

# Approche géomorpho-pédologique et système d'information géographique (sig) pour la gestion des terres au Maroc

M. Loukili<sup>(1)</sup>, L. Bock<sup>(2)</sup>, P. Engels<sup>(2)</sup> et L. Mathieu<sup>(2)</sup>

(1) Ecole Nationale d'Agriculture, Département des Sciences du Sol. BP S/40 Meknès, MAROC.

(2) Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques, Unité de Géopédologie, 27 Avenue Maréchal Juin, 5030 Gembloux. Belgique.

## RÉSUMÉ

Un SIG est un outil informatique qui permet la saisie, le traitement et l'analyse d'informations diverses spatialement référencées. Il offre des possibilités d'analyse dynamique (confrontation et suivi) de ces informations. C'est pour cela qu'un SIG peut être mis en œuvre comme outil d'aide à la décision dans le cadre de la gestion durable des ressources naturelles. En fonction de cet objectif, un système de référence a été constitué à l'aide du logiciel ILWIS, en utilisant les données relatives aux sols d'un périmètre cartographié selon une approche à caractère géomorpho-pédologique et situé dans la plaine du Tadla (Maroc central). Le croisement entre les données physico-chimiques des terres et les unités de sols délimitées sur la carte, support fondamental du système de référence ainsi construit, démontre l'importance de ce dernier dans l'analyse des relations spatiales entre les différentes caractéristiques édaphiques. Il permet en outre la réalisation à la demande, des cartes thématiques. Ces dernières sont utiles pour la gestion et l'aménagement des terres, notamment en ce qui concerne l'évaluation de leurs aptitudes, l'amélioration et la gestion de leur fertilité et leur affectation en fonction de celle-ci.

## Mots clés

Maroc, géomorpho-pédologie, SIG, thématisme, évaluation des terres.

## SUMMARY

### GEOMORPHO-PEDOLOGY AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS) FOR LAND MANAGEMENT.

A GIS is a computer tool for storage, processing and analysis of various spatially referenced data. It allows the dynamic analysis (matching and updating) of this information. This is why, a GIS can be used as an efficient tool for decision making in natural resource management. Within this context, a reference system is built up using ILWIS from soil data collected in a study area, mapped according to geomorpho-pedological approach and located in the plain of Tadla (Central Morocco). Combining physico-chemical data and land units of the map which is a fundamental component of our reference system, justifies the importance of the GIS in the analysis of spatial relationships between different soil characteristics and also in the production of the thematic maps to order. These maps are useful

for land management especially with regard to suitability evaluation, fertility management and use of land adapted to environment conditions.

**Key-words**

Morocco, geomorpho-pedology, GIS, thematic maps, land evaluation.

**RESUMEN**

**ENFOQUE GEOMORFO-PEDOLÓGICO Y SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (SIG) PARA LA GESTIÓN DE LAS TIERRAS**

Un SIG es una herramienta informática que permite la toma, el tratamiento y el análisis de varias informaciones espacialmente referenciadas. Ofrece posibilidades de análisis dinámica (confrontación y seguimiento) de estas informaciones. Es por eso que un SIG puede ser usado como herramienta de ayuda a la decisión en el cuadro de la gestión sostenible de los recursos naturales. En función de este objetivo, un sistema de referencia fue constituido con ayuda del programa ILWIS, utilizando los datos relativos a los suelos de un perímetro mapeado según un enfoque geomorfo-pedológico y localizado en la planicie de Tadla (Marruecos central). El cruce entre los datos físico-químicos de las tierras y las unidades de suelos delimitadas sobre el mapa, soporte fundamental del sistema de referencia así construido, muestra su importancia en el análisis de las relaciones espaciales entre las diferentes características edáficas. Permite además la realización, según la demanda, de mapas temáticos. Estos últimos son útiles para la gestión y la ordenación de las tierras, especialmente en lo que concierne a la evaluación de sus aptitudes, el mejoramiento y la gestión de su fertilidad y su afectación.

**Palabras claves**

Marruecos, geomorfo-pedología, tematización, evaluación de las tierras.

**L**e développement rapide des outils informatiques au cours des dernières décennies notamment des Systèmes d'Information Géographique (SIG) a ouvert des possibilités très intéressantes pour une gestion rationnelle et conviviale des données géographiques de sources diverses. En effet, le SIG en permettant le stockage, l'analyse et le traitement d'informations géoréférencées, la réalisation rapide de cartes mono ou pluri-thématiques, le croisement de données et des couches d'information, s'impose désormais comme un outil d'aide à la prise de décision dans la recherche, la planification et l'aménagement du territoire.

L'intérêt de l'informatique et des SIG dans le domaine de la pédologie a été souligné entre autres par King (1986), Burrough (1989), FAO (1989), Girard *et al.* (1989), Faure (1986 ; 1989), Legros et Nortcliff (1990), Flasse *et al.* (1991), Favrot et Lagacherie (1993), Jamagne (1993), Jamagne *et al.* (1993), Engels *et al.* (1993), Van Orsoven *et al.* (1993), Jamagne *et al.* (1995), Cam *et al.* (1996), Walter *et al.* (1997), Schvartz *et al.* (1997) et Kollias *et al.* (1999). De plus, avec le développement des moyens informatiques en matière de gestion des données spatiales, les documents cartographiques classiques sont apparus progressivement trop statiques, constituant des états des lieux trop figés (Jamagne, 1993).

L'objectif de cet article vise la mise au point et l'exploitation d'un système de référence intégrant les données recueillies par une cartographie des sols effectuée en 1986 à une grande échelle (1/5 000), selon l'approche géomorpho-pédologique, sur une superficie de 5 058 ha dans un périmètre de mise en valeur situé dans la plaine du Tadla, zone d'action de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla (ORMVAT).

L'objectif de cette étude est donc d'ordre méthodologique et porte sur la mise au point de méthodes d'acquisition, de structuration et de hiérarchisation, de traitement, de croisement des données pédologiques à l'aide d'un SIG. Son originalité réside dans l'analyse et l'exploitation de l'information spatiale d'une carte géomorpho-pédologique pour la réalisation de cartes thématiques et notamment la carte de l'évaluation des terres pour l'irrigation.

Le cadre physique de la plaine du Tadla est d'abord présenté en tenant compte des facteurs qui caractérisent les milieux de pédogenèse tant au niveau de la région qu'au niveau de la station, puis sont commentées les données acquises par la cartographie des sols du périmètre de mise en valeur. Ensuite sont justifiées d'abord la constitution du système de référence, puis son utilité, ses apports comme outil au service des responsables de la mise en valeur, de la gestion et de l'aménagement du périmètre, avec à l'appui de la démonstration, des exemples de cartes dérivées monothématiques et plurithématiques (carte de l'évaluation des terres par exemple).

## CADRE PHYSIQUE DE LA PLAINE DU TADLA

La plaine du Tadla dans laquelle s'inscrit le périmètre étudié, s'étend sur une vaste dépression synclinale orientée WNW-ESE (*figure 1*). L'altitude moyenne est de 400 m. Dans ce paysage généralement monotone, les pentes sont très faibles (1 à 3 pour mille). Elle est bordée au Nord par le Plateau des phosphates auquel elle se raccorde par des pentes très douces. Par contre au sud, le massif du Moyen atlas la surplombe vigoureusement avec ses lignes de crêtes qui culminent à plus de 1 600 m.

Dans la majeure partie de la plaine, le climat est aride. Les pluies sont faibles (300 mm par an en moyenne), fortement irrégulières et réparties en un petit nombre de jours. L'été, la température dépasse 40 °C, provoquant ainsi une forte évaporation. L'Oum er Rbia, l'unique oued à écoulement régulier de la région, coule dans l'axe de la plaine selon une direction générale E-W. Il y sépare deux périmètres en grande partie irrigués. L'un en rive droite dénommé les Béni Amir, irrigué par ses eaux, l'autre en rive gauche dénommé les Béni Moussa, irrigué par les eaux accumulées par le barrage de Bin el Ouidane. Ce dernier est construit sur l'oued El Abid dont les eaux comme celles de l'Oum er Rbia proviennent du Moyen Atlas (*figure 1*).

La plaine du Tadla est en fait une dépression en subsidence située à l'Ouest des rides anticlinales atlasiques et comblée par les dépôts du Néogène et du Quaternaire (Beaudet *et al.*, 1967; Etienne et Guessab, 1975 ; Rolley, 1978). Les dépôts de ce dernier, affleurent partout et constituent les roches mères des sols.

## CARACTÉRISATION GÉOMORPHO-PÉDOLOGIQUE DU PÉRIMÈTRE ÉTUDIÉ

Les fondements de l'approche géomorpho-pédologique ont été présentées par Tricart dès 1968 (Tricart, 1974) puis utilisée par les pédologues de l'Institut des Recherches en Agronomie Tropicale (IRAT), entre autres Kilian (1974) et Raunet (1974). Mathieu (1977) et Bock (1983) ont également démontré son utilité et la pertinence de ses fondements pour la cartographie des sols en Afrique du Nord. Cette démarche est basée sur le fait que le modelé est un élément majeur de structuration du paysage agraire. En associant les notions d'espace et de temps, cette méthode procède du général au particulier, conçoit le paysage comme un ensemble de structures emboîtées interdépendantes, les plus grandes incluant et expliquant les plus petites (Bertrand *et al.*, 1985). En prenant en considération le facteur temps, elle a aussi le mérite de permettre la reconstitution chronologique des faits permettant ainsi de discerner ce qui est hérité de ce qui est récent, actuel.

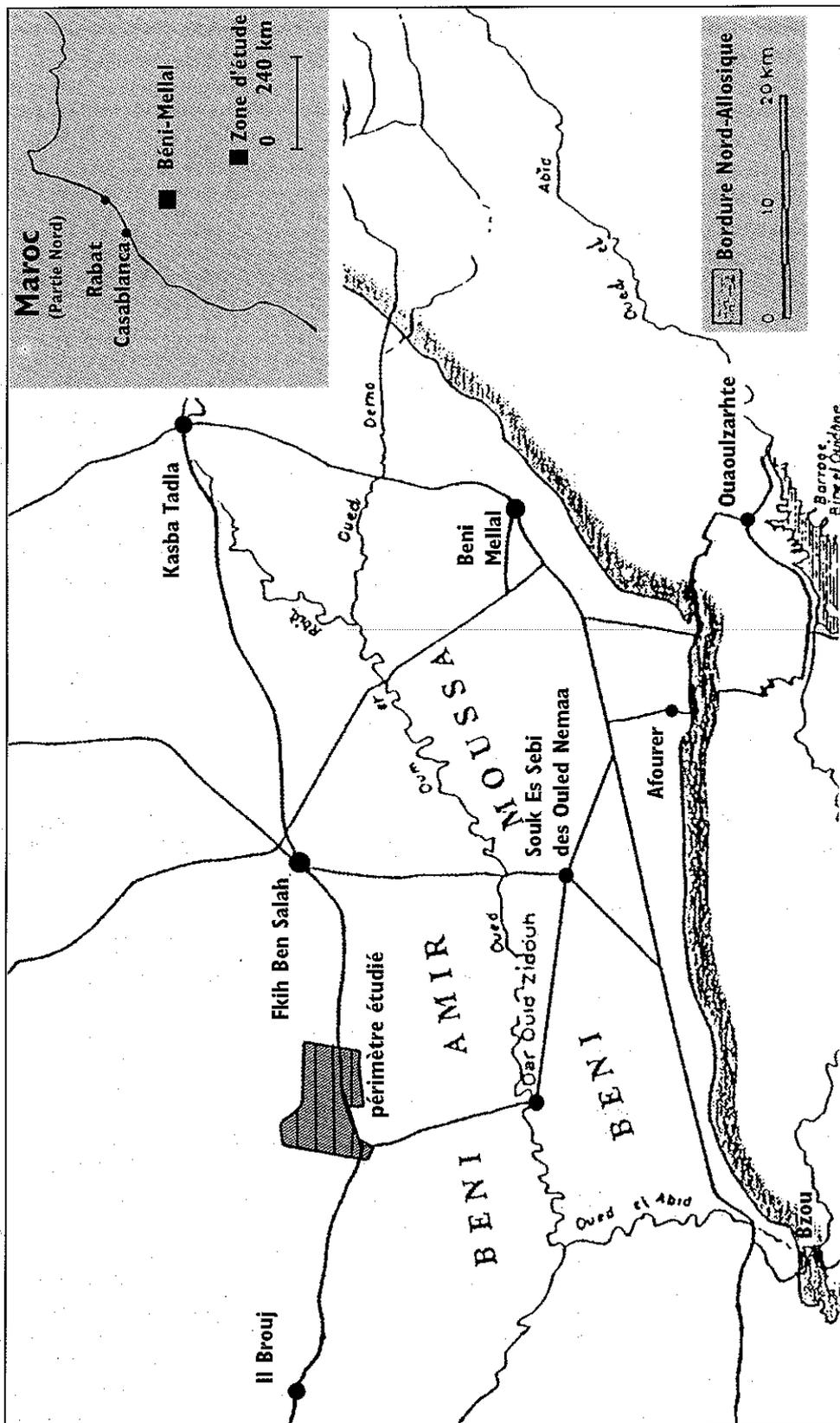


Figure 1 - Localisation du périmètre étudié

Figure 1 - Localization of the studied area

Ce sont en effet les lois géomorphologiques qui régissent la répartition des sols et il y a souvent une liaison étroite entre la nature et la forme du dépôt constituant le substrat, son âge relatif et la typologie des sols qui s'y développent. L'approche géomorpho-pédologique repose sur la connaissance des faits d'interrelation entre les différents facteurs du milieu (climat, relief, régime hydrique, matériaux en place) dont l'analyse permet d'établir le bilan morphogénèse-pédogénèse et ainsi situer le sol dans son cadre spatio-temporel (Kilian, 1974 ; Tricart, 1974).

Les travaux de prospection et de cartographie des sols du périmètre étudié (ORMVAT, 1986) ont été effectués selon les principes de géomorpho-pédologie évoquée plus haut. Bien que la cartographie du dit périmètre soit à grande échelle, permettant ainsi de délimiter avec facilité et grande précision toutes les unités cartographiques de sols, le recours à cette approche a permis, tout en intégrant le périmètre dans son contexte régional, géologique, géomorphologique et climatique et en décelant les relations entre l'amont et l'aval (glacis-plaine), une compréhension rapide du milieu de morphogénèse et un gain de temps

considérable dans la définition et la délimitation des unités pédologiques (Loukili, 1994).

**Relief**

La topographie du périmètre étudié est monotone, son modelé est presque plan, surtout dans la partie centrale. Les altitudes y sont comprises entre 434 m au Nord-Ouest et 399 m au Sud. La pente générale est très faible (0,4 %).

**Climat**

La pluviométrie annuelle moyenne est de 330 mm. Le mois le plus pluvieux est décembre et un maximum secondaire est enregistré en mars (figure 2). Le minimum de température est enregistré en janvier et le maximum en juillet. Le climat du périmètre, caractérisé par des précipitations faibles et des températures élevées, est de type méditerranéen aride à hiver tempéré. La végétation naturelle y a disparu et les sols sont souvent utilisés pour des cultures de céréales (blé et orge) dont les rendements sont fortement tributaires de la pluviométrie.

**Géologie-géomorphologie**

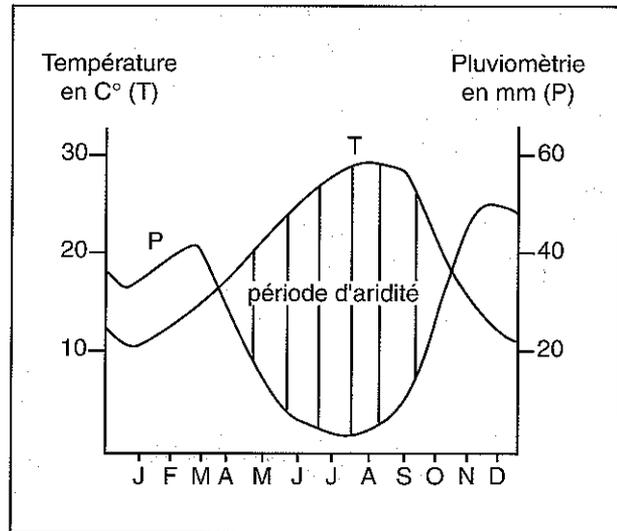
L'échelle chronostratigraphique utilisée pour désigner les niveaux et les formations du Quaternaire marocain caractérisant les unités géomorpho-pédologiques (figure 3) est celle qui a été proposée en 1956 par Choubert *et al* (Mathieu, 1977 ; Bock, 1983) et, nous devons le signaler, qui a été critiquée par certains auteurs (Lefèvre, 1989), notamment en raison des imprécisions liées surtout à l'attribution des étages. Si nous y avons eu recours, c'est parce que nous avons pu constater son adéquation pour le terrain d'étude où elle s'est avérée être un bon fil conducteur, un bon cadre de réflexion et d'hypothèse de travail pour situer, délimiter, les unités constitutives du modelé et supports des sols.

**Les formes et leurs formations superficielles quaternaires corrélatives identifiées dans le périmètre.**

Le périmètre situé en position de piedmont Sud par rapport au plateau des phosphates, a reçu les épandages de matériaux qui en provenaient en périodes d'instabilité au cours du Quaternaire. Sur cette bordure méridionale à 1,5 km environ du périmètre d'étude, affleurent les calcaires durs de l'Eo-Crétacé qui constituent une part du substratum. Les formations du Quaternaire se sont mises en place selon une direction Nord-Sud, par dessus du calcaire lacustre (Bock, 1993) généralement attribué au Plio-Villafranchien par les géologues de la carte. Des affleurements de ce dernier sont perceptibles au Sud du périmètre où ils constituent une barrière en bordure de l'Oum er Rbia qui les a incisés.

Nous présentons ci-après, en partant du Quaternaire ancien vers le Quaternaire récent et l'Holocène, selon l'échelle chronostratigraphique ci-dessus mentionnée, les formes et les

**Figure 2 - Diagramme ombrothermique d'El Brouj**  
**Figure 2 - Ombrothermal diagram of El Brouj**



formations superficielles qui leur sont corrélatives, identifiées dans le périmètre de mise en valeur, objet de notre étude. Celles-ci constituant le matériau parental des sols, ont été caractérisées par leur morphologie, leur nature lithologique, par certaines propriétés physico-chimiques des sols comme la texture, la couleur, présence et formes d'accumulations calcaires. La documentation géologique disponible et les travaux antérieurement réalisés dans le Tadla (Missante, 1963 ; Choubert *et al.*, 1977 ; Salvan *et al.*, 1972) ont été également utilisés à cet effet.

**Salétien**

Les glacis salétiens sont caractérisés par la présence d'une formation d'argile rouge à silex décarbonatée appartenant au Quaternaire le plus ancien. Il s'agit d'une argile riche en éléments détritiques (galets siliceux et quartzitiques émoussés), qui a été rubéfiée préalablement à sa mise en place.

**Amirien**

Cet étage s'étend sur la majeure partie du périmètre. Il se présente sous deux faciès corrélatifs de deux formes constitutives du modelé :

1- **Les cônes de déjection** (Amirien II de la figure 3) situés dans la moitié orientale du périmètre, formés des matériaux remaniés de l'argile à silex des glacis salétiens dont l'extension est importante vers le Nord. Généralement, la faible charge caillouteuse et la couleur brun rougeâtre de ces matériaux permettent de les distinguer des dépôts salétiens qui les surplombent à peine à l'Ouest.

2- Les hautes terrasses (Amirien I de la figure 3) dont l'extension est maximale dans la partie centrale du périmètre, sont formées de limons plus ou moins rubéfiés (limons roses) à accumulations calcaires.

Il est à signaler que la numérotation Amirien I et II est purement circonstancielle. Elle est utilisée uniquement pour distinguer les deux faciès de la formation corrélatrice de l'Amirien.

#### Soltanien

Ce sont les limons rouges supérieurs localisés dans les vallons à fond plat ou chenaux peu prononcés et anastomosés qui ont incisé les cônes de déjections amiriens dans la partie orientale du périmètre et y constituent cet étage.

#### Rharbien

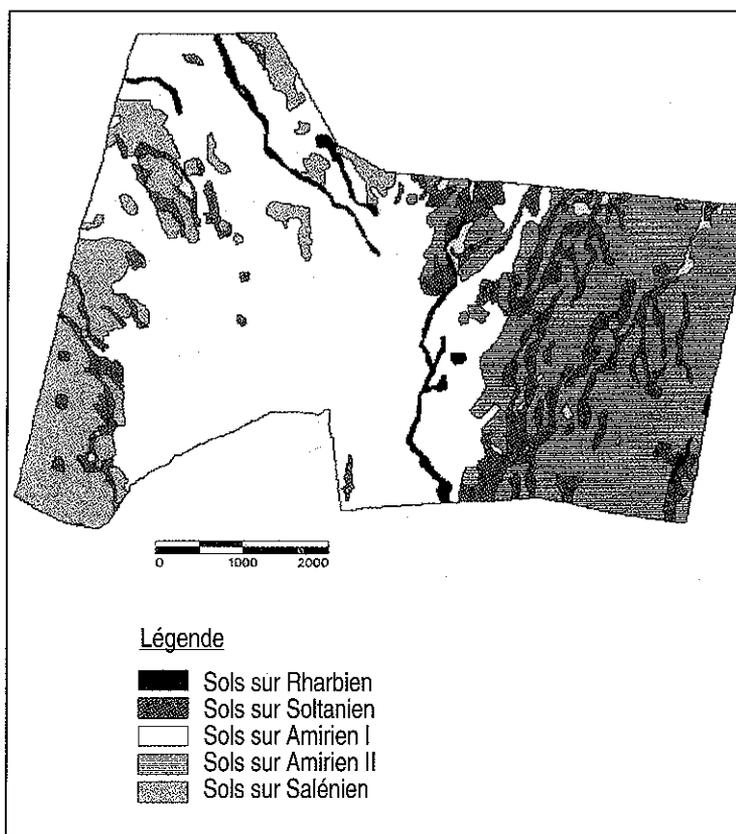
Dans le périmètre, le Rharbien (l'Holocène) est matérialisé par des alluvions limoneuses peu graveleuses et peu calcaires, de très faible extension, localisées le long des axes d'écoulements actuels.

Il est à noter que l'étage tensiftien, le plus souvent caractérisé par la présence d'une croûte calcaire constituée de feuillets d'une dizaine de centimètres d'épaisseur, souvent constaté dans les étagements de glacis de piedmonts sous des climats analogues à ceux du Tadla, n'a pas été observé dans le périmètre.

### Les types de sols corrélatifs des formes et formations superficielles quaternaires majeures du périmètre

Selon la classification française (CPCS) de 1967, les sols du périmètre se rangent essentiellement dans la classe des sols isohumiques et la classe des sols fersiallitiques. Les 26 unités cartographiques de la carte pédologique établie au 1/5 000 puis éditée au 1/20 000 (ORMVAT, 1986; Loukili, 1994) peuvent être regroupées sur la base des critères déterminants tels que la forme, la nature des formations superficielles et les traits pédogénétiques des sols qui s'y développent en cinq unités géomorpho-pédologiques majeures (figure 3). Cette dernière carte permet une vision et une exploitation synthétique de la carte pédologique tout en mettant en relief, la liaison étroite existant entre les formes du terrain, les sols et leurs roches mères ainsi que leurs âges relatifs. En outre, elle constitue la référence de base (sols-faciès) pour la confrontation avec les cartes thématiques (voir ci-dessus). Les caractéristiques des unités géomorpho-pédologiques précitées sont les suivantes :

Figure 3 - Carte des principales unités géomorpho-pédologiques  
Figure 3 - Map of the main geomorpho-pedologic units



#### Sols sur Amirien II et Salétien

Ce sont des sols fersiallitiques à caractère isohumique: Ces sols, rubéfiés sont polycycliques et montrent une nette surimposition de la pédogenèse isohumique récente à l'ancienne pédogenèse fersiallitique. Ils se sont développés sur l'argile à silex salétienne des glacis et amirienne des cônes de déjection reposant toujours sur une dalle calcaire. L'épaisseur de ces dépôts est variable, mais les sols profonds sont dominants. Localement, sous l'effet de l'érosion, l'épaisseur des dépôts devient mince et la dalle calcaire se trouve à faible profondeur et peut même affleurer à la surface des sols. Ces derniers, quelle que soit leur profondeur, sont décarbonatés. Les cailloux et graviers siliceux présents à la surface et au sein des sols montrent des concentrations variables. Le profil P1 (figure 4), ci-dessous décrit est représentatif de ces sols:

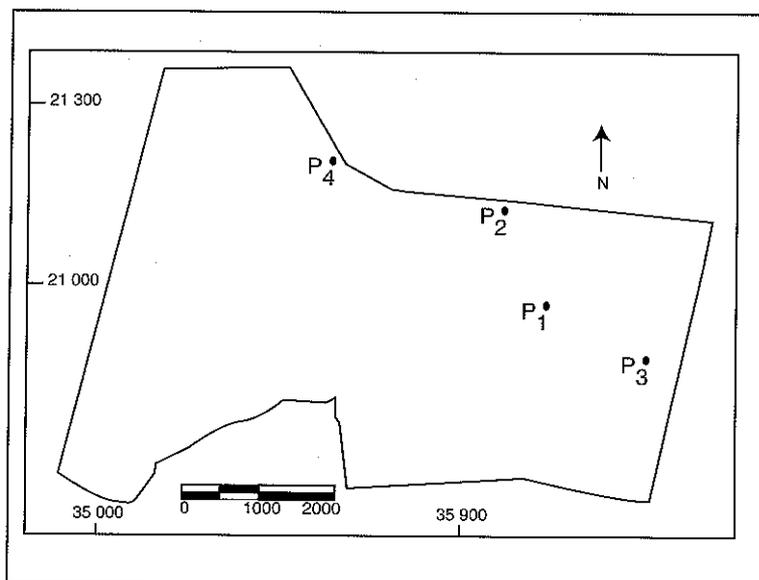
##### Description du profil P1

0 - 13 cm: Sec. Couleur à l'état humide 5 YR 3/4 (brun-rougeâtre foncé). Texture limono-sableuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette, très fine à fine. Aucune effervescence. 15 à 30 % de graviers siliceux, très peu de cailloux. Consistance fragile. Cohésion faible. Porosité forte. Activité biologique forte. Nombreuses racines fines. Transition distincte, régulière.

13 - 40 cm: Sec. Couleur à l'état humide 5 YR 3,5/4 (brun-rougeâtre à brun-

**Figure 4** - Localisation des profils représentatifs des principales unités géomorpho-pédologiques

**Figure 4** - Localization of the representative profiles of the main geomorpho-pedologic units



rougeâtre foncé). Texture limono-sableuse à limono-argilo-sableuse. Structure polyédrique subangulaire nette, fine à moyenne. Aucune effervescence. 5 à 10 % de graviers siliceux. Consistance non fragile. Cohésion forte. Porosité moyenne. Activité biologique forte. Racines fines. Transition distincte, régulière.

40 - 65 cm : Sec. Couleur à l'état humide 2,5 YR 4/5 (brun-rougeâtre à rouge). Texture argileuse à limono-argileuse. Structure polyédrique subangulaire nette, fine à moyenne. Aucune effervescence. 15 à 30 % de graviers siliceux. Consistance non fragile. Cohésion forte. Porosité moyenne. Activité biologique forte. Racines fines. Transition distincte, régulière.

65 - 110 cm : Sec. Couleur à l'état humide 2,5 YR 4/8 (rouge). Texture argileuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette à nette, fine. Aucune effervescence. 50 à 60 % de graviers et cailloux siliceux. Consistance non fragile. Cohésion forte à très forte. Porosité moyenne à faible. Activité biologique moyenne. Quelques racines fines. Transition nette régulière.

110 cm et plus : dalle calcaire moufouyenne, lapiézée.

### Sols sur Amirien I

Les sols largement dominants sont des sols bruns isohumiques subtropicaux. Ils sont plus répandus sur les limons amiriens. Leur horizon de surface est peu calcaire et les carbonates y sont présents sous forme diffuse et pseudomycélium. Par contre en profondeur, l'accumulation calcaire est toujours présente sous forme d'amas, granules et nodules. Localement, on rencontre des encroûtements calcaires riches en granules, nodules et rognons qui apparaissent à 35 cm de profondeur. Le profil P2 (figure 4), ci-dessous décrit, est représentatif des sols sur les limons roses amiriens. Il s'agit donc d'un sol brun isohumique subtropical modal.

### Description du profil P2 :

0 - 10 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 5 YR 3/3 (brun-rougeâtre foncé). Texture limoneuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette, très fine à fine. Faible effervescence, carbonates sous forme diffuse. Moins de 1 % de graviers siliceux. Consistance fragile à très fragile. Cohésion faible à moyenne. Porosité forte. Activité biologique forte. Nombreuses racines fines. Transition distincte, régulière.

10 - 40 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 7,5 YR 3/4 (brun foncé). Texture limono-argileuse. Structure polyédrique subangulaire nette, fine. Vive effervescence, présence de carbonates sous forme diffuse, de pseudomycéliums et de granules et nodules (5 %). Moins de 1 % de graviers siliceux. Consistance moyenne à forte. Cohésion moyenne à forte. Porosité moyenne. Activité biologique moyenne à forte. Racines fines. Transition distincte à nette, régulière.

40 - 80 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 5 YR 5/6 (rouge-jaunâtre). Texture limono-argileuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette à nette, fine. Vive effervescence, présence de carbonates sous forme de granules et nodules (30-50 %). Consistance peu fragile. Cohésion moyenne à forte. Porosité moyenne. Activité biologique moyenne à forte. Racines fines. Transition graduelle, régulière.

80 - 130 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 5 YR 5/7 (rouge-jaunâtre). Texture limoneuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette, très fine à fine. Vive effervescence, présence de carbonates sous forme de granules et nodules (15 à 40 %). Consistance peu fragile. Cohésion moyenne à forte. Porosité moyenne. Activité biologique moyenne. Quelques racines fines.

### Sols sur Soltanien

Ce sont des sols châtaîns isohumiques, à horizon de surface épais et toujours décarbonaté. Ils présentent en profondeur une accumulation calcaire discontinue sous forme d'amas, granules et parfois des nodules, et qui peut former localement des encroûtements calcaires apparaissant à des profondeurs variables mais toujours au-delà de 40 cm de profondeur. Le profil P3 (figure 4), ci-dessous décrit est représentatif des sols sur limons rouges soltaniens à encroûtement calcaire en profondeur.

### Description du profil P3

0 - 10 cm : Sec. Couleur à l'état humide 5 YR

3/3 (brun-rougeâtre foncé). Texture limono-argileuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette avec des éléments non agrégés, très fine. Aucune effervescence. 2 à 5 % de graviers siliceux. Consistance fragile. Cohésion faible. Porosité forte. Activité biologique forte. Nombreuses racines fines. Transition distincte, régulière.

10 - 45 cm : Sec. Couleur à l'état humide 5 YR 3/3 (brun rougeâtre foncé). Texture argileuse. Structure prismatique nette à très nette, moyenne. Aucune effervescence. 2 à 5 % de graviers siliceux. Consistance non fragile. Cohésion forte. Porosité moyenne. Activité biologique forte. Racines fines et moyennes. Transition graduelle, régulière.

45 - 65 cm : Sec. Couleur à l'état humide 5 YR 4/4 (brun rougeâtre). Texture argileuse. Structure polyédrique subangulaire nette, fine à moyenne. Aucune effervescence. 2 à 5 % de graviers siliceux. Consistance non fragile. Cohésion forte à très forte. Porosité moyenne. Activité biologique forte. Racines fines. Transition graduelle, régulière.

65 - 80 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 2,5 YR 4/6 (rouge). Texture argileuse. Structure polyédrique subangulaire nette, fine à moyenne. Effervescence, présence de carbonates sous forme diffuse, de pseudomycéliums. 2 à 5 % de graviers siliceux. Consistance non fragile. Cohésion forte. Porosité moyenne. Activité biologique forte. Racines fines. Transition graduelle, régulière.

80 - 125 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 2,5 YR 5/6 (rouge). Texture limono-argileuse. Structure polyédrique subangulaire nette, fine. Vive effervescence, encroûtement calcaire granulo-nodulaire. 2 à 5 % de graviers siliceux. Consistance non fragile. Cohésion forte. Porosité moyenne. Activité biologique moyenne. Quelques racines fines. Transition nette, régulière.

125 et plus : Plus de 50 % de cailloux à enrobements calcaires.

### **Sols sur Rharbien**

Il s'agit de sols isohumiques peu développés et faiblement calcaires. Ils sont formés sur des alluvions qui sont généralement des remaniements des matériaux précédents. Le profil P4 (figure 4), ci-dessous décrit est représentatif de ces sols. Il s'agit d'un sol brun isohumique peu développé.

#### **Description du profil P4 :**

0 - 15 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 5 YR 3/4 (brun-rougeâtre foncé). Texture limoneuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette, très fine à fine. Faible effervescence. Présence de carbonates surtout sous forme diffuse et quelques granules calcaires. Consistance fragile. Cohésion faible. Porosité forte. Activité biologique forte. Racines fines. Transition distincte, régulière.

15 - 30 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 5 YR 3/3 (brun-rougeâtre foncé). Texture limono-argileuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette à nette, moyenne. Faible

effervescence. Présence de carbonates sous forme diffuse et de pseudomycéliums. Consistance peu fragile. Cohésion moyenne. Porosité moyenne. Activité biologique moyenne à forte. Racines fines. Transition distincte à nette, régulière.

30 - 60 cm : Sec. Couleur à l'état humide 2,5 YR 4/6 (rouge). Texture limono-argileuse. Structure polyédrique subangulaire nette, fine. Faible à vive effervescence. Quelques taches et granules calcaires. Consistance peu fragile à fragile. Cohésion moyenne à forte. Porosité moyenne. Activité biologique moyenne. Quelques racines fines. Transition distincte, régulière.

60 - 90 cm : Sec. Couleur à l'état humide 2,5 YR 4/6 (rouge). Texture argileuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette à nette, moyenne. Faible à vive effervescence. Quelques taches et granules calcaires. Consistance peu fragile. Cohésion forte. Porosité moyenne. Activité biologique moyenne à faible. Quelques racines fines. Transition distincte, régulière.

90 - 120 cm : Sec. Couleur à l'état humide, 2,5 YR 4/6 (rouge). Texture argileuse. Structure polyédrique subangulaire peu nette, fine. Faible à vive effervescence. Quelques taches et granules calcaires. Consistance peu fragile. Cohésion forte. Porosité moyenne. Activité biologique faible. Quelques racines fines. Transition distincte, régulière.

## **ÉTABLISSEMENT D'UN SYSTÈME DE RÉFÉRENCE SUR LES SOLS DU PÉRIMÈTRE**

### **Élaboration du système de référence**

En vue de sa gestion informatique, l'information de base de la carte pédologique apparaissant sous ses deux aspects (Faure, 1989) complémentaires et indissociables (géographique et attributive) est introduite dans le système. Les traitements et analyses cartographiques de cette information de base passent par la saisie de ses deux composantes. Le logiciel qui a essentiellement été utilisé est le logiciel ILWIS (Integrated Land and Water Information System) de l'ITC (ITC, 1991 ; 1992).

### **Base de données géographiques**

#### **Digitalisation de la carte pédologique**

Il s'agit de la carte pédologique à l'échelle du 1/20 000, qui a été digitalisée puis rastérisée. Elle constitue le support fondamental de l'information d'ordre géomorpho-pédologique sur les formes et formations superficielles quaternaires, et les sols qui leur sont associés.

#### **Digitalisation de la carte topographique**

Il s'agit de la carte topographique du périmètre à l'échelle

du 1/20 000. Les courbes sont équidistantes d'un mètre. Elle sert de document de base pour la réalisation automatique du modèle numérique du terrain (MNT) dont l'un des produits dérivés est la carte des pentes.

### **Base de données attributives**

Il s'agit de l'ensemble des informations décrivant et hiérarchisant le contenu des unités cartographiques du périmètre étudié. Ce sont principalement des informations relatives à la caractérisation des unités de la carte pédologique au 1/20 000, comprenant les descriptions morphologiques et les déterminations physico-chimiques des profils qui caractérisent ces unités. Ces données ont été encodées pour tous les horizons des 405 profils, et correspondent d'un côté, aux déterminations de texture (684 analyses), pH (1370 analyses), calcaire total (1370 analyses), calcaire actif (538 analyses), matière organique (1370 analyses), salinité (1370 analyses) et alcalinité, et de l'autre côté, aux caractéristiques de profondeur, perméabilité (59 stations pour la mesure de l'infiltration verticale selon Müntz) et de charge caillouteuse (pierrosité à la surface et au sein des 405 profils). Toutes ces données ont été organisées en bases de données grâce au logiciel précité, où des traitements statistiques et des opérations de sélection, seuillage et combinaisons peuvent être facilement effectués pour la réalisation des cartes thématiques.

## **Thématisation**

### **Nécessite et utilité des cartes thématiques**

En matière d'exploitation des cartes pédologiques, la thématisation fournit une réponse spatiale à une question posée par l'utilisateur. Les cartes thématiques sont de différents types et on distingue les cartes thématiques monofactorielles, plurifactorielles, et les cartes thématiques dérivées (Girard *et al.*, 1989). En effet, les utilisateurs demandent souvent des documents thématiques spécifiques en matière d'aménagement et de gestion des sols pour des études d'impact, pour le conseil de fertilisation chimique, pour le choix et l'installation des cultures, etc.

### **Réalisation des cartes thématiques nécessaires à l'aménagement et à la gestion des sols.**

Avant de présenter et discuter les résultats obtenus, il faut toutefois signaler que la conversion de la carte digitale du mode vectoriel en mode raster, est souvent une source d'erreurs directement liées à la taille du pixel (Ngongo *et al.*, 1993). Ces erreurs se rapportent surtout à la position exacte des objets et aux calculs des surfaces (Burrough, 1989). Les erreurs sont aussi liées aux cartes thématiques obtenues par combinaison d'autres cartes en utilisant les opérateurs de la logique Booléenne (Gerard *et al.*, 1993). Dans notre cas, l'erreur sur la surface totale du périmètre due à la rasterisation de la carte digitale pédologique au 1/20 000, avec une taille du

pixel de 16,925 m. est très faible et reste inférieure à 0,1 % (Loukili, 1994).

Les cartes thématiques peuvent être rapidement obtenues par le croisement entre les unités de la carte pédologique et leurs caractéristiques physico-chimiques stockées dans la base de données. La *figure 5* montre les principales étapes poursuivies pour la réalisation des cartes thématiques à l'aide du logiciel utilisé. La carte thématique donnant la répartition des teneurs moyennes en calcaire total dans les horizons de surface (0 - 40 cm) est présentée à titre d'exemple (*figure 6*). En effet, d'autres cartes thématiques peuvent être réalisées à volonté, puisque avec l'outil informatique les possibilités de choix et de combinaisons entre les thèmes sont grandes.

Confrontée à la carte géomorpho-pédologique (*figure 3*), elle permet de constater que les sols fersiallitiques à caractère isohumique sur Salétien et Amirien II et les sols châtaîns sur Soltanien sont décarbonatés en surface. Par contre les sols bruns isohumiques sur Amirien I sont relativement plus calcaires que les sols isohumiques jeunes sur Rharbien. Les encroûtements calcaires quant à eux apparaissent sous forme de taches isolées au sein la grande plage des limons roses amiriens.

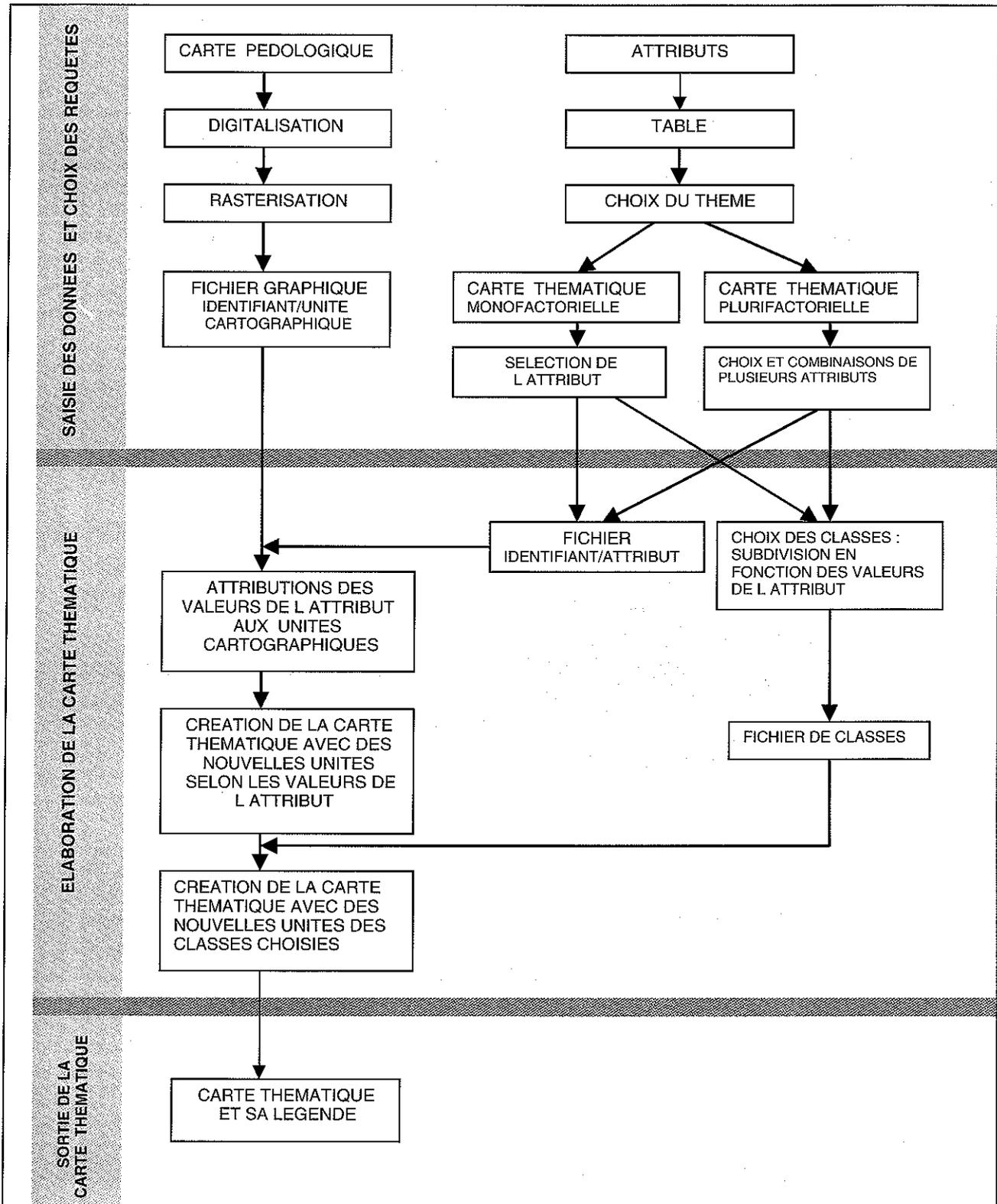
## **MODÉLISATION DE L'ÉVALUATION DES TERRES EN VUE DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE A L'AIDE DU LOGICIEL ILWIS**

Le but de l'évaluation des terres est de fournir des informations suffisantes sur la nature et l'intensité des contraintes liées à leur utilisation. Ces contraintes, quand elles existent, peuvent être de natures différentes notamment : climatiques, topographiques, physiques ou chimiques. Leur connaissance est capitale pour élaborer des plans d'aménagement pour la mise en valeur des terres.

L'évaluation consiste, sur la base des caractéristiques internes et externes du sol recueillies lors de la cartographie, à classer les terres dans des classes d'aptitude dont le principe et la méthodologie dépendent du système ou de la méthode d'évaluation adoptés. Les méthodes couramment utilisées pour l'évaluation des terres sont le système LCCS (Land Capability Classification System) de l'USDA (Klingebiel, Montgomery, 1961), les méthodes paramétriques (McRae et Burnham, 1981 ; Sys *et al.*, 1991a et 1991b) et la méthode FAO (FAO, 1976 ; FAO, 1979 ; FAO, 1983). L'établissement des cartes d'évaluation des terres exige la manipulation et l'analyse d'une multitude de données. Par la méthode classique, la réalisation de ces cartes demandait beaucoup de temps, alors qu'actuellement, à l'aide des systèmes d'information géographique, elle est rapide.

Figure 5 - Etapes suivies pour la réalisation des cartes thématiques à l'aide d'ILWIS, inspirées de Faure (1989).

Figure 5 - Followed steps for the realization of the thematic maps, adapted from Faure (1989).



Le logiciel ALES (Automated Land Evaluation System) (Rossister, Van Wambeke, 1993) permet de créer des systèmes experts en matière d'évaluation des terres conformément à la méthode FAO (FAO, 1976). La théorie des ensembles flous proposée par Zadeh (1965), approche basée sur le principe de la fonction d'appartenance de la variable étudiée à une classe donnée est aussi utilisée pour la détermination des indices et les classes d'aptitude des terres (Tang et Van Ranst, 1992). Burrough *et al.*(1992) l'ont utilisé pour l'évaluation des terres en tenant compte de l'étude des profils pédologiques et de la topographie. Kollias *et al.* (1999), en citant en plus le concept de cette théorie proposé plus tard par Zadeh (1978), discutent son apport en matière de cartographie des sols en utilisant le SIG.

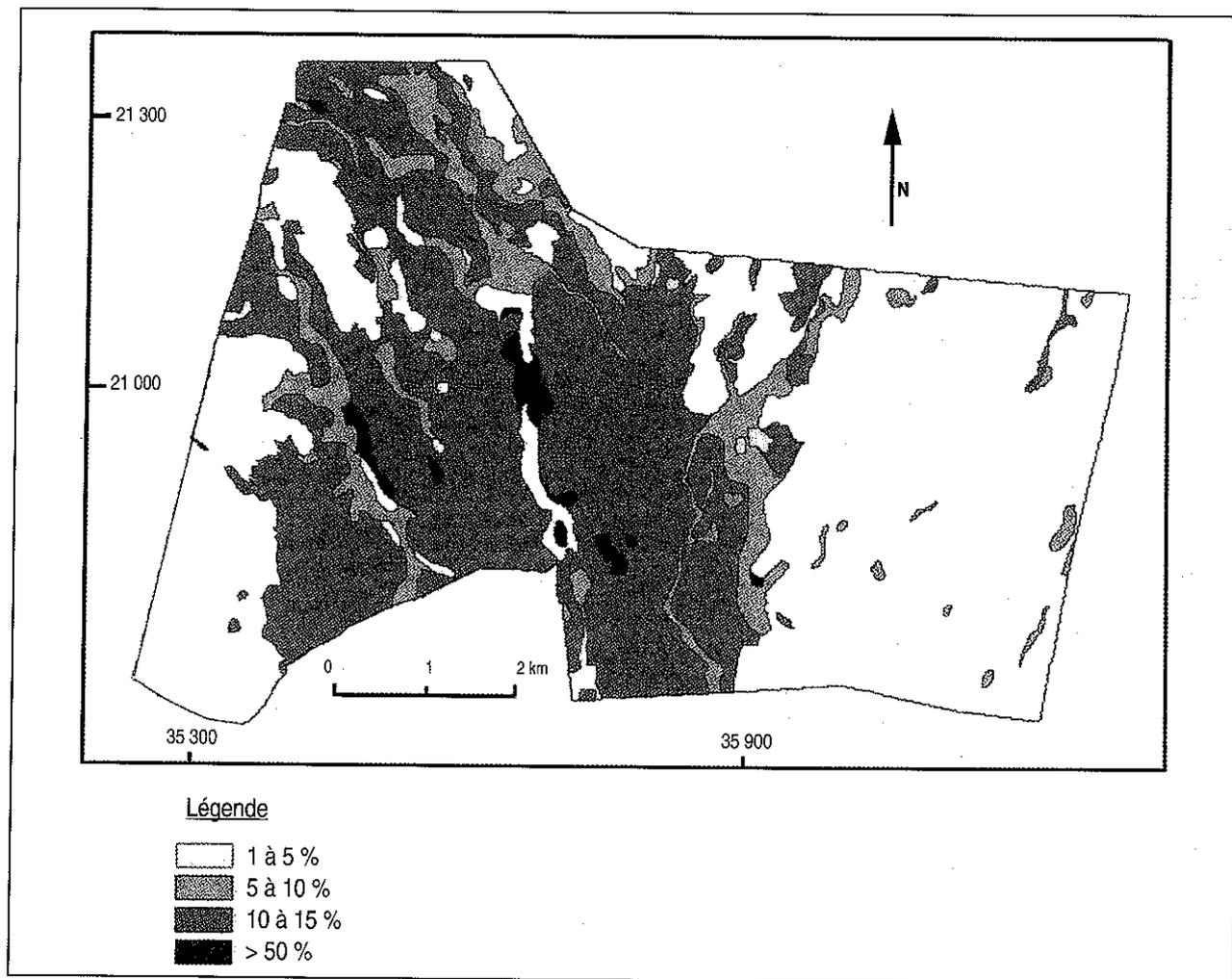
### Méthode suivie et résultat

Le logiciel utilisé cité ci-dessus, n'est pas doté d'une fonction permettant l'évaluation directe des terres, mais par contre, en tant que SIG, il offre les possibilités de croisement, de superposition, de confrontation de l'information quelle soit spatiale ou attributive, requises pour l'évaluation des sols. La compréhension de la méthodologie et du principe du système d'évaluation des sols est un préalable important pour sa modélisation et son adaptation sur le logiciel précité.

Nous présentons ci-dessous la méthodologie adoptée pour la réalisation de la carte de classement des sols pour l'irrigation gravitaire en utilisant le logiciel ci-dessus mentionné. C'est avec ce dernier qu'a été élaboré le système de référence dans lequel les données pour l'évaluation des sols ont été structurées.

Figure 6 - Carte des teneurs moyennes en calcaire total dans les horizons de surface

Figure 6 - Map of the means of topsoil calcium carbonate contents



Pour évaluer les contraintes, on s'est référé aux normes utilisées actuellement au Maroc pour l'évaluation des terres en vue de l'irrigation (Geoffroy, 1978). Il s'agit d'un système qui tient compte des contraintes dues à la topographie, celles dues au sol et enfin celles dues à l'eau. Il comprend 5 classes (I à V) et est basé sur le principe de la contrainte maximale qui consiste à retenir la contrainte la plus pénalisante que présente le sol à l'aménagiste pour déterminer la classe d'aptitude.

Les caractéristiques de pente, profondeur, texture, calcaire total, calcaire actif, charge caillouteuse, salinité, alcalinité, et perméabilité retenues spécifiquement dans notre cas pour l'évaluation des terres pour l'irrigation gravitaire sont encodées selon les normes du système d'évaluation ci-dessus cité. En effet, pour chaque caractéristique de l'unité pédologique, prise indépendamment, la valeur de la classe qui lui est attribuée croît avec son degré de sévérité: classe I quand sa valeur est optimale et classe V quand sa valeur est très défavorable. Signalons que les autres caractéristiques intervenant aussi dans l'évaluation des terres pour l'irrigation gravitaire, comme par exemple, les caractéristiques d'inondation et drainage, sont sans importance dans le périmètre étudié. En effet, vu la position du périmètre, les risques d'inondations sont très minimes. Aussi, aucune manifestation du mauvais drainage, n'a été observée dans les sols du périmètre et partout le drainage est bon.

Il est à noter que le classement des sols en fonction de l'aptitude à l'irrigation effectué selon les principes du système précité ne permet qu'une évaluation physique, puisqu'il ne tient compte que des facteurs intrinsèques et extrinsèques au sol, sans considérations agro-économiques. La méthodologie que nous avons suivie, bien qu'il y en ait d'autres possibles, pour réaliser la carte d'aptitude à l'irrigation gravitaire des sols du périmètre est donc fondée sur l'utilisation des normes précitées comme référence pour opérer automatiquement le classement des terres à partir de la carte pédologique digitale au 1/20 000 en mode raster et des données physico-chimiques des sols se trouvant dans la base de données construite dans le logiciel utilisé.

La cartographie des sols du périmètre effectuée d'abord à l'échelle du 1/5 000 puis éditée à l'échelle du 1/20 000 a permis de délimiter les Unités Cartographiques de Sols (UCS) (Jamagne, 1993) en utilisant le plus bas niveau de la classification, c'est-à-dire la série. Les Unités Cartographiques de Sols ainsi délimitées sont simples, regroupant chacune une seule Unité Typologique de Sols (UTS) (Jamagne, 1993) et ont un degré d'homogénéité élevé. Dans ces conditions, il est possible de faire dériver avec une grande précision la carte d'évaluation ou de classement des terres directement des valeurs moyennes des caractéristiques physico-chimiques des unités cartographiques de la carte pédologique.

Une carte thématique présentant la répartition spatiale des valeurs de classes ainsi attribuées a été réalisée pour chacune

des caractéristiques prises en considération pour l'évaluation de l'aptitude des terres (*figures 5 et 7*): carte des pentes, carte de profondeur, carte de texture, carte de calcaire total, carte de calcaire actif, carte de la charge caillouteuse, cartes de salinité et alcalinité. Seule la carte des pentes a été réalisée séparément, elle a été obtenue après une dérivation du MNT, lui-même créé à l'aide d'une interpolation spatiale linéaire à partir de la couche raster contenant les lignes d'altitudes provenant de la digitalisation de la carte topographique. Alors que les autres cartes thématiques dérivent toutes de la carte pédologique conformément aux étapes signalées à la *figure 5*. Chacune des cartes thématiques est en mode raster et constitue une couche d'information indépendante.

La carte de classement des sols pour l'irrigation gravitaire est finalement obtenue après la combinaison de toutes ces cartes thématiques (*figure 7*). En effet, après la combinaison de toutes ces couches raster, c'est la valeur numérique maximale des pixels homologues (même coordonnées) correspondant donc à la contrainte maximale, la plus pénalisante qui est affectée au pixel de la couche raster résultante, opération facilement réalisable à l'aide de la fonction "Maximum" du logiciel utilisé. Cette dernière couche correspond donc à la carte d'évaluation des sols pour l'irrigation gravitaire, qui après visualisation est imprimée sous forme d'une carte dérivée avec sa légende spécifique (*figure 8*).

Il nous faut signaler que comme la pente est très faible, elle n'intervient pratiquement pas dans le déclassement des sols. Il est de même des contraintes de salinité, d'alcalinité et de perméabilité. Alors que les caractéristiques de profondeur et l'abondance de la charge caillouteuse distinguant essentiellement les différentes séries de la carte pédologique au sein d'une même famille, sont aussi les contraintes maximales qui interviennent le plus dans le déclassement des sols. En effet, de la confrontation de la carte de la *figure 8* et de la carte géomorpho-pédologique de la *figure 3*, se dégagent les constatations suivantes:

- les sols de la classe I, majoritaires (3556,2 ha, soit 70,4 % de la surface totale) concernent les sols profonds sur les limons de l'Amirien I, les limons du Soltanien et les variantes de sols moins caillouteux sur l'argile à silex du Salétien et de l'Amirien II.

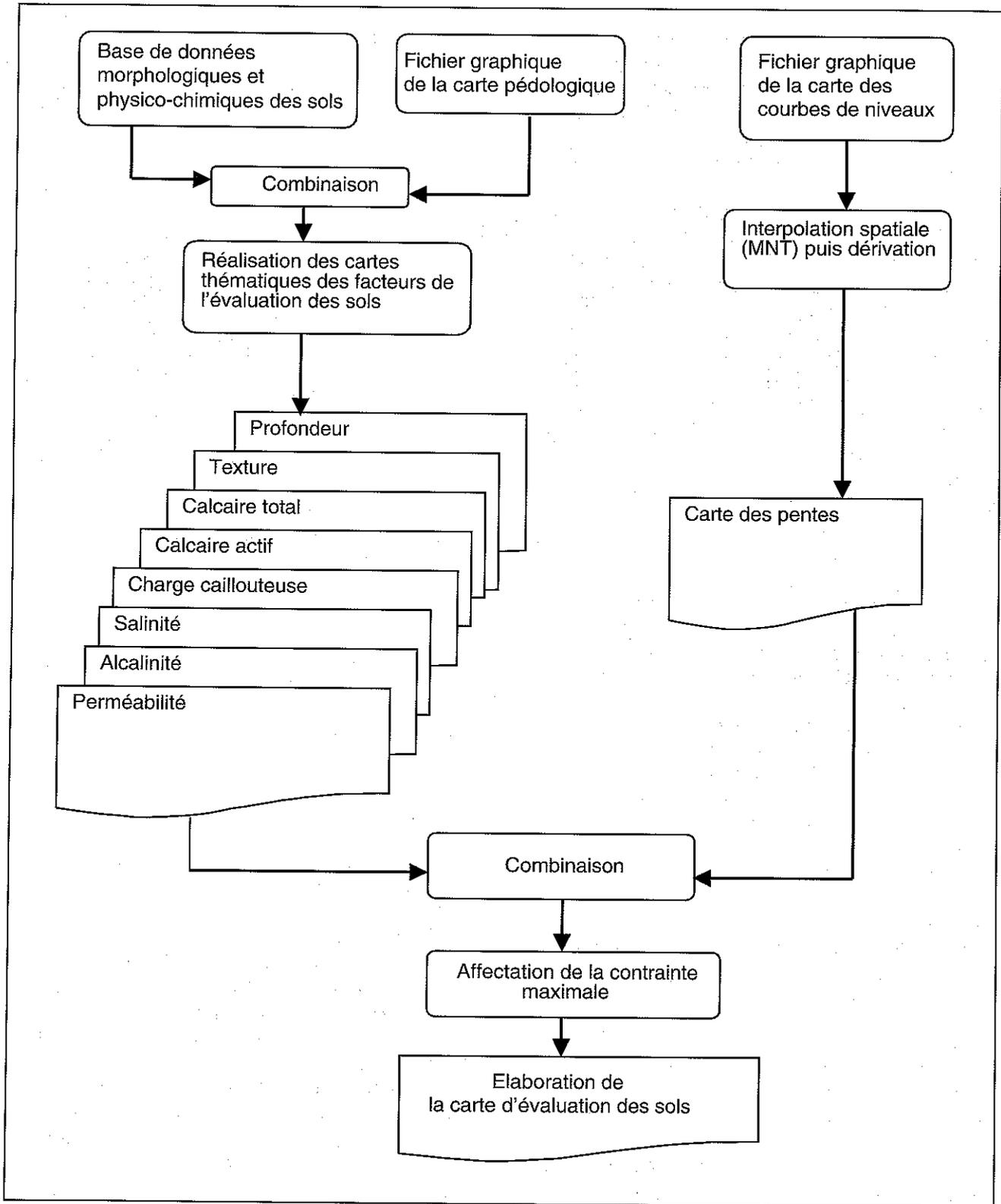
- les sols de la classe II (902,3 ha, soit 17,8 % de la surface totale), sur Salétien et Amirien II, sont déclassés par une charge caillouteuse présente en surface et en profondeur.

- les sols des classes III (330,2 ha, soit 6,5 % de la surface totale) et IV (202 ha, soit 4 % de la surface totale) présentent une contrainte d'épaisseur due à la présence à faible profondeur d'un horizon limitant, dalle ou encroûtement calcaires.

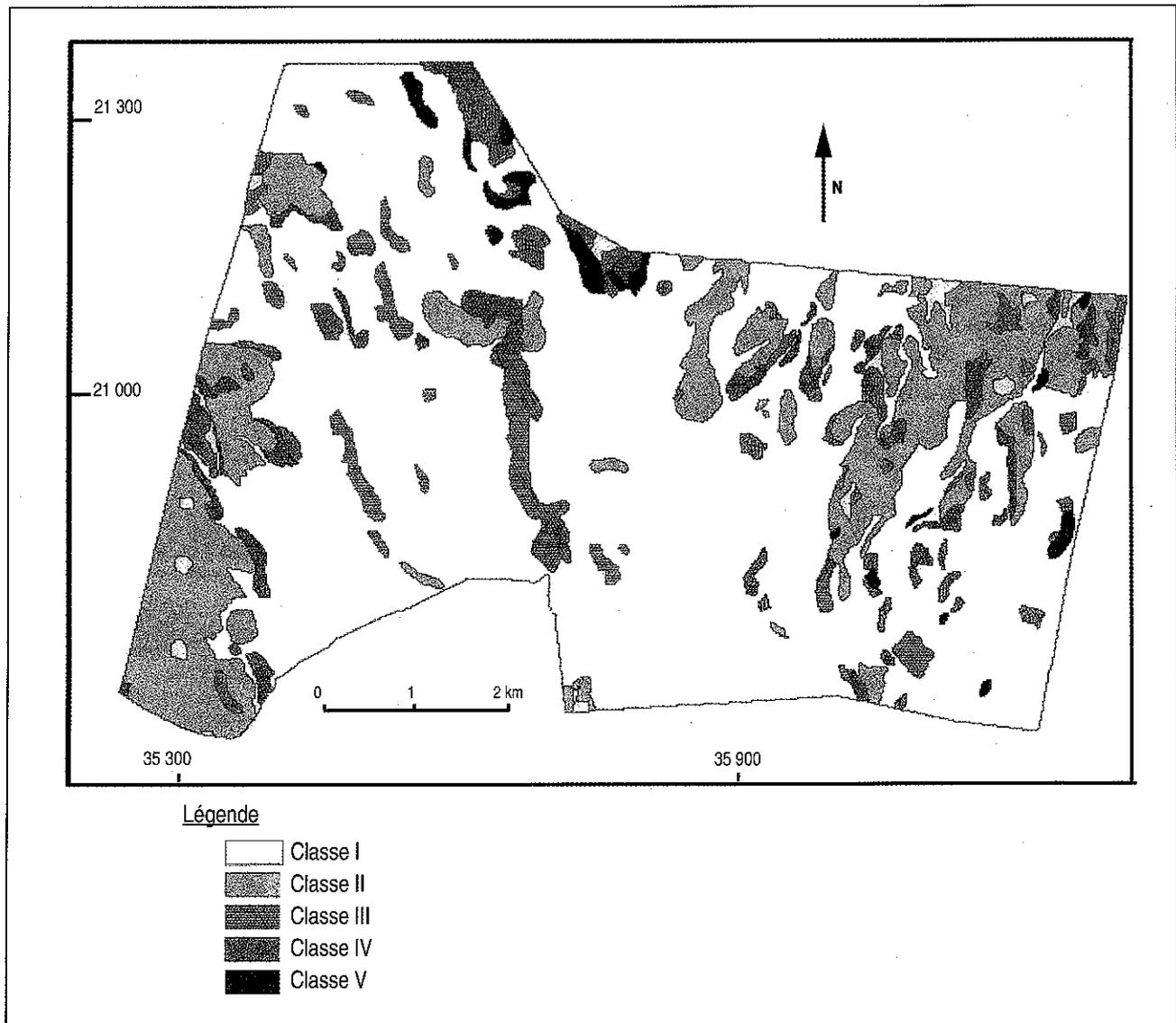
- la classe V (67,1 ha, soit 1,3 % de la surface totale) est matérialisée par de petites plages de sols où la dalle calcaire est à moins de 20 cm de profondeur.

Figure 7 - Démarche suivie pour l'évaluation des sols du périmètre en vue de l'irrigation gravitaire à l'aide d'ILWIS

Figure 7 - Adopted method by ILWIS for land evaluation for surface irrigation



**Figure 8** - Carte d'évaluation des sols pour l'irrigation gravitaire  
**Figure 8** - Map of the land suitability classes for the surface irrigation



## CONCLUSION

A l'aide du logiciel ILWIS, un système de référence sur les sols a pu être constitué. Il intègre l'information collectée et ordonnée, obtenue par une cartographie de type géomorpho-pédologique d'un périmètre de mise en valeur agricole. C'est là un outil utile pour une gestion durable des sols. En effet, le croisement entre la carte ainsi dressée, support fondamental du système de référence et la base des données morphologiques et physico-chimiques des Unités Cartographiques de Sols permet de publier, à la demande et rapidement, des

cartes thématiques mono ou plurifactorielles pour raisonner des plans d'aménagement et de gestion rationnels des terres.

La confrontation entre la carte géomorpho-pédologique et les cartes thématiques permet de mettre en évidence les relations spatiales entre les caractéristiques thématiques et les formes-formations quaternaires correspondantes.

La modélisation de l'évaluation de l'aptitude des sols effectuée à l'aide du logiciel précité a permis l'établissement d'une carte d'évaluation des aptitudes des terres du périmètre en vue de l'irrigation gravitaire en se basant sur un système d'évaluation à cinq classes. Cette carte a été obtenue par la

combinaison des caractéristiques intrinsèques et extrinsèques des sols requises pour l'évaluation des terres et organisées sous forme de couches thématiques indépendantes. Avec le logiciel utilisé, il est donc possible de "modéliser l'évaluation des terres" en fonction des objectifs et du système d'évaluation retenus, qui déterminent le choix des caractéristiques ainsi que les niveaux de limitation correspondants. Le système permet ainsi d'envisager différents scénarios dans la définition de l'aptitude d'une terre pour une utilisation donnée en jouant sur le choix des caractéristiques et des niveaux de contraintes qui leurs sont associés.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement les responsables de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla pour leur contribution à la réalisation de ce travail et pour toute la consultation documentaire.

## BIBLIOGRAPHIE

- Beaudet G., Massoni C., Missante G., Combes M., Etienne H.P., Ionesco T., 1967 - La plaine du Tadla. In : Congrès de Pédologie Méditerranéenne, Excursion au Maroc. Publ. Inst. Nat. Rech. Agron., INRA, Rabat, n° 24, tome I, 163-194.
- Bertrand R., Kilian J., Raunet M., Guillobez S., Bourgeon G., 1985 - La connaissance des systèmes des paysages naturels, un préalable à la protection du milieu : approche morphopédologique. Bull. Rech. Agron. Gembloux [1985], 20 (3/4), 545-559.
- Bock L., 1983 - L'intégration chronospaciale des accumulations calcaires, approche morphopédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie), thèse de doctorat, F.U.S.A.Gx, 448p.
- Bock L., 1993 - Evaluation sur le terrain du travail doctoral de Mr. Loukil. F.U.S.A., Gembloux, 14 p + annexes.
- Burrough P.A., 1989 - Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment, Clarendon press oxford. 194 p.
- Burrough P.A., MacMillan R.A. and van Deursen W., 1922 - Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography Journal of soil science, 1992, 43, 193-210.
- Choubert G., Joly F., Gigout M., Marçais J., Margat J. et Raynal R., 1956 - Essai de classification du Quaternaire continental du Maroc. C.R. Acad. Sci., Paris, t243, n° 5, pp. 504-506.
- Choubert G., Faure-Muret A., Saïvan H., Rolley J.P., 1977 - Carte géologique du Maroc au 1/100 000, feuille d'Alouzer. Publ. du Service Géologique du Maroc, notes et mémoires n° 247.
- Cam C., Froyer D., Moulin J., Rassineux J., Servant J., 1996 - Représentation cartographique de la sensibilité des sols à l'infiltration hydrique verticale. Carte thématique à l'infiltration verticale. Etude et Gestion des Sols 3, 2, 97-112.
- CPCS, 1967- Classification des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, 87 p.
- Engels P., Bock L., Neven C., Mathieu L., 1993 - Exemple d'utilisation de la carte des sols de Belgique comme base d'un système d'information géographique pour la gestion des terroirs. In : Gestion de l'espace. Bull. Rech. Agron., Gembloux, 28 (2-3), 181-195.
- Etienne H., Guessab D., 1975 - Plaine du Tadla. In : Ressources en eau du Maroc : Plaines et bassins du Maroc Atlantique. Ed. du Service Géologique du Maroc, Rabat, notes et mémoires n° 231, t 2, 299-366.
- FAO, 1976 - Cadre pour l'évaluation des terres. Bulletin pédologique de la FAO, 32, Rome, 64 p.
- FAO, 1979 - Land evaluation criteria for irrigation, World soil Resources, Rome, 50, 219 p.
- FAO, 1983 - Guidelines ; land evaluation for rainfed agriculture. FAO soils bulletin, Rome, 52, 237 p.
- FAO, 1989 - Le Système d'Information Géographique de la F.A.O, Rome, 21p.
- Faure P., 1986 - Apport des techniques infographiques à la cartographie pédologique thématique. Cahiers ORSTOM, sér. pédol., vol XXII, 3, 429-436.
- Faure P., 1989 - Cartographie pédologique thématique assistée par ordinateur, le logiciel FORBAN. Sci. sol, 27 (1), 81-84.
- Favrot J. C., Lagacherie P., 1993 - La cartographie automatisée des sols, une aide à la gestion écologique des paysages ruraux. In : Connaissance des sols et fragilité écologique. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France, t 79, 5, séance du 9/6/93, 61-76.
- Flasse S., Felten V., Frankart R., 1991 - Croisement des données multi-sources pour la détermination de l'aptitude des terres. Sci. sol, vol 29, 1, 55-69.
- Geoffroy J.L., 1978 - Normes utilisées actuellement au Maroc pour l'établissement des cartes de classement des sols en vue de la culture sous irrigation. Cah. ORSTOM, sér. Pedol., vol. XVI, 2, 177 - 191.
- Gerard B., Heuvelink M., and Burrough P.A., 1993 - Error propagation in cartographic modelling using Boolean logic and continuous classification. Int. J. Geographical Information Systems, 1993, vol 7, n° 3, 231-246.
- Girard M.C., Arousseau P., King D., Legros J.P., 1989 - Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. Sci. sol 27 (4), 335-350.
- ITC, ILWIS (version 1.21), 1991- Software and User's Manual, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, Netherlands, 255 p.
- ITC, ILWIS (version 1.3), 1992 - User's Manual, Vol 1, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, Netherlands, 205 p.
- Jamagne M., 1993 - Evolution dans les conceptions de la cartographie des sols. Pédologie, XLIII-1. Soc. Belge de Pédologie, Gand, 59-115.
- Jamagne M., King D., Daroussin J., Le Bas C., 1993 - Evolution et état actuel des programmes européens de connaissance et de gestion des sols. Bull. Rech. Agron. Gembloux [1993], 28 (2-3), 135-163.
- Jamagne M., Hardy R., King D. et Bornard M., 1995 - Les bases de données géographiques des sols de France. Etude et Gestion des sols 2, 3, 153-172.
- Kilian J., 1974 - Etude du milieu physique en vue de son aménagement. Conception de travail. Méthodes cartographiques. In : l'Agronomie tropicale. Ed. institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières, Paris, Vol XXIX, 141-153.
- King D. 1986 - Modélisation cartographique du comportement des sols basée sur la mise en valeur du " Marais de Rochefort ". Thèse de doctorat, INRA, Versailles, 173p + annexes.
- Klingebiel A.A. and Montgomery P.H., 1961 - Land-capability classification. USDA Agriculture Handbook N° 210.
- Kollias V.J., Kalivas D.P., Yassoglou N.J., 1999 - Mapping the soils resources of a recent alluvial plain in Greece using fuzzy sets in GIS environment. European Journal of soil science, volume 50, numéro 2, 261-273.
- Lefevre D., 1989 - Formations continentales pléistocènes et paléoenvironnements sédimentaires dans le bassin de Ksabi (Moyenne Moulouya, Maroc). Bull. de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire, 2, 101-113.
- Legros J.P., Nortcliff S., 1990 - Conception d'un vocabulaire pour la description du milieu naturel des sols. Pédologie, XL-2, 195-213.

- Loukili M., 1994 - Géomorphopédologie et système d'information géographique pour la gestion des terres. Application dans la plaine du Tadla (Maroc). Thèse de doctorat, Gembloux, Faculté des Sciences Agronomiques, 222 p, 25 tab., 54 fig.
- Missante G., 1963 - Les sols du Tadla et leur répartition schématique au 1/500 000, Al Awamia, Rabat, n° 9, 155-190 + 1 carte hors texte au 1/500 000.
- Mathieu L., 1977 - La géomorphologie et la géologie quaternaire comme bases fondamentales pour une juste définition et une cartographie rapide des sols et des milieux ; applications à la province de Taza (Maroc) et dans la cuvette d'Andapa (Madagascar). Thèse de doctorat, t I et II, 739 p.
- Mc Rae S.G., Burnham C.P., 1981 - Land evaluation, Oxford, Sciences publications, 239 p.
- Ngongo L., King D., Nicoulaud B., Brisson N., Ruget F., 1993 - Estimation des erreurs de prédiction spatiale du déficit hydrique dues à la rasterisation des cartes des sols. In : Gestion de l'espace. Bull. Agron., Gembloux, 28 (2-3), 223-239.
- ORMVAT, 1986 - Etude pédologique détaillée dans le secteur pilote situé dans les Béni-Amir. Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla, Maroc.
- Raunet M., 1974 - Etude morphopédologique dans la région des Béni-Slimane (Algérie). Contraintes pour la mise en valeur. In : l'Agronomie tropicale. Ed. Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des cultures Vivrières, Paris, Vol XXIX, 258-299.
- Rolley J.P., 1978 - Carte géologique du Maroc au 1/100 000. Feuille Afouzer (Haut Atlas Central). Notice explicative. Ed. du Service Géologique du Maroc, 103 p.
- Rossister D., Van Wambeke A., 1993 - ALES version (3.01). Guide de l'utilisateur, traduction française. Cornell University, Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences, 152 p.
- Salvan H., Choubert G., Faure-Muret A., Marin P., Sutter G., 1972 - Carte géologique du Maroc, feuille Oued Zem. Publ. du Service Géologique du Maroc, notes et mémoires n° 218.
- Schwartz Ch., Walter C., Claudot B., Bouédo Th., et Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre réalisée entre 1990 et 1994. I. Constitution d'une banque de données cantonale. Etude et Gestion des Sols 4, 3, 191-204.
- Sys C, Van Ranst E., Debavey J., 1991a - Land evaluation, part I, principles in land evaluation for crop production calculations. General Administration for Development Cooperation, Agricultural publication n° 7, Brussels, Belgium, 273 p.
- Sys C, Van Ranst E., Debavey J., 1991b - Land evaluation, part II, Methods in land evaluation. General Administration for Development Cooperation, Agricultural publication n° 7, Brussels, Belgium, 247 p.
- Tang H., Van Ranst E., 1992 - Testing of fuzzy set theory in land suitability assesment for rainfed grain maize production. Pedology, 42, 129-147.
- Tricart J., 1974 - De la géomorphologie à l'écographie intégrée. In : l'Agronomie Tropicale. Ed. Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières, Paris, Vol XXIX, 122-132.
- Van Orsoven J., Deckers J. A., Vandenbrouke D., Feyen J., 1993 - The completed database of Belgian soil profil data and its applicability in planning and management of rural land. Bull. Rech. Agron. Gembloux [1993], 28 (2-3), 197-222.
- Walter C., Schwartz Ch., Claudot B., Bouédo Th., et Arousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre réalisée entre 1990 et 1994. II, Description statistiques et cartographie de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. Etude et Gestion des Sols 4, 3, 205-220.
- Zadeh L.A., 1965 - Fuzzy sets. Information and control, 8, 338-353.
- Zadeh L.A., 1978 - Fuzzy sets as a basis for theory of possibility. Fuzzy sets and system, 1, 3-28.