH = 7), et une électrode a été introduite dans le bécher pendant quelques minutes pour faire la lecture du pH.

2.4.2. La matière organique

La matière organique regroupe plusieurs substances et composés carbonés d'origine végétale et animale : des débris en cours de décomposition issus de la végétation (sarmets, feuilles, racines, herbe, résidus de cultures, etc.) qui constituent la litière du sol, jusqu'à l'humus stable solidement fixé aux particules d'argile qui garantit la pérennité structurale. La matière organique est essentiellement localisée dans l'horizon superficiel du sol (0 à 20 cm). Elle joue un rôle primordial dans le comportement global du sol. Au niveau de l'aspect physique du sol, elle est le liant des particules minérales (argiles, limons et sables) à travers le complexe argilo-humique, et de ce fait elle participe à la qualité de la structure du sol et à sa stabilité vis à vis des agressions extérieures (érosion par la pluie et le vent, compaction entraînées par le passage d'engins agricoles, etc.). La matière organique assure le stockage et la mise à disposition pour la plante, par minéralisation, des éléments dont elle a besoin. En plus de stimuler l'activité biologique du sol, elle joue un rôle fondamental au niveau environnemental en retenant les micropolluants organiques et les pesticides. L'augmentation de leur temps de passage dans le sol permet d'améliorer leur dégradation par les micro-organismes. Entre autres, elle participe au maintien de la qualité de l'eau (Legros, 2007).

L'estimation de la teneur en matière organique d'un sol est basée sur la détermination du carbone organique. L'analyse et la détermination de la matière organique et de carbonate organique ont été faites au laboratoire de géographie physique du Département de Géographie à l'Université d'Ottawa, en utilisant la procédure suivante :

- Sécher l'échantillon de sol pendant 24 heures à 105°C.
- Prendre le poids du creuset vide, ajouter le sol séché, et puis noter le poids final.
- Mettre ensuite le sol au four sous une température de 550°C pendant 3 heures.

- Laisser le sol se refroidir et repeser le creuset.
- Mettre le même sol au four sous une température de 950°C pour déterminer le carbonate.
- Laisser le sol se refroidir et peser le poids final de l'échantillon sujet à l'analyse.

Les résultats de chaque échantillon ont été calculés à partir de l'équation suivante (Heiri *et al.*, 2001):

$$\text{M.O. (en pourcent)} = \frac{((P_{105} - P_0) - (P_{550} - P_0))}{(P_{105} - P_0)} * 100 \quad (1)$$

Où

M.O. : Matière organique,

P_0 : Poids du creuset vide,

P_{105} : Poids du creuset à 105°C, et

P_{550} : Poids du creuset à 550°C.

2.4.3. Le calcaire total

Le calcaire, nommé aussi carbonate de calcium, se présente sous la forme de particules plus ou moins grosses dans le sol. De point de vue granulométrique, ces particules ressemblent aux grains de sable mais elles sont chimiquement différentes. En effet, les plus fines particules peuvent libérer du calcium qui tend à neutraliser les acides et rendre le sol plus basique. Dans la littérature il existe différentes méthodes afin de déterminer le calcaire total dans un échantillon de sol (Baize, 2000). Toutefois, dans cette étude nous avons retenue la méthode volumétrique nommée aussi la méthode « Calcimètre de Bernard ». Elle est basée sur la mesure du volume de CO₂ dégagé suite à l'action d'un excès d'acide de chlorure (HCL) sur un poids connu d'un échantillon de sol (Baize, 2000). La connaissance du taux du calcaire total dans un sol est un élément fondamental parmi d'autres (matière organique, pH, éléments grossiers, et classe texturale) pour la détermination de la classe du sol en question.

2.4.3. L'analyse granulométrique

La distribution de la taille des particules du sol, nommée aussi composition granulométrique, est une des plus importantes caractéristiques du sol. Elle a un effet sur beaucoup de propriétés du sol, telles que : la facilité du labour, la conductivité capillaire d'un sol, l'humidité disponible, la perméabilité, le tassement, etc. L'analyse granulométrique permet la détermination de la distribution des fines particules du sol suivant leurs diamètres (sables : de 50 μm à 2 mm, limons : de 2 à 50 μm , et argiles : < 2 μm). Différentes méthodes ont été proposées dans la littérature pour les analyses granulométriques : la méthode à pipette de Robinson et la nouvelle méthode du tri-laser (Microtrac, S3500). Cette dernière méthode a été retenue dans le cadre de cette recherche. La séparation des particules par groupe de taille est généralement effectuée par tamisage à sec permettant la séparation de terre fine des éléments grossiers (diamètre > 2 mm) et par un tamisage humide séparant les particules ayant un diamètre compris entre 0,05 et 2 mm. Quant à la détermination de la taille des particules fine, la méthode basée sur la sédimentation est généralement utilisée. Le Tableau 1 résume les classes conventionnelles de la granulométrie.

Le Microtrac S3500 (Figure 5) basé sur la technologie Tri-laser fournit des informations précises et fiables sur les dimensions particulières. Cet instrument offre des avantages importants, en options sèches et humides, de point de vue alignement, exactitude, résolution, uniformité, et gamme (possibilité de mesurer de 0,024 à 2 800 microns). La méthode suivie pour l'analyse granulométrique en utilisant le Mitrotrac S3500 est la suivante (<http://www.microtrac.com/ProductsTechnology/MicrotracS3500ParticleSizeAnalyzer.aspx>):

- Mettre 5 à 10 mg de chaque échantillon de sol dans un tube gradué,
- Ajouter 20 ml d'eau distillée,
- Mélanger le tout et laisser pendant 3 jours,
- Mettre la solution dans un agitateur pendant quelques minutes,
- Prendre une quantité de la solution à l'aide d'une pipette,
- Inverser toute la solution dans l'appareil,

- Pendant 10 minutes, l'instrument Microtrac S3500 sépare les tailles des particules, et
- Calculer, ensuite, à l'aide d'un logiciel implémenté dans le Mitrotrac S3500 le pourcentage des éléments texturaux du sol.



Figure 2.5 : Microtrac S3500.

Tableau 1 : Classes conventionnelles de la granulométrie d'après le Ministère de l'Agriculture et de la Reforme Agraire du Maroc, SCET-Maroc (1984).

Classe	Diamètre des particules
Argile	< 2 μm
Limon fin	2 – 20 μm
Limon grossier	20 – 50 μm
Sable fin	50 – 200 μm
Sable grossier	200 – 2000 μm (2 mm)

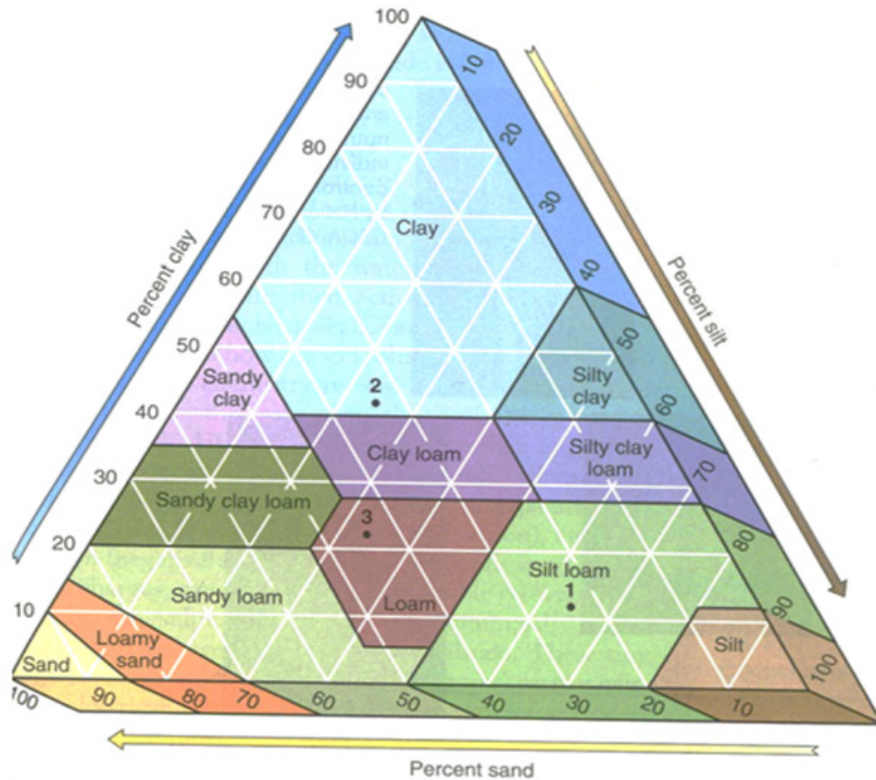


Figure 6 : Triangle de textures (d'après Christopherson and Byrne, 2009).

Après les analyses granulométriques effectuées au laboratoire, les classes texturales des sols ont été définies à l'aide du triangle de textures (Figure 6) dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile. L'analyse texturale d'un sol correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur (diamètres des particules) indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. Par contre, elle ne tient pas compte du calcaire et de la matière organique, ni des éléments grossiers (diamètre > 2mm) qui sont classés à part. Dans la littérature, il existe de nombreux triangles de textures, qui regroupent généralement les textures en quatre classes texturales fondamentales, qui permettent de définir les principales classes de propriétés d'un sol :

- Texture sablonneuse : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange anionique et cationique.

- Texture limoneuse : l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus et en calcium.
- Texture argileuse : sol chimiquement riche, mais à piètres propriétés physiques, milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines, travail du sol difficile en raison de la forte plasticité (état humide) ou de la compacité (sol sec). Une bonne structure favorisée par l'humidification corrige en partie ces propriétés défavorables.
- Texture équilibrée : elle correspond à l'optimum, dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts.

2.5. Classification des sols

La classification des sols est un système de référence qui consiste à grouper en catégories les sols aux caractéristiques morphologique semblables (Buol *et al.*, 2011). Les sols n'étant pas des entités discrètes, leur unité de mesure n'est pas évidente. Cette unité est le pedon, un corps tridimensionnel par définition, ordinairement de 1 m de côté et de 1 à 2 m de profondeur. Une section verticale d'un pedon présente des couches plus ou moins horizontales (horizons) résultant de la pédogenèse. Le but de n'importe quelle classification est d'organiser l'information sur les sols afin que les propriétés des classes des sols et leurs relations puissent être facilement comprises, ainsi que la compréhension des relations entre les sols et les facteurs environnementaux (Encyclopédie Canadienne, 2009). Il y a trois différents systèmes de classification des sols bien connus à l'échelle internationale (Legros, 2007) :

- 1- La classification Française connue sous le nom classification de la commission de pédologie et de cartographie des sols (CPCS) qui a été mise en place en 1967 (CPCS, 1967). Cette classification est à la fois hiérarchique et génétique. L'aspect hiérarchique est lié à la division en unités majeures : classes, sous-classe, groupes et sous-groupes. Quant à l'aspect génétique, il fait intervenir des facteurs externes

- de formation du sol, notamment le climat. Cet aspect est hérité de l'école RUSSE de pédologie.
- 2- La classification Américaine connue sous le nom de "Soil Taxonomy" (USDA, 1994), elle est basée sur les différents horizons de diagnostic (horizon spodique, horizon argileuse, etc.). Ces horizons servent à déterminer les unités fondamentales des sols, sauf les "arid-sols" définis par leur climat sec et les vertisols définis par leurs textures et les propriétés de la roche mère.
 - 3- La classification de la FAO sous l'organisation des Nations Unies est basée sur le *World Reference Base* (Latham, 1981) qui était mis en place par l'International Society of Soil Science. Elle propose une organisation des sols en établissant des passerelles entre les classifications nationales. Legros (2007) discute en détails des principes de base de cette classification.

Dans le cadre de cette recherche, en se basant sur les classes texturales déterminées à partir de l'analyse granulométrique, du calcaire total, du pH, de la matière organique et des éléments grossiers nous allons faire le passage des classes texturales et des classes des propriétés des sols aux classes des types des sols. Bien entendu, le potentiel des méthodes d'interpolation déterministes et probabilistes sera évalué pour cette cartographie.

2.6. Traitements des données

Une fois les analyses et la classification des sols terminées, nous allons restituer les cartes des différentes classes de fractions des sols en utilisant différentes méthodes d'interpolation dans l'environnement SIG. En effet, comme discuté auparavant, l'un des buts principaux de cette recherche est une confrontation (comparaison et analyse de précision) entre les deux approches déterministes et probabilistes afin d'examiner leurs potentiels pour la restitution des cartes des sols dans un environnement semi-aride. Généralement, les méthodes d'interpolation spatiale permettent l'estimation de valeurs de variables inconnues à partir de valeurs observées connues selon certains critères et conditions. Les méthodes déterministes comme Spline, polynomiale, inverse distance (connue sous l'abréviation anglaise IDW) et la triangulation considèrent la variabilité

régionale par une fonction aléatoire en assumant que les observations sont faites sans erreurs (Hulme *et al.*, 1995; Lennon *et al.*, 1995; Kurtzman et Kadmon, 1999). Par contre, les méthodes probabilistes comme la géostatistique reposent sur le principe de l'auto-corrélation spatiale qui préconise que les observations rapprochées dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. En outre, elles se distinguent par le calcul d'erreurs d'estimation associées (Matheron, 1963; Krige, 1963). Chaque carte d'abondance relative (fraction ou classe du sol) restituée est donc à analyser en parallèle de celle de la carte des erreurs qui lui sont associées (Arnaud et Emery, 2000; Baillargeon, 2005; Renard et Comby, 2006). Dans les sections suivantes nous allons présenter les méthodes considérées dans notre recherche, à savoir : IDW, Spline, le Krigeage ordinaire (KO) et le Krigeage universel (KU).

2.6.1. Méthode Spline

L'interpolation à l'aide de la méthode Spline ne s'effectue pas point par point comme avec les méthodes barycentriques (IDW, polynomiales, triangulation, etc.). L'idée est plutôt d'ajuster une surface sur tout le site d'étude dont les points connus ont été échantillonnés. Elle considère les points d'inflexion qui caractérisent le changement de la forme d'une courbe ou d'une ligne, de façon locale ou globale. Une Spline est en fait une famille de fonctions régulières de courbures minimales. Elle consiste à faire passer une fenêtre par les points de voisinage tout en minimisant la courbure de la surface. Le voisinage est défini par les " n " points connus qui sont les plus proches du point inconnu. Cette méthode est particulièrement adaptée aux surfaces sur lesquelles les variations sont peu importantes. Elle suppose que pour chaque intervalle X_i , X_{i+1} , etc. il faut calculer une valeur à l'aide d'un polynôme $P_i(X)$. Donc, l'ensemble de la courbe est calculé par un polynôme $P(X)$ construit par les polynômes $P_i(X)$ mis bout à bout afin d'assurer la continuité d'un segment :

$$P(X) = P_1(X) + P_2(X) + \dots + P_i(X) \quad (2)$$

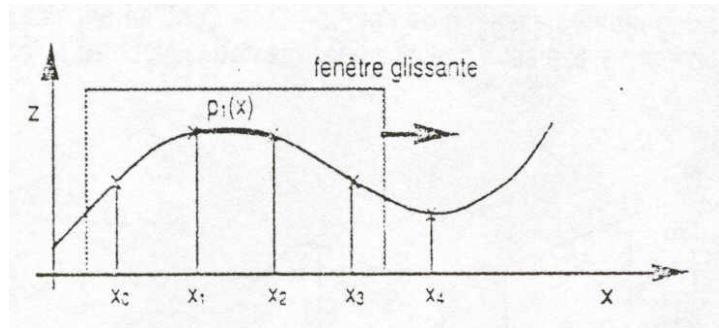


Figure 7 : Mode de fonctionnement de la méthode Spline.

La méthode Spline entraîne un gros volume de calculs, mais elle considère une fenêtre qui prend en compte seulement 4 points de contrôle à la fois. Les polynômes sont calculés de proche en proche en déplaçant la fenêtre (Figure 7). Toutefois, cette méthode peut donner des résultats incorrects (surestimation ou une sous estimation de la valeur inconnue), notamment lorsque les variations sont importantes sur une courte distance horizontale (Burrough et McDonnall, 1998). Il existe deux catégories de Splines : les Splines d'interpolation contraintes de passer par les points d'observation toute en respectant les caractéristiques du phénomène étudié sans trop de lissage (Spline with tension), et les Splines de lissage (regularized Spline) qui passent seulement à proximité de ces points (Duchon, 1975 et 1976; Wahba, 1990; Cressie, 1993). Dans le cadre de cette recherche nous considérons uniquement la méthode avec tension qui respect le plus les caractéristiques du phénomène à l'étude.

2.6.2. Méthode inverse de distance

La méthode d'interpolation inverse distance (IDW) est une méthode de moyenne pondérée où chaque valeur du point inconnu (à interpoler) est calculée comme une moyenne pondérée des observations. Elle effectue des estimations par interpolation basée sur les distances entre le point dont on souhaite estimer sa valeur et les points voisins dont on dispose déjà de mesures issues d'un échantillonnage sur le terrain. C'est l'une des méthodes les plus populaires et les plus employées. Elle est facile et rapide, mais crée des zones circulaires autour des valeurs observées, notamment si les observations ne sont pas assez denses ou si les points du voisinage ne sont pas assez nombreux. Bien entendu, cet aspect peut être lissé en jouant sur la puissance et le voisinage, mais il peut introduire

des erreurs grossières dans l'estimation des valeurs des points inconnus. Plus le point à interpoler est proche d'un point dont la valeur est connue, plus la valeur du point à interpoler sera presque similaire à la plus proche valeur connue. Dans une première étape on mesure la distance entre le point recherché et les points connus aux alentours. Dans une seconde étape, le calcul du point recherché se fait grâce à la moyenne des valeurs des points environnants en attribuant à chaque valeur connue " X_i " un poids inversement proportionnel à la distance entre le point connu et le point à estimer selon l'équation (3). Dans la littérature, la puissance accordée au poids lors de l'utilisation de cette méthode, notamment pour la cartographie des propriétés physiques ou chimiques des sols, a été au centre de grandes discussions. En effet, selon Yasrebi *et al.* (2009) une puissance égale à quatre assure une interpolation plus précise que toute autre valeur de puissance pour la prédiction de la variabilité spatiale des paramètres chimiques des sols en Iran. Toutefois, pour la cartographie des propriétés des sols, Kravchenko et Bullock (1999) et Weber et Englund (1994) ont rapportés qu'un poids avec une puissance égale à l'unité assure une meilleure estimation surtout lorsque les données ont un faible biais. En se basant sur notre expérience, sur la manipulation de nos données et aussi sur le fait qu'une puissance élevée réduit l'importance des points lointains, nous avons retenu une puissance égale à deux dans le cadre de cette recherche.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

$$W = \frac{1}{(dia)^p} \quad (4)$$

Où

W : est le poids,

p : est la puissance du poids,

dia : est la distance entre les points i et a, et

X_i : est la valeur connue de la variable à l'étude.

Bien que cette méthode est loin d'être idéale (Goodchild et Longley, 1999; Clark and Harper, 2000; Lembo, 2005), elle procure des résultats acceptables si les points d'échantillonnages sont denses et uniformément distribués spatialement. Cette approche a été exploitée dans plusieurs recherches pour estimer la distribution spatiale de la température de surface, des précipitations et des caractéristiques du sol (Tabios et Salas, 1985; Lennon *et al.*, 1995; Willmott et Matsuura, 1995; Nalder et Wein, 1998; Kurtzman et Kadmon, 1999). Elle sera considérée dans le cadre de notre recherche.

2.6.3. Méthode de la géostatistique

Les travaux de l'ingénieur minier sud-africain monsieur Krige (1951) sont précurseurs de la méthode de la géostatistique afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forages. Cependant, le terme Krigeage et le formalisme de cette méthode sont dus au français Matheron (1962) qui avait utilisé les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale. Il a aussi été le premier à utiliser le terme «géostatistiques» pour désigner la modélisation statistique de données spatiales.

Durant les trois dernières décennies, la géostatistique a connue des succès importants dans plusieurs domaines scientifiques, tels que : exploration minière et pétrolière, géologie, hydrologie, sols, etc. Elle est utile lorsque le caractère à étudier n'est pas visible à la surface du sol ou dans l'environnement (Legros, 1996). De point de vue conceptuel, elle préconise que la variable qui est sujet à l'étude dans l'environnement est un continuum et que les changements y sont progressifs ce qui cadre la nature des horizons des sols. En effet, dans le domaine des sciences des sols, Burgess et Webster (1980a et 1980b) ont été les premiers à exploiter cette approche (KO) pour cartographier les variations spatiales de propriétés des sols et de décrire les limites progressives entre unités pédologiques. Depuis lors, cette méthode a été largement utilisée pour la cartographie de plusieurs propriétés des sols, telles que : la salinité, la fertilité, la pollution et la distribution spatiale des sols (Heuvelink et Webster, 2001; Lark *et al.*, 1997; Navarro-Pedreno *et al.*, 2007). Elle traite des mesures de caractéristiques physiques, chimiques ou morphologiques du sol, effectuées à partir d'un échantillonnage fixé en général *a priori*. Nael *et al.* (2004) ont étudié le carbone organique dans le sol et la distribution de l'azote total, ainsi que les propriétés hydrologiques du sol en utilisant la

géostatistique. Herbst et Diekkruger, (2003) ont utilisé cette méthode pour la modélisation de la variabilité spatiale de l'humidité du sol à petite échelle. Gascuel et Gascud-Oudou, (1991) ont montré que les analyses morphologiques et la géostatistique constituent deux approches détaillées pour analyser la couverture pédologique. Dans la plaine côtière ancienne de Guyane, Grimaldi *et al.* (1992) ont expérimenté la géostatique pour la cartographie des variations spatiales des teneurs en argile et en fer. D'autres chercheurs ont combinés la géostatique et la télédétection pour la cartographie des propriétés des sols (Lopez-Granados *et al.*, 2005; Walder *et a.*, 2008) ou extraire uniquement la fraction argileuse du sol (Chikhaoui *et al.*, 2004). Une méthode d'interpolation spatiale combinant une analyse factorielle sphérique et le Krigeage s'avère beaucoup plus efficace pour la caractérisation granulométrique des sédiments superficiels (Lepretre *et al.*, 2006). Kheir (2007) a exploité la synergie entre la géostatistique et les SIG pour estimer la distribution spatiale des zones touchées par l'érosion.

Par ailleurs, les variogrammes et les cartes des différentes propriétés de sols obtenues par la géostatistique donnent des informations quantitatives sur les variations spatiales des propriétés analysées. Cet outil s'appuie sur des concepts stochastiques, avec l'hypothèse de base qu'il ya une certaine continuité spatiale des propriétés étudiées. Par exemple, si nous cherchons à comprendre comment et dans quelle mesures les fractions du limon dans l'espace géographique sont corrélées entre elles, la géostatistique est en mesure de répondre à nos questions. Les propriétés analysées par la géostatistique sont considérées comme des variables régionalisées (Matheron, 1965), ce qui veut dire qu'elles présentent simultanément deux aspects : un aspect structuré et un aspect aléatoire. Leur structure spatiale (Burgess et Webster, 1980a et 1980b) est analysée à l'aide du variogramme, $\gamma(h)$. Si nous considérons toutes les combinaisons de couples formés par tous les points échantillonnés dans un espace d'étude, en fonction de la distance (h) séparant leurs deux membres, le variogramme est formulé comme suit :

$$\gamma(h) = 1/2 (E (Z(x+h) - Z(x))^2) \quad (5)$$

Ou Z est, par exemple, la variable de limon observée, " x " et " $x + h$ " sont deux points d'appui formant un couple et qui sont distants de h , et E désigne l'espérance mathématique. Le variogramme est calculé de façon discrète, on choisit alors un modèle mathématique afin de caractériser la tendance de la variable sous étude (par exemple la fraction du limon) lors de son estimation par Krigeage. Cette estimation est linéaire, non biaisée et optimale au sens où l'on minimise la variance d'estimation (Matheron, 1965). Autrement dit, on modélise plus ou moins parfaitement la variabilité du limon (par exemple) telle qu'elle apparaît sur le terrain. Pour faire cette modélisation, la géostatistique nécessite en générale cinq étapes fondamentales : 1) l'analyse exploratoire (visualisation des données), 2) caractérisation de la courbe expérimentale à l'aide d'une fonction mathématique adéquate et le choix du type de Krigeage, 3) l'analyse d'anisotropie et du variogramme, 4) l'interpolation, et 5) l'évaluation de la précision des résultats (estimations). On distingue trois types de Krigeage : le simple, l'ordinaire qui est la technique la plus utilisée selon Gratton (2002), et l'universel (Laborde, 2000). La différence entre ces types réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler. Pour le KO, la variable stationnaire de la moyenne en un point est inconnue par rapport à son voisinage. Donc, l'estimation de la moyenne " m " du point inconnu se fait en utilisant tous les " n " points connus de son voisinage. Le processus du Krigeage simple considère deux étapes pour l'estimation d'un point inconnu. En premier lieu, on passe par une estimation de la moyenne de la variable inconnue (KO). Par la suite, le Krigeage simple considère cette moyenne estimée comme une valeur probable du point inconnu et recalcule la valeur qui est "disant vraie" de ce point en considérant toujours les mêmes " n " points connus mais en exploitant le principe d'ajustement des erreurs par moindres carrés. On peut alors former un estimateur sans biais et sans imposer la contrainte que la somme des poids soit égale à 1. Notons aussi que lorsque les zones sont fortement échantillonnées, les Krigeages simples ou le KO fournissent des estimations similaires. Par contre, dans les zones sous échantillonnées, le Krigeage simple attribue un poids important à la moyenne globale supposée connue, alors que le KO attribue le même poids à une moyenne estimée localement. Cependant, l'hypothèse de stationnarité sur laquelle repose les deux types de krigeage, simple et ordinaire, peut souvent être mise en doute (Matheron, 1969; Baillargeon, 2005). En particulier, il semble souvent erronée de

postuler que l'espérance de la fonction aléatoire étudiée reste constante ou quasi-constante sur le site d'étude. Quant au KU, aussi appelé krigeage en présence d'une dérive, il considère la variable non stationnaire mais avec un modèle de tendance (Matheron, 1969; Cressie, 1993; Goovaerts, 1997; Wackernagel, 2003). La stationnarité se définit par la constance de l'espérance, mais aussi par la covariance entre deux observations qui dépend uniquement de la distance entre ces observations.

Par ailleurs, dans la littérature, plusieurs autres chercheurs ont critiqué les techniques de la géostatistique du fait que le Krigeage est une technique qui est plus globale que locale, ce qui ne permet pas de prendre en considération la connaissance de la vraie nature des sols (Laslett *et al.*, 1987). Zhu (1997) rapporte une autre faiblesse, c'est que le Krigeage considère une très forte dépendance des données ce qui nécessite un très grand nombre de points d'échantillonnage suffisamment rapprochés spatialement, ce qui rend la tâche lourde et coûteuse. Selon McBratney *et al.* (2000), l'hypothèse de l'auto-corrélation spatiale des données par la géostatistique est parfois une supposition mal commode notamment dans les zones complexes avec des sols qui se caractérisent par des changements brusques dans leurs structures. Par contre, Webster et Oliver (1992) suggèrent que lorsque les points d'échantillonnage dépassent une centaine, il est souhaitable d'utiliser la géostatistique à l'échelle des champs à cause de la forte variabilité spatiale des sols dans certaines zones des parcelles.

2.7. Analyse spatiale

L'utilisation des SIG a permis d'établir des bases de données fiables pour une meilleure présentation des cartes pédologiques et avec une grande facilité pour des mises à jours par rapport aux méthodes conventionnelles (King et Burrill, 1995; Brabant *et al.*, 1995; Dobos *et al.*, 2000). Plusieurs chercheurs ont exploité les SIG dans le domaine de pédologies comme outils d'analyse (king, 1986; FAO, 1989; Burrough, 1993; Jamagne *et al.*, 1993; Loukili *et al.*, 1999; Santos *et al.*, 2000). Dans le cadre de cette recherche l'analyse spatiale permettra la mise en place des critères de seuillage (analyse multicritère) de chacune des fractions des sols séparément pour la restitution des cartes de

fractions des propriétés et les cartes de fractions des éléments granulométriques des types de sols, et ensuite restituer les cartes des sols en considérons chacune des méthodes d'interpolation : déterministes et probabilistes.

3. Analyse des résultats

Le but de notre recherche vise une étude et une analyse comparative afin de faire la mise au point sur la méthode d'interpolation spatiale qui semble la plus adaptée et la plus appropriée pour caractériser et cartographier la distribution spatiale des différents types de sols dans notre région d'étude.

Après l'échantillonnage sur le terrain, les analyses granulométriques des sols ont été effectuées au laboratoire afin de déterminer la distribution des fines particules en pourcentage suivant leurs diamètres (Tableau 1). En considérant les 254 échantillons, les résultats de nos analyses granulométriques ont montré que les pourcentages d'argile, de limon et de sable varient, respectivement, de 5 à 35%, de 36 à 75%, et 4 à 47%. Ces valeurs ont été à la base de la classification texturale de nos sols en fonction de la classification Américaine qui caractérise les unités fondamentales des sols par catégories de grosseurs (diamètres des particules) indépendamment de la nature et de la composition minéralogique. Cette classification considère le triangle texturales (Figure 6) dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de ces trois classes principales (sable, limon et argile) et dont les limites (minimum et maximum) permettent de déterminer les classes texturales (Tableau 2). D'après ces limites et en se basant sur les résultats de nos analyses granulométriques nous avons identifié cinq classes texturales comme illustré par la Figure 8 : 1) classe limono-argileuse, 2) classe limoneuse, 3) classe limoneuse-fine, 4) classe limoneuse-fine-argileuse, et 5) classe limono-argileuse-fine.

Par ailleurs, pour la cartographie des propriétés des différentes classes de sols de notre région d'étude, en plus de cette classification texturale, nous avons considéré les contenus en calcaire total, en matière organique (M.O.), en pH et en éléments grossiers (cailloux et des graviers). Excepte les éléments grossiers qui ont été estimés sur le terrain lors de l'échantillonnage (0 à 35%), toutes ces propriétés ont été analysées au laboratoire : le calcaire totale qui varie entre 0,8 et 53%, la matière organique qui varie entre 1,9 et 6,6, et le pH qui varie de 7 à 8,5. Évidemment, en se basant sur les normes internationales des sols (SCET-Maroc, 1984), les classes des propriétés des sols (riche ou pauvre) en fonction du contenu en pourcentage de chacune de ces quatre propriétés seront prises en considération lors de l'analyse spatiale. Toutefois, toutes ces variables

des sols discutés ci-dessus nous permettent de déterminer les principaux types des sols qui dominent le périmètre irrigué de Tadla, à savoir : sols isohumiques (bruns et châtaîns), sols calcimagnésiques, sols fersiallitiques, sols hydromorphes et sols complexes.

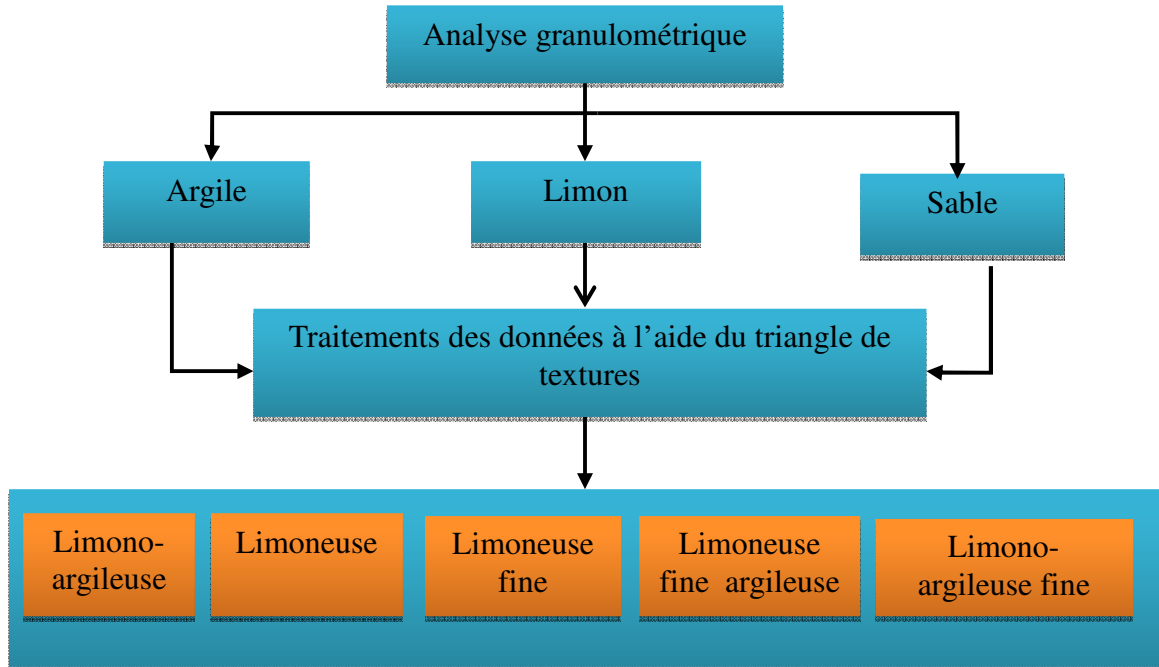


Figure 8: Résultats de la classification texturale.

Bien entendu, les résultats de toutes les analyses qui forment notre base de données ont été traités par les différentes méthodes d'interpolation considérées dans cette recherche, soient : déterministes (Spline et inverse distance) et probabilistes (KO et KU). Une fois les cartes des fractions de toutes les variables considérés ont été restituées, des analyses multicritères ont été entreprises en se basant sur les normes des propriétés des sols et sur les caractéristiques des types de sols afin de cartographier les différentes classes. Cependant, tous les traitements des données ont été effectués à l'aide d'ArcGIS version 9.3 avec les extensions d'analyse spatiale et de la géostatistique (ESRI, 2008).

Tableau 2 : Limites (Min. et Max.) des classes texturales selon le triangle de textures.

Texture	Classes texturales									
	La		L		Lf		Lfa		Laf	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Argile	28	40	15	30	0	30	15	30	30	40
Limon	20	55	30	50	50	80	55	90	40	70
Sable	15	40	20	50	5	50	0	10	0	10

La: Limono-argileux; L: Limoneux; Lf: Limoneux-fin; Lfa: Limoneux-fin argileux et Laf: Limoneux-argileux-fin.

En se basant sur les discussions bibliographiques (Yasrebi *et al.*, 2009; Kravchenko et Bullock, 1999; Weber et Englund, 1994), la méthode IDW a été exploitée avec un poids dont la puissance est égale à deux (2), en considérant huit (8) points connus du voisinage et en fixant la taille des pixels de sortie (out put pixel size) à 30 m. Évidemment, plus la valeur de cette puissance est élevée plus l'importance des points lointains est réduite. Quant à la méthode Spline, nous avons testé la fonction de tension avec différentes valeurs de poids et nous avons retenue une tension avec un poids égale à cinq (5). Par rapport aux autres testes considérés, cette valeur de poids a été la plus réaliste et la plus représentative de la réalité du fait qu'elle génère après l'interpolation des valeurs qui se rapproche le plus aux données réelles (input). Nos constatations corroborent celles de Valley *et al.* (2005) qui ont évalué différentes techniques d'interpolation pour des objectifs cartographiques. Comme pour la méthode IDW la taille des pixels de sortie a été fixée à 30 m lors du traitement par Spline. Évidemment, les méthodes de la géostatistique (KO et KU) ont été exploitées en se basant sur l'analyse du semi-variogramme avec un modèle sphérique et en fixant toujours 30 m pour les pixels de sortie. Il est important de préciser ici que nous avons testé tous les modèles mathématiques pour l'ajustement des différents paramètres des sols considérés dans cette recherche est c'est le modèle sphérique qui nous a donner les meilleurs résultats ce qui corrobore les conclusions de Nazari *et al.* (2006) et Mehrjardi *et al.* (2008).

3.1. Analyse des cartes de factions granulométriques

Dans les sections suivantes nous allons analyser les résultats de nos techniques d'interpolation pour la dérivation des différentes cartes de fractions représentant les classes granulométriques (argile, sable et limon), et les classes de propriétés des sols (pH, la M.O., le calcaire et les éléments grossiers).

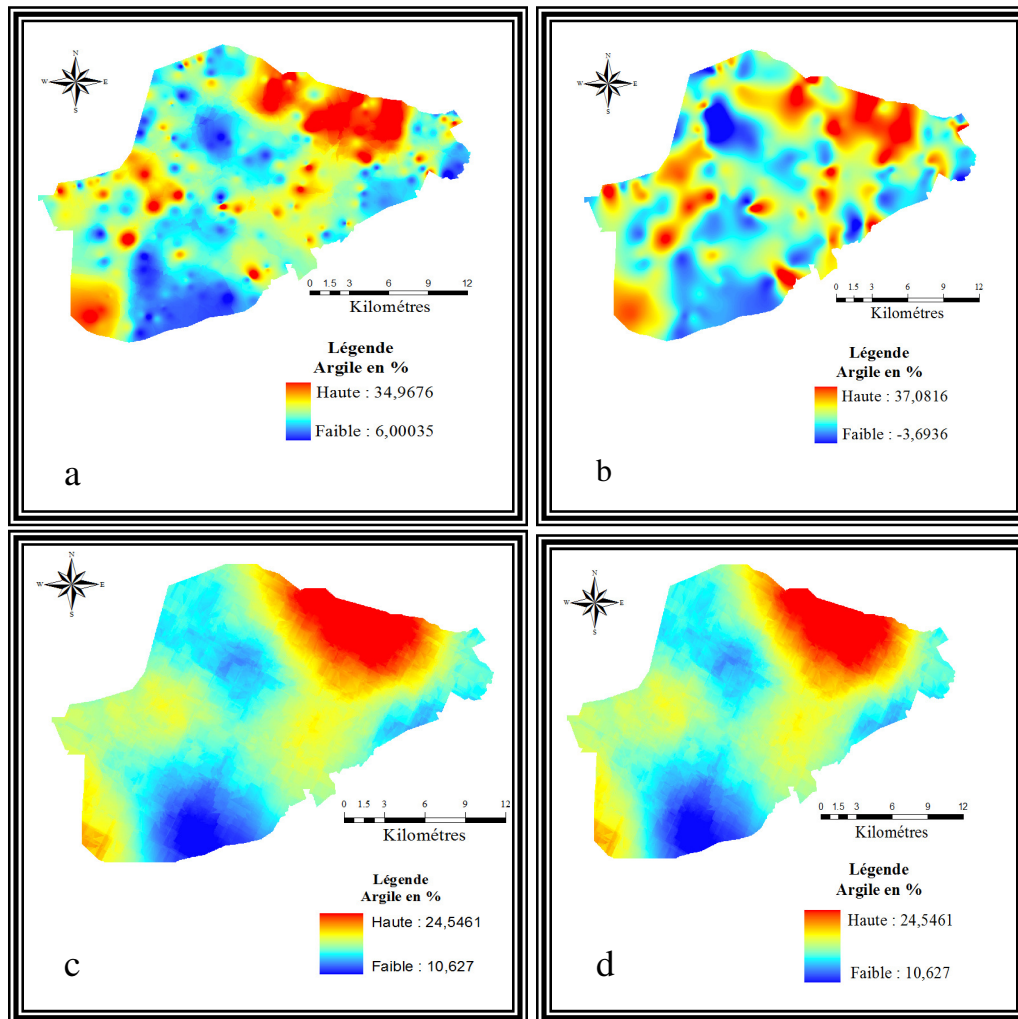


Figure 9 : Cartes d'argile dérivées par : IDW (a), Spline (b), KO (c) et KU (d).

Les figures 9a à 9d montrent les cartes de la fraction argileuse obtenues, respectivement, par les méthodes IDW, Spline, KO et KU. Premièrement, nous constatons que les méthodes déterministes (IDW et Spline) montrent des résultats presque similaires entre elles avec une distribution spatiale sporadique dans différentes zones du fait que ces techniques d'interpolation sont locales et se basent uniquement sur le voisinage. Toutefois, nous remarquons une forte concentration argileuse dans les zones nord-est et sud-ouest avec un maximum d'environ 34,94 % et un minimum de 6 % au sud.

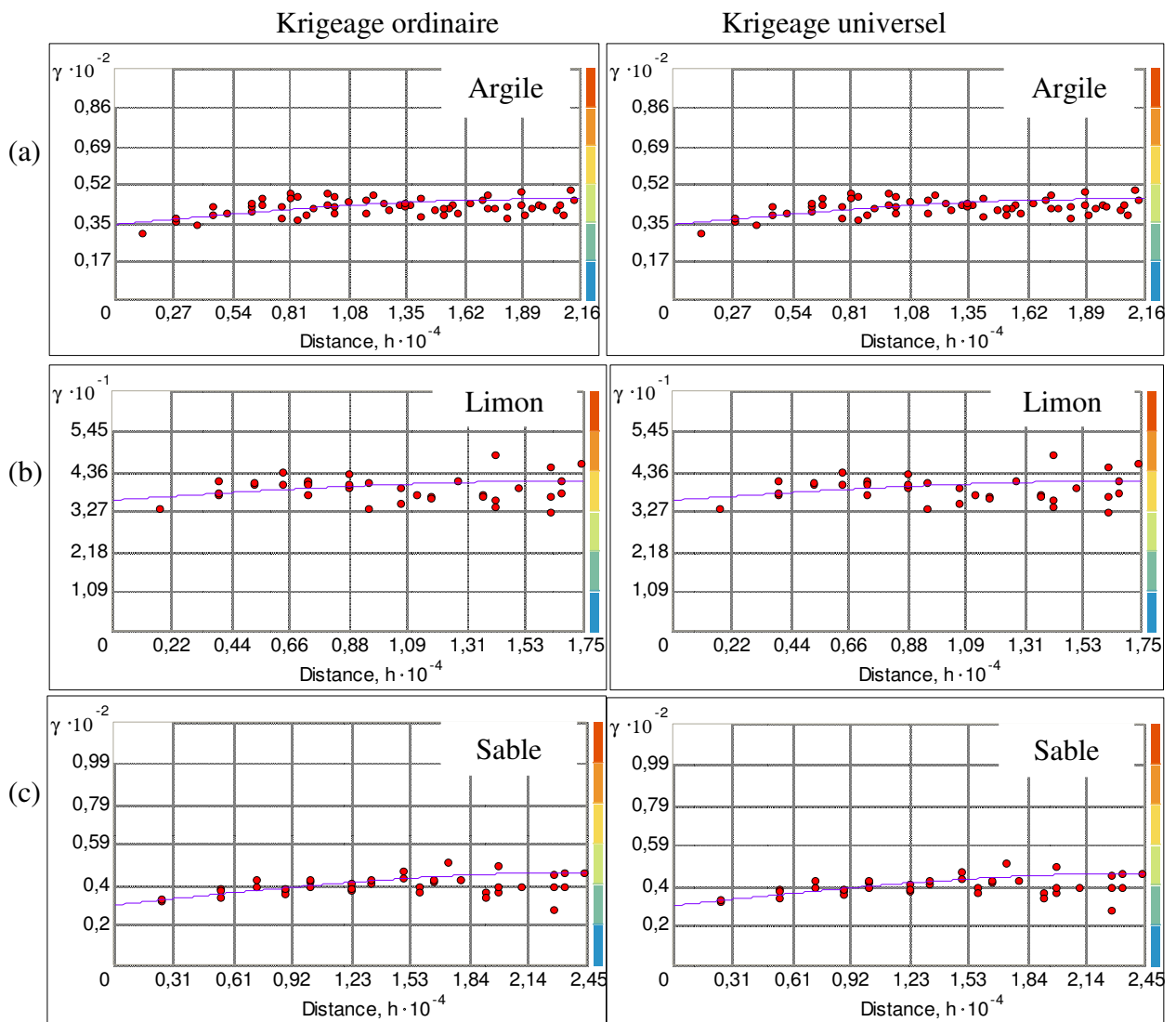


Figure 10: Semi-variogrammes résultants du KO et KU pour l'argile (a), le limon (b) et le sable (c).

Tableau 3 : Paramètres de semi-varogrammes dérivés par Krigeage des éléments texturaux.

Propriété	Modèle	Effet de pépite	Palier	Portée (m)	Taille de lag (m)	Nombre de lag	RMSE
Argile	Sphérique	0,35	0,46	21335	1800	12	0,971
Limon		3,29	3,34	17410	2500	7	1
Sable		0,23	0,45	24179	3500	7	1,008

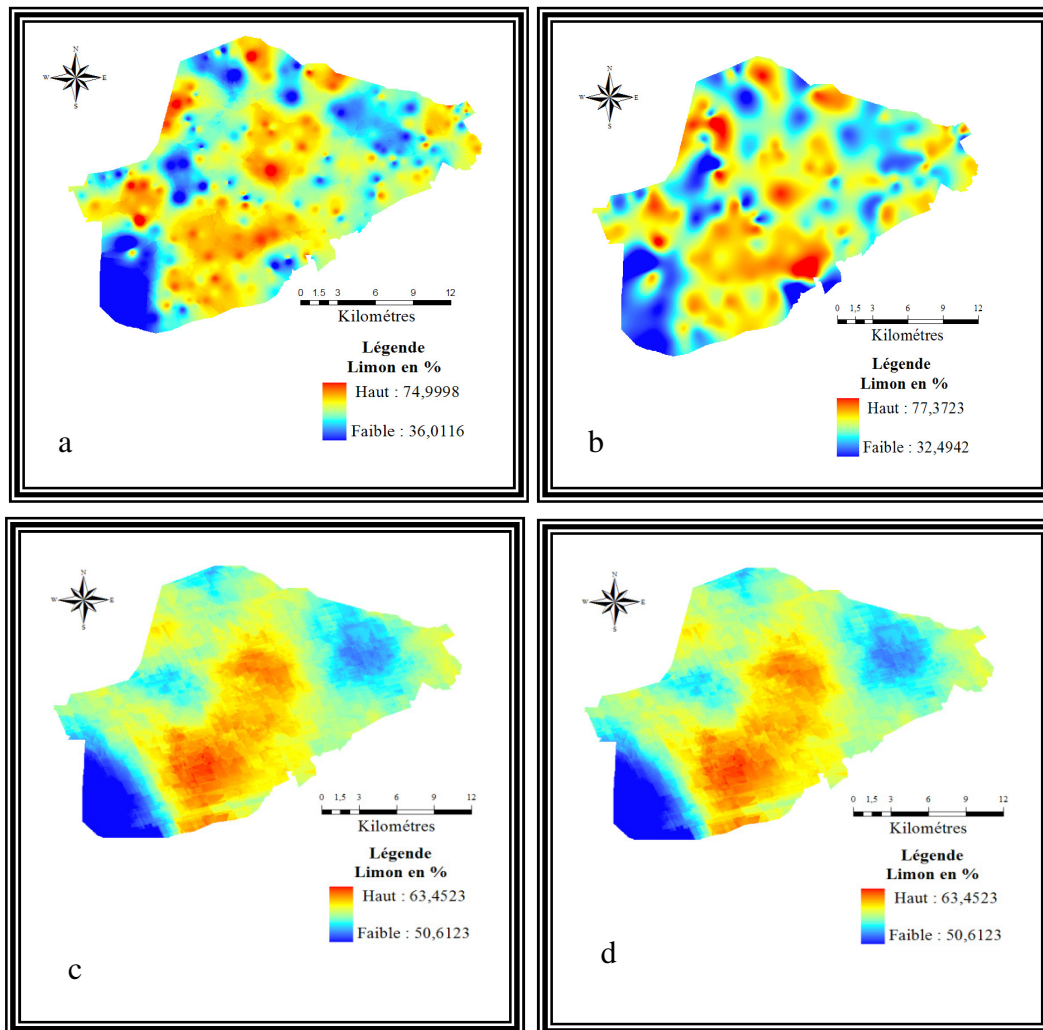


Figure 11 : Cartes du limon dérivées par : IDW (a), Spline (b), KO (c) et KU (d).

Quant aux méthodes de KO et KU elles procurent des résultats identiques. La figure 10 montre les semi-variogrammes des résultats issus de ces deux méthodes pour les trois éléments granulométriques et le Tableau 3 résume les paramètres d'ajustements (effet de pépité, palier, portée, lag et nombre de lag) de ces semi-variogrammes. Toutefois, nous constatons que l'ajustement géostatistique est similaire entre la méthode ordinaire et celle universelle pour l'argile, le limon et le sable. En outre, les erreurs quadratiques moyennes (ou RMSE) d'ajustement sont parfaites et sont presque identique pour ces trois éléments granulométriques. En conséquence, les cartes restituées sont similaires entre elles pour l'argile ainsi que pour les deux autres éléments granulométriques comme nous allons voir ci-dessous. Les cartes d'argiles obtenues montrent une certaine uniformité spatiale des différents niveaux de répartitions dans notre zone d'étude avec un maximum d'uniquement 24,54 % au nord-est et un minimum de 10 % au sud (Figures 9c et 9d).

Par ailleurs, les figures 11a à 11d montrent les cartes de la fraction limoneuse obtenues, respectivement, par les méthodes IDW, Spline, KO et KU. Les méthodes IDW et Spline exhibent des résultats presque identique spatialement avec des concentrations élevée au centre de la zone étudiée (environ 77 %) et faible (environ 32%) notamment au sud-est. Toutefois, la carte issue de la méthode Spline montre un certain lissage. De façon identique à la fraction argileuse, les deux méthodes du Krigeage permettent de dériver des cartes identiques et avec une certaine continuité spatiale. Bien entendu, les quatre méthodes montrent que globalement la fraction limoneuse se concentre plus au milieu et au sud de notre site d'étude.

Les cartes de la fraction sablonneuse obtenues par les méthodes déterministes sont illustrés par les figures 12a et 12b. Nous constatons que ces deux méthodes représentent la distribution spatiale de cette fraction de façon quasiment semblable avec un maximum et un minimum, respectivement, de 50 % et 4 %. Les fortes concentrations sont dans les zones du nord et du sud-est. Néanmoins, la méthode Spline montre un certain lissage avec une augmentation de la valeur maximale et une diminution de la valeur minimale de cette classe par rapport aux vraies valeurs. Quant aux figures 12c et 12d ils montrent les cartes obtenues par les deux méthodes du Krigeage. Comme pour les deux fractions

précédentes, ces deux méthodes octroient les mêmes résultats; avec un maximum de 31,22 % dans la zone sud-ouest et un minimum de 16,21 % dans la zone nord-est. Contrairement à la méthode Spline, nous constatons que le Krigeage (ordinaire et universel) à réduit significativement les limites (minimale et maximale) de cette classe par rapport aux valeurs réelles. En outre, nous remarquons qu'unique­ment la méthode IDW à conserver l'intégrité des vraies valeurs obtenues lors des analyses au laboratoire et introduites dans la base de données pour interpolation.

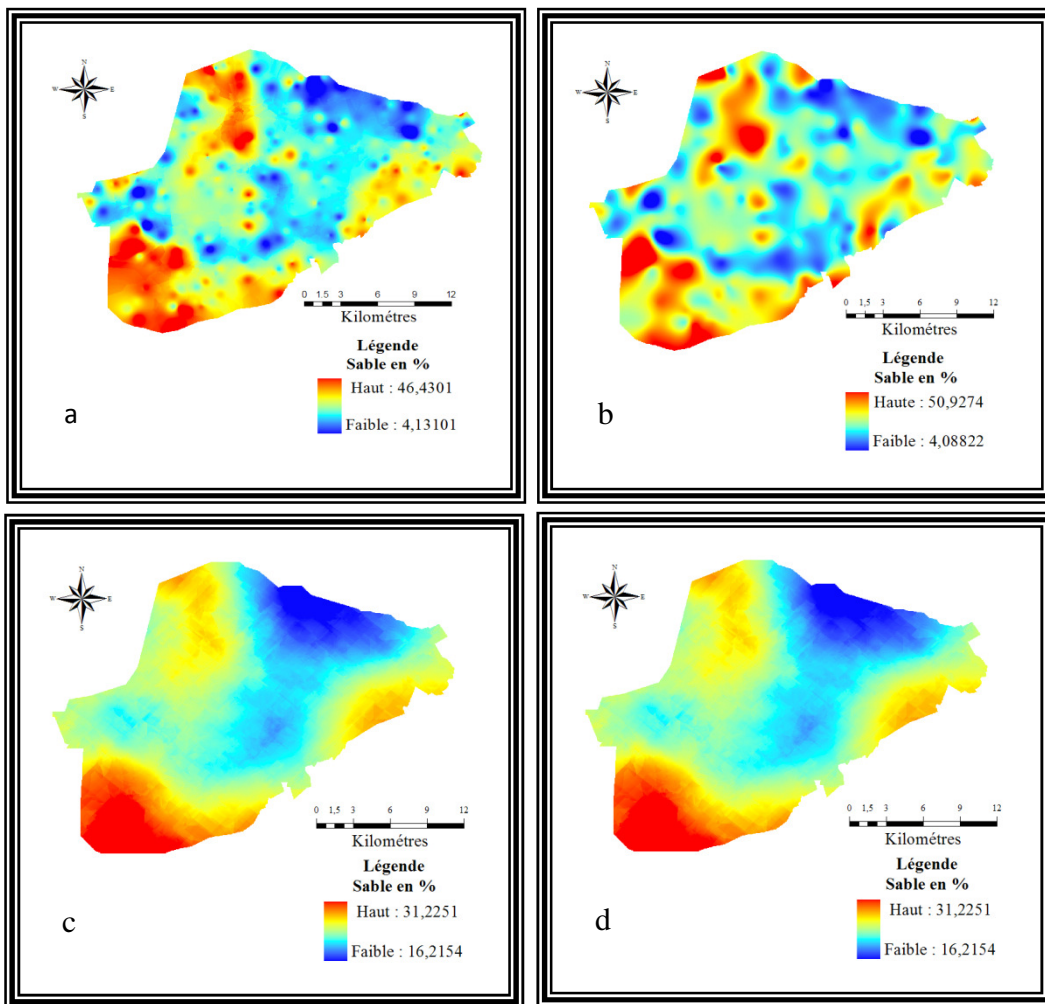


Figure 12 : Cartes du sable dérivées par : IDW (a), Spline (b), KO (c) et KU (d).

Cependant, indépendamment de la classe granulométrique considérée (argile, limon ou sable) nous remarquons que des aspects ponctuels et dispersés ou progressivement continus sont obtenus, respectivement, par les méthodes déterministes et probabilistes en reflétant leurs concepts de bases. En effet, lors de l'interpolation, les méthodes probabilistes (KO et KU) considèrent le territoire d'étude dans sa globalité en examinant tous les points d'échantillonnage deux par deux et en se basant sur l'hypothèse qu'il y a une certaine continuité spatiale des propriétés étudiées. Ainsi, malgré la légère différence conceptuelle entre les approches de ces deux méthodes, elles ont dérivées les cartes de façons analogues à cause, fort probablement, du grand nombre de points connus qui ont été échantillonnés à peu près uniformément sur notre site d'étude. Quant aux méthodes déterministes, elles se basent uniquement sur le voisinage en considérant un nombre limité des points connus. Évidemment, l'uniformité de la position spatiale des points échantillonnés ainsi que leur nombre peut être derrière la quasi-ressemblance entre les cartes obtenues par ces deux méthodes. Toutefois, par rapport à la méthode IDW, la méthode Spline affiche un aspect relativement lisse "ou flou" dans les zones de transitions entre les différents niveaux de concentration de l'élément sujet à l'étude. Par ailleurs, il est important de préciser ici qu'à ce niveau d'analyse il est très difficile de dire laquelle de ces méthodes est la plus précise puisque nous ne disposons d'aucune réalité terrain pour la validation de ces résultats. Évidemment, le critère de comparaison sera pris en considération lors de la validation des résultats finaux (cartes de types des sols) par rapport à la vérité terrain qui est représentée par une carte pédologique. Cette dernière a été établie en se basant sur des techniques pédologiques conventionnelles pour la cartographie des sols.

3.2. Analyse spatiale des cartes texturales

Après cette étape où nous avons dérivée les cartes de fractions granulométriques (nommée aussi cartes de particules du sol : argile, limon et sable), nous avons dérivés les cartes texturales en fonction des cinq différentes classes texturales identifiées précédemment (Figure 8). Ces dernières sont : 1) classe limono-argileuse, 2) classe limoneuse, 3) classe limoneuse-fine, 4) classe limoneuse-fine-argileuse, et 5) classe limono-argileuse-fine. Pour faire, en exploitant les fonctions des requêtes spatiales

d'ArcGIS, nous nous sommes référés aux limites de ces classes texturales résumés dans le Tableau 2. Par exemple, afin de restituer la carte texturale issue de chacune des quatre méthodes d'interpolations, nous avons considérés cinq étapes. Dans la première étape nous avons localisés les zones à texture limono-argileuse en lançant la requête suivante : 20 à 40% d'argile, 20 à 55% de limon et 15 à 40% de sable. Pour la classe limoneuse, nous avons formulé une seconde requête : 13 à 30% d'argile, 30 à 50% de limon et 20 à 50% de sable. La troisième étape porte sur la localisation de la classe limoneuse-fine : 0 à 30% d'argile, 50 à 80% de limon et 5 à 50% de sable. La classe limoneuse-fine-argileuse a été localisée par la quatrième requête : 15 à 30% d'argile, 55 à 90% de limon et 0 à 10% de sable. Quant à la cinquième et dernière classe, limono-argileuse-fine, elle a été localisée par la requête suivante : 30 à 40% d'argile, 40 à 70% de limon et 0 à 10% de sable. En conséquence, ces cinq classes ont été assemblées dans l'environnement ArcGIS pour restituer nos cartes texturales. Les Figures 13a, 13b et 13c montrent, respectivement, la distribution spatiale de ces classes texturales résultants des méthodes d'interpolations IDW, Spline et Krigeage. Il est important de noter ici que nous avons présenté une seule carte issue du Krigeage du fait que nous avons obtenu des résultats identiques entre les méthodes ordinaire et universelle.

À la lumière des résultats de cette analyse spatiale est d'après IDW et Spline (Figures 13a et 13b), nous remarquons que la classe limoneuse-fine est la plus dominante en occupant une superficie d'environ 90% du territoire. Toutefois, la classe limoneuse occupe environ 5%, alors que les trois autres classes (limono-argileuse, limoneuse-fine-argileuse et limono-argileuse-fine) occupent environ les 5% restant du territoire. Globalement, les résultats issus des méthodes IDW et Spline sont presque similaires entre eux à l'exception de certaines très petites différences au centre et au sud-ouest du territoire d'étude. Ces petites différences sont évidemment les conséquences de la différence dont chacune de ces deux méthodes traitent les variables connues afin d'estimer les variables inconnues. Toutefois, la méthode basée sur le Krigeage illustre la présence d'une seule et unique classe texturale qui est la classe limoneuse-fine (Figure 13c). Cette uniformité qui ne considère guère les autres quatre classes texturales peut être causée par la force de la globalité d'interpolation en considérant des couples de points sur une distance bien

précise (Lag). Ainsi, elle préconise une certaine continuité spatiale de la propriété sujette à l'étude. Cette situation ne donne pas donc la chance aux classes qui sont de faibles fréquences de se manifester.

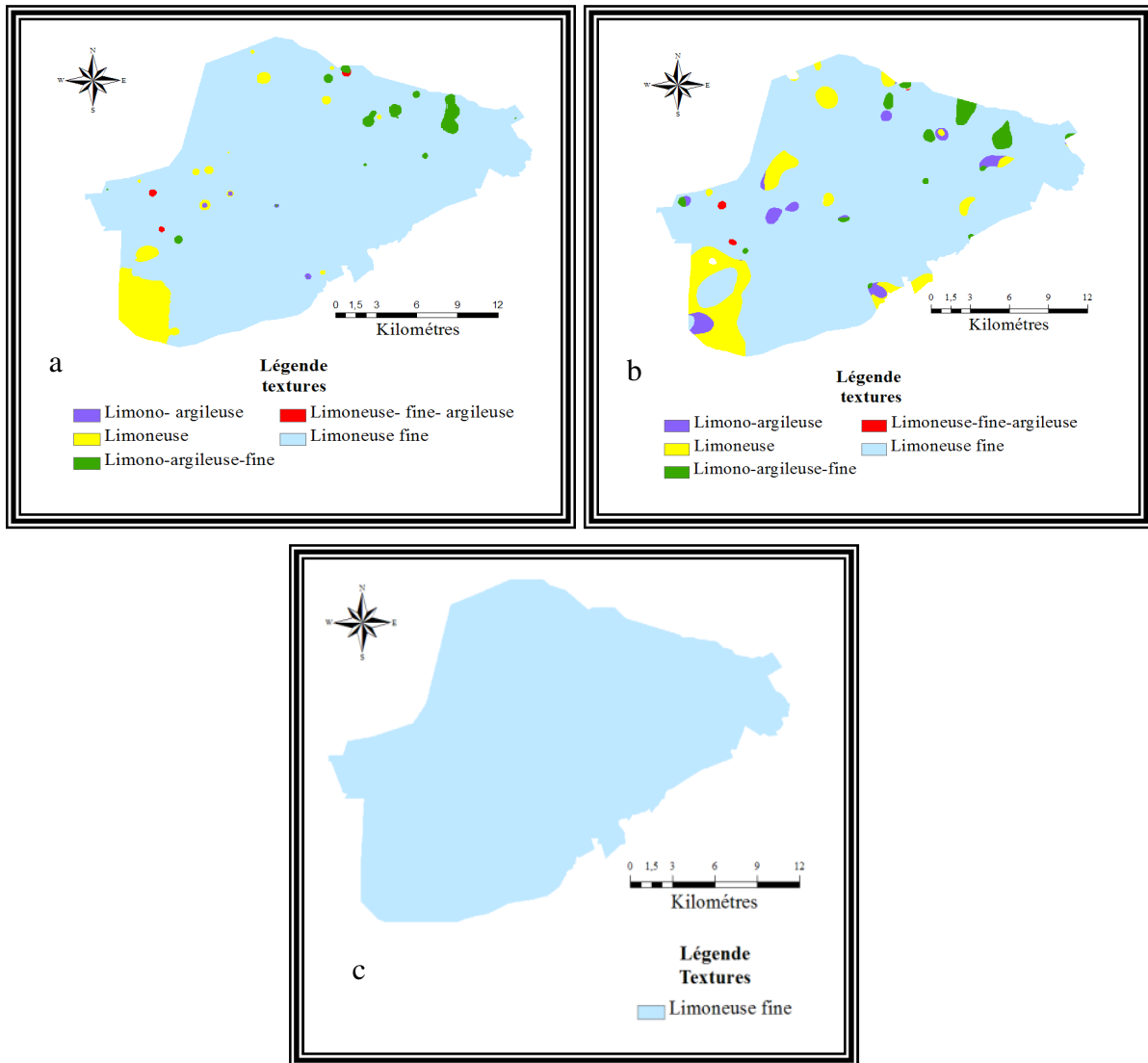


Figure 13 : Cartes texturales dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU (c).

Par ailleurs, un autre problème intrinsèque au type de sol lui-même peut être à l'origine de cette situation. En effet, bien que tous les sols soient sujets à une éventuelle érosion (hydrique et éolienne) le limon est la classe la plus menacée. Évidemment, l'érosion des zones montagneuses avoisinantes à la plaine est intense et le ruissellement peut disperser

et/ou amener des particules limoneuses. Cette situation peut être aussi accompagnée d'une irrigation gravitaire des eaux des barrages de la région en diffusant la vase d'une vitesse impressionnante. Entre autres, les pratiques agricoles intensives dans la région utilisent des méthodes de labours profonds ce qui monte les fines particules en surface. Il est important de noter aussi que la région est menacée par les phénomènes de salinité et d'alcalinité nommée aussi sodicité (Bannari *et al.*, 2008 et 2011). Bien entendu, ces phénomènes contribuent à la destruction de la structure du sol en le réduisant en fine particules.

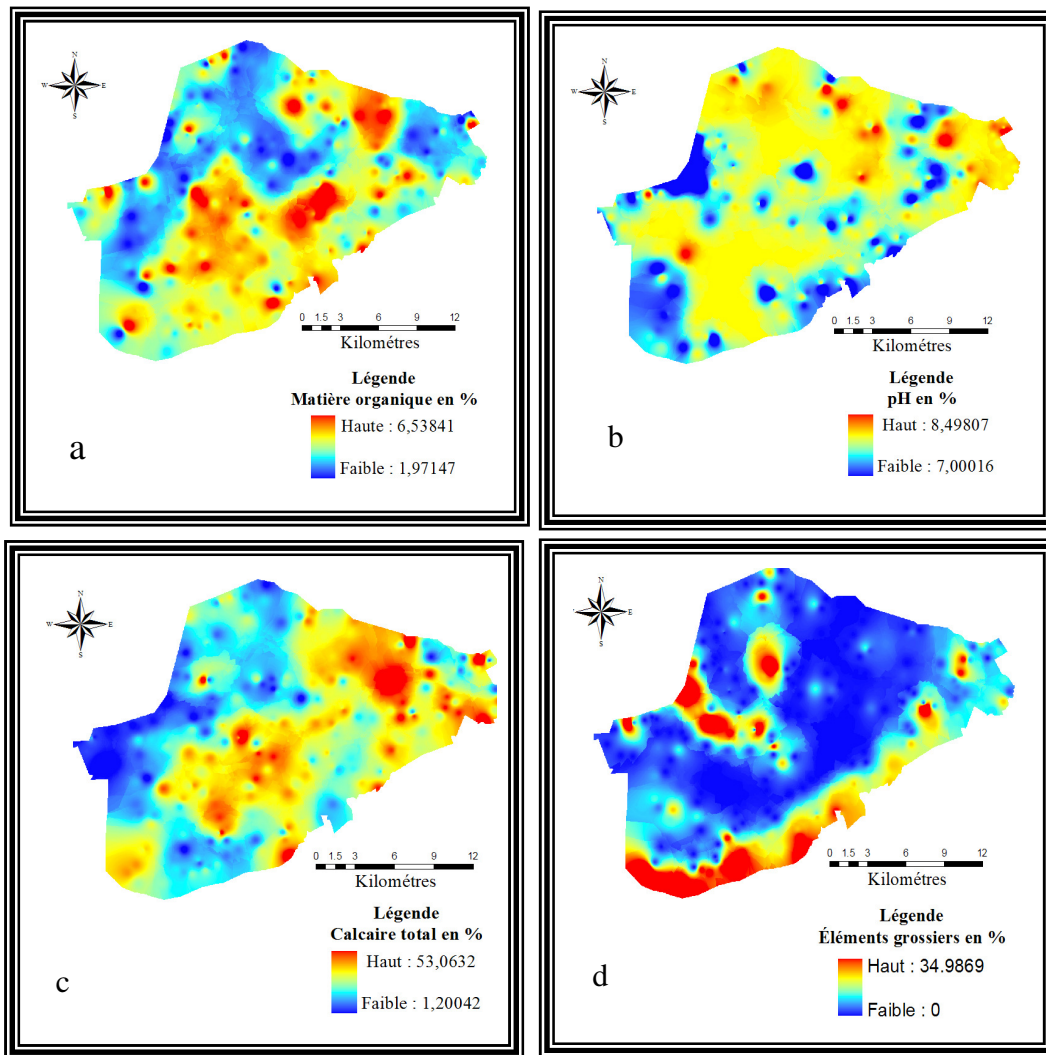


Figure 14 : Cartes dérivées par IDW de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).

3.3. Analyse des cartes de fractions des propriétés des sols

Dans cette section nous présentons les cartes des propriétés des sols (MO, pH, calcaire total et éléments grossiers) obtenues par les quatre méthodes d'interpolation. Dans une première étape nous allons analysés les cartes obtenues par les méthodes déterministes, soient IDW et Spline.

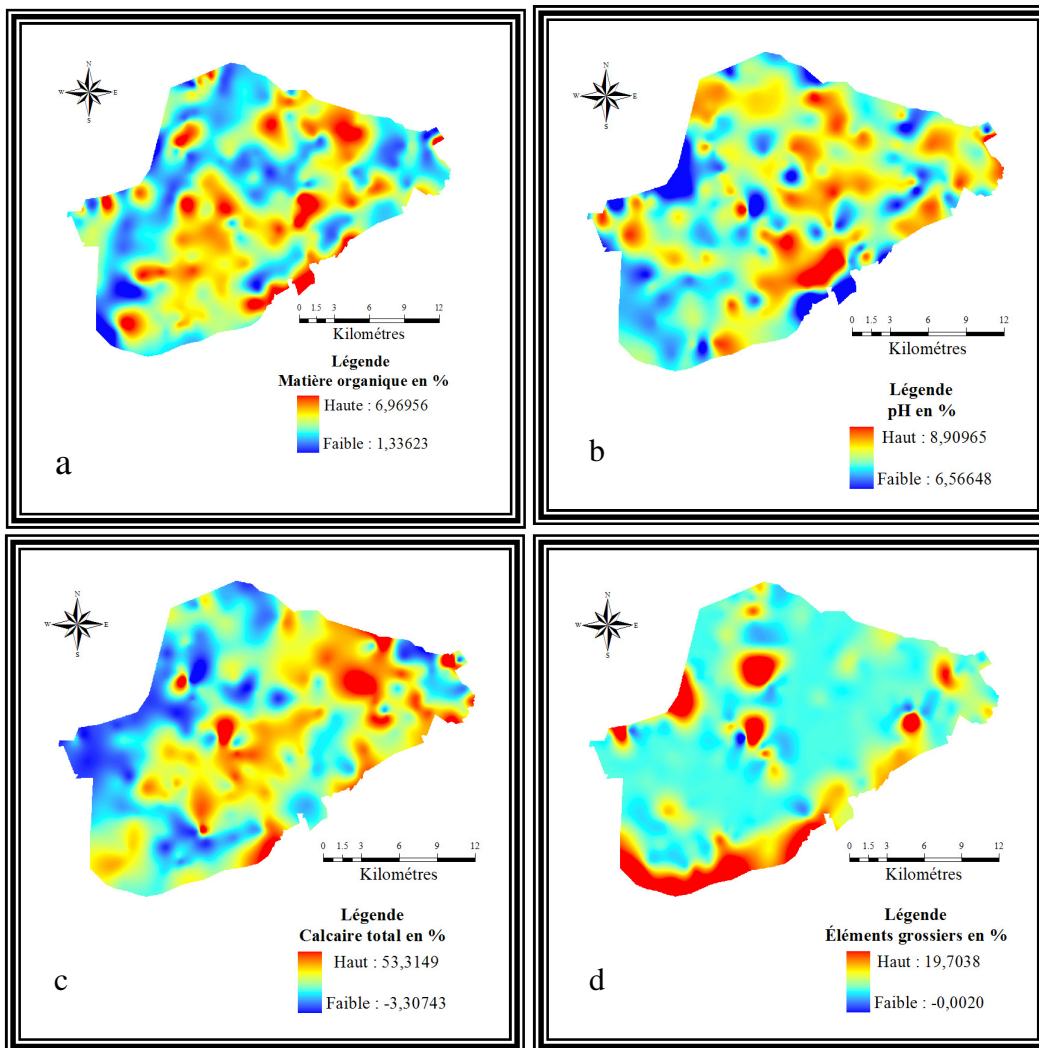


Figure 15 : Cartes dérivées par Spline de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).

Les Figures 14a et 15a montrent les cartes de la matière organique (MO) dérivées par IDW et Spline. Globalement, nous remarquons que les deux méthodes ont montrées une distribution spatiale presque similaire de cette propriété des sols. Les zones du centre, du sud et du nord-est montrent une dominance relative d'un haut taux de la MO. Toutefois, nous notons des légères différences qui sont les conséquences de la façon dont chacune des méthodes traite les données au moment de l'ajustement. En effet, la méthode IDW montre toujours une certaine ponctualité de l'information de manière circulaire en fonction des points connus et considérés lors de l'interpolation, et elle conserve les valeurs obtenues lors des analyses au laboratoire et qui ont été intégrées dans notre base de données. Par contre, nous constatons un aspect plus zonal et relativement lissé par la méthode Spline. Ainsi, cette dernière méthode change relativement les limites des classes, minimale et maximale, réelles existant dans notre base de données à cause de l'interpolateur mathématique de la fonction Spline. Par ailleurs, nous avons soulevés les mêmes remarques et constatations pour la propriété du calcaire total (Figures 14c et 15c). Cette dernière propriété montre des fortes concentrations qui sont localisées au centre et au nord-est de notre site d'étude, alors que des faibles taux sont localisés au nord, au nord ouest et au sud-ouest.

Quant au pH et aux éléments grossiers, le fait que la méthode Spline extrapole les valeurs minimales et maximales avec un biais elle donne des résultats relativement différents de la méthode IDW. En effet, la propriété pH affiche des valeurs extrêmes de 7 à 8,50 et de 6,56 à 8,91, respectivement, pour IDW et Spline. Bien entendu, le IDW garde l'intégrité de l'information de base ce qui n'est pas le cas de Spline (Figures 14b et 15b). Cette petite différence génère, en conséquence, une différence au niveau de la réparation spatiale de ces deux propriétés. Par exemple, l'augmentation de la valeur maximale du pH de 0,51 affiche un sol avec une tendance alcalin qu'un sol basique dans différentes places de notre site d'étude ce qui est incorrecte. Au sujet des éléments grossiers, les deux méthodes montrent la même distribution spatiale de cette propriété notamment pour la classe à haute pourcentage au centre, à l'ouest, au sud et au sud-est de la zone d'étude (Figures 14d et 15d). Toutefois, dans les autres places de notre site un certain changement brutal a eu lieu surtout pour les taux faibles et intermédiaires du fait que les valeurs

initiales de cette classe de propriété à changer par le modèle interpolateur de Spline. En effet, la valeur maximale de cette classe de propriété a été réduite de 34,99% à 19,70%. Évidemment, cette compression significative de l'information avait comme conséquence le passage d'un taux faible à un taux intermédiaire. D'ailleurs, cette forte diminution des valeurs originales par Spline a été soulevée dans les travaux de Valley *et al.* (2005) et de l'institut de la recherche des systèmes environnementaux (Environmental Systems Research Institute Inc., 1996).

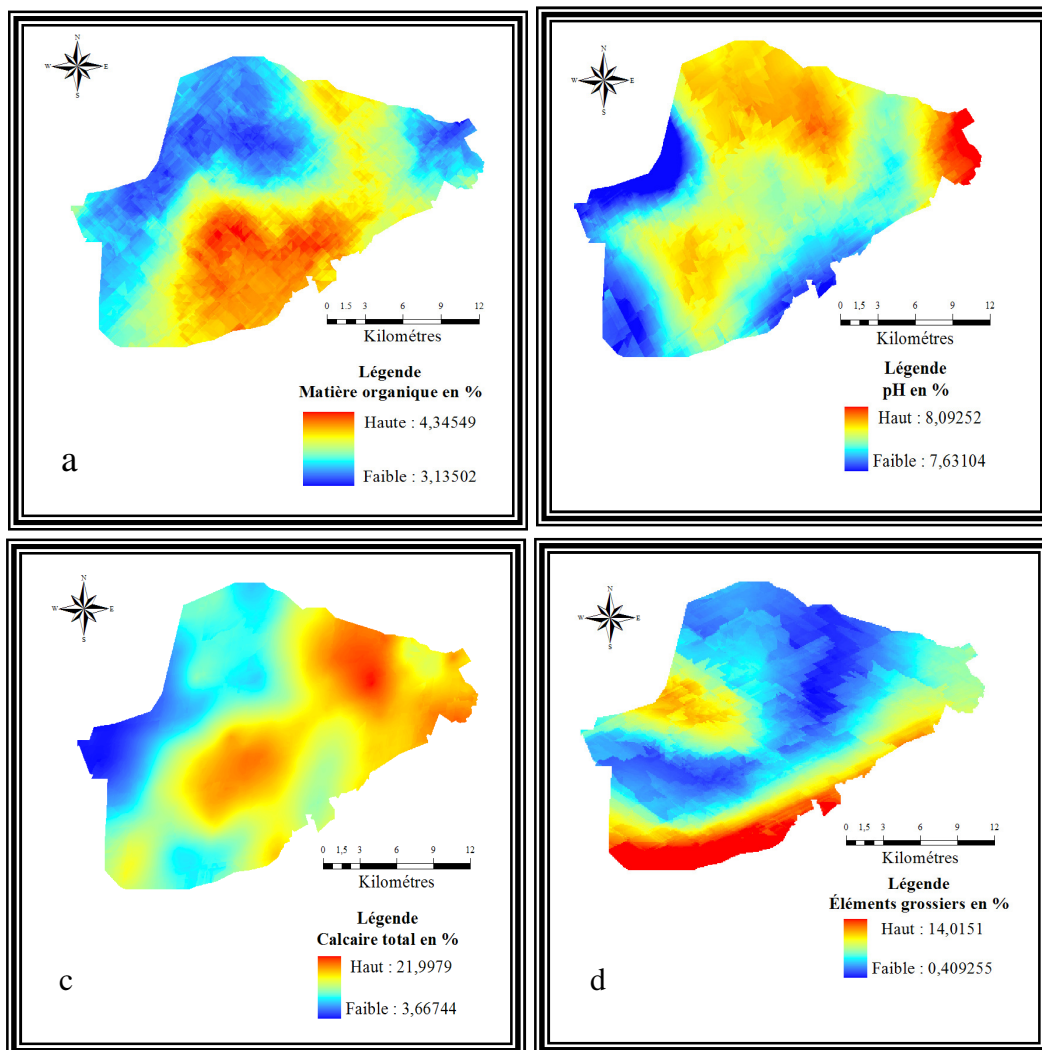


Figure 17 : Cartes dérivées par KO de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).

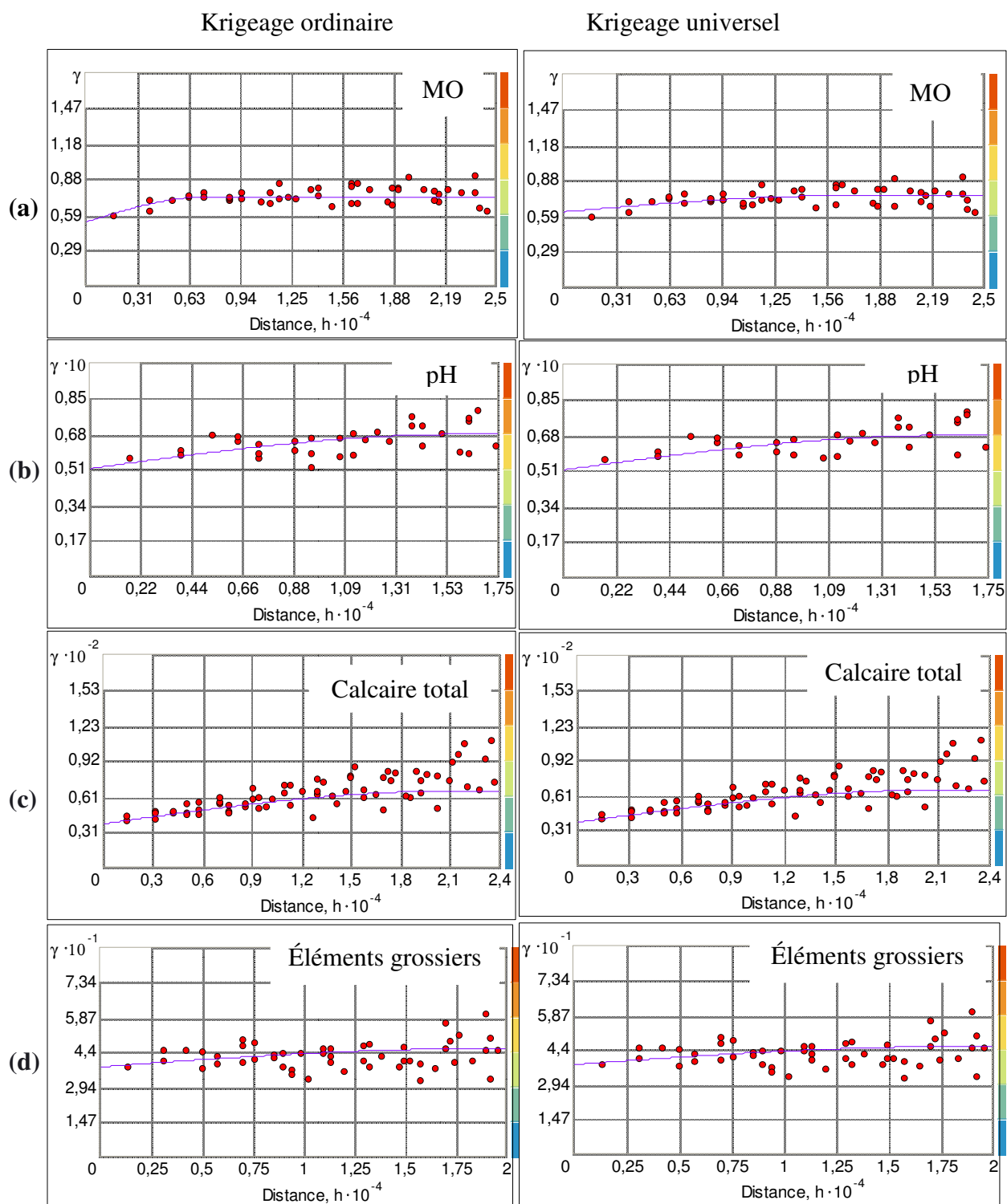


Figure 16 : Semi-variogrammes résultants du KO et du KU pour la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d)

Tableau 4 : Paramètres des semi-varogrammes dérivés par Krigerage des éléments de propriétés de sols.

Propriété	Modèle	Effet de pépite	Palier	Portée (m)	Taille de lag (m)	Nombres de lag	RMSE
Matière organique	Sphérique	0,57	0,77	7458	2500	10	0,9849
pH		0,51	0,68	17401	2500	7	1,041
Calcaire Total		0,4	0,71	23705	2000	12	0,998
Graviers		3,4	4,41	19357	2000	10	0,955

Au sujet des méthodes probabilistes, comme pour les éléments granulométriques discutés auparavant, l'interpolation des quatre propriétés des sols considérés a conduit à des résultats identiques entre le KO et le KU. La Figure 16 illustre les graphiques des semi-varigrammes obtenus par chacune de ces deux méthodes en fonction des propriétés des sols. En outre, le Tableau 4 résume les paramètres de ces semi-varigrammes (effet de pépite, palier, portée, lag et nombre de lag) qui sont relatifs à la MO, au pH, au calcaire total et aux éléments grossiers. Les RMSE qui ont résulté des ajustements par ces deux méthodes sont, entre autres, identiques entre elles et elles sont égales à 0,98; 1,04; 0,99 et 0,96; respectivement, pour la MO, au pH, au calcaire total et aux éléments grossiers. Ces excellentes valeurs des RMSE témoignent de la performance d'ajustement de la géostatistique. En conséquence à cette conformité d'analyses, les cartes obtenues par ces deux méthodes d'interpolation sont évidemment similaires entre elles pour chacune de ces quatre propriétés (Figures 17 et 18).

Les figures 17a et 18a montrent une distribution spatiale uniforme et continue de la MO avec des faibles contenus au nord-ouest et à l'est, des contenus moyens au centre et au nord, et des contenus élevés au sud. Ces cartes affichent la même tendance que celle obtenue par la méthode IDW malgré l'aspect ponctuel et sporadique de cette dernière. Néanmoins, contrairement à la méthode Spline qui cause un biais d'étalement par extrapolation, le Krigeage diminue les valeurs extrêmes à cause de l'auto-corrélation

spatiale qui calcule la moyenne des valeurs dominantes en éliminant les faibles valeurs. Évidemment, cette situation reste valable et applicable indépendamment de la variable sujet à l'interpolation.

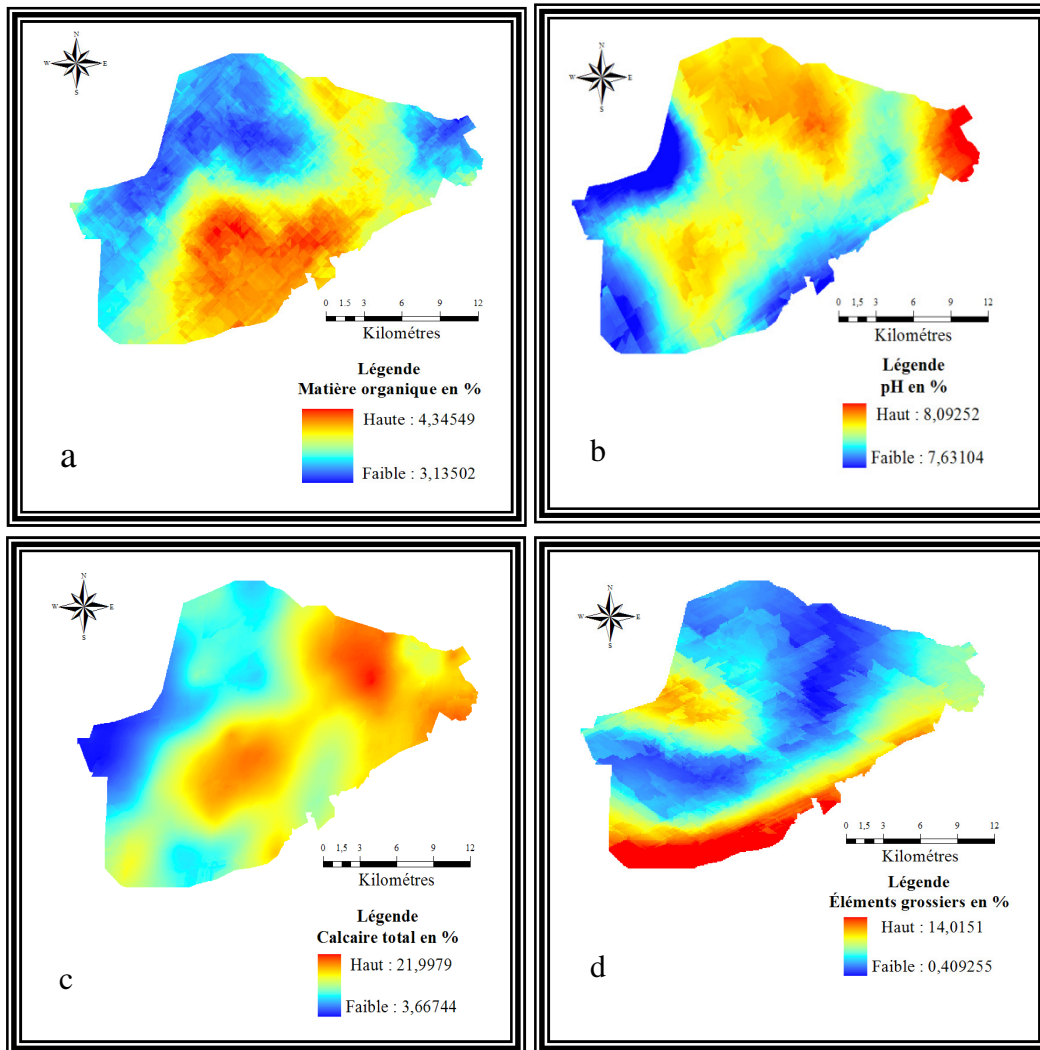


Figure 18 : Cartes dérivées par KU de la matière organique (a), le pH (b), le calcaire total (c) et les éléments grossiers (d).

Pour le pH, nous remarquons une certaine uniformité dans la distribution spatiale avec des fortes valeurs au nord, à l'est et au sud-ouest. Alors que les faibles valeurs sont au sud, au sud-ouest et à l'ouest (Figures 17b et 18b). Également, nous constatons que ces cartes du pH reflètent une certaine tendance de la distribution spatiale comme celle

obtenue par la méthode IDW. En outre, bien que les cartes du calcaire total et des éléments grossiers montrent un changement doux et progressif du pourcentage de chacune de ces deux propriétés, elles montrent des distributions et des localisations spatiales relativement similaires aux cartes obtenues par IDW et Spline. Certainement, malgré cette similarité spatiale relative, un changement significatif dans les valeurs extrêmes (minimales et maximales) a été noté à cause des différentes façons dont ces modèles estiment les valeurs inconnues comme nous avons discutés auparavant.

Tableau 5: Normes de caractérisation des propriétés des sols de la zone d'étude, d'après le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc, SCET-Maroc (1984).

Propriétés des sols				
Les normes	Matière organique en %	Calcaire total en %	Éléments grossiers en %	pH
	Très riche : > 6	Non calcaire : 0 à 1	Nom caillouteux : < 5	Fortement acide : 5,0 à 5,5
	Riche : 3 à 6	Faiblement calcaire : 1 à 5	Peu caillouteux : 5 à 10	Moyennement acide : 5,5 à 6,0
	Moyennement. Pourvu : 1,5 à 3	Moyennement calcaire : 5 à 10	Caillouteux : 10 à 30	Faiblement acide : 6,0 à 6,5
	Pauvre : < 1,5	Calcaire : 10 à 15	Très caillouteux : 30 à 50	Neutre : 6,5 à 7,3
		Fortement calcaire : 15 à 30	Extrêmement caillouteux : >50	Faiblement basique : 7,3 à 7,8
		Très fortement calcaire : à 50		Moyennement basique : 7,8 à 8,5
		Excessivement calcaire : >50		Tendance alcaline : 8,5 à 9,0

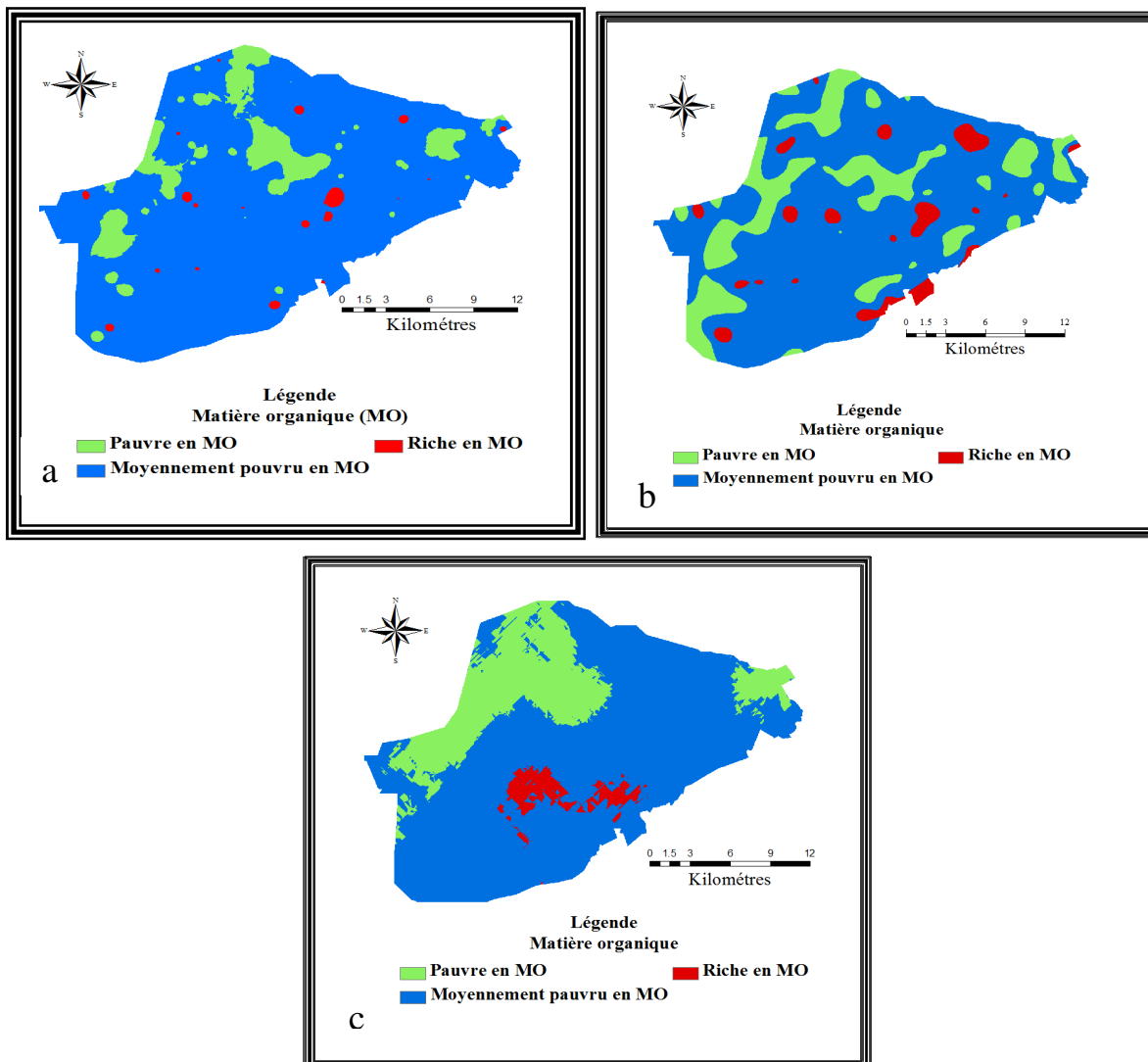


Figure 19 : Cartes de la matière organique dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU (c).

3.4. Analyse spatiale des cartes des propriétés des sols

Le concept de propriétés des sols n'est pas universel du fait que ces propriétés sont variables en fonction du climat, du couvert végétal, de la topographie, de la localisation géographique dans le monde et du facteur humain. Par exemple, le degré de catégorisation et de classification d'un sol riche ou pauvre en MO peut changer d'un milieu semi-aride à un milieu tropical. Autrement dit, les limites ou les normes de caractérisation des propriétés des sols varient selon plusieurs écoles de pensées pédologiques comme l'école Française, Russe, Américaine, etc. Inspiré de l'ancienne

puissance coloniale française, le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc (SCET-Maroc, 1984) avait établi les normes de caractérisation des propriétés des sols de notre zone d'étude. Le Tableau 5 résume ces normes de propriétés afin de caractériser les différents niveaux de richesses ou de pauvretés de chacune des quatre propriétés considérés dans cette recherche. Ces normes ont été utilisées dans nos analyses spatiales afin de dérivé les cartes des propriétés de nos sols.

À la lumière des analyses, nous constatons que la matière organique (MO) affiche un minimum de 1,97% et un maximum de 6,54%. Par référence au Tableau 5 qui résume les classes des propriétés des sols en fonction du taux de la MO uniquement trois classes existent dans notre secteur d'étude, à savoir : riche (3 à 6%), moyennement pourvue (1,5 à 3%), et pauvre (1,5<). Les figures 19a et 19b montrent les cartes de la MO dérivées par les méthodes IDW et Spline. Ces deux cartes montrent une similarité de la distribution spatiale de la MO mais avec des différences relativement petites au niveau de l'occupation et de la localisation spatiale de chacune des trois classes. Par exemple, par rapport à la méthode IDW, celle de Spline montre plus de zones pauvres en MO notamment au sud-est et au sud-ouest. Également, bien que la riche classe en MO se localise spatialement aux mêmes endroits, nous constatons qu'elle est représentée par une superficie relativement significative par la méthode Spline. Alors que la classe moyennement pourvue occupe environ 80% et 70% du territoire, respectivement, par IDW et Spline. Cependant, ces différences peuvent être expliquées par le fait qu'IDW comme technique garde l'intégrité des valeurs nominales des attribues de chacun des points échantillonnés en fournissant des classes isovaleurs autour des points d'observations. Alors que Spline introduit des coefficients de lissages de sorte que les valeurs estimées peuvent être inférieurs à la plus petites donnée ou supérieure à la plus grande. Cette situation est due aux artefacts causés par les polynômes d'ajustement qui considèrent sous contrainte les points d'inflexions pour l'estimation d'une variable ce qui cause un biais et, par conséquent, il est probable que l'interpolateur n'est plus exacte ce qui corroborent les constatations d'Arnaud et Emery (2000). Quant aux méthodes du Krigeage (ordinaire et universel), elles donnent des résultats identiques pour la cartographie de la MO, en représentant ainsi les mêmes trois classes qu'IDW et Spline.

La classe moyennement pourvue qui est la dominante avec environ 70% du territoire étudié, secondée par la classe pauvre occupant environ 25%, et finalement la riche classe couvrant le reste du territoire, soit environ 5%. Toutefois, la carte restituée à l'aide du Krigeage donne une autre localisation et distribution spatiale pour la classe pauvre, mais surtout pour la classe riche en MO. En effet, nous constatons une certaine agrégation et continuité spatiale de chacune de ces deux classes mais avec des zones bien limitées.

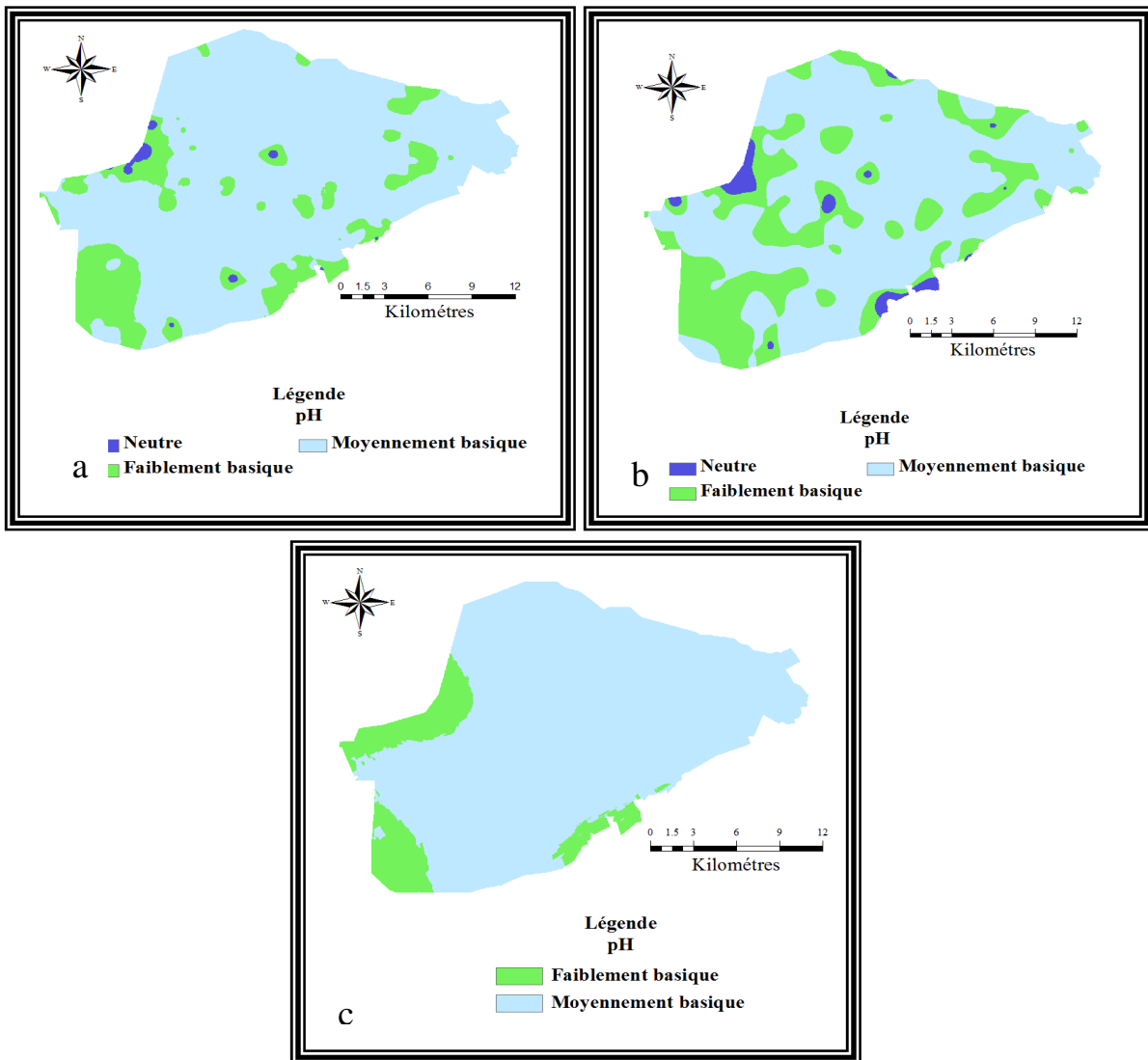


Figure 20 : Cartes du pH dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU (c).

Par ailleurs, nous remarquons que globalement notre zone d'étude se caractérise par une pauvreté en MO du fait que le sol est de dominance limoneux et de faible taux en argile (environ 35%) ce qui explique cette pauvreté. Entre autres, ce faible taux de la MO peut être lié à la dégradation des sols causée par une exploitation et une irrigation intensives, aux techniques de labour profond, et aux résidus de cultures qui sont ramassés à la fin des saisons agricoles. Sachant que les résidus de cultures contribuent à la lutte contre l'érosion et à l'enrichissement des sols par la MO. D'ailleurs, dans ses travaux sur le périmètre irrigué de Tadla, Badraoui (2003) soulève le problème de diminution de la MO durant les 30 dernières années notamment dans la plaine de Béni-Amir.

Comme discuté auparavant, la notion du pH permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'un sol. L'échelle de mesure du pH varie entre 0 et 14, dont la valeur 7 montre un pH neutre. Les sols acides sont ceux dont le pH est inférieur à 7; alors que les sols dont le pH est supérieur à 7 elles sont basiques. Généralement, le pH de la plupart de nos sols se situe entre 7 à 8,5 avec une moyenne de 7,9 ce qui nous permet de constater que les sols acides ne sont pas présents sur notre site d'étude. Les fonctions d'analyse spatiale nous ont permis de dériver les cartes du pH issues des quatre méthodes d'interpolations considérées. En se basant sur les normes des propriétés des sols du Ministère de l'Agriculture et de la Reforme Agraire du Maroc (Tableau 5), ainsi que sur les résultats de nos analyses du pH, seulement trois classes ont été considérées : neutre ($7 \leq x \leq 7,3$), faiblement basique ($7,3 < x \leq 7,8$) et moyennement basique ($7,8 < x \leq 8,5$). Les Figures 20a et 20b illustrent les cartes du pH obtenues par IDW et Spline. Ces deux cartes montrent une dominance de la classe moyennement basique représentant environ 80% du territoire de la zone d'étude. La classe de faible basicité représente une superficie d'environ 16%, alors que la classe neutre est d'environ 4%. Sachant que les deux méthodes du Krigeage donnent les mêmes résultats uniquement une seule carte a été retenue (Figure 20c). L'analyse de cette dernière montre la distribution spatiale d'uniquement deux classes du pH. Une classe moyennement basique couvrant environ 80% du territoire, et une seconde classe faiblement basique couvrant environ 20% et elle est localisée notamment dans les zones nord-ouest et sud. Par contre, la classe neutre n'est plus existante du fait que le Krigeage élimine les valeurs des classes faiblement

représentées. Cependant, nous constatons que généralement les sols calcaires ont une tendance à afficher différents niveaux de basicité (faible et moyenne). En effet, les sols à forte présence du calcaire sont moyennement basiques, tandis que les sols calcaires avec une présence du sable sont faiblement basiques. Ainsi, la classe des sols neutres est associée à un faible taux de calcaire et la présence des particules d'argile.

Les analyses du calcaire total au laboratoire ont livré des valeurs limitées par 0,8% comme minimum et 50,0% comme maximum. Selon les normes des propriétés des sols résumées dans le Tableau 5, ces valeurs nous informent sur la présence de cinq différentes classes du calcaire total. L'analyse spatiale de la carte du calcaire total dérivée par la méthode IDW illustre ces cinq classes (Figure 21a) qui sont les suivantes: faiblement calcaire (1 à 5%), moyennement calcaire (5 à 10%), calcaire (10 à 15%), fortement calcaire (15 à 30%) et très fortement calcaire (30 à 50%). Quant à la méthode Spline (Figure 21b), en plus de ces cinq classes, elle ajoute la classe non calcaire (0 à 1%). Toutefois, cette nouvelle classe ne reflète pas la réalité des résultats de nos analyses au laboratoire mais tout simplement un artefact causé par le modèle mathématique impliqué dans ce type d'interpolation comme nous avons soulevé auparavant. Globalement, les cartes qui sont à la base de ces deux méthodes, IDW et Spline (Figures 21a et 21b), illustrent de façons relativement similaires la répartition spatiale du calcaire total. Puisque les sols de notre région d'étude sont formés sur une dalle calcaire avec un pH basique, nous remarquons que la classe dominante est celle qui est fortement calcaire occupant environ 55% du territoire, suivi par les classes calcaire (environ 20%), moyennement calcaire (environ 15%), faiblement calcaire (environ 8%), et finalement une très faible partie du territoire ($2\% \leq$) montre la classe très fortement calcaire.

Comme pour les autres éléments analysés ci-dessus, les cartes du calcaire total fournies par les deux méthodes du Krigeage (ordinaire et universel) sont identiques (Figure 21c). En outre, par rapport aux méthodes déterministes, la carte restituée par le Krigeage montre uniquement quatre classes avec une bonne continuité spatiale en ignorant la classe très fortement calcaire qui est faiblement représentée. La classe fortement calcaire est la plus dominante avec environ 50% du territoire localisée spatialement au centre et nord-

est. Elle est suivie par la classe calcaire qui montre une superficie moins large (environ 30%), elle couvre une partie nord-sud-ouest avec une zone au sud de la région d'étude. Quoique la classe moyennement calcaire située surtout au nord-ouest et au sud occupe un territoire d'environ 15%. Finement, la quatrième et dernière classe qui est faiblement calcaire, environ 5%, est localisée de façon uniforme dans la partie ouest du site d'étude.

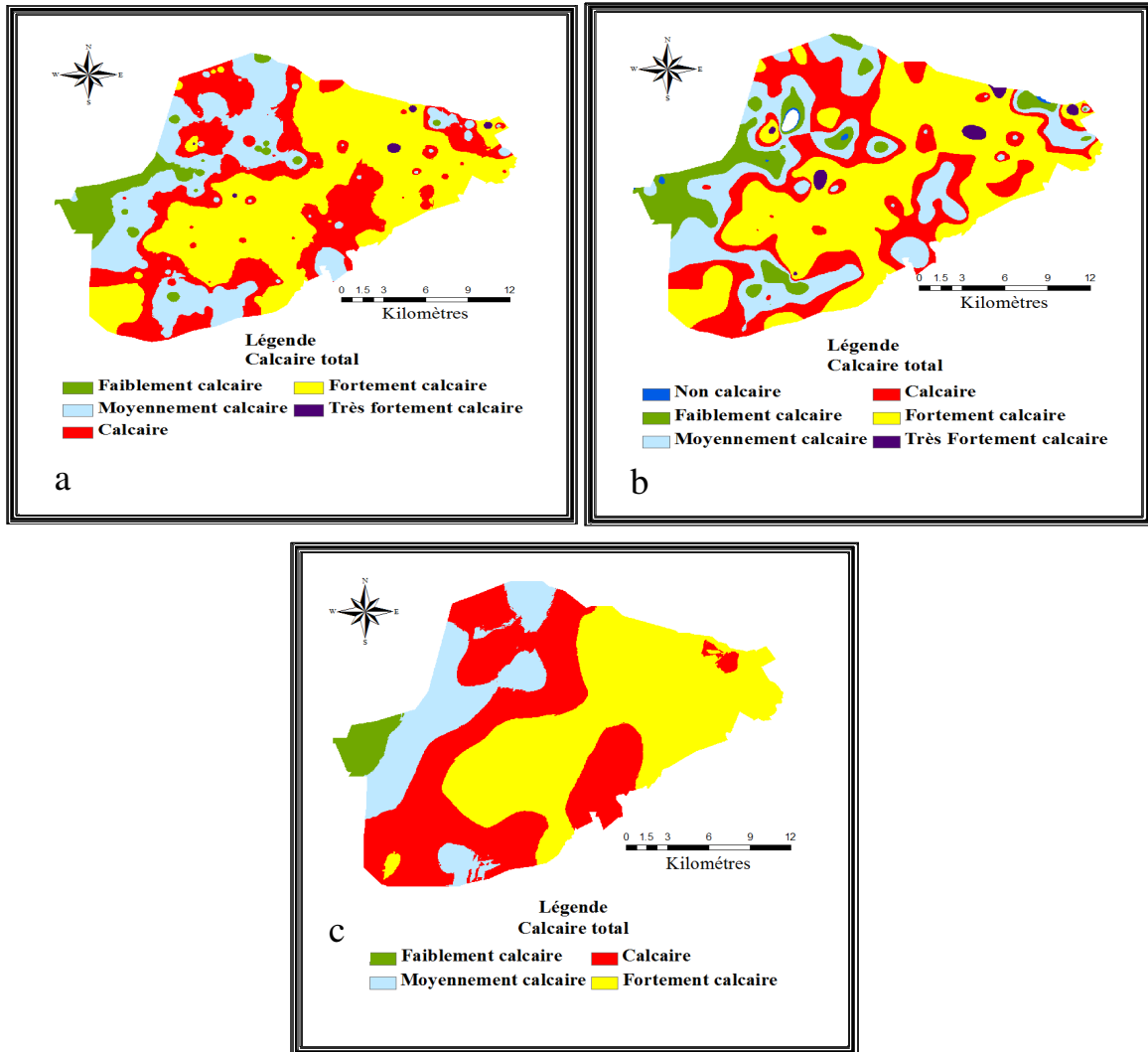


Figure 21 : Cartes du calcaire total dérivées par : IDW (a), Spline (b) et KO et KU(c).

Rappelons que l'estimation du pourcentage des éléments grossiers avait lieu sur le terrain lors de l'échantillonnage en utilisant une grille de 1 m². Lors de cette opération et en

considérant chacun de nos 254 points, nous avons estimé la densité des éléments grossiers d'une valeur allant de 0 à 35%. D'après ces limites et les normes résumées dans le Tableau 5, quatre classes distinguent notre zone d'étude, à savoir : sol non caillouteux (<5%), sol peu caillouteux (5 à 10%), sol caillouteux (10 à 30%) et sol très caillouteux (30 à 50%). L'analyse spatiale de la carte des éléments grossiers interpolée par la méthode IDW (Figure 22a) à permis de montrer la dominance des classes des sols non caillouteux et peu caillouteux avec environ 95% du territoire ce qui est évident puisque c'est une plaine agricole remembrée et irriguée par les deux grands barrages de la région. Les 5% du territoire restant représente notamment les sols caillouteux, alors que les sols très caillouteux ne représente qu'un pourcentage insignifiant. Ces deux classes font partie des sols squelettiques non développés et peu profonds, généralement localisées au bord de la rivière. Quant à la carte restituée par la méthode Spline (Figure 22b), elle montre les mêmes quatre classes, mais avec plus de représentativité de la classe du sol non caillouteux au détriment du sol peu caillouteux. Toutefois, ces deux classes couvrent ensemble environ 90% du territoire. Bien que cette méthode montre la même localisation spatiale des classes de sols caillouteux et très caillouteux, nous constatons une augmentation relative de leur superficie par rapport à la méthode IDW, soit environ 10%. En outre, la classe des sols très caillouteux a été manifestée dans d'autres places. Bien entendu, cette augmentation peut être causée par l'altération des valeurs initialement observées sur le terrain par le modèle interpolateur de Spline.

De façon similaire aux autres éléments qui ont été analysé au laboratoire, les méthodes du Krigeage (ordinaire et universel) ont donné des résultats semblables. Ainsi, par comparaison aux méthodes IDW et Spline, le Krigeage ne considère pas la classe des sols très caillouteux qui est représentée par un nombre de points très négligeable et très dispersés spatialement ce qui permet au modèle probabiliste et globale de les éliminés (Figure 22c). En outre, nous remarquons une généralisation cartographique sévère de la classe des sols peu caillouteux couvrant maintenant uniquement 15% au profit des sols non caillouteux montrant une superficie d'environ 75% du territoire. Quant à la dernière classe des sols caillouteux, elle couvre environ les 10% restant du territoire localisée particulièrement au sud et à l'ouest en allongeant la bordure de la rivière.

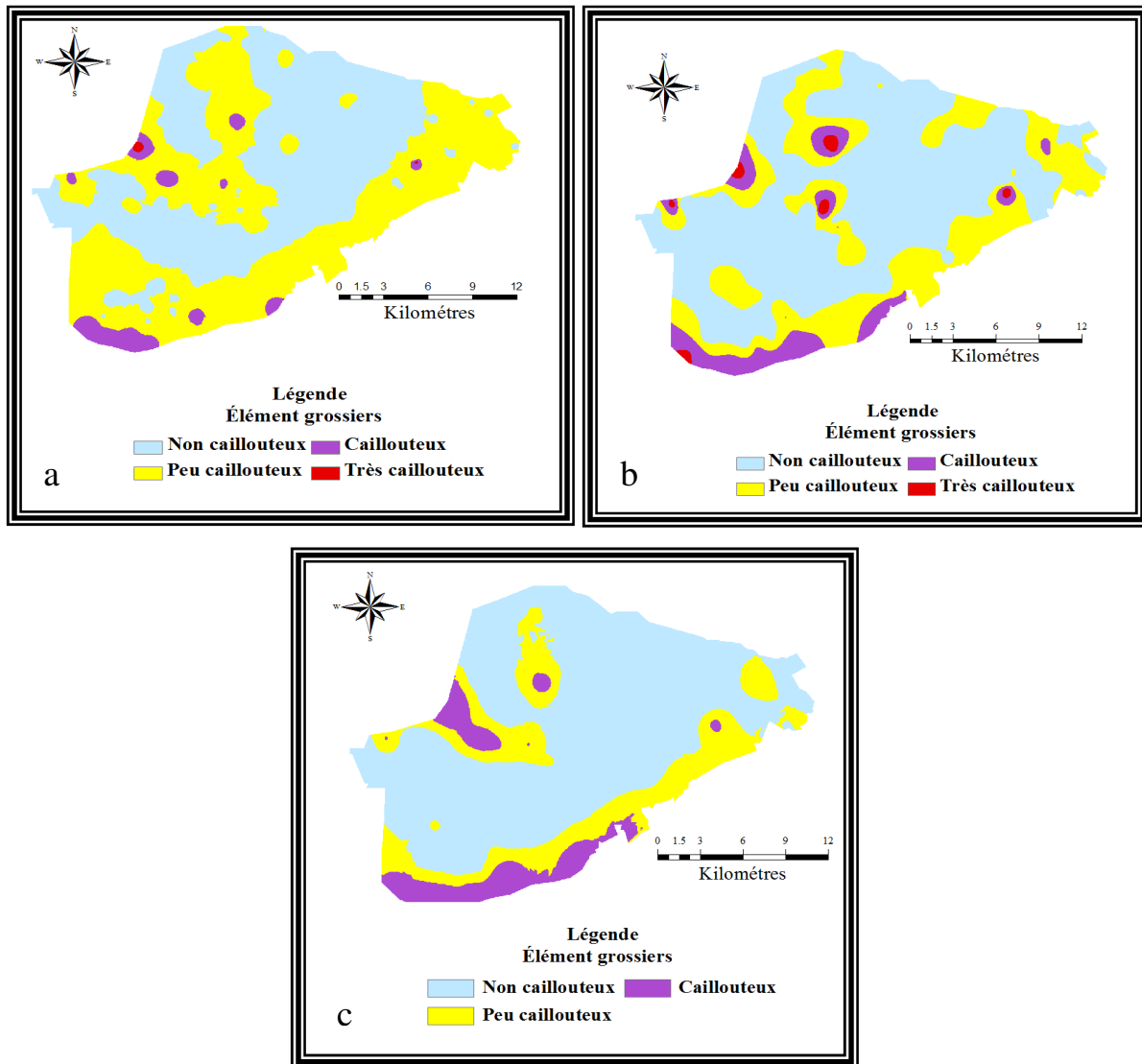


Figure 22: Cartes des éléments grossiers dérivées par IDW (a), Spline (b) et KO et KU (c).

3.5. Restitution et validation des cartes des sols

Il est très important de rappeler que la restitution d'une carte pédologique se base essentiellement sur des profils pédologiques caractérisant les sols verticalement, de la surface à la roche mère, en montrant les changements brutaux et en mettant en évidence les différents types d'unités pédologiques. Toutefois, dans le cadre de cette recherche nous essayons de cartographier les types de sols entre la surface et une profondeur de 20

cm en se basant sur les éléments granulométriques et sur les quatre propriétés des sols considérés. Comme discutés dans la section 2.1. les principaux types des sols qui dominent le périmètre irrigué de Tadla qui forme notre site d'étude sont les sols isohumiques châtains et bruns (environ 83% du territoire), les sols calcimagnésiques (environ 11% du territoire), les sols fersiallitiques à sesquioxydes de fer, les sols hydromorphes et les sols peu évolués (dites aussi sols complexes). Selon les normes du Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc et de l'OMVAT nous avons résumés les caractéristiques des types de sols du périmètre irrigué de Tadla pour une profondeur qui varie de 0 à 20 cm (SCET-Maroc, 1984). Ces caractéristiques sont synthétisées et présentées dans le Tableau 6. Par ailleurs, en se basant sur les classes texturales et celles des propriétés de nos sols nous avons lancés des requêtes spatiales en fonction des critères qui caractérisent chaque type de sol (Tableau 6) afin de restituer les cartes finales. Par exemple, un sol hydromorphe se caractérise par une texture limoneuse-fine (0 à 30% d'argile, 50 à 80% de limon et 5 à 50% de sable), fortement à très fortement calcaire (15 à 50%), riche en matière organique (3 à 6%), moyennement basique (7,8 à 8,5) et peu caillouteux (5 à 10% en éléments grossiers). Évidemment, en utilisant "Spatial analyst" d'Arc-GIS et en respectant tous ces critères, la carte de fraction du sol hydromorphe a été générée. La même procédure a été suivie pour dériver la fraction de chaque type de sol et, par la suite, produire une carte de type de sols en considérant chacune des méthodes d'interpolation.

Bien entendu, les résultats finaux attendus de cette recherche sont les quatre cartes de types de sols restituées par Spline, IDW, KO et KU. Néanmoins, puisque les méthodes de Krigeage ont donnés des résultats identiques, une seule carte de types de sols restituée par la géostatistique a été retenue pour des fins d'analyses et de comparaison par rapport à la réalité terrain. Cette dernière est une carte pédologique de notre site d'étude établie en 1976 par des ingénieurs pédologues en se basant sur les méthodes conventionnelles des sciences des sols (Figure 23, source ORMVAT). Elle illustre cinq différentes classes de sols : calcimagnésiques, complexes, fersiallitiques, hydromorphes, isohumiques. Il est important de préciser ici que cette carte présente une seule et unique classe des sols isohumiques indépendamment de leurs couleurs (bruns ou châtains). Par contre, dans nos

requêtes d’analyses spatiales nous avons fait une distinction entre les sols isohumiques bruns et châtons. Par ailleurs, les zones 1 et 2 figurant sur cette carte de validation montrent, respectivement, le centre ville et une partie non cartographier en 1976 parce qu’elle ne fait pas partie du périmètre irrigué, mais plutôt des terres dites “Bour” qui sont basées uniquement sur la pluviométrie. Toutefois, lors de nos travaux d’échantillonnage sur le terrain nous avons échantillonné aux limites du périmètre irrigué avec la ville et nous avons pris en considération aussi la zone 2.

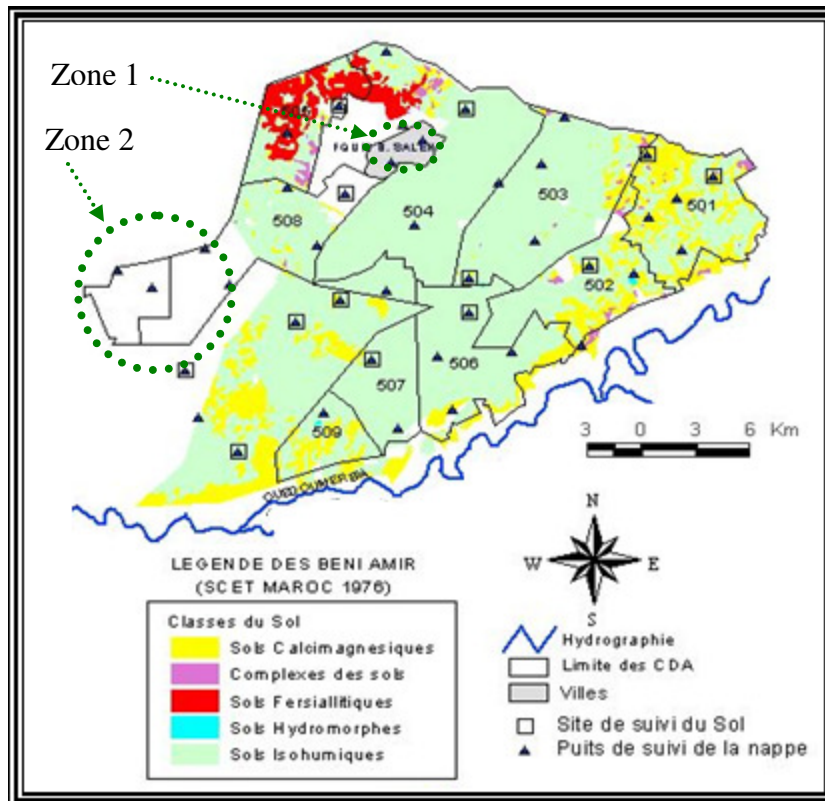


Figure 23 : Carte pédologique de la région d’étude (Source: ORMVAT).

Types des sols	Classes texturales	Propriétés des sols			
		Calcaire total	Matière organique	Éléments grossiers	pH
Isohumique châtain	Limono-argileux Limoneux-fin Limoneux	Faiblement calcaire	Pauvre en MO	Non caillouteux	Faiblement basique
Isohumique brun	Limoneux-fin Limoneux	Moyennement calcaire	Moyennement pourvu en MO	Non caillouteux	Neutre à faiblement basique
Calcimagnésique	Limono-argileux Limoneux-fin	Moyennement à fortement calcaire	Moyennement pourvu en MO	Peu caillouteux à caillouteux	Moyennement basique
Hydromophe	Limoneux fin	Fortement à très calcaire	Riche en MO	Peu caillouteux	Moyennement basique
Sols peu évolué	Limoneux-fin Limoneux-fin argileux	Très calcaire	Moyennement pourvu en MO	Peu caillouteux	Faiblement basique
Sols Fersiallitique	Limino-sableux	Non calcaire	Moyennement pourvu en MO	Non Caillouteux	Neutre

Tableau 6 : Caractéristiques des types de sols de 0 à 20 cm de la zone étudiée qui sont résumés d'après les normes du Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc, SCET-Maroc (1984).

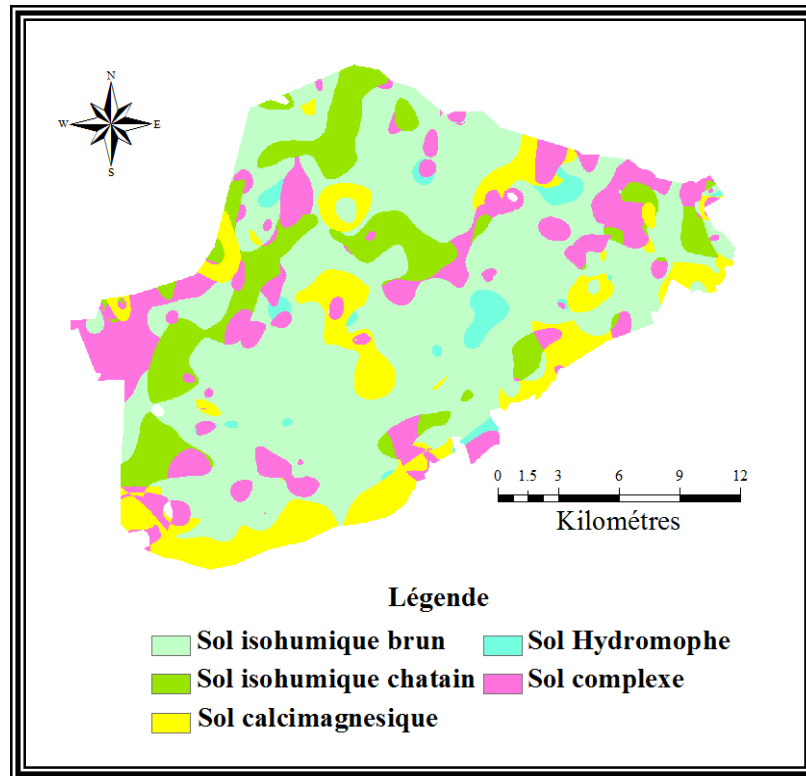


Figure 24 : Carte des types de sols restituée par la méthode *Spline*.

Les figures 24, 25 et 26 représentent les cartes de types de sols obtenues par les méthodes *Spline*, *IDW* et *Krigeage*. L'interprétation et la comparaison de ces cartes par rapport à celle qui illustre la vérité terrain montre certaines ressemblances, mais aussi des différences majeures notamment l'absence de la classe des sols fersiallitiques au nord de la carte de validation. Comme nous avons discutés auparavant (section 2.1.3.), cette classe se caractérise par une texture argileuse et sablonneuse, une absence totale du calcaire et caillouteuse en surface. Cependant, les résultats de nos analyses au laboratoire représentées sous forme cartographique, indépendamment des méthodes d'interpolations, nous montrent une situation différente. En effet, dans cette partie de notre site d'étude, de point de vue texture le contenu en argile est très faible (Figures 9a, 9b et 9c), mais avec une moyenne présence du sable (Figures 12a, 12b et 12c). En outre, le calcaire commence à se manifester avec un taux relativement faible (Figures 14c, 15c et 17c), ainsi qu'une absence complète des cailloux (Figures 14d, 15d et 17d). Ce changement drastique qui a contribué à la disparition de cette classe s'explique par plusieurs facteurs

qui ont affectés la région durant les 35 dernières années. Le travail du sol par des techniques de labours profonds en utilisant la machinerie lourde accompagné d'une exploitation intensive des terres ont contribué aux changements de la structure du sol. Ceci favorise le concassage des cailloux de natures calcaire et affecte la nature texturale du sol. Ainsi, le ramassage des cailloux aux fils des années afin de rendre les terres plus rentables avec moins d'obstacles aux techniques de labours. En plus, l'irrigation intensive de la plaine (absence de la topographie) favorise les phénomènes d'érosion (hydrique et éolienne), accentue la sévérité de la salinité et de la sodicité (Bannari *et al.*, 2008 et 2011), et transforme la texture en limon et en limon-fin. A cause de l'impact des changements climatiques sur la région durant les 40 dernières années, en plus de cette irrigation intensive, la pluie est devenue rare mais forte sur une très courte période ce qui contribue au lessivage des sols et dégage le substratum calcaire.

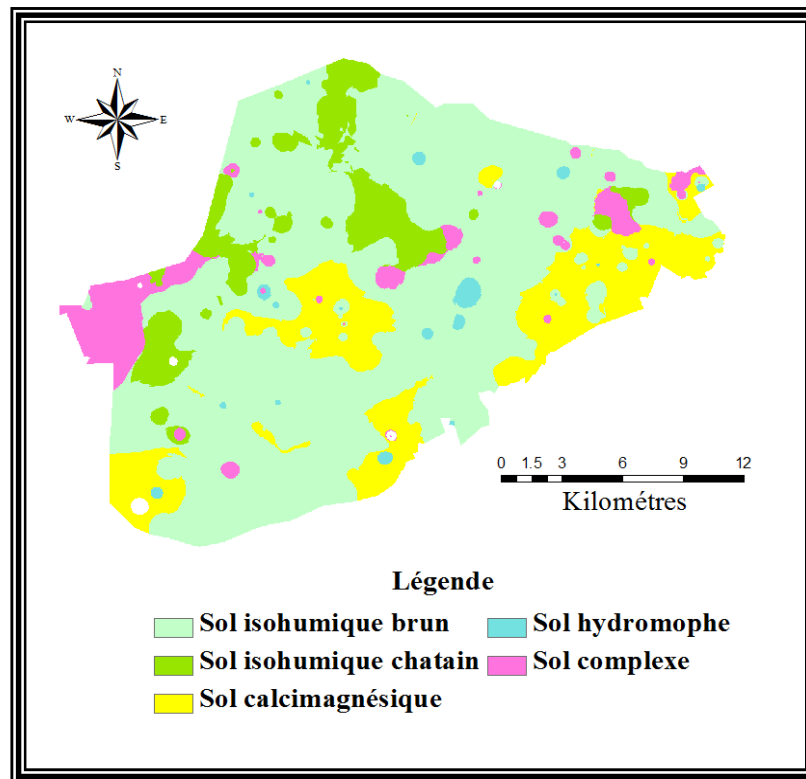


Figure 25 : Carte des types de sols restituée par la méthode *Inverse Distance*

Par ailleurs, contrairement aux méthodes IDW et Krigeage, la carte obtenue par Spline affiche la classe des sols complexes spatialement à plusieurs zones de façon significative par rapport à la réalité terrain. Par contre, la carte de validation localise cette classe dans de très petites zones (spots) à l'est et au nord. Incontestablement, nous nous attendons à ces résultats qui ne reflètent guère la réalité du terrain du fait que lors de l'interpolation de toutes les cartes de fractions (propriétés et éléments granulométriques) cette méthode change l'intégrité des valeurs de nos analyses au laboratoire. Certainement, les opérations d'analyse spatiale qui se basent sur valeurs relativement erronées vont compromettre la précision de la carte finale. Par contre, cette classe est cartographiée par les différentes méthodes considérées exactement à l'ouest de notre zone d'étude. Comme nous avons soulevé auparavant, cette zone fait partie des terres dites "Bour" ne figure pas sur la carte de validation, mais le consensus des quatre techniques testés témoigne qu'elle existe belle et bien comme classe. En effet, par référence à nos notes de description prises lors de l'échantillonnage sur le terrain nous corroborons la précision de cette information. Car nous avons noté que cette zone est pauvre à moyennement pauvre en matière organique et caillouteuse en surface. En outre, les fossés au bord des champs et les puits de la régions ont permis d'observer des profils ne dépassant pas une trentaine de centimètres de profondeur ce qui caractérise les sols squelettiques ou peu développer.

Excepte cette zone à l'ouest de notre site d'étude, nous remarquons que la méthode IDW à un peu surestimée la présence de cette classe au milieu, à l'est et aussi au sud-ouest en exhibant de petites zones. Quant à la méthode du Krigeage, nous remarquons qu'elle représente cette classe de façon plus conforme à la réalité terrain. Les petits points ou pixels indiquant cette classe sur la carte de validation ne figures nullement sur carte obtenue par Krigeage à cause de la globalité de cette méthode qui considère une forte dépendance spatiale des observations avec une certaine continuité spatiale de la propriété sujette à l'étude. Formellement, ces hypothèses ne donnent pas la chance à la représentativité des petites informations dispersées sur un large territoire. Pour une représentativité faiblement probable de cette classe, il fallait un très grand nombre de points d'échantillonnage de façon très rapproché et sur de très petites distances ce qui rend la tâche lourde et coûteuse.

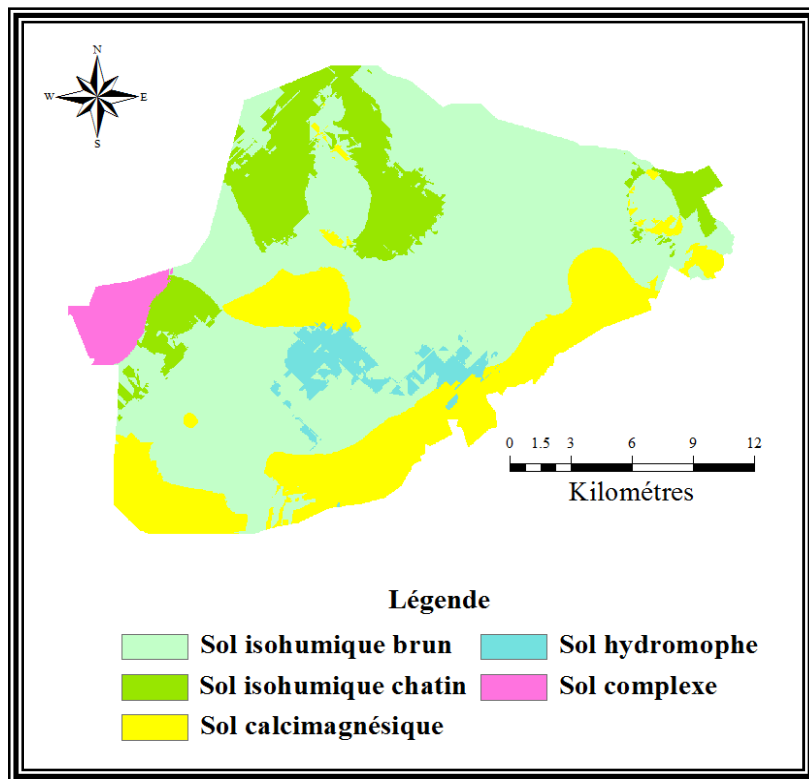


Figure 26 : Carte des types de sols restituée par le Krigeage.

La classe des sols hydromorphes est très faiblement représentée dans les zones 502 et 509 de la carte de validation. Généralement, cette classe se trouve dans des zones à bas plateaux (variabilité topographique faible ou absente), et elle se caractérise par une richesse en matière organique, par du limon-fin, une forte richesse en calcaire, un très faible taux de cailloux (peu caillouteux) et par une nappe phréatique relativement proche de la surface. Cette classe est évoquée très faiblement par les cartes dérivées par les méthodes Spline, IDW et Krigeage, et elle est localisée spatialement dans des zones qui diffèrent de la vérité terrain. Par exemple, les méthodes Spline et IDW montrent des petits points ou de très petites zones dispersées dans notre territoire d'étude. Bien entendu, il est très difficile de juger la précision ou la représentativité cartographique de cette classe par ces deux techniques, IDW et Spline. Toutefois, nous pouvons conclure

qu'elle est n'est pas conforme à la réalité terrain. Quant à la carte obtenue par Krigeage, elle manifeste cette classe de sol par une zone relativement représentative, continue et uniforme, localisée au centre de notre zone d'étude. À la lumière de nos analyses précédentes nous pouvons dire que la prédiction et la localisation de cette classe par le Krigeage se fait logiquement et correctement. En effet, d'après une étude du niveau piézométrique de la nappe phréatique du Tadla (ORMVAT, 2005), comme illustré par l'annexe 1, nous remarquons que cette zone fait partie des zones qui sont très proche de la surface avec un niveau piézométrique inférieur à 5 m. Entre autres, l'analyse des figures 17c et 21c montrent que cette classe se localise dans une zone avec une forte richesse en calcaire. Entre autres, elle est faiblement caillouteuse, fortement limoneuse, et moyennement basique, respectivement, comme illustré par les figures 11c, 17d et 20c. Autrement dit, nous constatons que la cartographie et la localisation de cette classe répondent aux critères caractérisant ce type de sol (Tableau 6) avec fidélité ce qui nous laisse croire à sa précision cartographique par le Krigeage.

La classe des sols calcimagnésiques est localisée globalement à l'est, au sud au bord de la rivière, au sud-ouest et des petits spots sont localisés au nord et au centre sur la carte pédologique qui représente la vérité terrain. Cette classe n'est que partiellement conforme à la réalité terrain sur les deux cartes dérivées par Spline et IDW. Ces deux méthodes indiquent une certaine représentativité de cette classe notamment au sud et à certaines petites zones localisées au centre et au sud-est. Quant à la carte issue du Krigeage, elle concorde mieux que les deux autres cartes avec la réalité terrain à l'est, au sud, au sud ouest et au centre. Évidemment, elle représente toujours une certaine continuité et uniformité de l'information. Afin de faire une mise au point sur la précision cartographique de cette classe, nous rappelons ici comme discuté par Ruellan (1972) et SCET-Maroc (1984) et récapituler dans le Tableau 6, la classe des sols calcimagnésiques est formée sur des alluvions calcaires à pente plus ou moins forte. Elle se caractérise, entre autres, par un sol moyennement riche en matière organique, moyennement basique, limoneux-fin et/ou limoneux-argileux, peu caillouteux à caillouteux, et son existence est essentiellement due à l'érosion. En se basant sur ces critères et en considérant les cartes que nous avons dérivées pour les éléments texturaux et pour les propriétés des sols nous

pouvons conclure que la méthode du Krigeage donne de meilleurs résultats par rapport à Spline et à IDW. En effet, la zone de notre site d'étude ou la classe calcimagnésique est localisée se caractérise par un moyen contenu en matière organique (Figure 19c), une basicité moyenne (Figure 20c), une texture limoneuse-fine (Figure 13c), un sol calcaire à fortement calcaire (Figures 18c et 21c) et peu caillouteux à caillouteux (Figure 22c). En outre, cette classe est localisée au bord de la rivière (Figure 23) avec des pentes plus au moins fortes.

Finalement, la classe des sols isohumiques est représentée par une seule et unique classe sur la carte de la réalité terrain, sans faire la distinction entre la couleur châtain et brune. Cette représentativité peut être, probablement, due à un processus de généralisation cartographique pour ne représenter qu'une seule classe des sols isohumiques lors de la restitution de cette carte de validation. Comme il est fort probable que lors de la confection de cette carte il n'existait qu'une seule et unique classe des sols isohumiques bruns, alors que le changement de la dynamique de la matière organique dans le sol entre 1976 (date de production de la carte) et 2008 (date de l'échantillonnage) a conduit à ce changement au niveau de la couleur. Cette deuxième hypothèse peut être forte probable car d'après Badraoui (2003) la teneur du sol en matière organique a connue une baisse progressive suite à la mauvaise gestion des résidus de cultures dans le périmètre irrigué de Tadla. En outre, selon Souidi *et al.* (2000) et Naman *et al.* (2001), la teneur en matière organique a diminuer d'environ 48% entre 1971 et 2001 dans les principaux périmètres irrigués au Maroc à cause de l'intensification agricole en fonction des années d'irrigation. Bien entendu, dans notre analyse et nos requêtes spatiales nous avons fait une distinction nette entre ces deux types de sols (châtains et bruns). Comme indiqué dans le Tableau 6, cette différence de couleur se manifeste notamment au niveau du contenu en calcaire et celui de la matière organique. Bien que cette classe des sols isohumiques occupe la grande partie restante de notre site d'étude, nous constatons que la disparition de la classes des sols fersiallitiques (Figure 23) et remplacer par la classes des sols isohumiques châtain (Figure 26) à cause de l'augmentation du taux du calcaire dans le sol comme nous avons soulevé auparavant. Cependant, bien que la carte de validation ne discrimine pas entre les sols isohumiques châtains et bruns, nous pouvons dire que les

méthodes IDW et Spline ont représentées cette classe avec une précision relativement acceptable. Toutefois, si nous considérons la conservation de l'intégrité des valeurs de nos analyses par le modèle interpolateur lors de l'estimation des valeurs inconnues, la considération de l'auto-corrélation spatiale de nos observations qui sont bien denses et assez représentatifs de la réalité terrain, et la rigueur de nos requêtes d'analyses spatiales en respectant les normes qui caractérisent les types de sols; nous pouvons dire que globalement le Krigeage fait une distinction et représentation spatiale précises de ces deux classes isohumiques (châtains et bruns) dans notre zone d'étude.

Par ailleurs, il est très important de rappeler que la validation des cartes obtenues dans le cadre de cette recherche par rapport à celle qui représente la réalité terrain ne peut être faite de façons rigoureuses et absolues. En effet, bien que la méthode pédologique soit précise, certaines faiblesses peuvent être notées. Par exemple, le traçage des limites des classes des sols par méthode pédologique se fait en accordons de l'importance à la végétation, à la topographie et aux états de surfaces. Ainsi, l'étude de la variabilité au sein et entre les plages cartographiques d'une même unité peut être limitée par le nombre de profils et par l'ordre de grandeur de la densité d'échantillonnage que suppose l'estimation de propriétés du sol avec un niveau de précision donné. Autrement dit, le fardeau économique peut être pris en considération pour l'atteinte d'une meilleure précision. En plus de ce facteur économique, nous devons aussi prendre en considération les faiblesses de la généralisation cartographique lors de la confection de cette carte de validation en 1976, car elle est basée sur des techniques cartographiques et de photos interprétations moins performantes que la rigueur de l'analyse spatiale à l'aide du SIG.

Cependant, à la lumière de tous nos résultats et de la validation des cartes obtenues nous pouvons dire qu'à l'aide des observations ponctuelles et denses des sols couplés aux analyses au laboratoire, la géostatistique et l'analyse spatiale peuvent différencier les principaux types de sols dans l'espace avec une bonne précision. La géostatistique repose sur des bases sérieuses afin d'étudier les relations spatiales et elle en trouve ce qui lui donne la puissance par rapport aux méthodes déterministes qui reposent sur l'indépendance entre les variables. Nous pouvons donc conclure que la géostatistique

représente une autre alternative ou un excellent outil de support aux méthodes conventionnelles de cartographie. Elle caractérise bien la continuité des propriétés des sols et manifeste les changements de façon progressive. Par contre, elle peut être non convenable lorsqu'il ya des discontinuités brutales. Elle confère plus de robustesse et de malléabilité à la démarche cartographique proposée, en permettant aux procédés d'analyses spatiales de produire des cartes représentatives. Elle forme un outil de production de documents cartographiques à grandes et moyennes échelles répondant rapidement à des applications spécifiques notamment dans les pays en développement. Selon Legros (1996) la géostatistique nécessite de 150 à 200 points d'observations afin de bien décrire l'organisation spatiale des sols. Ce qui corrobore nos résultats du fait que nous avons une grande densité des points d'échantillonnage (254 points) avec une excellente précision de localisation spatiale (± 5 m) dans notre territoire d'étude grâce au GPS. Les analyses au laboratoire qui sont basées sur une nouvelle technologie d'instrumentation de très haute performance nous laisse croire à une excellente précision des résultats de nos analyses granulométriques et des propriétés des sols. Entre autres, la force des SIG au niveau de l'analyse spatial en respectant les normes et les caractéristiques des types des sols contribuent très significativement à la précision, surtout de la carte finale obtenue le Krigeage. Il est certain que la démarche proposée peut être un excellent outil de la cartographie des sols à moyenne échelle ce qui corrobore les remarques de Walter (1990). Toutefois, malgré de l'utilité et de la précision de cette démarche proposée dans cette recherche, elle ne peu supplanter les méthodes de cartographiques qui se basent sur les sondages, les caractéristiques de l'environnement, les lois pédologiques, les documents cartographiques et les photos aériennes et l'expérience du pédologue et son flair développé avec l'expérience au fils des années.

4. Conclusions et recommandations

La cartographie des sols est d'une importance particulière pour bien comprendre l'organisation, la localisation et la distribution spatiale des sols, et de leurs caractéristiques. Ces informations sont fondamentales du fait que les sols supportent le développement durable. Ils sont des ressources primaires qui jouent un rôle essentiel dans

les fonctionnements biophysique et biochimique des différents écosystèmes végétales. En outre, actuellement, il y a une très grande demande d'une information précise sur les sols par les modélisateurs de l'environnement, de l'érosion et de l'hydrologie, par les ingénieurs de génie, les planificateurs en milieu urbain et rural, par les forestiers, ainsi que par les agriculteurs. Pour la cartographie des sols, les méthodes conventionnelles sont basées sur des modèles discrets qui préconisent que les changements brutaux des sols généralisent différents types d'unités pédologiques dont les profils caractérisent les sols. Bien entendu, ces méthodes nécessitent la présence d'un pédologue sur le terrain d'étude en observant les attribues des sols, et elles assurent des produits cartographiques de très grande précision à différentes échelles. Toutefois, elles nécessitent plus de temps et d'investissement, notamment dans les pays en développement. Durant cette dernière décennie, de nouvelles procédures théoriques et conceptuelles liées au développement de la technologie de l'information ont permis des avancées considérables dans le domaine de la cartographie des sols. En effet, un certain nombre de technologies de l'information, tels que les SIG et les GPS qui sont associés à la modélisation mathématique et statistique, et aux analyses au laboratoire permettent de cartographier les différents types de sols. Cette recherche explore le potentiel de la synergie entre les SIG, le GPS, les méthodes d'interpolations déterministes (Spline et inverse distance) et probabilistes (géostatistique), et les analyses au laboratoire (granulométrie, calcaire total, pH, matière organique et éléments grossiers) pour la cartographie des types de sols dans un environnement semi-aride au Maroc.

Dans une première étape, d'après nos analyses granulométriques basées sur la classification texturale Américaine, nous avons identifié cinq classes texturales : 1) classe limono-argileuse, 2) classe limoneuse, 3) classe limoneuse-fine, 4) classe limoneuse-fine-argileuse, et 5) classe limono-argileuse-fine. En outre, en plus de cette classification texturale, nous avons considérés quatre propriétés de sols, à savoir : calcaire total, matière organique, pH et éléments grossiers (cailloux et des graviers). Excepte ces derniers éléments qui ont été estimés sur le terrain lors de l'échantillonnage, le contenu de chacune de ces propriétés a été analysées au laboratoire. Dans une seconde étape les cartes de fractions des éléments granulométriques et des propriétés des sols ont été

dérivées par chacune des méthodes d'interpolation déterministes (IDW et Spline) et probabilistes (KO et KU).

Indépendamment de l'élément sujet à l'interpolation, nous constatons que les méthodes déterministes exposent des résultats relativement similaires entre elles en montrant des distributions spatiales sporadiques dans différentes zones des cartes obtenues du fait que ces techniques d'interpolation sont locales et se basent uniquement sur le voisinage. Toutefois, nous avons notés des légères différences qui sont les conséquences de la façon dont chacune de ces méthodes traite les données au moment de l'ajustement. La méthode IDW fournit des classes iso-valeurs de manière circulaire autour des points d'observations lors de l'interpolation, mais elle garde l'intégrité des valeurs nominales des attribues obtenues lors des analyses au laboratoire pour chacun des points échantillonnés. Par contre, la méthode Spline introduit des coefficients de lissages de sorte que les valeurs estimées peuvent être inférieures à la plus petite donnée ou supérieure à la plus grande. Cette situation est due aux artefacts causés par les polynômes d'ajustement qui considèrent sous contrainte les points d'inflexions pour l'estimation d'une variable ce qui cause un biais et, par conséquent, il est probable que l'interpolateur n'est plus exact. En conséquence, elle change significativement les limites (minimale et maximale) réelles des valeurs des attribues obtenues lors des analyses au laboratoire. Par rapport à la méthode IDW, la méthode Spline affiche un fort aspect relativement lisse "ou flou" dans les zones de transitions entre les différents niveaux de concentration de l'élément sujet à l'étude. Quant aux méthodes probabilistes (KO et KU), elles considèrent le territoire d'étude dans sa globalité en examinant tous les points d'échantillonnage deux par deux et en se basant sur l'hypothèse qu'il y a une certaine continuité spatiale des propriétés étudiées. Ainsi, malgré la légère différence conceptuelle entre les approches de ces deux méthodes, elles ont dérivées les cartes de façons analogues entre elles à cause, fort probablement, du grand nombre de points connus qui ont été échantillonné à peu près uniformément sur notre site d'étude. Ainsi, Contrairement à la méthode Spline qui cause un biais d'étalement par extrapolation, le Krigeage diminue les valeurs extrêmes à cause de l'auto-corrélation spatiale qui calcule la moyenne des valeurs dominantes en éliminant

les faibles valeurs. Évidemment, cette situation reste valable et applicable indépendamment de la variable sujet à l'interpolation.

Par ailleurs, du fait que nous n'avons pas validé chacune des cartes de factions issues des analyses granulométriques ou des propriétés des sols, il est très difficile à ce niveau de prévoir laquelle de ces méthodes est la plus précise. Évidemment, ce critère de comparaison a été pris en considération lors de la validation des cartes finales (cartes de types des sols) par rapport à la vérité terrain. Cette dernière est représentée par une carte pédologique qui a été établie en 1976 en se basant sur des techniques pédologiques conventionnelles pour la cartographie des sols.

En se basant sur les classes texturales et celles des propriétés de nos sols, des requêtes spatiales ont été lancées en fonction des critères caractérisant les types de sols de la zone étudiée d'après le Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire du Maroc afin de restituer les cartes finales. À la lumière des résultats obtenus et de leur validation par rapport à la vérité terrain nous pouvons dire qu'à l'aide des observations ponctuelles, denses et uniformément distribuées spatialement, et couplés aux analyses au laboratoire, la méthode IDW procure des résultats acceptables. Bien qu'elle soit non idéale, elle est plus simple à utiliser et représente relativement mieux la réalité terrain que la méthode Spline. Par contre, elle est moins précise que le Krigeage qui peut différencier les principaux types de sols dans l'espace avec une bonne précision. En effet, le Krigeage représente les classes des sols de façons relativement conformes à la réalité terrain. Il repose sur des bases sérieuses afin d'étudier les relations spatiales et il en trouve ce qui lui donne la puissance par rapport aux méthodes déterministes reposant sur l'indépendance entre les variables. Nous pouvons donc conclure que de point de vue cartographie pédologique le Krigeage, ou la géostatistique, représente une autre alternative ou un excellent outil de support aux méthodes conventionnelles de la cartographie des sols. Il caractérise bien la continuité des propriétés des sols et manifeste les changements de façon progressive. Par contre, il peut être non convenable lorsqu'il ya des discontinuités brutales. Il confère plus de robustesse et de malléabilité à la démarche cartographique proposée, en permettant aux procédés rigoureux d'analyses

spatiales de produire des cartes représentatives. Il forme un outil de production de documents cartographiques répondant rapidement à des applications spécifiques notamment dans les pays en développement. Néanmoins, une petite faiblesse peut être notée. Autrement dit, les classes représentées sur la carte de validation par de très petites zones ne figurent nullement sur carte obtenue par le Krigeage à cause de la globalité de cette méthode qui considère une forte dépendance spatiale des observations avec une certaine continuité de la propriété sujette à l'étude. Formellement, ces hypothèses ne donnent pas la chance à la représentativité des petites informations dispersées sur un large territoire. Pour une représentativité, faiblement probable, de ces très petites classes ou ces petites zones, il fallait un très grand nombre de points d'échantillonnage de façon très rapproché et sur de très petites distances ce qui rend la tâche lourde et coûteuse. Cependant, cette petite faiblesse du Krigeage peut être surmontée par la méthode IDW notamment dans des applications en agriculture de précision (fertilisation, irrigation ou fertigation) qui se fait au niveau parcellaire et à différentes échelles. En effet, la méthode IDW garde l'intégrité des valeurs observées et donne des résultats qui respectent le plus proche voisinage en gardant les très petites classes ou les très petites zones qui peuvent être nécessaires pour une gestion inter et intra parcellaires. Bien entendu, il peut même y avoir une certaine synergie et complémentarité entre les méthodes IDW et le Krigeage en fonction de la nature des applications (pédologie, agriculture, décisions et gestions du territoire, etc.) et aussi des analyses multi-échelles.

Enfin, il est souhaitable de tester sur le même site et à la même période la robustesse de la géostatistique en comparaison avec la méthode pédologique conventionnelle pour la confection des cartes des sols. En outre, il est aussi souhaitable de faire la mise au point sur la limite du nombre des points d'échantillonnage sur la géostatistique afin d'avoir des cartes de types de sols avec précision.

5. Bibliographie

Arnaud, M. et Emery, X. (2000) Estimation et interpolation spatiale. Hermes Science Publications, Paris (France), 221pages.

- ANAFID : Association Nationale des aménagements Fonciers, de l'irrigation et drainage (1993) Irrigation in Morocco. Document of the National Association of Land Management, Irrigation, and Drainage, 35 pages.
- Badraoui, M., Merzouk, A., Bonn F., Gwyn Q.H.J. et Hinse, M. (1989) Apport de la télédétection à la cartographie des sols dans les zones arides et semi-arides. Rapport final de projet. IAV Hassan-II / Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, 132 pages.
- Badraoui, M., Agbani, M., Soudi, B. (2000) Évolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc. In Soudi *et al.* (2000) Éditeurs. Intensification agricole et qualité des sols et des eaux. Actes du séminaire organisé à Rabat (Maroc), 2 et 3 Novembre, 11 pages (<http://www.vulgarisation.net/intensificationagricole/03-badraoui.pdf>).
- Badraoui, M. and Stitou, M. (2002) Status of soil survey and soil information system in Morocco. In Badraoui, Bouabid et Pavlovic Editeurs. Actes de l'atelier sur les bases de données SOTER pour les pays de l'Union du Maghreb Arabe, 12-16 novembre 2001, Rabat, Maroc, FAP/SNEA, pp. 21-28.
- Badraoui, M. and Stitou, M. (2003) Status of Soil Survey and Soil Information System in Morocco. Options Méditerranéennes, Série B, No. 34, pp. 193 -204. (<http://ressources.ciheam.org/om/pdf/b34/01002094.pdf>).
- Badraoui, M. (2006) Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc. 93-114p. disponible en ligne :
http://doc.abhatoo.net.ma/doc/IMG/pdf/Connaiss_utilisation_ressources_en_sol_a_u_Maroc.pdf
- Badraoui, M. (2003) <http://www.fsagx.ac.be/mf/Agriecoconseil/EFCA/badraoui.pdf>
- Baillargeon, S. (2005) Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Thèse de Maîtrise, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Ste-Foy (Québec), Canada, 137 pages.
- Baize, D. (2000) Calcaire total et calcaire actif. Chapitre 10 du guide des analyses en pédologie, 2^e édition. Collection Techniques et pratiques. Presses de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France, pages 87-95.

- Bannari, A., El-Harti, A., Haboudane, D., Bachaoui, M. et El-Ghmari, A. (2008) Intégration des variables spectrales et géomorphométriques dans un SIG pour la Cartographie des Zones Exposées à l'Érosion. *Revue Télédétection*, Vol. 7, No. 1-2-3-4, pp. 327-342.
- Bannari, A., Guedon, A.M., El-Harti, A. and El-Ghmari, A. (2011) Modeling and Mapping Slight and Moderate Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land Using ALI (EO-1) Data. *IEEE Transaction On Geosciences and Remote Sensing* (Submitted).
- Beaudet, G., Maurer, G. et Ruellan, A. (1967) Le quaternaire marocain : observations et hypothèses nouvelles. *Revue de Géographie Physique* (2), Vol. IX, No. 4, pp. 269 – 310.
- Bellouti, A., Cherkaoui, F., Benhida, M., Debbarh, A., Soudib, B. et Badraoui, M. (2002) Mise en place d'un système de suivi et de surveillance de la qualité des eaux souterraines et des sols dans le périmètre irrigué du Tadla, au Maroc. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, 28-29 mai 2002.
- Billaux, P. et Bryssine, G. (1970) Les sols du Maroc : chapitre III. Cahier de l'ORSTOM, numéro de la collection de références, No. 13703, pp. 59-101.
- Boulet, R., Humbel, F.X. et Lucas, Y. (1982) Analyse structurale et cartographie en pédologie : II. Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. Cahier de l'ORSTOM, série Pédologie, Vol. XII, No. 4, pp. 323-339.
- Brabant, P., Simonneaux, V. et Euge, K. (1995) État actuel de dégradation des terres et de l'environnement au Togo déterminé à l'aide de la télédétection. In "Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques". Actes du Symposium international AISS, Ouagadougou (Burkina-Faso), 6-10 février 1995, pp 469-485.
- Buol, S. W., Southard, R.J., Graham, R.C. and McDaniel, P.A. (2011) Soil genesis and classification (6th Edition). Wiley-Blackwell Press, 560 Pages.
- Burgess, T.M. and Webster, R. (1980a) Optimal Interpolation and Isarithmic mapping of soil properties - I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, Vol. 31, pp. 315-331.

- Burgess, T.M. and Webster, R. (1980b) Optimal Interpolation and isarithmic mapping of soil properties - II. Block kriging. *Journal of Soil Science*, Vol. 31, pp. 333-341.
- Burrough, P.A and McDonnell, R.A. (1998) *Principales of geographical information systems*. Oxford University Press, New York, 327 pages.
- Burrough, P.A. (1993) The technologic paradox in soil survey: new methods and techniques of data capture and handling. *ITC Journal*, Vol. 1, pp. 15-22.
- Chikhaoui, M., Bonn, F. et Merzouk, A. (2004) Cartographie de la fraction argileuse du sol dans le Rif marocain à l'aide du capteur ASTER et de l'analyse géostatistique. *Revue internationale de géomatique*, Vol. 14, No. 3-4, pp. 359-37.
- Christopherson R. and Byrne, M.L. (2009) *Geo-systems an introduction to physical geography*. Pearson, Prentice Hall, Second Canadian edition, 709 pages.
- Clark, I. and Harper, W.V. (2000) *Practical Geostatistics 2000*. Ecosse North America Llc, Columbus, Ohio, U.S.A., 342 Pages.
- CPCS: Commission de Pédologie et de la Cartographie des Sols (1967) *Classification des sols*. Institut National de Recherche Agronomique, Grignon, France, 87 pages.
- Cressie, N.A.C. (1993) *Statistics for spatial data*. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics: Applied Probability and Statistics. John Wiley and Sons Inc., New York (USA), 416 pages.
- Dobos, E., Micheli, E., Baumgardner, M. F., Biehl, L. and Helt, T. (2000) Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. *Geoderma*, Vol. 97, pp. 367-391.
- Duchon, J. (1975) Fonctions-Spline du type plaque mince en dimension 2. Rapport technique 231, Université de Grenoble, *Journal of Hydrology*, Vol. 208, pp.187-193.
- Duchon, J. (1976) Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. *Revue Française d'Automatique et de Recherche Opérationnelle (R.A.I.R.O.) Analyse numérique*, Vol. 10, pp.5 -12.
- Encyclopédie Canadienne (2009) La classification des sols. <http://www.thecanadianencyclopedia.com/index.cfm?PgNm=TCE&Params=FISE878662>.

- Environmental Systems Research institute Inc. (1996) ArcView GIS. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA.
- Escadafal, R., Girard, M.C. et Courault, D. (1988) La couleur des sols : Appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, Vol. 8, No. 2, pp. 147-154.
- Escadafal, R. (1991) Remote Sensing of Soil Color: Principles and Applications. *Remote Sensing Reviews*, Vol. 7, pp. 261-279.
- ESRI: Environmental Systems Research institute (2008) ArcGIS desktop. <https://www.esricanada.com/english/default.asp>
- FAO (1989) Le Système d'Information Géographique de la FAO. Centre d'investissement, Rome (Italie), 21 pages.
- Faure, A. (1985) Les sols de Kara, Nord-Est-Togo : relations avec l'environnement. Publications de l'ORSTOM, Institut français de recherche scientifiques pour le développement en coopération, 274 pages.
- Feodoroff, A. (1955) Étude générale des sols du périmètre irrigable des Doukkala. Prospections Zone Nord de Sidi Bennour. Service de Recherche Agronomique, expérimentation agricole SOGETIM (Société de gestion des terres irrigués au Maroc), Rapport plus Cartes au 1/50 000.
- Gascuel-Oudou, C., Grimaldi, M. et Veilon, L. (1991) Apport de la géostatistique à l'analyse morphologique du sol : cas d'un transecte représentatif de la plaine côtière guyanaise. *Science du Sol*, Vol. 29, No. 3, pp. 189-209.
- Girard, M.C. (1983) Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique : Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne. Thèse d'état, Université de Paris-7, Paris (France), 430 pages.
- Girard, M.C., Arousseau, P., King, D. et Legros, J.P. (1989) Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Science du Sol*, Vol. 27, No. 4, pp. 335-350.
- Goodchild, M.F. and Longley, P.A. (1999) The future of GIS and spatial analysis. In: Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J. and Rhind, D.W. (editors). *Geographical information systems: principles, techniques, applications, and*

- management (2nd edition, Vol. 1), John Wiley & Sons Inc., New York, pp 567-580.
- Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York (USA), 496 pages.
- Gratton ,Y. (2002) *Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale*. Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, Juin 2002, www.iag.asso.fr
- Grimaldi, M., Grimaldi, C. et Barthes, B. (1992) Variations spatiales du sol des barres prelittorales de la plaine côtière ancienne de Guyane analyse structurale et cartographie. *Cahier de l'ORSTOM de Cayenne. Série pédologique*. Vol. 20, No. 4, pp. 251-259.
- Heiri, O., Lotter, A.F. and Lemcke, G. (2001) Loss on Ignition as a Method for Estimating Organic and Carbonate Content in Sediments: Reproducibility and Comparability of results. *Journal of paleolimnology*, Vol. 25, pp. 101-110.
- Herbst, M. and Diekkruger, M. (2003) Modelling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 28, pp. 239-245.
- Heuvelink, G.B.M. and Webster, R. (2001) Modelling soil variation: Past, Present and Future. *Geoderma*, Vol.100, No. 3-4, pp. 269-301.
- Hulme, M., Conway, D., Jones, P.D., Jiang, T., Barrow, E.M. and Turney, C. (1995) A 1961–1990 Climatology for Europe for Climate Change Modelling and Impact Applications. *International Journal of Climatology*, Vol. 15, pp. 1333-1364.
- Jamagne, M., King, D., Daroussin, J. et LeBas, C. (1993) Évolution et état actuel des programmes européens de connaissance et de la gestion des sols. *Bulletin de Recherche Agronomique*. Vol. 28, No. 2-3, pp. 135-163.
- King, D. et Burrill, A. (1995) Apport réciproques des SIG et de la télédétection pour l'élaboration d'un système d'information sur les sols d'Europe. In "Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques". Actes du Symposium international AISS, Ouagadougou (Burkina-Faso), 6-10 février, pp. 3-18.

- King, D. (1986) Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur la mise en valeur du «Marais de Rochefort ». Thèse de doctorat, Institut Nationale de Recherche Agronomique, Versailles (France), 173 pages.
- Krige, D.G. (1951) A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society*, Vol. 52, pp. 119-139.
- Krige, D.G. (1963) Two Dimensional Weighted Moving Average Trend Surfaces for Ore-evaluation. *Journal of the South African Institution of Mining and Metallurgy*, Vol. 66, pp. 13-38.
- Kheir, R. (2007) A Conditional GIS-Interpolation-Based Model for Mapping Soil-Water Erosion Processes in Lebanon. *Land degradation and development* : www.Interscience.wiley.com.
- Kravchenko, A. and Bullock, D.G. (1999) A comparative study of interpolation methods for mapping soil proprieties. *Agronomy Journal*, Vol. 91, No. 4, pp. 393-400.
- Kurtzman, D. and Kadmon, R. (1999) Mapping of Temperature Variables in Israel : A Comparison of Different Interpolation Methods. *Climate Research*, Vol. 13, pp. 33-43.
- Laborde, J.P. (2000) Méthodes d'interpolation et géostatistiques pour la cartographie automatique. Notes de cours, Université de Nice, Sophia Antipolis, CNRS – UMR 5651 « Espace », 27 pages.
- Lark, R.S. (1997) A Geostatistical Descriptor of Spatial Distribution of Soil Classes and its Use in Predicting the Purity of Possible Soil Map Units. *Geodarma*, Vol. 83, pp. 243-267.
- Laslett, G.M., McBratney, A.B., Pahl, P.J. and Hutchinson, M.F. (1987) Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science*, Vol. 38, pp. 325– 341.
- Latham, M. (1981) THE FAO/UNESCO SOIL *MAP* OF THE WORLD LEGEND. In Morrison, R.J. and Leslie, D.M. Editors, *Proceedings of the South Pacific Regional Forum on Soil Taxonomy*. Institute of Natural Resources, The University of South pacific, Suva, Fiji, November, p p. 177-183

- Legros, J.P. (2007) Les grands sols du monde. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 574 pages.
- Legros, J.P. (1996) Cartographie des sols : De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 321 pages.
- Lembo, A.J. (2005) Spatial Interpolation. Lecture Power Point Presentation, Cornell University. <http://www.css.cornell.edu/courses/420/lecture18.ppt>.
- Lennon, J.L. and Turner, J.R.G. (1995) Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. *Journal of Animal Ecology*, Vol. 64, pp. 370–392.
- Lopez-Granados, F., Jurado-Exposito, M., Pena-Barragan J. and Garcia-Torres, L. (2005) Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. *Europe Journal Agronomy*, Vol. 23, pp 279-289.
- Lepretre, A., Chapalain, G. et Carpentier, P. (2006) Une méthode d'interpolation spatiale des caractéristiques granulométriques des sédiments superficiels. *Bulletin de la Société géologique Française*, Vol. 177, No. 2, pp. 89-95
- Loukili, M., Bock, L., Engels, P. et Mathieu, L. (1999) Approche géomorpho-pédologique et système d'information géographique pour la gestion des terres au Maroc. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 7, No. 1, pp. 37-52.
- MADRPM : Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des pêches Maritime (1993) Inventaire des études pédologiques au Maroc. DCFCC/DC, Rabat (Maroc),
- Massoni, C., Missan, G., Beaudetm, G., Combesh, E. et Ionesco, P. (1970) La plaine de Tadla : chapitre II. Publications de l'ORSTOM, Cahier de la recherche agronomoqie, No. 24, pp. 163-194.
- Matheron, G. (1962). *Traité de géostatistique appliquée*. Vol. 14 of *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*. Editions Technip, Paris, France.
- Matheron, G. (1963) Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, Vol. 58, pp. 1246-1266.
- Matheron, G. (1965) *Les variables régionalisés et leur estimation*. Paris (France), les presses de Masson.

- Matheron, G. (1969) Le krigeage universel. Vol. 1. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, École des Mines de Paris, France, Fontainebleau.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S. and Shatar T.M. (2000) An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, Vol. 97, pp. 293–327.
- Mehrjadi, R.T., Zareian Jahromo, M., Mahmodi, Sh. and Heidari, A. (2008) Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics, Case study: Yazd-Ardakan plain. *World Applied Sciences Journal*, Vol. 4, No. 1, pp. 9 – 17.
- Merzouk, A., Badraoui, M., Fassi, D., Bonn, F., Gwyn, Q.H.J. et Hinse, M. (1990) Essai méthodologique pour le classement et la cartographie des Terres en vue de la conservation des sols et des eaux en zones arides : Apport de la télédétection. In J.M. Dubois et P. La France éditeurs. *Apport de la télédétection à la lutte contre la sécheresse*, publications d'AUPELF-UREF, pp. 163-171.
- Microtrac S3500
<http://www.microtrac.com/ProductsTechnology/MicrotracS3500ParticleSizeAnalyzer.aspx>).
- Nael, M., Khademi H. and Hajabbasi, M.A. (2004) Response of soil quality indicators and their spatial variability to land degradation in central Iran. *Applied Soil Ecology*, Vol. 27, pp. 221- 232.
- Nalder, I.A. and Wein, R.W. (1998) Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 92, pp. 211–225.
- Naman, F., Soudi, B. et Chiang, N.C. (2001) Impact de l'intensification agricole sur le statut de la matière organique des sols en zones irriguées semi-arides au Maroc. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 8, No. 4, pp. 269- 277.
- Navarro- Pedreno, J., Jordan, M.M., Melendez-Partor, I., Gomez, I., Juan, P. and Mateu, J. (2007) Estimation of soil salinity in semi-arid land using a geostatistical model. *Land Degradation and development*, Vol. 18, pp. 339-353.
- Nazari, Z.F., Arshadiyan Behnaz, F., and Zand Vakily Kamran (2006) Study of spatial variability of groundwater quality of Balarood plain in Khuzestan province. The first congress of optimized exploitation from water source of karoon and Zayanderood plain. Shahre Kord university, Persian version, pp. 1236 – 1240.

- ORMVAT (2005) Carte du niveau piézométrique de la nappe phréatique du Tadla en 2005. <http://ormvatadla.com>.
- Prefol, P. (1986) Prodige de l'irrigation au Maroc: le développement exemplaire du Tadla 1936 – 1985. Nouvelle édition latines, Paris, France, 266 pages.
- Renard, F. et Comby, J. (2006) Évaluation de techniques d'interpolation spatiale de la pluie en milieu urbain pour une meilleure gestion d'événements extrêmes : le cas du Grand Lyon. Houille Blanche, Revue internationale de l'eau, Vol. 6, pp. 73-78.
- Robert, M. (1996) Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, 241 pages.
- Ruellan, A. (1972) Les sols a profil calcaire différencié du Maroc. Académie d'agriculture de France, pp. 752- 755.
- Ruellan, A. (2003) Évaluation du système de recherche scientifique et technique au Maroc : Sols et Environnement. MESFCRS, SERS.
- Santos, M.L., Guenat, C., Bouzelboudjen, M. and Golay, F. (2000) Three-dimensional GIS cartography applied to the study of the spatial variation of soil horizons in a Swiss floodplain. Geoderma, Vol. 97, pp. 351–366.
- SCET-Maroc (1984) Société centrale pour l'équipement du territoire Maroc. Rapport sur les zones irrigables. Étude des sols au 1/50 000 des zones périphériques du périmètre irrigué du Tadla, 148 pages.
- Sculla, P., Franklina, J., Chadwick, O.A. and McArthur, D. (2003) Predictive soil mapping: a review. Progress in Physical Geography, Vol. 27, No. 2, pp. 171–197.
- Soudi, B., Naman, F. et Chiang, C.N. (2000) Problématique de gestion de la matière organique des sols: cas des périmètres irrigués du Tadla et des Doukkala. Actes du Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux'. 2-3 Novembre, Rabat, Maroc, pp. 25 – 30.
- Stengel, P. et Gelin, S. (1998) Sol : interface fragile. Publié par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris (France), ISBN 2-7380-0786-4, 210 pages.
- Tabios, G.Q. and Salas, J.D. (1985) A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. Water Resources Bulletin, Vol. 21, No. 3, pp. 365–380.

- Thomann, Ch. (1952) contribution à l'étude de la fertilisation chimique des sols du Maroc. Travaux de la Section Pédologique, Vol. 13, No. 14, pp. 9-34.
- USDA (1994) Keys of soil Taxonomy (6th edition). United States Agriculture Department of Soil conservation service (USAD-SCS), Pocahontas Press, Inc., Blacksburg (USA), 306 pages.
- Valley, R.D., Drake, M.T. and Anderson, C.S. (2005) Evaluation of alternative interpolation techniques for the mapping of remotely-sensed submersed vegetation abundance. *Aquatic Botany*. Vol. 81, pp. 13 - 25.
- Wackernagel, H. (2003) *Multivariate geostatistics: an introduction with applications* (3rd Edition). Springer-Verlag Press, Berlin, 387 pages.
- Wahba, G. (1990) *Spline Models for Observational Data*. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia (USA), 169 pages.
- Wälder, K., Wälder, O., Rinklebe, J. and Menz, J. (2008) Estimation of soil properties with geostatistical methods in floodplains. *Archives of Agronomy and Soil Science*, Vol. 54, No. 3, pp. 275-295.
- Weber, D. and Englund, E. (1994) Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Mathematical Geology*, Vol. 26, No. 5, pp. 589-603.
- Webster, R. and Oliver, M.A. (1992) Sample Adequately to Estimate Variograms of Soil Properties. *Journal of Soil Science*, Vol. 43, pp. 177-192.
- Willmott, C.J. and Matsuura, K. (1995) Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 34, pp. 2577–2586.
- Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H. and Karimian, N. (2009) Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighing Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters. *Research Journal of Biological Sciences*, Vol. 4, No. 1, pp. 93-102.
- Zhu, A.X. (1997) A Similarity Model for Representing Soil Spatial Information. *Geoderma*, Vol. 77, pp. 217– 242.

Annexe - I

Carte du niveau piézométrique de la nappe phréatique du Tadla en 2005 d'après l'ORMVAT (Source : <http://ormvatadla.com>)

