

Institut national agronomique El-Harrach, Alger
Département de Science du sol
En vue de l'obtention du diplôme de magistère en Sciences Agronomiques
Option : Science du sol

Valorisation des données pédologiques en Algérie.

Présenté par
Mr. TIMLELT Farouk
DJILI Kadour Professeur
Soutenu publiquement le 05/02/2007

devant le jury composé de : **P résident** : Mr. DAOUD Youcef Professeur **Examineurs** : Mr. DRIDI Bachir Maître de conférences Mr. TEMAGOULT Mouloud Chargé de cours

Table des matières

Résumé : .	1
Summary : . .	3
Introduction générale . .	5
Chapitre I . .	9
La cartographie pédologique . .	9
Les constituants d'une carte . .	9
Objectifs et applications de la cartographie . .	11
1.3 Démarche pour la cartographie pédologique . .	12
1.4 Utilisation des SIG en cartographie pédologique . .	16
1.5. Apport des SIG à la cartographie . .	17
1.6. Exploitation des cartes pédologiques . .	18
1.7. Validité des cartes produites . .	19
Chapitre II .	21
Le milieu naturel .	21
Situation générale .	21
Le climat . .	22
Géologie et hydrogéologie .	26
Chapitre III . .	29
Matériel et méthodes .	29
3.1. La carte des sols . .	30
3.2 L'analyse des données .	33
3.3 Valorisation des données . .	33
Chapitre IV . .	37
Résultats et discussion .	37
Classification et caractéristiques des sols . .	37
Chapitre V .	53

5. Analyse des résultats . .	53
5.1. Concordance entre les données . .	54
5.2. Variabilité des propriétés du sol . .	55
5.3 Relation entre les descripteurs pédologiques .	68
CONCLUSION . .	72
Chapitre VI . .	75
6. Analyse thématique des critères de cartographie de sol .	75
Introduction .	75
Résultats . .	76
6.1 Analyse thématique à l'échelle d'un seul critère de cartographie .	77
6.2 Analyse thématique à l'échelle d'un seul horizon .	106
6.3 Analyse thématique à l'échelle du profil . .	113
6.4 Comparaison de la carte pédologique semi-automatique (CPSA) avec la carte pédologique classique (CPC) .	116
Conclusion générale .	121
Références bibliographiques : .	125
Liste des abréviations .	131

Résumé :

La présente étude entre dans le cadre de la valorisation des études pédologique en Algérie. Ainsi, pour un aménagement hydro agricole, une étude agropédologique est réalisée dans le périmètre de Hennaya (w.Tlemcen). La zone cartographiée s'étale sur 783 ha environs. La carte des sols, réalisée selon un procédé classique à savoir une prospection systématique à la précision du 1/20 000ème, fait ressortir trois classes de sol d'après la classification (C.P.C.S, 1967) : il s'agit notamment des sols calcimagnésiques, des sols à sesqui-oxyde de fer et manganèse et les sols isohumiques. L'évaluation de la démarche de terrain révèle que le nombre d'observations effectué est suffisant, néanmoins le nombre d'échantillons pris est insuffisant pour caractériser certains paramètres pédologiques. C'est le cas de la C.E.C et la conductivité électrique pour lesquelles un échantillonnage supplémentaire est nécessaire pour mieux cerner leur variabilité spatiale.

L'analyse critique des données montre une incohérence entre la C.E.C et les résultats des bases échangeables liée à la surestimation de cette dernière. Nous avons ensuite déterminé la variabilité spatiale des paramètres pédologique. Il en ressort trois catégories :

La première caractérisée par une faible variabilité ($CV < 15\%$) est représentée par le pH et la densité apparente,

La seconde dont la variabilité est moyenne ($15\% < CV < 30\%$) est représenté par le taux d'argile et la C.E.C.

La troisième catégorie est caractérisé par une forte variabilité ($CV > 30\%$) est représenté par la CE, le calcaire totale et la matière organique.

L'étude des corrélations entre variables a démontré pour notre cas que la matière organique n'a pas d'effet significatif sur la CEC et l'essentiel de celle-ci est dû à l'argile.

Enfin, la thématization des caractéristiques des sols a permis de sélectionner les critères de cartographie les plus pertinents :

La profondeur du sol

La couleur de l'horizon de sub surface.

Le croisement des cartes thématiques issues des observations en tenant compte des critères précédents moyennant un SIG (MapInfo), a permis d'obtenir une carte assez différente de celle réalisée selon un procédé classique tout en apportant à cette dernières des corrections dans les limites de sols.

Mots Clefs : Cartographie pédologique ; Critères de cartographie ; Système d'information géographique (SIG) ; cartes thématiques ; coefficient de variation, Algérie.

Summary :

The present study returns within the framework of the pedological valorization of the studies to Algeria. Thus, for an agricultural hydro installation, a agropedologic study is carried out in the perimeter of Hennaya (w.Tlemcen). The zone charted is spread out over 783 ha surroundings. The chart of the grounds, realized according to a traditional process with knowing a systematic prospection with the precision of the 1/20 000ème, emphasizes three classes of ground according to classification (C.P.C.S, 1967). The evaluation of the procedure of ground reveals that the number of observations carried out is sufficient, nevertheless the number of samples taken is insufficient to characterize certain pedological parameters. It is the case of the E.C.C and the electric conductivity for which an additional sampling is necessary to better determine their space variability.

The analysis cracks of the data shows an inconsistency between the results of the E.C.C and exchangeable bases related to the over-estimate of the latter. We then determined the space variability of the parameters pedological. It arises three categories of them:

The first characterized by a low variability ($CV < 15\%$) is represented by the pH and the apparent density,

The second of which variability is average ($15\% < CV < 30\%$) is represented by the clay rate and the E.C.C.

The third category is characterized by a strong variability ($CV > 30\%$) is represented by the EC, limestone total and the organic matter.

The study of the correlations between variables showed for our case that the organic matter does not have a significant effect on the CEC and the essence of this one is due to clay.

Lastly, the thematisation of the characteristics of the grounds made it possible to select the most relevant criteria of cartography:

Depth of the ground

The color of the horizon of sub surface.

The crossing of the charts sets of themes resulting from the observations based on the preceding criteria with the help of a GIS (MapInfo), made it possible to obtain a chart rather different from that carried out according to a traditional process while making to the latter corrections within the limits of grounds.

Key words : Pedological cartography; Criteria of cartography; Geographical Information system (GIS); charts sets of themes; coefficient of variation, Algeria.

بعد الدراسة لفضل من إطار تقييم درجات علم التربية في الجزائر. لحرص توظيفها التربوي. تمت دراسة التربية في
مجملها (الدرجة 3.5) (الدراسات) حرة تم مسح حوالي 3000 عينة
شريحة التربية في الجزائر، وفي طريقة تصنيفها في أعضاء على الترتيب بنفا 10000 (1) حيث
ظهرت ذاتها أهداف من التربية بهذا النظام لتقييم الرسمي (C.P.C.S 1967)
لأنه يتم الآن لدراسة التربية في الجزائر. لحرص توظيفها التربوي. تمت دراسة التربية في
لتقييم بعض مكونات التربية، يتعدى الأمر بفترة زمنية (C.T.C) (والفئة الكيريلية (C.T.F) الآن
بمقتضى: لتدعيمات إنشائية لتقييم - تقييم التمدد
من كطيف الفئات المستويات والتغير. عدم التوافق الفعلي بين نتائج التقييم (E) وهو الفهم القائم بدرجة
(C.T.C) قائم من الأثر لآخر. لتقييم الفهم الأثرية بعدة تم تحوّلها لتغيرت الفهم، حول النظام و بذلك تصفيتها
هو ذلك التقييم:

الفهم الأول: ويتركز ويعدّل التقييم لحرص من 21 ويقتصر على من الطلاب والكافة المتعلمة (الدراسات)

- الفهم الثاني: يتجه ويعدّد التقييم ويعلق بتقييم ما بين 15 و 30، وتضار نسبة الفهم، وهو ذات الفهم
العلمي.

- الفهم الثالث: يتجه ويعدّد التقييم على حصة التقييم بمرور 30 و 50 من العينة (الدراسات) (C.E) الفهم الثاني
واحدة لعضوية.

من نوعية الفهم المتغيرة بين التغيرات في حالات أو العدة لعضوية ليس به تغير بل هو على (C.E.C)
(الدراسات) الأثرية المتغيرة في الفهم والتغير.

في الأثرية (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات)
الدراسات المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات)

- صبي الفهم

كون ادرية الأثرية كتبت سطحي

من صيغة تقاسم فرائط لدراسات قائمة على الدراسات لدراسة وأيضاً بعدة الأثرية المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات)
والدراسات (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات)
الدراسات (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات)

التعليقات لمفتحية

مع العلم التربية (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات) المتغيرة في الفهم (الدراسات)

Introduction générale

La cartographie des sols et le classement des terres sont à la base de la mise en valeur agricole. Cependant, malgré de nombreuses études cartographiques menées à grandes et moyennes échelles en Algérie (A.N.R.H, 2003 ; Djili, 2000), les rendements agricoles restent instables et la mise en valeur des terres peu maîtrisée (Mostéphaoui, 1996).

De ce fait, on est en droit de se poser des questions sur l'efficacité et la qualité de ces études cartographiques. Ces études sont-elles en mesure de répondre aux questions de la mise en valeur des terres ? La méthodologie adoptée pour la réalisation des cartes est-elle en adéquation avec les objectifs de l'étude ? Les données fournies par l'étude sont-elles fiables, utiles et suffisamment normalisées?

C'est à travers l'exemple concret d'une étude agro-pédologique de la région de Hennaya (Wilaya de Tlemcen) que nous tenterons de répondre à ces questions. Ainsi, dans le cadre de l'aménagement hydro-agricole de la plaine de Hennaya, un marché a été conclu entre l'Agence National de Réalisation et de Gestion des Infrastructures Hydrauliques pour l'irrigation et le Drainage (AGID) en qualité de maître de l'ouvrage et l'Entreprise National des Etudes Hydrauliques (E.N.HYD) maître de l'œuvre pour la réalisation d'une étude agropédologique selon les termes de référence du cahier des charges n°199/1999. De ce fait, l'objectif de ce travail consistera donc à réaliser une étude pédologique au 1/20 000 de 500 ha selon les prescriptions du cahier des charges, les objectifs et les résultats de cette étude seront ensuite évalués et les données valorisées.

Ainsi donc, après une recherche bibliographique sur l'état de l'art en matière de

cartographie des sols, nous avons organisé cette recherche autour de trois principaux thèmes :

- Le premier thème est relatif à la réalisation de la carte des sols au 1/20 000 d'un périmètre de 500 ha situé dans la région de Hennaya (Wilaya de Tlemcen). La démarche cartographique adoptée ici est celle prescrite dans le cahier des charges de l'AGID.

- Le deuxième thème a été consacré à une analyse critique des résultats et à leur valorisation. En effet, La carte pédologique ainsi que les résultats d'analyse sont repris tel que publiés pour le compte du maître de l'ouvrage. L'analyse critique a porté essentiellement sur l'évaluation de la démarche cartographique adoptée et la qualité des données morphologiques et analytiques des sols étudiés. La valorisation des résultats obtenus a porté sur l'analyse des relations entre les différents descripteurs pédologiques et surtout sur l'analyse de leur variabilité spatiale à différentes échelles (selon l'ensemble des profils, selon les horizons et selon les unités cartographiques).

- Le troisième thème de cette recherche a été consacré à l'analyse thématique des critères de cartographie utilisés lors de la prospection pédologique. A ce niveau, il s'agit à chaque fois de comparer une carte thématique dérivée de la carte pédologique à la même carte thématique mais qui est obtenue directement à partir des observations de terrain. Cette analyse thématique a été menée à l'échelle d'un seul critère de cartographie, ensuite à l'échelle de l'horizon (horizons de surface, horizon de subsurface et horizon de profondeur) et enfin à l'échelle du profil. La carte thématique à l'échelle de l'horizon est le résultat du croisement des différentes cartes thématiques relatives aux critères de cartographie. La carte thématique à l'échelle du profil est le résultat du croisement des cartes thématiques à l'échelle de l'horizon et de la carte de profondeur. La carte thématique à l'échelle du profil issue des observations de terrain a été appelée carte pédologique semi-automatique (CPSA) par opposition à la carte pédologique classique (CPC). Les données de la CPSA ont été confrontées à celles de la CPC.

Pour ce faire, nous avons structuré le présent document en VI chapitres :

- Après une introduction générale, le chapitre I a porté sur une analyse bibliographique en matière de cartographie des sols et de Système d'Information Géographique.

- Dans le chapitre II, nous avons présenté le milieu naturel de la zone d'étude.

- Le chapitre III explicite la méthodologie menée dans cette recherche.

- Dans le chapitre IV, nous avons présenté et discuté les résultats de la cartographie pédologique.

- Le chapitre V est relatif à l'analyse critique des résultats et à leur valorisation. Il s'agit surtout d'une analyse de la concordance des différents résultats analytiques et morphologiques des sols et de l'étude de leur variabilité spatiale à différentes échelles.

- Le chapitre VI est consacré à l'analyse thématique des différents critères de cartographie des sols utilisés lors de la prospection pédologique. Cette analyse a été menée à trois niveaux de perception (un seul critère de cartographie, l'horizon et le profil). Il est suivi d'une conclusion générale.

Chapitre I

La cartographie pédologique

La carte pédologique constitue une base de données des sols (Faure, 1989 ; Fournier, 1989 ; Chrétien et al., 1993 ; Carré et al 2002). Elle fournit en même temps des informations graphiques comme les limites des plages et des informations sémantiques représentées par des chiffres et qualificatifs (Girard et al. 1989). Ses objectifs et applications sont aussi nombreux que variés et dépendent de la précision avec laquelle elle est réalisée. Ceux-ci peuvent être la connaissance du milieu naturel, la recherche scientifique, les aménagements agricoles et la protection des sols (Legros, 1996).

Les constituants d'une carte

Le document cartographique

Graphiquement, une carte de sols est la projection sur un plan de la couverture pédologique, c'est-à-dire d'un volume. Habituellement, on représente les indications suivantes sur la carte (Girard et al 1989) : Système de projection, échelle, niveau d'analyse (précision des mesures, des observations, types de variables utilisées),

résolution (surface la plus petite pour laquelle on dispose d'une information), objets cartographiés (valeur de réserve utile, horizon...). Ces derniers sont schématisés sur un fond topographique en :

- Plage cartographique : surface élémentaire dont la limite est fermée sur elle-même. Le contenu est défini et représenté de manière homogène par un figuré ou une couleur déterminée.
- Unité cartographique : est constituée par l'ensemble des plages de même nature.
- Unité sol : l'unité cartographique peut renfermer une ou plusieurs unités de sols dont les contours ne sont pas définis.

La légende et la notice

La légende et la notice représentent une sémantique permettant de compléter et préciser les informations pédologiques, en particulier :

- La caractérisation des unités cartographiques (description morphologique et analytique des horizons)
- La dénomination des unités cartographiques en référence à une classification.

La précision

La précision indique le nombre d'observations faites par unité de surface. Celle admise à la direction des Etudes de Milieu et la Recherche Hydraulique au niveau de l'Agence National des Ressources Hydrique (A.N.R.H) est d'une observation par cm^2 de carte. Par exemple, une étude à la précision du 1/20 000 signifie qu'il a été fait une observation tout les quatre hectares. Une observation peut être un sondage à la tarière ou un profil. Ainsi, on distingue selon l'objectif recherché :

- Les cartes à petites échelles (du 1/10 000 000 au 1/500 000) qui ne mentionnent que les grands traits des caractéristiques des sols. Elles représentent une très grande surface couvrant le territoire national. La classification des sols indique généralement la classe et la sous classe.
- Les cartes à moyennes échelles (du 1/200 000 au 1/50 000) permettent l'inventaire plus détaillé des sols. On cartographie au niveau de la série pour le 1/50 000 uniquement.
- Les cartes à grandes échelles (du 1/25 000 au 1/5000) sont destinées à résoudre des questions précises tel que la mise en valeur, elles donnent une image assez précise des sols. On cartographie au niveau de la série et le type de sol (ANRH, 1974).

Il faut distinguer l'échelle des levés, l'échelle des maquettes intermédiaires et l'échelle du rendu final lors de l'élaboration d'une carte (Legros, 1996). Une bonne solution consiste à diviser l'échelle linéaire par deux à chaque étape du travail. Par exemple, on se sert des photographies aériennes à 1/30 000 pour faire les levés, on constitue une maquette

intermédiaire à l'échelle du 1/50 000 ceci pour publier une carte à l'échelle définitive du 1/100 000. Cela permet de ne pas perdre de précision lors du report des limites. Par ailleurs, on rappelle la différence entre la notion d'échelle et celle du niveau d'analyse (Jamagne et al. 1993). La première est liée à une représentation en deux dimensions sur un document papier (rapport entre une distance mesurée sur la carte et la même distance mesurée sur le terrain dans les mêmes unités). La seconde est liée à la résolution, ainsi qu'au nombre, à la nature et à la précision des informations.

Objectifs et applications de la cartographie

La cartographie pédologique est une activité coûteuse. En effet, elle est longue et exige un personnel hautement spécialisé ainsi que de nombreuses analyses de terres. Elle se justifie donc lorsqu'on peut démontrer son intérêt pratique. On cite dans ce qui suit certaines applications qu'elle couvre (Legros 1996) :

- Connaissance du milieu naturel : il s'agit d'inventorier les sols et préciser leur distribution dans l'espace. Celle-ci servira d'orientation dans plusieurs disciplines telles que la phytosociologie, l'hydrologie.

- Recherche scientifique : en étudiant la liaison entre la couverture pédologique et l'environnement naturel qui est la morphologie, le climat, la végétation et le temps : c'est la pédogenèse.

- Aptitude culturale : dans ce contexte, le rôle du cartographe est double. D'une part, il doit mettre en évidence les contraintes fortes pouvant réduire la gamme de cultures possibles, telles que la profondeur du sol, la présence de la charge caillouteuse, la présence du calcaire actif impliquant des contraintes en arboriculture pour les portes greffes. D'autre part, le cartographe doit signaler et situer spatialement les risques majeurs d'une mauvaise exploitation tel l'érosion et la salinisation par exemple.

- Aménagement agricole : dans ce domaine, on cite :

L'irrigation : l'équipement des parcelles en vue d'être irriguées présente un coût économique considérable. En effet, l'adduction des parcelles à la source d'eau à travers des conduites doit être planifié afin d'assurer la rentabilité. Ceci est possible en tenant compte des caractéristiques des sols lors de l'exploitation.

Le drainage : l'étude pédologique préalable au drainage est indispensable. Celui-ci, lorsqu'il est justifié, pose le problème du coût économique. En effet, la distance entre les drains ne doit être ni trop faible ni trop grande ce qui impliquerait à défaut, un surcoût inutile dans le premier cas et une perte de l'investissement dans le deuxième cas.

Protection des sols :

La Lute contre l'érosion : Dans certains cas, des études pédologiques ont prouvé que la pente n'est pas la principale cause de l'érosion. En effet, la texture de l'horizon de surface et le type de culture semblent jouer un rôle important dans le déclenchement du ruissellent.

Le dessalement : la mise en valeur des zones salées implique la connaissance préalable des sols. En outre, ces zones nécessitent d'abord le dessalage du sol et

l'évacuation des eaux chargées. Pour sa réalisation, la cartographie demeure un excellent moyen.

Enfin, la cartographie pédologique trouve d'autres applications telles que la lutte contre la pollution chimique des sols, l'étude des processus de désertification etc.

1.3 Démarche pour la cartographie pédologique

D'une manière générale, on identifie deux grandes phases lors de la production d'une carte pédologique (Jamagne, 1993) :

- - Recueil et élaboration de l'information pédologique.
- - Transmission de l'information.

1.3.1 Recueil et élaboration de l'information pédologique

1.3.1.1 Etape préparatoire et de reconnaissance

Les données sur la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie, la végétation et le climat sont analysées et les documents de base (carte topographique, géologique) sont étudiés.

1.3.1.2 Etape de prospection de terrain

Il s'agit de procéder à la cartographie proprement dite de la zone. D'après Legros (1996), il existe trois façons principales de procéder. La première repose sur l'expérience et la somme des connaissances régionales acquises du pédologue. De cette manière le pédologue cartographe choisira les sites d'observations sur la base d'un raisonnement logique en utilisant un nombre d'observations réduit. C'est la cartographie libre. Une deuxième approche, (cartographie systématique) où le pédologue effectue des observations selon un réseau rigide basé sur un maillage strictement respecté. La troisième approche utilise les statistiques pour décrire les corrélations spatiales des propriétés des sols et prédit, avec une précision connue, la valeur en des sites non reconnus. On citera la géostatistique qui est devenue la méthode de référence en matière d'analyse spatiale des sol (Webster et Oliver, 1990 cités par Walter 2002) et qui a connu très rapidement un développement considérable dans les applications en science du sol (Douaoui, 1995), en hydrologie du sol (Gascuel-Oudou, 1984), physique du sol (Voltz, 1986) et en chimie du sol (Goovaert et al., 1989 cité par Walter, 2002).

1.3.1. 3 Choix des critères cartographiques

Selon Legros (1978a), les principaux éléments qui doivent conditionner le choix des critères de cartographie sont :

- Leur signification agronomique ou pédogénétique. A priori, prendre en compte la texture ou l'hydromorphie paraît plus important que de différencier les sols à partir de la taille des éléments structuraux.

- L'efficacité de la délimitation des sols sur la base des critères envisagés. Il faut donc choisir des critères aisés et rapides tel que la pente de terrain.
- Les critères doivent être adaptés au niveau taxonomique de représentation (type de sol, famille de sol etc..) d'abord en fonction de l'échelle, et ensuite en fonction du milieu car seuls les caractères du sol ou de l'environnement ayant une valeur discriminante sont intéressants.

1.3.1.4 Caractérisation de l'organisation de la couverture pédologique

Dans la nature, le sol est un continuum désigné comme couverture pédologique (Jamagne et al 1993). Même si les variations des propriétés sont parfois brutales pour représenter les limites, celles-ci restent théoriques et conceptuelles, sans existence réelle (Legros, 1996). Afin de caractériser sur un plan une réalité tridimensionnelle, les spécialistes ont utilisé différents modèles :

Le premier repose sur la notion du profil constitué d'une superposition d'unités élémentaires qui sont les horizons (Girard, 1989 ; Lahmar et al 1989).

Le deuxième modèle est basé sur l'analyse structurale (Djili, 1983 ; Boulet et al in Legros 1996 ; Ruellan et al. 1989) l'unité élémentaire est un volume pédologique (un horizon au sens large), son objectif est de décrire les structures de la couverture pédologique, et de comprendre l'évolution de ces structures dans le temps afin de déterminer le fonctionnement du système mis en place.

Le troisième modèle repose sur l'association des sols et différencie trois types d'associations en l'occurrence les chaînes de sol, les climato séquences et les chrono séquences.

Le quatrième modèle est celui des pédo-paysages (Haddouche et al., 2001 ; Gaddas, 2001). Ce modèle se base sur l'exploitation des photos aériennes ou satellitaires qui offre l'avantage de réduire la durée de la prospection sur terrain.

1.3.2 Transmission de l'information

C'est la phase finale qui consiste à reporter sur carte la synthèse des connaissances acquises durant les étapes précédentes à travers la représentation cartographique, la légende et la notice explicative. Plusieurs modes de représentations ont été utilisés afin d'obtenir une meilleure expression sur les cartes des résultats obtenus. Dès lors, divers types de cartes sont élaborées à des échelles différentes suivant l'objectif poursuivi (Jamagne et al. 1993):

- La représentation synthétique où chaque unité cartographique est représentée par une couleur, une trame ou un symbole. La carte elle-même est simple, mais la notice explicative est souvent détaillée. Des exemples ont été produits à des échelles allant du 1/20 000 au 1/60 000.
- La représentation par pédopaysage : l'échelle de publication de cette représentation est au 1/250 000. Elle tient compte des éléments majeurs du paysage et donne

l'importance aux données pédologiques ayant une conséquence agronomique.

- La représentation mixte ou morphogénétique : C'est une représentation où les éléments de la pédogenèse, la caractérisation de matériaux et l'économie de l'eau sont simultanément mentionnée. Des documents à l'échelle du 1/100 000 ont été produits.
- La représentation analytique : la variabilité spatiale des sols est exprimée par la codification de toutes les propriétés importantes du sol.
- La représentation en courbe d'isodifférentiation : cette représentation, utilisée essentiellement à grande échelle, privilégie le tracé de courbes matérialisant l'apparition et la disparition d'horizons et volumes pédologiques significatifs. Cette méthode a été testée en Algérie par Djili (1983).

Par ailleurs, des critiques ont été formulés à l'égard de ces représentations par de nombreux auteurs (King, 1984 ; King et al 1989 ; Girard et al 1989 ; Jamagne .1993 ; Chrétien et al, 1993 ; Lagacherie, 2002). Le seul document graphique ne représente pas la totalité des informations recueillies et traitées par l'auteur de la carte. En effet, le pédologue dans son effort de synthèse omet certains détails qui parfois sont importants. De même, sur la carte on retrouve une terminologie trop synthétique ainsi que des symboles souvent complexe

Des tests de pureté des unités cartographiques (Walter, 1990) ont montré que les variabilités au sein des unités de sols étaient souvent plus fortes que celles attendues d'après les normes édictées par les bureaux de cartographie pédologique (Lagacherie, 2002). En fin, le pédologue se trouve parfois contraint de rapporter certains détails dans la notice pour des raisons d'échelles ou de contraintes graphiques (lisibilité du document).

Girard et al 1989 considèrent les documents établis suivant les procédés classiques trop statiques, constituant un inventaire figé, comprenant un nombre important de données non classées.

Face à cette situation, l'utilisation de l'outil informatique a permis de résoudre les difficultés suscitées. En effet, la mémorisation maximale des données de base ou élaborées est rendue possible grâce aux banques de données et Systèmes d'Information Géographique (S.I.G). Celui-ci est présenté (Brabant, 1993) comme étant une base de données numérisées dans laquelle sont stockées des informations variées et repérées par leurs positions géographiques. Ces informations sont dites géocodées ou également géo-référencées.

Les utilisateurs ont souvent besoin d'une information ciblée dans des délais très courts. Le mode classique d'archivage de l'information pédologique ne le permet pas souvent. Ainsi, de nombreux pays ont entamé la création de banques de données informatisées nationales ou régionales. Dans ce sens, nous citons l'exemple des français qui ont utilisé les logiciels STIPA (1979) et DONESOL (1991) pour créer la banque de données des sols du Languedoc-Roussillon (Bornant et al. 1994). Des banques similaires sont en cours de réalisation aux plans européen et mondial, il s'agit des projet MARS (Meyer-Roux, 1987) et SOTER (ISRIC, 1995).

En Algérie, des efforts ont été fournis pour la création d'une banque de données. On

citera pour exemple les travaux effectués par Djili (2000) en vue de la création d'une banque de données informatisée ainsi que l'utilisation des SIG pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. D'autre part, un projet en vue de l'évaluation de la valeur vénale des terres agricoles à travers le territoire national est en cours de réalisation (INSID, 1999).

L'utilisation de l'outil informatique selon Girard et al. (1989) a permis l'accélération des tâches, notamment dans :

- L'élaboration des cartes : Lors de l'acquisition des données, on procède à la saisie directe des descriptions de sol sur terrain, la gestion informatique de ces données permet leur stockage en banque et leur restitution rapidement. L'analyse statistique de la couverture pédologique (statistiques descriptives et géostatistique) permet l'étude des relations spatiales des données avec le type de sol.
- L'exploitation des cartes : Le document cartographique classique est loin de représenter la totalité des informations recueillies et traitées par l'auteur de la carte. Les pédologues regroupent des informations faute de pouvoir les représenter séparément et les lecteurs doivent par la suite décoder des noms de sol et une symbolique graphique souvent complexe.

L'analyse de l'information cartographique par le biais des SIG a conduit à décrire un modèle informatique des données spatialisées comprenant deux ensembles :

- L'ensemble graphique : il correspond au contenant, où les données graphiques peuvent être gérées selon le mode raster ou le mode vecteur. Chacun des deux modes a ses intérêts et ses inconvénients. En mode raster, la carte est représentée sous forme d'une matrice de cellules carrées ou rectangulaires appelées pixels. En mode vecteur, les contours pédologiques sont décrits à l'aide des coordonnées de segments ou arcs qui les composent.
- L'ensemble sémantique fournit des informations sur le contenu des unités cartographiques. Elles sont plus complètes que celles visualisées sur carte papier. Il est possible d'indiquer plusieurs critères (King, 1990). Dès lors, l'exploitation de l'information graphique est facilitée. En effet, les caractéristiques pédologiques des profils ou celles du sol le plus proche peuvent être obtenues rapidement (visualisé), d'où différentes sortes de cartes thématiques sont susceptibles d'être produites.
- Selon Girard et al. (1989), le concept de SIG englobe à la fois la notion d'un système de gestion de base de données (SGBD) pour l'ensemble sémantique et celle de dessin assisté par ordinateur (DAO) pour l'ensemble graphique. Dans son utilisation, les auteurs recensent également l'étude de scénarii et combinaisons cartographiques. En effet, dans la partie sémantique d'une carte, on trouve une description de la nature des sols sur la base des caractéristiques permanentes. Dans certains cas, les notices comportent aussi des notions concernant la dynamique des systèmes tels que le fonctionnement hydrique ou le comportement par rapport aux façons culturales. Au sein d'un SIG, il est possible de décrire ces aspects dynamiques en précisant les flux existants entre horizons ou entre unités cartographiques. Des travaux (Tessier et al.,

1996 ; Wu et al., 2001) ont traité ces aspects dans le cadre de problèmes d'hydro-pédologie, d'érosion, de potentialité d'une culture etc. L'état global du sol peut être visualisé à chaque instant précis.

1.4 Utilisation des SIG en cartographie pédologique

D'après Legros et Bornand (1992) les S.I.G sont utilisés pour :

1.4.1 La cartographie proprement dite

Plusieurs essais ont été réalisés, telle que la cartographie par secteurs de référence (;Favrot, 1989 Lagacherie et al., 1993 ; Lagacherie et Oballos J., 2001). La zone test correspond à quelques centaines ou milliers d'hectares cartographiés en détail, il s'agit alors d'extrapoler autour du secteur de référence et de réaliser une cartographie automatique sur toute la région naturelle. L'outil utilisé permet de visualiser les résultats de calcul sous forme de cartes en mode raster. La démarche permet d'alléger la phase de terrain sans se substituer complètement à la prospection systématique du milieu naturel.

1.4.2 La cartogénese

Il s'agit de comparer la carte pédologique établie dans une région donnée aux autres cartes disponibles pour le même secteur (cartes des pentes, cartes des végétations, etc) en utilisant une méthode d'analyse multivariable (Arrouways, 1989) tel que l'analyse des correspondances multiples (ACM). Sur le plan pratique, le contrôle ou l'expertise d'une carte pédologique est possible en cas de contestation.

1.4.3 La thématisation

Les S.I.G ont permis d'introduire le concept de couches d'informations et de leur croisement (King et al 1989 ; Flasse et al 1991). Il est donc possible de combiner les informations de différentes natures (pédologiques, topographiques, agronomiques, etc....) pour établir des cartes thématiques. Pour ce faire, deux méthodes de croisements sont identifiées (Legros, 1996):

Le modèle déterministe dans lequel le phénomène étudié est grossièrement reproduit. Par exemple, le bilan hydrique sert à combiner des informations sur le sol, les plantes et le climat pour définir l'aptitude d'une culture non irriguée mais exigeante en eau.

Le modèle diffus ou boîtes noires correspondant au principe que si chaque facteur est favorable alors le résultat global sera favorable.

Cependant, certaines difficultés sont à signaler. En effet, souvent le croisement des cartes conduit à une carte résultante contenant un nombre considérable de polygones ou de pixels différents. Le thématicien se trouve confronté à des problèmes de précision (Jamagne et al. 1995) par suite de l'utilisation de données hétérogènes, quantitatives et qualitatives à des échelles diverses et correspondantes à des degrés de fiabilité variable.

L'exploitation des cartes pédologiques s'effectue par thématization (Faure, 1989). On en distingue différents types (Girard et al 1989) :

- Les cartes monofactorielles : Elles sont obtenues en procédant à une extraction de variables à partir de la définition sémantique des unités pédologiques comme par exemple la carte des classes de profondeur du sol et la carte des classes d'hydromorphie.
- Les cartes plurifactorielles : Elles sont obtenues en utilisant des méthodes empiriques de pondération. Chaque modalité des variables de définition des unités cartographiques est affectée d'une note. On utilise ensuite une pondération soit additive, soit multiplicative, soit combinatoire pour calculer une note chaque unité de sol. On procède ensuite à un découpage finale pour en classe avant la phase de dessin de la carte.
- Les cartes thématiques dérivées : Elles sont obtenues en utilisant des règles de pédotransfert qui consistent à combiner avec un poids relatif, les données disponibles ou d'accès faciles afin d'estimer des paramètres de sol manquants et dont la mesure est difficile (Jamagne et al. 1995). Ces règles peuvent concerner le degré de différenciation du solum, l'évaluation des capacités de stockage en eau (Bastet et al. 1998 ; Trouche et Morlon. 1999), la faisabilité d'une culture (Chéry et al. 2002) et l'estimation des risques de dégradation physique des sols ou de pollution.... Par exemple, on utilise d'abord un model de type régression multiple pour estimer la réserve utile en fonction des teneurs en argile, limon fin, limon grossier et matière organique des horizons qui sont ajustés par des coefficients. En fin, la réserve utile totale du sol est obtenue en tenant compte de la profondeur d'enracinement et l'épaisseur des horizons.

Dans le but de l'évaluation de l'aptitude des terres et l'amélioration et la gestion de la fertilité du sol, Loukili et al. (2000) ont utilisé le logiciel ILIWIS, croisé des données physico-chimiques des terres et des unités cartographiques. La carte de classement des sols pour l'irrigation (carte dérivée) est obtenue par le croisement des cartes monofactorielles elles même issues de la carte pédologique.

I.5. Apport des SIG à la cartographie

Les SIG sont conçus pour autoriser l'élaboration, la manipulation et l'archivage des cartes tels que :

- **L'aide à la création de l'information** : L'utilisation d'un SIG permet de construire une couche d'information correspondant au point représentant les profils. Les coordonnées correspondantes peuvent être calculées automatiquement. Les SIG permettent également le calcul rapide et précis des surfaces (King et Duval, 1989).
- **L'aide à l'exploitation de l'information** : l'utilisation des SIG permet la constitution d'une banque de données (Bornand et al 1994 ; Bracke et al., 2001). Dans ce cas, la carte obtenue représente une application parmi d'autres. En faite, plusieurs cartes

peuvent être obtenues en choisissant le nombre et le poids des facteurs pris en compte.

- **L'aide à la validation de l'information** : la création de la base de données permet plusieurs opérations. L'estimation de la variabilité interne des unités cartographiques est réalisée à l'aide de la géostatistique (Gascuel-odoux, 1987).
- **L'aide à l'édition des cartes** : en possédant un matériel de qualité, les SIG permettent de procéder rationnellement. En effet, et suivant la demande, il est possible de faire des tirages partiels d'une région et à l'échelle souhaitée. Pour introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG, Brabant (1993) a proposé de structurer l'espace rural avec sa couverture pédologique en quatre niveaux hiérarchisés :
- Nous avons d'abord l'unité naturelle de terrain (UNT) qui est définie suivant la topographie, la forme du modelé, la nature de la roche, du sol, de la végétation spontanée et de la forme du réseau hydrographique. Cette unité est subdivisée en unités modelées (UM) dont les formes sont reconnues dans le paysage suivant un motif répétitif tels que le sommet, le versant, le bas fond. La subdivision de cette unité donne des unités de sol (US) qui sont généralement disposées dans le même ordre répétitif. Chaque unité de sol est subdivisée en disposés dans l'ordre déterminé du sommet à la base. horizons qui correspondent au niveau quatre de la hiérarchie et qui sont

Ce découpage de l'espace rural tient compte des conditions requises par l'informatique, aux exigences du changement d'échelle et à la recherche d'une perte minimale d'informations lors de ces changements et, enfin, à répondre au besoin du développement rural.

1.6. Exploitation des cartes pédologiques

A grande échelle, le niveau taxonomique de référence pour la cartographie est la série de sol (Bornand, 1980 in Voltz 1986). La série caractérise une unité qui regroupe des sols situés dans une position topographique comparable, issus d'une même roche mère présentant une bonne homogénéité vis-à-vis de la texture, morphologie et épaisseur des différents horizons. Sur cette base, le pédologue cartographe considère que les propriétés en tous points de l'unité de sol à grande échelle peuvent être approchées avec une précision suffisante par les propriétés moyennes de l'unité (Jamagne, 1993 in Loukili et al, 2000).

D'après Walter (1990), la précision de l'estimation dans l'espace d'une propriété du sol à partir d'une carte pédologique pose un problème différent selon que cette propriété constitue ou non un critère cartographique. Elle va dépendre pour un critère cartographique donné des erreurs de mesure, de l'intervalle de variation admis par le pédologue et de la présence d'inclusions au sein des unités cartographiques. Dans les autres cas, elle dépendra des facteurs précédents et en plus, des corrélations avec les critères cartographiques.

1.7. Validité des cartes produites

L'informatisation des cartes pédologiques diminue les pertes d'informations ce qui permet l'élaboration de documents thématiques plus précis et plus complets. L'automatisation permet la production de nombreux documents d'une façon simple et dans des délais très courts. Le problème qui se pose alors est la validité des documents fournis. En effet, lors de la thématisation, l'utilisateur non spécialiste a souvent tendance à considérer l'unité cartographique de sols comme homogène. Sur de telles bases, le document produit est erroné. En fait, les thèmes traités correspondent rarement d'une façon directe à un critère ayant servi au cours de l'élaboration cartographique (King, 1984). Il existe de nombreuses méthodes pour contrôler un document cartographique. On vérifie pour cela soit l'emplacement des limites pédologiques, soit la caractérisation des unités cartographiques (Legros, 1978a). Pour ce faire, une nouvelle phase de prospection est nécessaire. Celle-ci est effectuée soit à une plus grande échelle sur des zones-test, soit par un semis de points d'observations placés au hasard (King, 1984 ; Legros, 1996). Cependant, ces méthodes sont coûteuses et rarement expérimentées. A cet effet, King (1984) propose l'édition de cartes dites de variabilité intra unité des thèmes concernés afin de mettre en garde l'utilisateur des cartes thématiques. De même, Legros (1978a) constate que souvent les impuretés sont nombreuses et la variabilité est importante au sein des unités cartographiques. L'effcience du cartographe ainsi que l'échelle peuvent être responsables de ces imprécisions mais également la complexité de la couverture pédologique. Pour cela, l'auteur recommande d'accompagner le document cartographique d'indications sur la pureté des unités de sol et si possible, leur variabilité.

D'autre part, certains auteurs estiment que malgré que les nouveaux outils informatiques aient permis une diffusion grandissante de l'information pédologique au travers d'une grande variété d'applications, ils n'ont pas encore apporté de solutions convaincantes pour représenter efficacement l'information sur la variabilité pédologique et l'imprécision qui lui est associée (Burrough and Frank in Lagacherie, 2002). Pour ce faire, des modèles basés sur des paramètres statistiques sont utilisés pour rendre compte de la variabilité spatiale intra-unité et de l'incertitude associée. Mais l'utilisation de ces modèles se trouve limitée car il est très rare que des bases de données pédologiques contiennent des observations et mesures permettant d'établir les paramètres statistiques pour l'ensemble des unités cartographique de sol (Lagacherie, 2002). Ce dernier propose, pour résoudre le problème lié à la disponibilité des données, un cadre théorique relatif à la logique du flou (Klirt and Yuan, 1995 in Lagacherie 2002). L'intérêt de cette théorie réside en :

- La substitution des limites abruptes entre unités de sol imposées par la « carte choroplète » des zones de transitions plus ou moins progressives.
- La localisation des unités typologiques de sol au sein d'unités cartographiques complexes en utilisant l'information qualitative décrivant l'environnement de ces unités typologiques.
- L'estimation des valeurs des propriétés des sols et leurs incertitudes associées pour

chaque unité de sol en utilisant leurs descriptions imprécises disponibles dans les bases de données pédologiques.

Chapitre II

Le milieu naturel

Situation générale

La zone d'étude proposée pour l'aménagement hydro-agricole se situe au Nord de Hennaya (Wilaya de Tlemcen) (figure 1). Elle est limitée à l'Est par la route communale Hennaya - Ain Youcef sur 5,875 km, à l'Ouest par la RN n° 22 Hennaya -Remchi sur une distance de 5 km, au Nord par une piste constituée de deux rangées d'oliviers sur 2,5 km et au Sud par la ville de Hennaya.

Elle s'intègre dans un pseudo-triangle de coordonnées UTM A = 649 980, 3 874 810 ; B = 647 920, 3 873 990 et C = 649 320, 3 869 100. L'altitude varie entre 300 et 350m, la superficie est de 783 ha.

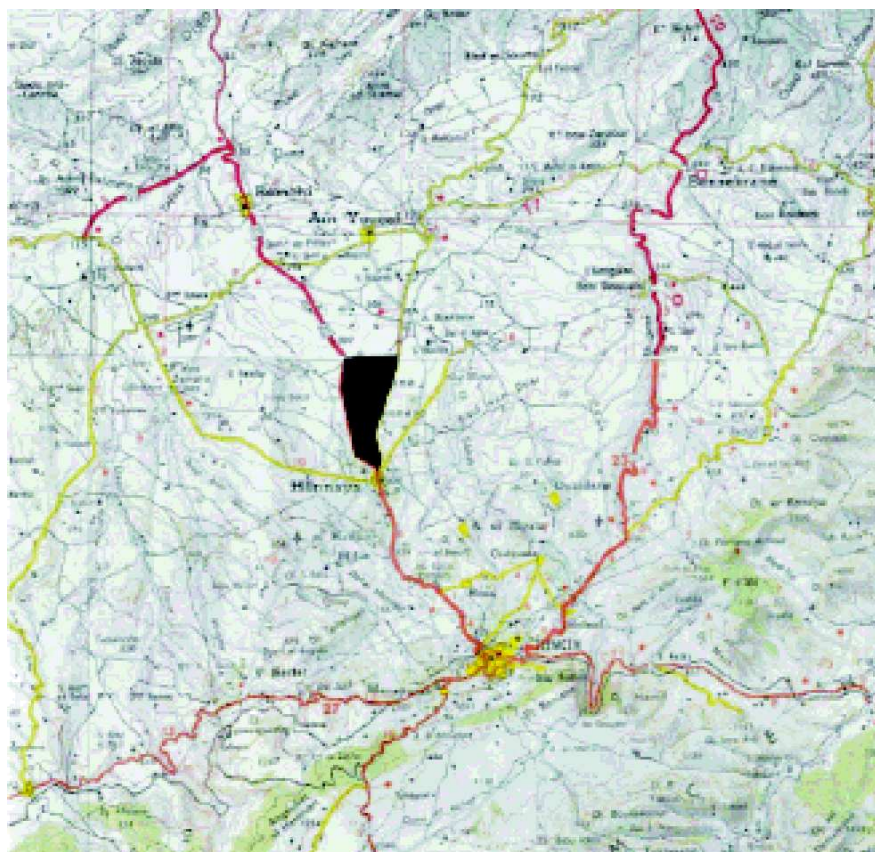


Figure 1 : Carte de situation géographique (extraite de la carte de Tlemcen 1/ 200 000)

Zone d'étude

Le climat

L'étude du climat a pour but de fournir les éléments nécessaires aux aménageurs pour dimensionner les ouvrages hydrauliques qui constituent un des facteurs principaux pour l'aménagement du territoire et le développement économique et social du pays.

Cette étude s'appuiera sur les observations effectuées par les principaux réseaux climatologiques existants (ONM et ANRH), et sur l'étude du BNEDER (1993).

Les stations climatologiques qui intéressent la zone d'étude sont celles de Mila Hennaya, Tlemcen Zenata, Remchi et Tlemcen ; ces stations sont gérées par l'ANRH et l'ONM. Le choix de ces stations s'explique par le fait que la station météorologique de Hennaya ne dispose que des données pluviométriques. Nous avons été contraint d'utiliser les données des stations les plus proches de la zone afin de compléter la synthèse climatique.

Les moyennes sont calculées sur des périodes observées variant entre 11 et 29 ans et peuvent être donc considérées comme représentatives.

Pluviométrie

Des données disponibles, nous n'avons retenu que celles de M'lila Hennaya qui est la station la plus proche de la zone d'étude. Il ressort du tableau 1 que les précipitations annuelles moyennes sont de 525mm. On enregistre le maximum de pluviométrie en mars avec 84,0 mm. Les hauteurs les plus faibles (5.2 mm) sont enregistrées en juillet et août.

Tableau 1: Précipitations annuelles en mm de la station de M'lila Henneya,

Statins	S	O	oN	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne Annuelle
M'lila Hennaya	21,0	36,7	68,3	68,3	57,8	78,7	84,0	57,8	31,5	10,5	5,2	5,2	525

ANRH (2000)

Température

Pour les températures dans la zone d'étude, nous disposons des données de stations de référence que nous allons reporter au tableau 2

Tableau 2 : Températures mensuelles moyennes (C°) des stations de Tlemcen zenata et Remchi d'après l'ONM (2000) et BNEDER (1993)

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	0	N	D	Année
Tlemcen Zenata (1967-1996)	10,18	11,27	12,71	14,61	17,68	21,25	24,86	25,55	22,63	18,47	14,39	11,04	17,05

D'après le tableau 2, janvier est le mois le plus froid avec une température comprise entre 10,18°C et 11°C, et août est le plus chaud avec une température qui fluctue entre 25,55 C° et 26,5°C.

La température moyenne annuelle de l'air varie entre 17,05°C et 17,58 °C.

Humidité relative

C'est un élément important du cycle hydrologique contrôlant l'évaporation du sol et la couverture végétale et qui représente un degré de saturation de l'air en vapeur d'eau.

Les données d'humidités relatives mensuelles moyennes de la station de Tlemcen Zenata sont présentées au tableau 3.

Tableau 3 : Humidités mensuelles moyennes (%), ONM (2000)

Nom de la station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	0	N	D	Année
Tlemcen Zenata 1967-1996	73,00	71,52	69,80	67,58	66,44	62,00	60,61	60,17	63,88	67,66	69,96	73,51	67,18

Les valeurs minimales sont enregistrées en juillet-août (60% environ) et les maximales en décembre et janvier (73 %). La moyenne annuelle est de 67,18%. Ces valeurs sont relativement élevées.

Vents

Il s'agit d'un facteur important pour l'agronome et l'aménagiste, puisqu'il détermine le choix du type d'irrigation et contribue dans l'élaboration du système de protection (brise-vent) des périmètres.

A partir des observations réalisées pendant cinq années (1975- 1980), une rose des vents a été tracée pour la station de Tlemcen et pour les douze (12) mois de l'année. Il s'avère que les vents dominants ont une direction Ouest et Nord. La vitesse moyenne maximale est de 2,4 m/s et peut atteindre 4,4 m/s.

Sirocco

Il s'agit d'un vent chaud pouvant causer aux cultures des dégâts importants par l'élévation brutale des températures. Les valeurs observées sont présentées au tableau 4.

Tableau 4 : Valeurs moyennes mensuelles du nombre de jours de sirocco

Nom de la station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Tlemcen Zenata	0	0	0	0	0	2	4	2	0	0	0	0	8
Remchi	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	3

Pour les deux stations, aucune journée de sirocco n'a été observée pendant les mois froids, le maximum de jours de sirocco est atteint en période estivale (juillet-août).

Gelée

Pour Tlemcen Zenata, ce phénomène est fréquent en hiver de novembre à avril avec un maximum de 5 jours en janvier (tableau 5). Il existe donc un grand risque de gelée, surtout en janvier.

Tableau 5: Valeurs moyennes mensuelles du nombre de jours de gelée, ONM (2000)

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Tlemcen Zenata 1976-1984 1994-1996	5,250	1,000	0,750	0,250	0	0	0	0	0	0	0,500	2,000	9,750
Remchi	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Neige

Le tableau 6 indique qu'il ne neige pratiquement jamais dans la zone d'étude.

Tableau 6 : Valeurs moyennes mensuelles du nombre de jours de neige, ONM (2000) et BNEDER (1993)

Nom de la station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Tlemcen Zenata 1976-1984	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25
Remchi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Evapotranspiration

L'évapotranspiration est indispensable, aussi bien à l'agronome qu'à l'hydraulicien ou à l'hydrologue ; elle met en jeu le sol, le climat et la plante.

Les valeurs moyennes mensuelles et annuelles de l'évapotranspiration des stations sont regroupées au tableau 7

Tableau 7 : Evapotranspirations mensuelles et annuelles aux différentes stations calculées selon la formule de Penman (mm), BNEDER (1993).

Nom de la station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Cumul Annuel
Tlemcen Zenata *	43,09	51,80	89,28	104,4	134,23	159,9	192,20	175,77	135,30	73,47	55,80	45,88	1261,64
Remchi	43,71	52,02	88,35	104,4	131,44	155,1	157,86	171,43	129,30	93,93	54,90	46,19	1228,63

D'après le tableau ci-dessus, il ressort que l'ETP est forte entre les mois d'avril (104,4 mm) et septembre (135,30 mm). Le maximum est atteint en juillet (192,20 mm) et la valeur minimale est enregistrée en janvier (43,09). Les valeurs les plus élevées se produisent en juin, juillet et août.

Synthèse des données climatiques

2.2.9.1 Climagramme pluviométrique d'Emberger

Le climagramme pluviométrique d'Emberger, spécifique au climat méditerranéen, classe la région de Hennaya dans l'étage bioclimatique sub-humide à hiver doux. Le coefficient Q_3 (stewart.1969) pour la station de Tlemcen Zenata est égal à 116,63 et pour la station de Remchi à 123,76. Le coefficient Q_3 (stewart.1969) se calcule comme suit :

$$Q_3 = 3,43.P/(M-m)$$

Avec :

- P : pluviométrie annuelle (mm);
- M : moyenne des maximums du mois les plus chauds;
- m : moyenne des minimums du mois les plus froids ;

2.2.9.2 Diagramme ombrothermique de «Gausсен»

Ce diagramme permet de définir les mois secs. La figure 2 fait ressortir six mois secs qui s'étalent de Mai à Octobre.

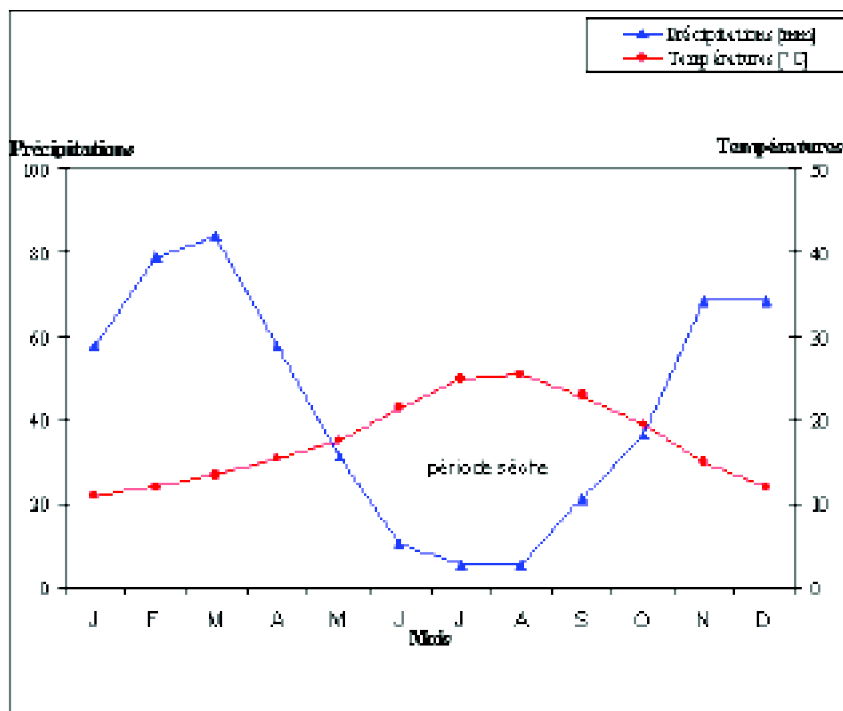


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de Gausсен

Géologie et hydrogéologie

D'après la carte géologique de Tlemcen n°270, la région d'étude présente deux ensembles topographiquement bien distincts : une zone montagneuse qui se situe au sud et à l'est et une dépression qui s'étale en une vaste plaine qui s'oriente vers le Nord et l'Ouest.

Le périmètre de Hennaya est représenté par une plaine à pente faible vers le Nord. Dans sa base, il est constitué de marnes helvétiques qui sont couvertes de formations alluvionnaires du quaternaire, les cônes de déjection des oueds descendants des monts de Tlemcen ayant remblayé une cuvette plus ancienne, de conglomérats, de graviers, de moellons et de matériaux sablo-argileux calcaires. En surface s'est formée une croûte calcaire dure carbonatée.

Les formes actuelles du périmètre sont le résultat de l'activité des oueds venant du sud, le rôle principal est dévolu à l'oued Sikkak. Le périmètre occupe la quatrième terrasse (si on prend comme base le lit de l'oued Sikkak). Elle est formée d'alluvions dont la base est constituée de particules grossières et fines en surface. Ces alluvions ont subi une évolution partielle au cours de laquelle se sont formées des croûtes dures carbonatées dont l'épaisseur varie de 30 à 70 cm. Les sols bruns-rouges se sont

développés sur cette terrasse.

Suite à l'activité des oueds Hennaya et Sidi Kanoun, des alluvions contemporaines se sont déposées sur une partie du périmètre, en aval du village de Hennaya. Elles sont fines sans être trop argileuses. Les sols isohumiques se sont formés sur ces terrasses.

Le réseau hydrographique est relativement peu développé dans la région de Hennaya. L'oued principal qui coule toute l'année est le Sikkak sur lequel un barrage destiné à l'irrigation de la plaine est en construction. Les autres oueds sont l'oued Hennaya et oued Sidi Kanoun. il existe également de nombreux ravins qui sont alimentés en eau seulement pendant la saison des pluies.

Le processus de formation des sols de la région a été influencé par les roches-mères riches en carbonates, par le climat et par la durée du processus même de formation des sols.

Selon la figure 3, il existe trois ensembles lithologiques dans la zone étudiée.

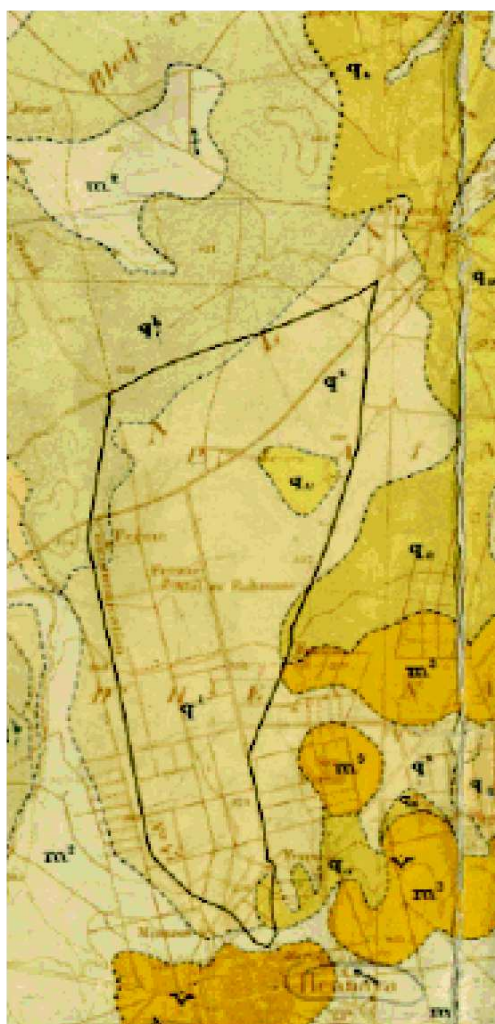


Figure 3 : Carte géologique du périmètre étudié
(Extrait de la carte géologique de Tlemcen n°270 au 1/50 000)

q¹ : calcaires lacustres, massifs ou grumeleux, accompagnés de marnes gréseuses lacustres blanches.

q^b : carapace calcaire tufeuse en dessous, recouvrant toutes les formations du miocène et pléistocène.

q^b „ : alluvions anciennes, dépôts caillouteux et limoneux des vallées, de la bordure des plateaux et des grandes cuvettes.

D'après la carte précitée on remarque que les calcaires lacustres sont largement répandus dans la zone.

Chapitre III

Matériel et méthodes

La carte pédologique est un document de base pour toute étude d'aménagement. Les difficultés majeures pour le pédologue cartographe résident dans la saisie, la gestion, le traitement et la restitution d'un grand volume de données (Girard et al 1989). En effet, dans son travail de synthèse, le pédologue réunit les caractères du sol en horizons, ces derniers sont constitués en profils et sont à leur tour associés pour former une unité cartographique. King (1987) considère que la carte en tant qu'expression graphique ne représente qu'une partie de l'information d'où la nécessité de poursuivre les investigations soit en détaillant les notices et les ouvrages publiés, soit en réalisant d'autres études sur terrain. Les progrès réalisés dans la cartographie ont démontré des lacunes caractérisant les cartes de sols tels que réalisées couramment. C'est dans ce sens que nous nous proposons de valoriser les données pédologiques de la carte pédologique de Hennaya. La démarche comporte les étapes suivantes :

- La réalisation de la carte des sols à grande échelle (1/20 000) selon les références du cahier des charges n°199/1999.
- L'analyse critique des données en vérifiant leur concordance. Les données concernées sont soit qualitatives comme la couleur, l'effervescence à l'HCl soit

quantitatives comme la texture, le pourcentage de calcaire total, le taux du calcaire actif, la C.E.C, le pH et la matière organique.

- La valorisation des données pédologiques en utilisant une approche statistique et en procédant à une analyse thématique.

3.1. La carte des sols

L'étude agro-pédologique de la plaine de Hennaya a été réalisée au mois de novembre 1999 suivant une prospection systématique avec une précision du 1/20 000 restituée sur un fond topographique au 1/25 000, elle succède à celle de Techno Exportsroy (1971) réalisée au 1/50 000.

La carte des sols a été réalisée en plusieurs phases :

- Une phase préparatoire qui a porté essentiellement sur l'analyse de l'étude pédologique au 1/50 000 réalisée par Techno Exportsroy (1971) et sur la délimitation de la zone d'étude sur la carte topographique au 1/25 000 (feuille Tlemcen 1-2);
- Une reconnaissance préliminaire du terrain qui a permis de situer la zone d'étude dans son ensemble en analysant le relief et les moyens d'accès (routes, pistes), de réaliser un inventaire provisoire des principaux types de sols et d'évaluer le volume de travail.
- Après un maillage de la zone, il a été procédé à l'implantation et la réalisation de 137 profils pédologiques ou fosses d'observation (figure 4) de profondeur très variable (35 à 160 cm) suivant les niveaux limitants (croûte, encroûtement et conglomérats) suivis de la description morphologique en tenant compte surtout de la profondeur du sol, couleur des horizons d'après le code Munsell, la texture, structure, porosité, présence de calcaire ou non, la forme du calcaire, l'enracinement et les inclusions.

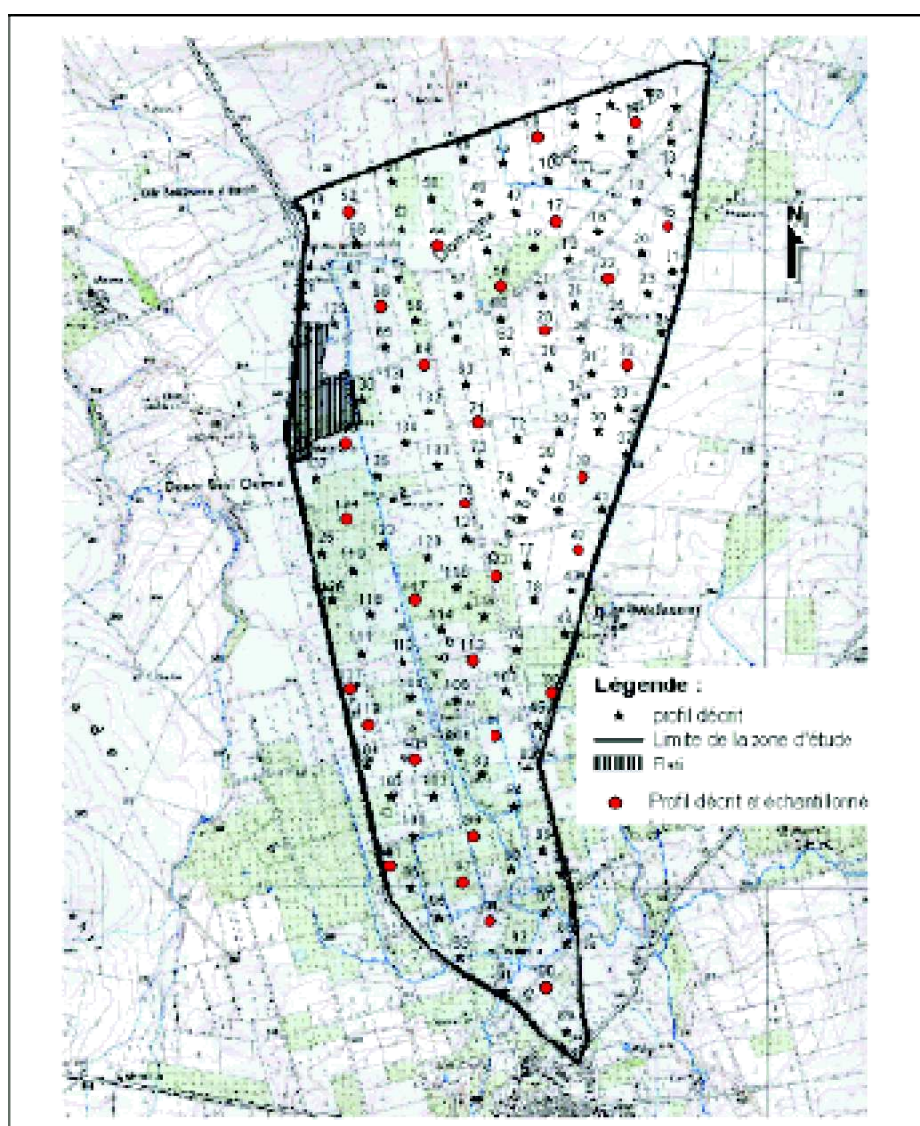


Figure 4 : Carte d'implantation des profils. Echelle : 1/25 000

Un prélèvement d'échantillons sur 31 profils parmi les unités cartographiques les plus représentatives observées sur le terrain. La densité de prélèvement des échantillons a été faite en fonction de l'hétérogénéité du relief et des sols qui ne diffèrent parfois que par la profondeur du sol et qui repose soit sur une croûte, un encroûtement ou un niveau caillouteux.

3.1.1 Classification

La classification des sols utilisée est la CPCS (1967), celle-ci est adoptée par la direction de la pédologie de l'A.N.R.H (1970). Ce choix obéit aux termes du cahier des charges conclu avec le maître de l'ouvrage. La structure de cette classification repose sur la détermination des classes, sous classes, groupes, sous groupes, familles, séries et types. En effet, la précision avec laquelle est menée la prospection (une observation tout les 5 ha environ) permet de descendre dans les niveaux bas de la classification.

Sur les cartes, les sols des sous classes et groupes sont représentés par une teinte plate, les sous groupes, familles, séries, et types sont représentés par l'addition de pastilles teintées, des signes, des symboles ou des cartouches teintées; les autres indications concernant les textures, les profondeurs des horizons sont portées sur les cartes. Les teintes, et symboles utilisés sont conventionnels.

3.1.2 Analyses du sol

- Les analyses effectuées au laboratoire pour la caractérisation physico-chimique des échantillons de terres sont :
 - **La granulométrie** : méthode internationale, à la pipette Robinson.
 - **Calcaire total** : méthode volumétrique au calcimètre de Bernard;
 - **calcaire actif** : méthode Drouineau;
 - **Conductivité électrique** : sur extrait de pâte saturée ; méthode Riverside (sur extrait après repos de 24 heures, la pâte est centrifugée, l'extrait sert à la mesure); si la C.E est supérieure à 2 dS/m, la détermination des sels solubles est alors nécessaire;
 - **Carbone organique** : Attaque à froid par le mélange sulfochromique, suivi d'un dosage par colorimétrie;
 - **azote total**: méthode Kjeldahl;
 - **Potassium total** : attaque de 5 heures à l'acide nitrique bouillant suivi d'un dosage par photomètre à flamme;
 - **Phosphore assimilable** : méthode Truog avec 2 prises différentes d'échantillons (2 et 5g);
 - **Phosphore total** : attaque de 5 heures à l'acide nitrique bouillant, dosage colorimétrique avec le molybdate d'ammonium réduit par le chlorure stanneux;
 - **pH** : pH mètre; rapport sol/eau 1/ 2,5
 - **Bases échangeables**: K, Na, Ca, et Mg : percolation de l'échantillon avec une solution normale d'acétate d'ammonium à pH 8,2;
 - Na et K par photométrie à flamme.
 - Ca et Mg sont déterminés en utilisant le complexons pour la capacité totale d'échange, percolation de chlorure de sodium à 10%, dosage des ions ammoniums déplacés par la réaction Berthelot;
 - **Bilan ionique** : effectué sur extrait pâte saturée pour les échantillons présentant un taux de salinité élevée (>2 dS/m);
-
- | | |
|---|----|
| Na et K : photométrie à flamme; | 1. |
| Ca et Mg : complexons; | 2. |
| Cl : méthode colorimétrique, le lithyocyanate mercurique; | 3. |
| SO4 : par turbimétrie de SO4Ba; | 4. |

CO3 : méthode potentiométrique; 5.

Dosage du fer total : attaque au triacide et dosage colorimétrique du fer. 6.

Remarque

Pour la texture, nous avons utilisé le triangle américain (2^{ème} Approximation) qui est le triangle le plus utilisé par les pédologues.

3.2 L'analyse des données

Dans un premier temps, les résultats d'analyses sont vérifiés à travers des tests. Sachant que les variables pédologiques sont liées entre elles, l'étude de la relation qui les lie est souvent utilisée par les pédologues pour vérifier la qualité de l'information (Legros et al., 1992). Elle est aussi fréquemment utilisée pour prédire la valeur d'une donnée du sol à partir d'une donnée d'accès ou de mesure facile. Il s'agira de voir si leur réalisation est justifiée, ensuite on procédera au contrôle de vraisemblance et enfin au contrôle de cohérence.

Lors de l'étude de la qualité des données pédologique, Djili (2000) différencie les variables principales qui peuvent être qualitatives ou quantitatives mesurables quel que soit le type de sols tels que la couleur, la texture et la structure des variables secondaires qui dépendent d'une variable principale.

- le contrôle de vraisemblance consiste à évaluer si les données saisies ont des valeurs acceptables.

- le contrôle de cohérence consiste à examiner si les données saisies sont compatibles entre elles.

Dans un second temps, la variabilité des propriétés est étudiée sur l'ensemble des profils, suivant les horizons et enfin selon les différentes unités cartographiques.

3.3 Valorisation des données

3.3.1) Elaboration des cartes thématiques

Les données de terrain géoréférencées sont saisies et traitées avec le logiciel Map Info qui permet de réaliser des cartes thématiques. Pour ce faire, on réalise une analyse thématique en identifiant les profils homogènes vis-à-vis d'un critère donné. Les plages cartographiques sont dessinées en tenant compte de cette homogénéité. On obtient ainsi des cartes monoparamétriques.

3.3.2) Croisement des cartes thématiques

Moyennant la fonction «Découper» du logiciel Map/Info, on croise les cartes monoparamétriques. Cette opération permet l'intersection des différentes couches et aboutie à une carte pédologique dite semi-automatique (CPSA).

3.3.3) Comparaison entre les cartes

Il s'agit de confronter les cartes monoparamétriques issues des observations à leurs équivalents dérivés de la carte pédologique classique (CPC). Par la suite, cette dernière carte est comparée au résultat du croisement des différentes cartes monoparamétriques de l'horizon de surface d'abord puis de l'horizon de subsurface par et enfin à l'horizon de profondeur. La synthèse et la discussion des résultats permettront d'identifier les critères pédologiques les plus pertinents de la zone étudiée.

La dernière comparaison est faite entre la carte pédologique et le résultat du croisement des cartes monoparamétriques elles mêmes croisées à la carte thématique de profondeur et ce en tenant compte des critères de cartographie les plus pertinents.

La restitution des différentes cartes est faite au 1/25 000 pour faciliter leur comparaison.

Dans le schémas suivant sont reprises les principales étapes constituant l'approche méthodologique:



Step	What happens	Where
1	Bill is introduced	House of Representatives
2	Bill is assigned to a committee	House of Representatives
3	Committee holds hearings and reports back	House of Representatives
4	House votes on the bill	House of Representatives
5	Bill is sent to the Senate	Senate
6	Senate votes on the bill	Senate
7	Both chambers pass the bill	Both House and Senate
8	Bill goes to the President	White House
9	President signs bill into law or vetoes it	White House

Step	What happens	Where
1	Bill is introduced	House of Representatives
2	Bill is assigned to a committee	House of Representatives
3	Committee holds hearings and reports back	House of Representatives
4	House votes on the bill	House of Representatives
5	Bill is sent to the Senate	Senate
6	Senate votes on the bill	Senate
7	Both chambers pass the bill	Both House and Senate
8	Bill goes to the President	White House
9	President signs bill into law or vetoes it	White House

Step	What happens	Where
1	Bill is introduced	House of Representatives
2	Bill is assigned to a committee	House of Representatives
3	Committee holds hearings and reports back	House of Representatives
4	House votes on the bill	House of Representatives
5	Bill is sent to the Senate	Senate
6	Senate votes on the bill	Senate
7	Both chambers pass the bill	Both House and Senate
8	Bill goes to the President	White House
9	President signs bill into law or vetoes it	White House

Chapitre IV

Résultats et discussion

Classification et caractéristiques des sols

Selon la classification française (C.P.C.S, 1967) utilisée par l'ANRH, les sols de la plaine de Hennaya se regroupent dans les trois classes suivantes (figure 5) :

- Les sols à sesquioxydes de fer et de Manganèse;
- Les sols calcimagnésiques;
- Les sols isohumiques.

Classe des sols à sesquioxydes de fer et de Manganèse

Localisée à l'Ouest de la plaine, cette classe forme une large plage mitoyenne avec les sols isohumiques et calcimagnésiques, sa surface est de 271,02 ha soit 34,62 % de la surface totale.

Les sols à sesquioxydes de fer sont des sols rouges formés sous un climat de type

méditerranéen. Dans la zone d'étude, cette classe est représentée par le sous-groupe recalcifé. Les textures limono-argileuses, argileuses et équilibrées prédominent.

Les résultats d'analyses de ces sols (tableau 8) montrent que la teneur en matière organique dans les horizons de surface varie entre 1,37 et 2,84%, et entre 0,6 et 1,32 % dans l'horizon compris entre 60 et 120cm.

Le rapport C/N est généralement compris entre 9 et 11 traduisant ainsi une bonne minéralisation de la matière organique. La teneur en CaCO_3 total de ces sols varie entre 21,2% et 24.8%. La teneur en CaCO_3 actif se situe entre 7 et 12% en moyenne et limite l'aptitude de ces sols aux cultures à cause d'un risque de chlorose pour certaines espèces arboricoles. Le pH est alcalin et varie entre 8,0 et 9,4.

Cette classe est représentée uniquement par le sous groupe des sols recalcifés dont le profil 117 est le plus représentatif.

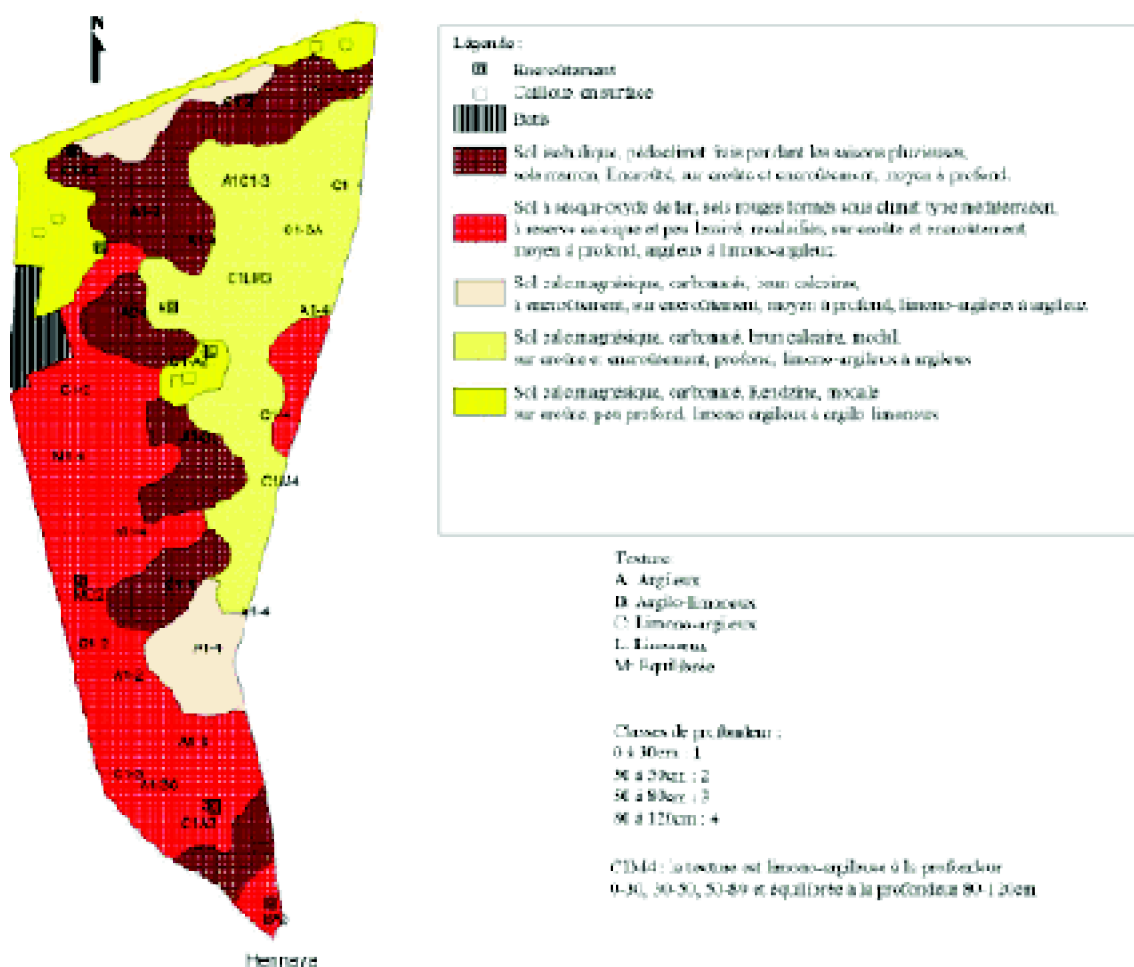


Figure 5 : Carte pédologique Précision 1/20 000 Echelle : 1/25 000



Photo 1. Photo prise le 10 avril 2000

Photo 1. Photo prise le 10 avril 2000

Néflier planté sur sol à sesquioxyde de fer - recalifié sur encroûtement à 70 cm (Profil 110), arbre chétif, les feuilles sont jaunes (chlorose).

Tableau 9 : Résultats des analyses physico-chimiques du profil 117

Profondeur (cm)	A%	Lf+Lg %	Sf+Sg%	MO%	C‰	N‰	C/N	pH	CEdS/m
0-30 Ap	23	42	31	1,96	11,4	1,09	10	7,81	1,40
30-50 (B)	28	65	26	1,53	8,9	1,05	8	7,92	1,70
50-80 C1	16	28	53	0,68	4	0,44	9	7,78	1,87
80-120 C2	19	55	13	0,65	3,8	0,14	27	7,79	2,87

Tableau 10 : Réserves minérales du profil 117

Profondeur (cm)	CaCO ₃ total%	CaCO ₃ actif%	CECCmol/kg	P ₂ O ₅ total‰	P ₂ O ₅ assim ppm	K ₂ O %
0-30 Ap	24,8	12,75	6,86	1,59	96,18	2,84
30-50(B)	23,2	12,63	6,72	1,27	41,22	2,42
50-80C1	21,2	11,13	11,6	0,78	20,61	1,56
80-120C2	22,4	10,88	14,3	0,71	20,61	1,74

Le profil est caractérisé par la couleur rouge ocre due à l'oxydation du fer. La texture est équilibrée sur l'ensemble du profil. Le taux de matière organique est faible, la valeur maximale (1,96 %) se situe en surface.

Le pH est légèrement et 2,87 dS/m en profondeur. Le pourcentage alcalin, la CE est faible et varie entre 1,4 dS/m en surface de calcaire total est assez élevé sur l'ensemble du profil et varie entre 21 et 25 %, le calcaire actif est compris entre 10 et 13 %. Ces taux limitent le choix des cultures arboricoles.

Classe des sols calcimagnésiques

Les sols calcimagnésiques carbonatés sont représentés par les rendzines modales, les sols bruns calcaires modaux et les sols bruns calcaires sur encroûtement. Ils occupent une surface de 324,02 ha soit 41,38 % de la surface totale.

Les textures prédominantes sont limono-argileuse (LA), argilo-limoneuse (AL) et argileuse (A). La fraction limoneuse augmente généralement avec la profondeur.

La teneur moyenne en matière organique (tableau 11) est de 2,2% en de moyenne dans l'horizon surface et varie entre 1 et 1,5% dans les horizons de profondeur. Le rapport C/N se situe entre 9 et 11.

Dans ces sols, la teneur en calcaire actif augmente avec la profondeur, elle varie en moyenne entre 6,0 et 15,0%. Les bases échangeables sont dominées par le calcium (Ca^{++}) dont les valeurs se situent entre 16,75 et 30 cmol/kg. Les autres bases se situent entre 1,15 et 7,09 Cmol/kg pour le Magnésium (Mg^{++}), entre 0,30 et 1,76 Cmol/kg pour le potassium (K^+) et entre 0,48 et 3,37 Cmol/kg pour le sodium (Na^+).

Le pH est légèrement alcalin (8).

La conductivité électrique (CE) n'est pas élevée, elle varie entre 0,81 et 4,68 dS/m. La CE moyenne est de l'ordre de 1 à 2 dS/m. La salinité de ces sols serait secondaire et aurait pour origine les eaux usées utilisées pour l'irrigation.

- Situation : Nord Ouest de la zone d'étude
- Carte topographique au 1/25 000 (Tlemcen 1,2).
- Topographie: plane avec une légère inclinaison de 1% d'Ouest vers l'Est.
- Culture : jachère.
- Terrain labouré sur 20 cm.
- Coordonnées UTM (m): X = 648 127,585; Y=3 873 402,201.
- **CPCS** : Sols calcimagnésiques ; carbonatés ; rendzines ; modales ; peu profond ; sur croûte calcaire à 35 cm ; type limono-argileux.
- **0 – 35 cm** : horizon rouge ocre 2,5YR2/4 ; frais ; texture LA ; structure grumeleuse ; porosité très bonne ; fine radicules lignifiées ; quelques débris de croûte (2%) ; friable ; effervescence forte ; transition nette.
- **> 35 cm** : Croûte calcaire dure.

Les résultats des analyses sont rapportés dans les tableaux 12 et 13.

Tableau 12 : Résultats des analyses physico-chimiques du profil 66

Profondeur (cm)	A%	L%	S%	MO%	C‰	N‰	C/N	pH	CEdS/m
0-35Ap	33	29	37	2,63	15,3	1,41	11	7,8	1,36
>35R	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 13 : Réserves minérales du profil 66

Profondeur (cm)	CaCO ₃ total %	CaCO ₃ Actif %	CECCmol/kg	P ₂ O ₅ total‰	P ₂ O ₅ assim ppm	K ₂ O‰
0-35A	40,6	16,86	12,18	1,12	61,83	3
>35R	-	-	-	-	-	-

En dehors du fait que le profil est peu profond, celui-ci est caractérisé par des teneurs très élevées en calcaire total (40,6 %) et calcaire actif (16,8 %). Les taux d'argile (33 %) et de matière organique (2,63 %) sont assez élevés. Avec 12,18 Cmol/kg, la CEC est moyenne, le pH est légèrement alcalin (7,8) et la conductivité électrique est faible (1,36 dS/m).

4.1.2.2. Les sols bruns calcaires à encroûtement calcaire

Ces sols sont identiques aux sols modaux sauf qu'ils sont sur des niveaux limitants (croûte ou encroûtement calcaire exemple du profil 9). Ils sont situés au nord et au sud de la zone, leur surface est de 55,84 ha, soit 7,13 % de la superficie totale.

Description du profil n° 9

- Carte topographique au 1/25 000 (Tlemcen 1-2)
- Profil situé au Nord Est du périmètre au niveau de la limite
- Topographie: plane
- Culture: jachère
- Débris de croûte calcaire en surface (10 à 15%)
- Coordonnées UTM (m) : X= 649 006,246; Y= 3 874 386,943
- **CPCS** : Sol calcimagnésique ; carbonaté ; brun calcaire ; à encroûtement calcaire ; type limono-argileux
- **0 – 20m** : Horizon brun foncé (7,5 YR 3/2) ; texture LA ; structure grumeleuse ; porosité très bonne ; fines radicelles lignifiées ; Inclusions débris de croûtes calcaire (3 à 5%) ; effervescence forte ; transition graduelle.
- **20 – 47 cm**: Horizon brun foncé (7,5 YR 3/2) ; texture AL ; structure polyédrique fine ; porosité très bonne ; débris de croûtes calcaire (2 à 3%) ; effervescence forte ; transition nette.
- **> 47 cm** : Croûte calcaire dure.

Les résultats des analyses sont rapportés dans les tableaux 14 et 15.

Tableau 14 : Résultats des analyses physico-chimiques du profil 9

Profondeur (cm)	A%	L%	S%	MO%	C‰	N‰	C/N	pH	CEdS/m
0 –20A	39	26	30	2,84	16,5	1,05	16	8,02	2,71
20 -47C	39	29	30	3,04	17,7	1,2	15	7,93	2,1

Tableau 15 : Réserves minérales du profil 9

Profondeur (cm)	CaCO3 total%	CaCO3 Actif%	CECCmol/kg	P2O5 total‰	P2O5 assimil(PPM)	K2O‰
0 –20A	16,5	8,31	12,77	2,22	185,49	5,16
20 -47C	15,6	6,32	14,17	2,43	21,53	4,20

Le profil repose sur une croûte calcaire dure. Le taux de calcaire total est élevé et varie peu dans le profil (16 % environ), le pH est alcalin (8) et la CE est faible (2 dS/m). Le taux d'argile est assez élevé en surface et en profondeur (39 %). Ce sol est moyennement pourvu en matière organique (3 %). La CEC est moyenne avec des taux respectifs de 12,77 et 14,17 Cmol/kg en surface et en profondeur.

4.1.2.3. Les sols bruns calcaires modaux

Avec les sols à sesquioxyde de fer et/ou de manganèse, ces sols sont les plus représentatifs de la région d'étude. Ils forment de larges plages à l'Est du périmètre et sont plus profonds (exemple du profil 22) que les précédents. Leur surface est de 193,69

ha représentant 24,74 % de la surface totale.

Description du profil n 22

- Carte topographique au 1/25 000 (Tlemcen 1-2)
- Profil situé au nord-Est de la zone d'étude.
- Topographie: plane
- Culture: pêche (bon état)
- Coordonnées UTM X= 649 423,035; Y=3 873 582,100
- **CPCS** : Sol calcimagnésique ; carbonaté ; brun calcaire ; modal ; profond ; type limono-argileux.
- **0 – 20 cm** : Horizon brun foncé (7,5 YR 3/2) ; frais ; texture LA ; structure grumeleuse émoussée ; porosité très bonne ; friable et meuble ; quelques débris végétaux; effervescence forte; transition graduelle.
- **20 – 50 cm**: Horizon brun foncé (7,5 YR 3/2) ; frais ; texture LA ; structure polyédrique fine ; porosité très bonne ; quelques fines radicelles ; activité biologique bonne ; accumulations en pseudomycélium calcaires ; transition graduelle ; effervescence forte.
- **50 – 90 cm** : Horizon brun foncé (7,5 YR 3/2) ; texture LA ; structure polyédrique fine, porosité bonne ; friable ; accumulations en pseudomycélium calcaire; traces d'anciennes racines en décomposition ; quelques débris de coquilles ; activité biologique bonne ; effervescence forte; transition graduelle.
- **90 – 120 cm** : Horizon brun pâle (10 YR 6/3) ; texture A ; structure polyédrique fine ; porosité très bonne ; activité biologique bonne ; présence de pseudomycéliums calcaires ; consistance peu dure ; effervescence forte.

Les résultats des analyses au laboratoire sont présentés dans les tableaux 16 et 17.

Tableau 16 : Résultats d'analyses physico-chimiques du profil 22

Profondeur (cm)	A%	L%	S%	MO%	C‰	N‰	C/N	pH	CEdS/m
0 –20Ap	29	39	30	1,89	11	1,24	9	7,95	3,66
20 -50(B)	37	27	36	1 ,87	10,9	1,12	10	8,13	1,38
50 -90BC	34	32	31	1,70	9,9	0,99	10	8,07	1,19
90 -120C	50	28	19	1,25	7,3	0,79	9	7,95	1,59

Tableau 17 : Réserves minérales du profil 22

Profondeur (cm)	CaCO ₃ total%	CaCO ₃ Actif%	CECmol/kg	P ₂ O ₅ total‰	P ₂ O ₅ assimil(ppm)	K ₂ O‰
0 – 30Ap	19,53	12,27	10,42	1,65	125,95	2,43
30 –50(B)	17,43	13,52	10	1,58	43,51	2,05
50 –80BC	19,53	13,88	9,86	1,49	27,48	1,99
80 -120C	17,53	13,64	12,64	1,90	22,90	2,21

Les données analytiques du profil indiquent que la texture dans l'ensemble du profil est fine et de type limono-argileuse avec un niveau argileux en profondeur.

Le taux de matière organique est faible dans tout le profil, le maximum est atteint en surface avec un taux 1,89%. Le pH est alcalin et varie entre 7,95 et 8,13, la CE est relativement élevée dans l'horizon de surface (3,66 dS/m) alors qu'elle est comprise entre 1,19 et 1,59 dS/m dans le reste du profil. Dans leur ensemble, ces valeurs ne présentent pas de contrainte majeure à l'irrigation. Le sol présente une bonne structure et une bonne porosité, l'irrigation empêchera toute concentration saline et permettra la lixiviation des sels. D'autre part, on remarque la présence assez élevée du calcaire total dans l'ensemble du profil avec des taux compris entre 17 et 20 %. Le calcaire actif semble suivre la même tendance que le calcaire total et varie entre 12 et 14 %. Ces valeurs conduisent à certaines restrictions au niveau des cultures arboricoles. La CEC est moyenne, elle varie entre 12 et 13 Cmol/kg.

Classe des sols isohumiques

Les sols marrons encroûtés

Les sols isohumiques se localisent au nord et au centre du périmètre (figure 5). Leur surface est de 187,86 ha soit 24 % de la superficie totale. Ils ne sont représentés que par le sous groupe des sols marron encroûtés. Ils se caractérisent par un complexe saturé (principalement en Ca), évoluant sous un pédoclimat frais pendant les saisons pluvieuses, du type limono-argileux. Selon la granulométrie, les textures limono-argileuses et argileuses sont les plus prédominantes (profil n°4 – TA).

Les analyses (tableau 18) de ces sols indiquent que la teneur en matière organique dans les horizons supérieurs est en moyenne égale à 2,0 à 2,5% régulièrement répartie dans le profil avec une forte teneur en profondeur. Le C/N est peu variable ($9 < C/N < 11$), la teneur en calcaire actif varie entre 8 et 11%.

La teneur en Ca^{++} du complexe adsorbant varie entre 23,0 et 27,0 Cmol/kg, celle en Mg^{++} entre 2,0 et 6,0 Cmol/kg et celle en Na^{++} entre 1,5 et 2,5 Cmol/kg.

La réaction de la solution du sol (pH) est légèrement alcaline, elle se situe entre 8,0 et 8,3.

La conductivité électrique est faible ce qui démontre que les sols ne sont pas salés; les valeurs moyennes de la CE sont inférieures à 2,0 dS/m. Cependant, des efflorescences salines faisant effervescence à l'HCl sont observées dans la zone racinaire (Photo 2). Ces sols sont sur croûte à différentes profondeurs et limitent le choix cultural,

surtout les espèces arboricoles. Ces sols sont représentés par le profil 71.



Photo 2 (10 avril 2000), efflorescence saline carbonatée à la basse du feuillage de culture de pomme de terre

JFA	Profondeur (cm)	Caractéristiques					pH	Éléments minéraux					Éléments organiques																	
		C	N	P	K	Ca		Mg	Na	Si	Al	Fe	1000 Corg	1000 Norg	1000 Porg	1000 Korg	1000 Caorg	1000 Mgorg	1000 Naorg	1000 Siorg	1000 Feorg	1000 Alorg	1000 Feorg	1000 Alorg						
1	0-10	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
4	10-20	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
20	20-30	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
40	30-40	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
60	40-50	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
80	50-60	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
100	60-70	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
120	70-80	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
140	80-90	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
160	90-100	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
180	100-110	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0
200	110-120	15.71	0.88	18.7	5	36	7.4	100	17.7	1.13	13.75	6.2	4.47	1.47	47.47	4.68	0.78	4.38	0.1	1.94	13.47	3	1.4	0.11	0.12	1.28	0.77	1.07	0.79	0

Tableau 18 : Résultats analytiques des sols isohumiques

Description du profil N° 71

- Situation : Carte topographique au 1/25 000ème (Tlemcen 1-2)
- Topographie : plane
- Culture: quelques oliviers
- Terrain labouré
- Débris de croûte calcaire en surface
- Coordonnées UTM: X = 648 686,647; Y = 3 872 745,524
- **CPCS** : Sols isohumiques à complexe saturé en Ca ; évoluant sous un pédoclimat frais pendant les saisons pluvieuses ; sols marrons ; encroûtés ; sur croûte calcaire à 55 cm ; type limono-argileux
- **0 – 20 cm** : Horizon de labour ; frais ; brun (7,5YR 5/4) ; texture LA ; structure

grumeleuse à polyédrique fine ; friable ; très nombreux débris de chaumes enfouis ; quelques débris de croûtes et cailloux roulés (1%) ; effervescence forte; transition graduelle.

- **20 – 55 cm** : Horizon brun ; texture LA ; structure polyédrique moyenne ; porosité bonne ; quelques débris de croûte ; effervescence forte; transition nette.
- **> 55 cm** : croûte calcaire.

Tableau 19 : Résultats des analyses physico-chimiques du profil 71

Profondeur (cm)	A%	Lf+Lg%	Sg+Sf%	MO%	C‰	N‰	C/N	pH	CEdS/m
0-20	44	38	16	3,12	18,1	1,77	10	8,3	1,85
20-55	49	30	19	2,18	12,7	1,13	11	8,4	0,93

Tableau 20 : Réserves minérales du profil 71

Profondeur (cm)	CaCO3 total%	CaCO3 actif%	CECCmol/kg	P2O5 tota‰	P2O5 assimil(ppm)	K2O‰
0-20	13	10,66	14,14	1,56	54,96	5,80
20-55	23	11,16	13,44	1,28	27,48	5,10

Ce profil présente deux horizons caractérisés par une structure grumeleuse en surface (0-20cm) et polyédrique moyenne en profondeur.

La teneur en argile est approximativement la même le long du profil avec 44% en surface et 49% en profondeur. La teneur en limon fin et grossier diminue avec la profondeur passant de 38 % en surface à 30% en subsurface. Le taux de matière organique est élevé (3,12 %) en surface et décroît dans le deuxième horizon pour atteindre le taux moyen de 2,18 % ; cette matière organique est bien décomposée (C/N=10 à 11). Le taux de P2O5 total est moyen (1,56 et 1,28‰). Les taux de CaCO3 total (13 à 23 %) et de calcaire actif (10,66 et 11,86 %) sont assez forts, le pH est légèrement alcalins (8) dans l'ensemble du profil.

La conductivité électrique est faible et ne dépasse guère 1,85 dS/m, elle ne constitue pas un facteur limitant pour les cultures. Toutefois, ce profil repose sur une croûte calcaire dure qui limite la profondeur du sol pour certaines spéculations.

4.2. Texture et structure

Le diagramme de textures (classification USDA) montre une prépondérance des textures fines et très fines sur l'ensemble des profils dans la zone d'étude. Le taux d'argile est très élevé et varie de 28 à 64%. Les textures moyennes sont peu répandues (Profil 117 et 124).

La structure des sols est bonne en général, variant entre grumeleuse en surface et polyédrique fine à polyédrique moyenne à fine en profondeur, rarement grossière. Bien que la texture des sols soit fine, la structure est restée toujours favorable. Ceci peut être

expliqué par la bonne activité hydro-agricole dans le périmètre.

4.3. Calcaire total et actif

Le calcaire actif, à un certain taux, devient un facteur limitant essentiel dans la détermination des aptitudes culturales; à un taux compris entre 8 et 12 %, il peut y avoir un blocage d'assimilation du fer qui entraîne un jaunissement des feuilles (chlorose), une fragilité des cultures aux différentes maladies et par la même une réduction des rendements.

Le taux de calcaire total est moyen pour les sols à sesquioxyde de fer et de Manganèse ainsi que pour les sols isohumiques avec des taux moyens respectifs de 17,34 % et 17,97 %. Concernant les sols calcimagnésiques, ceux-ci sont plus calcaires avec un taux moyen élevé (26,36%).

Le taux de calcaire actif dans la plaine de Hennaya est relativement élevé. Le taux moyen est de 10,32 %, 10,56 % et 11,83 respectivement pour les sols à sesquioxyde de fer, les sols isohumiques et les sols calcimagnésiques.

4.4.Matière organique et azote total

La fertilité croît toujours dans certaines limites avec les taux de matière organique et d'azote total. Le taux de matière organique est en général moyen pour tous les sols étudiés en surface (1,4 à 3 %), faible en profondeur (0,6 à 1,8 %).

4.5.Conductivité électrique

Les résultats des analyses montrent une CE faible, elle est inférieure à 4 dS/m sur l'ensemble des profils échantillonnés à l'exception des profils 122, 113 et 105. La valeur la plus élevée est enregistrée au niveau du profil 122 entre 30 et 60 cm avec une CE égale à 6,36 dS/m, pour le profil 113, la CE en surface et subsurface est respectivement de 5,36 et 5,22 dS/m. Concernant le profil 105, la valeur maximale est de 4,33 dS/m en surface. Ces valeurs induisent une restriction pour quelques cultures arboricoles. Toutefois, un dessalage localisé au niveau de cette zone peut évacuer les sels au dessous de la zone racinaire en tenant compte de la bonne perméabilité du sol.

CONCLUSION

La zone cartographiée s'étend sur 783 ha. Elle se caractérise par un climat de type méditerranéen, semi aride avec un été chaud et sec et un hiver humide et frais. Actuellement, il y a une bonne activité agricole en irrigué caractérisée par des cultures maraîchères et fruitières (agrumes, pommiers, poiriers, pêchers et pruniers).

La cartographie a mis en évidence trois classes de sols :

- les sols calcimagnésiques qui sont représentés par les sols bruns calcaires modaux et à ou sur encroûtement calcaire et les rendzines modales,
- les sols isohumiques qui sont représentés par les sols marron encroûtés, sur croûte

calcaire et

- les sols à sesquioxydes de fer et Mn qui sont représentés par les sols rouges recalifiés formés sous un climat de type méditerranéen.

La croûte, l'encroûtement ou la dalle calcaire est omniprésente dans la plaine à des profondeurs variables (35 - 120 cm), ils constituent un facteur limitant les aptitudes culturales, principalement l'arboriculture. D'autres formes d'accumulation (les pseudomycéliums, les amas friables et les nodules de calcaire) sont également courantes dans ce milieu. Les textures sont fines à très fines et parfois équilibrées. Cette description concorde avec celle relatée par Kaemmerer et al (1991) dans l'étude de formation des amas friables et nodules calcaires dans la région de Fès (Maroc). Malgré cette texture, les sols sont bien structurés, particulièrement les horizons de surface. La structure est souvent grumeleuse ou polyédrique. Cette bonne structure s'explique par le bon travail du sol.

Cette zone ne pose ni des problèmes de salinité, ni de drainage, les sols étant pourvus d'une bonne perméabilité.

Les travaux préconisés sont :

- Les rootages par endroits
- Les labours avec des amendements organiques
- L'implantation de brise vents
- Epierrage
- L'assainissement de surface dans les zones planes pour évacuer les eaux en excès et éviter les engorgements qui peuvent se produire.

Chapitre V

5. Analyse des résultats

La faible résolution de l'échantillonnage dans l'analyse spatiale des sols est une contrainte majeure (Jamagne, 1967). Des travaux mettant en œuvre des approches statistiques sur des propriétés de sols ont montré que la variabilité spatiale des propriétés des sols avait été, d'une manière générale, sous estimée (Lagacherie, 2002). En effet, même à grande échelle, des auteurs (King, 1984) ont constaté que les unités de sols présentent une variabilité interne de leurs propriétés.

Dans ce qui suit, nous évaluons dans un premier temps la démarche cartographique. Il s'agit de vérifier si le nombre de profils réalisés ainsi que le nombre d'échantillons prélevés sont suffisants. Dans un second temps, nous analysons de la qualité des données et évaluons par la suite leur variabilité à l'échelle des horizons et à l'échelle des différentes unités cartographiques pour vérifier leur homogénéité.

La démarche cartographique adoptée sur le terrain était basée sur une prospection systématique qui a permis de décrire 137 profils pédologiques et d'échantillonner 31 profils représentatifs. Le nombre total d'horizons échantillonnés est de 87. Cette démarche a conduit à l'élaboration d'une carte pédologique à la précision du 1/20 000, échelle suffisante pour l'organisation de l'irrigation (Jamagne, 1967 ; Legros, 1996).

Pour évaluer cette démarche, nous avons calculé le nombre de profils et le nombre d'échantillons théoriquement nécessaires (Legros, 1978 b) à l'établissement de la carte pédologique :

$$P = (4/K).E^2.10^8.S \text{ tel que } \square$$

P est le nombre de profils,

S est la surface en hectare,

E est l'échelle,

K est un indice qui évalue l'efficacité pédologique, il varie entre 1 et 20. L'efficacité pédologique pourra être minimale pour un paysage de forêt vierge, dans une région dépourvue de couverture topographique et géologique, avec un débutant en guise d'explorateur.

Dans notre cas le nombre de profil nécessaire sera inclus entre 39 dans le cas d'une efficacité maximale et 783 pour une efficacité minimale. Or, le nombre de profils réalisés (137) correspond à une efficacité de presque 6. Cette valeur est à notre sens correct en regard de la documentation de base disponible relative à la zone d'étude (carte pédologique au 1/50 000, carte géologique, fond topographique...).

Pour l'étude de la variabilité intra-parcellaire de quelques propriétés de sols sableux des Landes de Gascogne (France) Arrouays et al (1997) ont utilisé la formule de Snedecor et Cochran, 1967) :

$$N = t^2 (CV^2)/e^2$$

Avec t = valeur du t de Student, CV = coefficient de variation, e = erreur relative d'estimation de la moyenne. Pour notre cas, si nous estimons la moyenne des caractéristiques des sols avec un intervalle de confiance de 95% (t = 1,96) et une erreur relative de 10 %, le nombre d'échantillons nécessaires sera plus important que celui retenu pour le calcaire total et la conductivité électrique avec respectivement 94 et 114 échantillons. En revanche, pour les autres paramètres, le nombre d'échantillons retenu est suffisant en tenant compte des hypothèses précédentes.

5.1. Concordance entre les données

Pour l'ensemble des échantillons, des analyses courantes ont été effectuées selon les recommandations du cahier des charges. La qualité des résultats d'analyse, à travers un contrôle de vraisemblance et un contrôle de cohérence (Legros et al., 1992 ; Djili et Keslani., 1996 ;Shwartz et al. 1997.) sera abordée dans ce qui suit :

Selon les résultats obtenus, la somme des fractions granulométriques est comprise entre 94 % et 103 %. Ces valeurs sont considérées comme relativement acceptables.

Sur la totalité des échantillons analysés (87 échantillons), la texture appréciée sur terrain correspond aux résultats de la granulométrie uniquement pour 29 échantillons ce qui représente 33,33 %. Pour le reste des échantillons, la texture limono-argileuse est prise pour une texture argilo-limoneuse ou argileuse. En effet, sur l'ensemble des échantillons mal appréciés (58 échantillons), 35 échantillons sont limono-argileux d'après

l'analyse granulométrique ce qui correspond à 60,34 %. Dans certains cas, la texture équilibrée est prise pour une texture limono-argileuse et enfin, certains horizons limono-argileux sont pris pour des horizons argileux ou argilo-limoneux. Il s'avère donc que les limons sont mal appréciés sur terrain. En étudiant la relation entre la texture de terrain et la granulométrie de la banque STIPA de Montpellier, Legros et al. (1992) ont trouvé également un faible taux de concordance parfaite (39%).

D'autre part, certains résultats sont non concordants. En effet, pour tous les échantillons analysés, le taux de saturation en bases échangeables est supérieur à 100 %. L'origine de cette erreur est liée à la difficulté d'analyse du cation Ca^{++} dont une partie provient de la dissolution du calcaire. Certains auteurs (Baize, 1988) pensent qu'il est inutile de déterminer les bases échangeable (S) pour les sols calcaires.

A priori, certaines analyses effectuées ne sont pas justifiées puisque elles ne sont pas prises en considération lors de l'établissement de la carte. Il s'agit notamment du phosphore, de l'azote, et du potassium. D'après (Jamagne, 1967), ces éléments ne peuvent être pris en considération pour la définition et la cartographie des sols car ils peuvent être aisément modifiée par l'agriculteur. Toutefois, s'agissant d'une étude agro-pédologique, il est nécessaire de connaître le niveau de fertilité des sols.

5.2. Variabilité des propriétés du sol

A travers les statistiques descriptives (moyenne, écart type, les quartiles et les coefficients de variation), nous allons étudier la variabilité spatiale des paramètres pédologiques retenus. Il s'agit de l'argile, du calcaire total, la matière organique, la conductivité électrique, la capacité d'échange cationique, le pH et enfin la densité apparente. Le choix de ces paramètres se justifie par la place qui leur est accordée dans les classifications des sols (C.P.C.S, 1967 ; U.S.D.A., 1994) ainsi que leur importance sur le plan agronomique. Les traitements statistiques porteront sur l'ensemble des profils, puis les données seront structurées suivant les horizons, et à la fin la variabilité inter et intra unité sera évaluée.

5.2.1 Variation des données sur l'ensemble des profils

Les résultats des traitements statistiques pour tous les échantillons sont reportés dans le tableau 21.

Tableau 21 : Structure des données sur l'ensemble des profils

	Argile%	MO%	CaCO ₃ tot%	CE(dS/m)	CEC(Cmol/ kg)	pH	Da
Moyenne	38.32	1.83	20.97	2.15	10.29	8.20	1.36
Minimum	16.00	0.64	3.20	0.81	3.89	7.74	1.11
Maximum	64.00	4.52	48.40	6.36	17.92	9.40	1.71
Ecart type	8.44	0.64	10.28	1.17	2.73	0.38	0.11
Quartiles 25	34.00	1.44	14.80	1.31	9.05	7.95	1.28
50	39.00	1.82	19.11	1.84	10.22	8.07	1.35
75	44.00	2.10	25.20	2.71	12.08	8.34	1.44
C.V %	22.04	35.18	49.04	54.49	26.57	4.60	8.39

a) L'argile

La moyenne du taux d'argile est de 38.3 %. Ceci implique que les propriétés de l'argile vont caractériser le sol dans notre cas. Le taux minimal est de 16 % alors que le taux maximal est de 64 %. Le tableau 21 indique que 75 % des échantillons ont des taux supérieurs 34 %. La plage de variation est de 48 %, alors que 25 % des échantillons ont des taux supérieurs à 44 % d'argile. Sur la base de ces résultats, on remarque que les taux d'argile sont hétérogènes, mais les taux élevés sont plus fréquents et sont majoritaires dans notre zone. Ce résultat explique la faible variabilité spatiale de ce paramètre (CV % = 22)

b) Le calcaire total

Le taux moyen en calcaire total est de 20.97 %. Le taux minimal est de 3.20 % alors que le maximum est de 48.4 %, la plage de variation est de 45.20 %. On note que 75 % des échantillons ont des taux de calcaire supérieurs à 14.80 % alors que 25 % des échantillons ont des taux supérieurs à 25.20 %. D'après Lozet et Mathieu (1990) cités par Djili et al (1999), on peut qualifier ces taux de moyens à élevés. Ces taux sont liés à la roche mère dont la carte géologique fait ressortir les calcaires lacustres largement répandus dans la zone étudiée.

c) La Capacité d'échange cationique

En moyenne, celle-ci est de 10.29 Cmol/ kg alors que 75 % des échantillons ont une CEC inférieure à 12,08 Cmol/Kg. Ces valeurs sont globalement moyennes mais en regard des taux d'argile (38,3 % en moyenne), la CEC aurait pu être plus élevée. Les valeurs minimales et maximales sont respectivement de 3.89 et 17.92 Cmol/kg avec une plage de variation de 14.03 Cmol/kg et un CV de 26,57 %. Ceci signifie que la CEC est assez variable dans la zone.

e) La matière organique

La teneur moyenne en matière organique est de 1.83 %. Le taux minimal est de 0.64 %, le taux maximal est de 4.52. Le tableau 21 montre que 75 % des échantillons ont des taux inférieurs à 2.10% et que 25 % des échantillons ont des taux inférieurs à 1.44 %. S'agissant de sols cultivés, on estime que ces taux sont relativement faibles et que les

sols étudiés sont globalement pauvres en matière organique.

f) Le pH

Le pH moyen est de 8.20, il varie entre 7.74 et 9.40. Les résultats montrent que 75 % des échantillons ont des pH supérieurs à 7.95 et 25 % ont des pH supérieurs à 8.34. Ces valeurs indiquent que les sols de cette zone sont alcalins. Cette alcalinité peut être expliquée par la présence du calcaire. En effet, l'influence de ce sel est bien connue puisqu'il est utilisé pour corriger l'état d'acidité du sol (Bin et al in Djili et Daoud, 1999). Dans le cas d'un équilibre entre une phase solide de CaCO_3 et l'eau sous une pression de CO_2 égale à la pression partielle de ce gaz dans l'atmosphère ($p\text{CO}_2=10^{-3.5}$ atméanmoins, au-delà de cette valeur, ce sont les), le pH de la solution d'équilibre sera égal à 8,4. N sols sodiques qui sont caractérisé par un $\text{pH} > 9$ et dont le complexe adsorbant est partiellement saturé par le sodium (Duchaufour, 1988), chose qui n'est pas notre cas puisque sur terrain, nous n'avons pas relevé de sols salins. On peut donc conclure que les valeurs du pH ont été surestimées pour quelques échantillons.

g) La Conductivité électrique

Le taux moyen est de 2.14 dS/m. Les résultats indiquent que 75% des échantillons ont des conductivités électriques inférieures à 2.71 dS/m. D'une façon générale, les sols étudiés ne sont pas salins.

h) La densité apparente (Da)

La densité moyenne des sols étudiés est de 1.36. Les quartiles indiquent que 75 % des échantillons ont des valeurs inférieures à 1.44 et que 25 % ont des valeurs inférieures à 1.28. On remarque que la densité apparente est inférieure à 1.5. Ce résultat signifie que les sols étudiés ont une bonne porosité.

i) Variabilité des paramètres étudiés

D'une manière générale on distingue trois classes de variabilités en fonction du coefficient de variation d'après Wilding et Drees, (1978) cités par Walter, (1990).

La première classe est caractérisée par une faible variabilité dont le coefficient de variation est inférieur à 15 %. Dans le cas des sols étudiés, seuls le pH et la densité apparente entrent dans cette classe, leur CV % respectifs sont égaux à 4,6 et 8,39 %. Ce résultat concorde avec celui de Laslett et al (1987) cités par Arrouway et al (1997) qui notent que le pH est l'un des paramètres les moins variables à l'échelle parcellaire.

La deuxième classe est qualifiée de variabilité moyenne. Le coefficient de variation est compris entre 15 et 30 %. Dans la zone d'étude, cette classe est représentée par les taux d'argile et par la CEC. Leurs coefficients de variation sont respectivement 22 % et 26 %.

La troisième classe dont le coefficient de variation est supérieur à 30 % est qualifiée de forte variabilité. On distingue la matière organique, le CaCO_3 total et la C.E dont les

coefficients de variation respectifs sont 35 %, 49 % et 54 %.

Globalement, Wilding cité par walter (1990) précise que les propriétés statiques sont moins variables par rapport aux propriétés dynamiques ; par exemple, la texture et la minéralogie par rapport à la conductivité hydraulique, l'humidité du sol, la salinité, les microorganismes, les cations échangeables et le potentiel redox.

Nous avons caractérisé les principaux paramètres pédologique sur l'ensemble des profils sans distinction des horizons, nous allons, dans ce qui suit, caractériser la variation verticale (structure par horizon) de ces paramètres.

5.2.2 Variabilité selon les horizons

a) L'argile

Le tableau 22 présente les résultats des paramètres statistiques concernant l'argile.

		H.Surface %	H.Sub-surface %	H.Profondeur %
quantiles	25	32.00	35.75	32.00
	75	39.00	39.00	37.00
	90	43.00	47.00	43.00
Moyenne		37.90	40.70	35.8
Ecart type		7.82	7.75	9.45
C.V.%		20.63	19.03	26.39

Tableau 22 : Structure du taux d'argile suivant les horizons (H)

Les taux moyens sont respectivement de 37 %, 40 et 36 % pour l'horizon de surface, de sub-surface et de profondeur. En outre, 75% des échantillons ont des taux supérieurs à 32%, 35.75 et 32% respectivement dans les horizons de surface, de subsurface et de profondeur. Ces résultats indiquent que le sol est fortement argileux puisque la majorité des échantillons possède des taux supérieur à 30 %. La distribution verticale indique que les horizons de sub-surface sont légèrement plus argileux que les horizons de surface et de profondeur. Globalement, ce résultat concorde avec celui de Djili (2000) pour les zones où la pluviométrie est supérieure à 300 mm. Le coefficient de variation est moyen, il est de l'ordre de 20 % en surface, 19 % en sub-surface et 26 % en profondeur.

b) Le calcaire total

Les résultats des paramètres statistiques pour le calcaire total sont résumés dans le tableau 23.

quantiles	25	14.38	11.30	36.08
	50	16.20	17.62	23.90
	75	20.16	23.05	32.24
Moyenne		19.26	18.55	25.32
Ecart type		10.31	9.58	10.25
C.V.%		53.50	51.56	40.47

Tableau 23 : Structure du taux de calcaire total suivant les horizons (H)

Le tableau 23 indique que 75 % des horizons de surface (H1) ont des taux de calcaire inférieurs à 20 %, 50 % ont des taux inférieurs à 16 et 25 % ont des taux inférieurs à 14 %. Ces résultats sont respectivement de 23, 17 et 11 % pour l'horizon de subsurface (H2) et de 32, 23 et 36 % pour les horizons de profondeur (Hp). Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 19, 18 et 25 % respectivement en H1, H2 et Hp. Les sols étudiés sont donc moyennement pourvus en calcaire et les horizons de profondeur sont plus calcaires que les horizons de surface et sub-surface. Ces résultats concorde avec ceux obtenus par Djili, et al. (1999).

Le coefficient de variation varie très fortement, surtout en surface. Il est de 53 %, 51 % et 40 % respectivement en surface, en sub-surface et en profondeur.

c) La CEC

Les paramètres statistiques pour la CEC sont reportés dans le tableau 24.

		H. surface	H. subsurface	H. profondeur
Quartiles	25	9.05	9.59	6.74
	50	10.42	10.46	9.77
	75	12.77	11.49	11.95
Moyenne		10.58	10.73	9.39
Ecart type		3.08	2.16	2.78
C.V.%		29.17	20.09	29.63

Tableau 24 : Structure de la C.E.C suivant les horizons

La CEC moyenne est de 10 Cmol/kg de terre environ pour tous les horizons. La structure des données (tableau 24) montre que les sols ont une CEC moyenne et homogène dans le profil.

d) La matière organique

Les taux de matière organique sont globalement faibles et décroissent dans le profil (tableau 25). En moyenne, le taux est assez élevé en surface (MO = 2.12 %), puis diminue en H2 (MO = 1,89 %) et en H3 (MO = 1.48 %). Les résultats du tableau 25 indiquent que 75 % des échantillons ont des taux inférieurs à 2.37 % de MO en surface, à 1,94 % en subsurface et inférieurs à 1,70 % en profondeur (HP). Les horizons de surface sont plus riches en matière organique. Ce résultat rejoint l'étude réalisée par Djili (2000) qui note que le taux maximal est enregistré aux environ de l'isohyète 520 mm en concluant que le model de distribution de la matière organique dans les sols du nord de l'Algérie est de type H1>H2>Hp.

Le coefficient de variation est moyen (21.66%) en surface et assez fort dans les horizons profonds (44.42 %).

		H. surface	H. subsurface	H. profondeur
Quartile	25	1.89	1.60	0.93
	50	2.1	1.81	1.37
	75	2.37	1.94	1.70
Moyenne		2.12	1.89	1.48
Ecart type		0.46	0.65	0.66
C.V.%		21.66	34.15	44.42

Tableau 25 : Structure de la matière organique (%) suivant les horizons

e) Le pH

Le pH moyen est de 8.21, 8.24, 8.15 respectivement dans l'horizon H1, H2 et Hp. Le tableau 26 indique que 75% des échantillons sont caractérisés par un pH supérieur à 7.94 en H1, à 7.97 en H2 et à 7.94 en profondeur. Le pH est basique et peut être expliqué par la présence du calcaire dont la teneur moyenne est 19.26 % dans le H1, 18.55 % dans le H2 et 25.32 dans le Hp.

Par ailleurs, ce paramètre est caractérisé par sa faible variabilité, son coefficient de variation oscille entre 3.87 et 5.09 %.

		H. surface	H. subsurface	H. profondeur
Quartile	25	7.94	7.97	7.94
	50	8.07	8.09	8.07
	75	8.35	8.39	8.30
Moyenne		8.21	8.24	8.15
Ecart type		0.42	0.40	0.32
C.V.%		5.09	4.90	3.87

Tableau 26 : Structure du pH suivant les horizons

f) La conductivité électrique

La conductivité électrique est en moyenne de 2.23, 2.24 et 1.94 dS/m respectivement dans l'horizon de surface, subsurface et de profondeur. Les résultats (tableau 27) indiquent que 75% des échantillons ont une CE inférieure à 2.95 dS/m dans l'horizon de surface, inférieur à 2.63 dS/m dans l'horizon de subsurface, et inférieur à 2.69 dS/m dans l'horizon de profondeur. Ces valeurs indiquent que globalement, les sols ne sont pas salinisés. On remarque que les valeurs de la CE sont légèrement plus élevées dans les horizons de surface et subsurface comparées à celles de profondeur. Ceci pourrait être dû à la remontée capillaire suite à l'importante évapotranspiration dans ce milieu et qui engendrerait une certaine concentration de la solution du sol en surface.

		H. surface	H. sub-surface	H. profondeur
Quartile	25	1.40	1.28	1.12
	50	1.80	1.82	1.78
	75	2.95	2.63	2.69
Moyenne		2.23	2.24	2.01
Ecart type		1.18	1.37	0.91
C.V %		53.01	61.04	45.25

Tableau 27 : Structure de la Conductivité électrique (dS/m) suivant les horizons

g) La densité apparente

La densité apparente varie faiblement et prend la valeur de 1,32 en surface puis augmente en profondeur pour atteindre 1,38 en subsurface et en profondeur. D'après le tableau 28, 75 % des échantillons ont des valeurs inférieures à 1,39, 1,44, 1,45 respectivement en surface, subsurface et en profondeur. Ces valeurs sont moyennes et donnent une idée sur la porosité qui est assez bonne. Ce paramètre est peu variable à travers les différents niveaux de profondeur, ceci est illustré par un faible coefficient de variation respectivement 7.61, 8.74 et 8.36 en surface, sub-surface et en profondeur.

		H. surface	H. subsurface	H. profondeur
Quartile	25	1,24	1,31	1,29
	50	1,32	1,39	1,41
	75	1,39	1,44	1,45
Moyenne		1,32	1,38	1,38
Ecart type		0,10	0,12	0,12
C.V %		7,61	8,74	8,36

Tableau 28 : Structure de la densité apparente suivant les horizons

La synthèse des résultats précédents fait ressortir que les sols sont riches en argile avec une distribution homogène dans le profil. Les taux moyens en argile sont de l'ordre de 38 %, 40 % et 35 % respectivement en surface, sub-surface et en profondeur. Concernant le calcaire total, les taux sont relativement moyens en surface et en sub-surface ($\text{CaCO}_3 = 19\%$) mais relativement élevés en profondeur ($\text{CaCO}_3 = 25\%$). La matière organique présente des taux très faibles. D'une manière générale le profil organique moyen est du type $\text{H1} > \text{H2} > \text{Hp}$. Les valeurs moyennes en H1, H2 et Hp sont respectivement de 2.12, 1.89 et 1.48 %. Le pH est alcalin et se situe entre 8.15 et 8.24. Cette tendance concorde avec celle décrite par Djili (2000) concernant les sols d'Algérie situés dans l'étage bioclimatique de type sub-humide.

Les résultats obtenus précédemment ont montré que lorsqu'on considère l'ensemble des données, la matière organique, le calcaire total et la conductivité électrique varient fortement. Par contre, l'argile et la CEC présentent une variabilité moyenne, alors que le pH et la densité apparente sont faiblement variables. En structurant les données suivant

les horizons, le coefficient de variation a montré la même tendance que pour l'ensemble des données. Dans ce qui suit, nous montrons la variation des paramètres précédemment étudiés à l'intérieur d'une même unité cartographique.

5.2.3 Variation des données dans les unités cartographiques

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats concernant la variabilité spatiale des propriétés du sol retenues au sein des unités cartographiques. Nous chercherons d'abord à connaître si les unités appartiennent à des populations différentes, et ensuite nous étudierons la variabilité intra-unité cartographique pour chaque propriété :

5.2.3.1. Unité 1 : (sol marron encroûté)

La structure des données dans le sol marron encroûté est présentée dans le tableau 29.

Tableau 29 : Structure des données dans les sols marron

	Argile%	MO%	CaCO ₃ tot%	CE(dS/m)	CEC(Cmol/kg)	pH	Da
Moyenne	41.83	1.80	17.97	2.13	10.50	8.19	1.34
Médiane	43	1,82	17,64	1,56	10,64	8,26	1,33
Min	28.00	0.72	3.2	0.85	5.14	7.80	1.18
Max	64.00	3.11	46.00	6.36	14.56	8.48	1.54
Ecart type	7.79	0.68	9.56	1.44	2.54	0.20	0.11
Quartiles 25	36.50	1.39	11.6	1.20	9.34	8.02	1.23
50	43.00	1.82	17.64	1.56	10.64	8.26	1.33
75	46.50	2.20	21.80	2.73	12.01	8.36	1.43
C.V %	18.62	36.04	48.75	67.61	24.14	2.42	8.40

a) L'argile

La moyenne des taux d'argile est de 42 % et, l'écart type est de 7.7. D'après le tableau 29, 75 % des échantillons ont des taux d'argile supérieurs à 36,50 %. La médiane est de 43 %. Ces taux indiquent que cette unité est fortement argileuse. Le coefficient de variation est de 18.6 %. Ce coefficient correspond à une variabilité spatiale moyenne.

b) Le calcaire

Le taux moyen est de 18 % et l'écart type est de 9,56. Les résultats indiquent que 75 % des échantillons ont des taux de calcaire supérieurs à 11.60 % et que 25% des échantillons ont des taux supérieurs à 22 %. Le coefficient de variation est élevé (53.20 %), il indique donc une forte variabilité de ce paramètre dans cette unité cartographique.

c) La capacité d'échange cationique (C.E.C)

Cette unité se caractérise par une C.E.C moyenne (10.50 Cmol/kg) avec des valeurs qui oscillent entre 5 Cmol/Kg et 15 Cmol/Kg. Les résultats indiquent 75 % des échantillons ont une CEC supérieure à 9.34 Cmol/Kg et que 25 % ont une CEC supérieure à 12 Cmol/kg.

Le coefficient de variation est de 24 %. Ces résultats indiquent que la CEC est relativement faible et que sa variation dans l'unité cartographique est moyenne.

d) La matière organique

Le taux moyen de MO est de 1.80 %, l'écart type est de 0.66. Le tableau 29 montre des taux en MO relativement faibles puisque 75% des échantillons possèdent des taux inférieurs à 2,20 % et 50% d'entre eux ont des taux inférieurs à 1,82 %. Ce paramètre est fortement variable avec un C.V égal à 36,04 %.

e) Le pH

La valeur moyenne du pH est de 8.19, l'écart type est de 0.20. Les calculs indiquent que 50 % des échantillons de cette unité ont un pH supérieur à 8.26, et que 75% d'entre eux échantillons ont un pH supérieur à 8,02. Ce paramètre est très peu variable dans l'espace (CV % = 2.4). Ces valeurs indiquent que cette unité est caractérisée dans son ensemble par un pH alcalin.

f) La conductivité électrique

La conductivité électrique moyenne est de 2.1 dS/m. L'écart type est de 1.44. On remarque que 75% des échantillons ont une CE inférieure à 2.73 dS/m. Ces valeurs indiquent que les échantillons de cette unité présentent une faible salinité. Cependant, le coefficient de variation est très élevé 67 %. Cette variation est dûe au caractère dynamique de cette propriété.

g) La densité apparente

La moyenne pour cette unité est de 1.34 et la médiane est de 1.33, l'écart type est de 0.11. Les statistiques indiquent que 75 % des échantillons ont une densité apparente (d_a) inférieure à 1.43. Ce résultat indique que le sol est caractérisé par une bonne structure et une porosité conséquente. Le coefficient de variation est faible (CV % = 8 %).

Dans l'ensemble, cette unité se caractérise par des taux forts en argile (42 %), moyens en calcaire (18 %) et faibles en matière organique (1,8 %). Les sols de cette unité sont alcalins (pH = 8,19), non salés (CE = 2.13 dS/m) et sont pourvus d'une CEC relativement faible (CEC = 10 Cmol/kg) malgré les forts taux d'argiles. Les valeurs de la densité apparente laissent penser que le sol est caractérisé par une bonne porosité. Le coefficient de variation montre une forte variabilité de la matière organique, du calcaire total et de la conductivité électrique avec des C.V. respectifs de 36 %, 48 % et 67 %. A un degré moindre, la CEC, l'argile, la densité apparente et le pH sont moyennement à faiblement variables avec des coefficients respectifs de 24 %, 18 %, 8 % et 2 %.

5.2.3.2. Unité 3 (sol brun calcaire modal)

Cette unité représente les sols bruns calcaires modaux, les données sont résumées dans le tableau 30.

Tableau 30 : Structure des données dans les sols bruns calcaires

(CaCO ₃ = 19 %)	Argile%	MO%	CaCO ₃ tot%	CE(dS/m)	CEC(Cmol/kg)	pH	Da
Moyenne	38.40	1.71	26.57	1.85	10.52	8.03	1.32
Médiane	38.50	1.79	24.70	1.51	10.81	8.03	1,30
Min	24.00	0.64	11.76	0.81	3.89	7.74	1.11
Max	50.00	2.60	48.40	4.68	17.92	8.39	1.46
Ecart type	6.92	0.39	10.63	1.00	3.30	0.15	0.10
Quartiles 25	33	1.59	18.69	1.13	8.79	7.92	1.24
50	38.50	1.79	24.70	1.51	10.81	8.02	1.30
75	43.25	1.89	33.90	2.27	12.60	8.09	1.43
C.V %	18.02	29.69	40.00	54.05	31.34	1.90	7.76

Les résultats obtenus ont montré ce qui suit :

a) L'argile

Le taux d'argile moyen est de 38 % et l'écart type est de 6.92. Les calculs indiquent que 75 % des échantillons ont des taux d'argile supérieurs 33 %. Ces taux montrent que cette unité est fortement argileuse. Le coefficient de variation est de 18 %, il signifie que ce paramètre est moyennement variable.

b) Le calcaire total

Le taux moyen en calcaire des sols de cette unité est de 26 %. Les résultats indiquent que 75 % des échantillons ont des taux de calcaire supérieurs à 18.7 % et que 25 % ont des taux supérieurs à 34 %. De ce fait, cette unité est bien pourvue en calcaire. Le coefficient de variation est de 40 % et indique donc une forte variabilité du calcaire total dans cette unité.

c) La capacité d'échange cationique (C.E.C)

Le tableau 30 indique que les sols de cette unité ont une CEC relativement faible. En effet, La valeur moyenne est de 10,52 Cmol/kg et 75 % des échantillons ont une C.E.C inférieure à 12,60 Cmol/kg. La variabilité de ce paramètre est moyenne (CV = 31,34 %).

d) La matière organique (MO)

Dans cette unité, le taux moyen en M.O est de 1.7 %. Le premier quartile montre que 25 % des échantillons ont des taux en MO inférieurs à 1,6 %, alors que le troisième quartile indique que 75 % des échantillons ont des taux inférieurs à 1,9 %. Le coefficient de variation de ce paramètre est de 30 %. Ces résultats indiquent que cette unité est pauvre en matière organique et que la variabilité spatiale de ce paramètre est moyenne.

e) Le pH

En moyenne, le pH est de 8.03, l'écart type est de 0.15. Les résultats indiquent que 75 % des échantillons ont des pH supérieurs à 7.92. Ces échantillons sont alcalins. Le coefficient de variation est très faible (CV = 1.90 %), il suggère une faible variabilité spatiale.

f) La conductivité électrique

La CE moyenne est de 1.85 dS/m. L'écart type est de 1. Les valeurs se situent entre 0,8 et 4,5 dS/m. La salinité des sols de cette unité est également faible. Le coefficient de variation est de 54 % et témoigne d'une forte variabilité spatiale de ce paramètre.

g) La densité apparente

Les sols de cette unité cartographique sont pourvus d'une densité apparente moyenne ($d_a = 1,3$). L'écart type est de 0.10. Les quartiles indiquent que 75 % des échantillons ont une densité apparente inférieure 1.43 et que 50 % des échantillons ont une densité apparente inférieure à 1.29. Le coefficient de variation est de 7.76 %. Ces valeurs montrent que la densité apparente est globalement inférieure à 1.5, le sol est donc caractérisé par une bonne structure et une porosité totale importante. Ce paramètre varie peu dans l'espace.

Cette unité est caractérisée aussi par de forts taux d'argile (38 %) et un taux de calcaire total très élevé ($\text{CaCO}_3 = 26$ %). Le taux de matière organique est faible (MO = 1,71 %), la conductivité électrique faible (CE = 1,85 dS/m), une CEC relativement faible (CEC = 10,5 Cmol/100g), le pH est alcalin (pH = 8,03). Les valeurs de la densité apparente indiquent une bonne porosité et une bonne structure du sol.

5.2.3.3. Unité 5 (sol à sesquioxyde de fer et de Mn)

Cette unité regroupe les sols appartenant à la classe des sols à sesquioxyde de fer et de manganèse. Les données concernant les paramètres étudiés sont illustrés dans le tableau 31.

Tableau 31 : Structure des données dans les sols à sesquioxyde de fer

	Argile%	MO%	CaCO ₃ tot%	CE(dS/m)	CEC(Cmol/Kg)	pH	Da
Moyenne	34.32	1.88	17.34	2.53	9.45	8.45	1.41
Médiane	37	1,87	16,60	2.48	9.58	8,30	1.42
Min	16	0.65	7.40	1.13	5.42	7.78	1.21
Max	50	4.52	43.05	4.93	14.30	9.40	1.71
Ecart type	9.70	0.78	7.35	0.99	2.06	0.57	0.11
Quartiles 25	25	1.43	12.3	1.75	8.13	7.97	1.33
50	37	1.87	16.6	2.48	9.58	8.30	1.41
75	41	2.10	21.61	3.04	10.46	9.18	1.45
CV %	28.27	41.14	42.43	38.92	21.85	6.73	8.06

L'analyse de ce tableau indique ce qui suit :

a) L'argile

Le taux moyen en argile de ce cette unité est de 34 % et l'écart type de ce paramètre est de 9,70. Les résultats montrent que 75 % des échantillons ont des taux supérieurs à 25 % d'argile et que 50 % ont en des taux supérieurs à 37 %. Le coefficient de variation est de 28 % et qualifie la variabilité spatiale de ce paramètre de moyenne.

b) Le calcaire total

Le taux moyen en calcaire total est de 17 %. D'après le tableau 31, 75 % des échantillons ont des taux de calcaire supérieurs à 12.30 % et que 50 % ont en des taux supérieurs à 16 %. Ces valeurs signifient que le calcaire est élevé dans les sols de cette unité. Le coefficient de variation est de 42 % et suggère que la variabilité spatiale de ce paramètre est forte dans cette unité.

c) La C.E.C

La valeur moyenne de la CEC est de 9,45 Cmol/kg. D'après les résultats (tableau 31), 75 % des échantillons ont des valeurs relativement faibles qui sont inférieures à 10,46 Cmol/kg. La variabilité de cet élément est moyenne (CV = 21 %).

d) La Matière organique

Le taux moyen en matière organique est de 1,88 %. On remarque que 75 % des échantillons ont un taux inférieur à 2,10. Bien que cela reste faible, les sols à sesquioxyde de fer et les sols isohumiques sont plus riche en matière organique que les autres sols cartographiés. La variabilité spatiale de ce paramètre est forte dans cette unité (CV = 41%).

e) Le pH

Le pH moyen est de 8,4. D'après le tableau 31, 75 % des échantillons ont un pH supérieur à 7.97 et 50 % ont un pH supérieur à 8.30. Le pH de cette unité est donc alcalin. La variabilité de ce paramètre est faible (CV = 6.73 %).

f) La conductivité électrique

La valeur moyenne de la conductivité électrique est de 2.53, l'écart type est de 0.99. Les résultats (tableau 31) indiquent que 75 % des échantillons ont une CE inférieure à 3.04 dS/m et que 50 % d'entre eux ont une CE inférieure à 2.48 dS/m. Les sols de cette unité présentent un niveau de salinité faible.

g) La densité apparente

La densité apparente moyenne des sols à sesquioxydes de fer et de manganèse est de 1.41. Les résultats montrent que 75 % des échantillons ont une Da inférieure à 1,45 et que 50 % des échantillons ont une densité inférieure à 1,41. Ces valeurs restent

inférieures à 1,5 et suggèrent que les sols de cette unité sont dotés d'une bonne structure et d'une porosité totale importante. Ce paramètre varie peu dans l'espace, son CV est de 8,06 %.

Les sols à sesquioxyde de fer se caractérisent donc par un fort taux d'argile (34 %), un taux de calcaire total moyen (17 %), un taux de matière organique faible (1,8 %), une conductivité électrique faible (CE = 2,5 dS/m), une CEC faible (CEC = 9,4 Cmol/kg) et un pH alcalin (8,4). La densité apparente indique une bonne porosité du sol. Le calcaire total, la matière organique et la conductivité électrique varient fortement dans l'espace (CV > 38 %), en revanche, l'argile, la CEC, la densité apparente et le pH varient moyennement à faiblement dans l'espace (6 % < C.V < 28 %).

5.2.4 Comparaison entre les unités cartographiques

La comparaison entre les unités cartographiques est basée sur les moyennes et les médianes des propriétés retenues. Les résultats sont indiqués dans le tableau 32.

Tableau 32 : Paramètres statistiques des unités cartographiques

Variable	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Coef.de variation
Argil(%) Unité1 Unité3 Unité 5	43 38.50 37	41.83 38.40 34.32	7.79 6.92 9.70	18.62 18.02 28.27
MO(%) Unité1 Unité3 Unité 5	1.82 1.79 1.87	1.80 1.71 1.88	0.68 0.39 0.78	36.04 29.69 41.14
CaCO3(%) Unité1 Unité3 Unité 5	17.64 24.70 16.60	17.97 26.57 17.34	9.56 10.63 7.35	48.75 40.00 42.43
CEC (Cmol/kg) Unité 1 Unité 3 Unité 5	10.64 10.52 9.58	10.50 10.52 9.45	2.54 3.30 2.06	24.14 31.34 21.85

En considérant le coefficient de variation des propriétés étudiées, on remarque que l'argile est moyennement variable (18 % < C.V < 29 %) et que le calcaire total est fortement variable (C.V > 40 %) dans les trois unités de sols. La variabilité spatiale de la matière organique est moyenne dans l'unité 3 (sol brun calcaire modal ; CV = 29,7 %) et forte dans l'unité 1 (sol marron encroûté ; CV = 36 %) et l'unité 5 (sol rouge peu lessivé ; CV = 42 %). De même, la CEC est moyennement variable dans l'unité 1 (CV = 21 %) et l'unité 5 (CV = 25 %) et fortement variable dans l'unité 3 (CV = 31 %).

La comparaison des moyennes (test de Student) (tableau 33) prises deux à deux indique des différences significatives entre l'unité 1 (sols marrons encroûtés) et l'unité 5 (sols rouges recalifié) alors que les taux moyens du calcaire total font ressortir une différence significative entre l'unité 1 (sol marron encroûté) et l'unité 3 (sols brun calcaire modaux) d'une part et entre l'unité 3 et l'unité 5 (sol rouge recalifié).

	Unité1 et unité3	Unité1 et unité5	Unité3 et unité5
Argile			
T Calculé	-1,79	-3,15	-1,82
Probabilité	0,08	0,003	0,07
Signification	ns	*	ns
Le calcaire total			
T Calculé	3,26	-0,27	-3,67
Probabilité	0,001	0,79	5,71.10 ⁻⁴
Signification	*	ns	*

Tableau 33 : Comparaison des moyennes du taux d'argile et du calcaire total entre les unités de sols

On peut donc conclure que par rapport à l'argile et au calcaire total, les trois unités correspondent à des populations différentes.

5.3 Relation entre les descripteurs pédologiques

Les paramètres pédologiques étant souvent interdépendants, nous étudierons dans ce qui suit les différentes relations entre les descripteurs pédologiques étudiés jusque là. Le tableau 34 synthétise les différents coefficients de corrélation entre les descripteurs pédologiques quand ils sont pris deux à deux pour l'ensemble des données.

Tableau 34 : Coefficients de corrélation entre les descripteurs pédologiques

	argile	Calcaire total	Calcaire actif	CEC	MO	pH
Argile	-					
Calcaire total	-0,25	-				
Calcaire actif	-0,22	0,64	-			
CEC	0,36	-0,18	-0,14	-		
MO	0,15	0,31	-0,24	0,13	-	
PH	0,19	-0,18	-0,14	-0,025	0,094	-

La capacité d'échange cationique des sols méditerranéens est due essentiellement à leur fraction argileuse, leur taux de matière organique étant faible (Torrent. 1995 cité Djili .2000).

Dans la zone d'étude, même si la CEC et le taux d'argile ne sont pas bien corrélés ($r = 0,35$), la relation qui les lie est statistiquement hautement significative. D'autre part, la CEC et la matière organique ne sont pas corrélés ($r = 0,13$), la relation n'est pas significative statistiquement.

Les calculs (tableau 34) montrent également que la variation de la CEC, en fonction du pH ($R=-0,025$) et de la teneur en CaCO_3 ($R=-0,184$) n'est pas significative. Dans ce qui suit, les relations les plus courantes entre variables sont étudiées.

a) Relation entre l'argile et le calcaire total

La figure 6 indique qu'aux forts pourcentages d'argile correspondent de faibles taux de calcaire. L'allure de la droite de régression et la valeur négative du coefficient de corrélation ($R = -0,25$) le confirment. La relation entre les deux descripteurs est statistiquement significative mais la corrélation reste néanmoins faible. La forme du nuage fait ressortir les remarques suivantes :

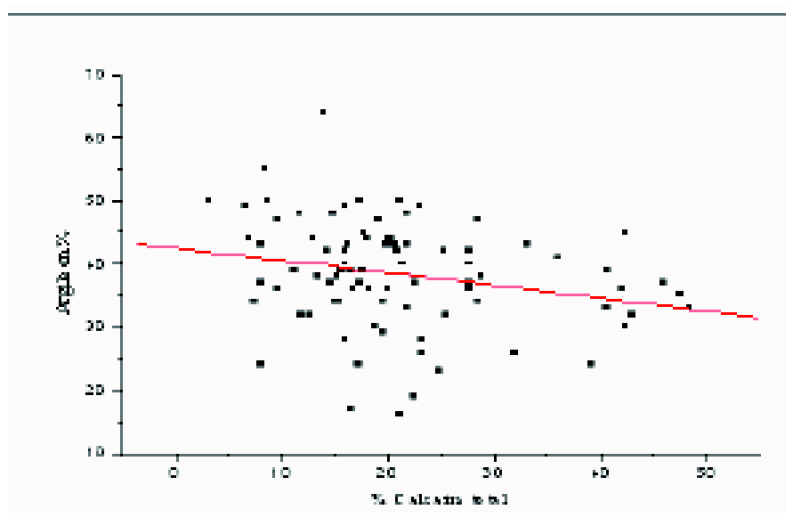


Figure 6 : Relation entre l'argile et le calcaire total

- L'ensemble des valeurs du calcaire total se localise au dessous de la droite (100, 100), ce qui signifie que la somme des deux fractions ne dépasse pas le seuil de 100%. Le contraire aurait été physiquement impossible.
- Le nuage de point est relativement dispersé. Certains points indiquent qu'aux faibles taux d'argile correspondent de faibles taux de calcaires. De la même manière, de forts taux de calcaire peuvent correspondre à de forts taux d'argile. Ce résultat indique qu'il n'y a pas de proportionnalité entre le taux d'argile et le taux de calcaire total. Ce résultat corrobore avec celui obtenu par Djili (2000) qui note que la relation est d'ordre physique dont la somme des deux fractions ne peut dépasser les 100 % sans qu'elle ne soit proportionnelle.

b) Relation entre la CEC et les taux d'argile et de matière organique

La relation entre la CEC et le taux d'argile d'une part et entre la CEC et la matière organique a fait l'objet de nombreux travaux. Nous avons démontré précédemment que pour notre cas la relation entre la CEC et le taux d'argile est statistiquement hautement significatif, alors qu'elle ne l'est pas pour la deuxième relation. La figure 7 montre d'après le nuage de point que l'augmentation du taux d'argile induit l'augmentation de la CEC.

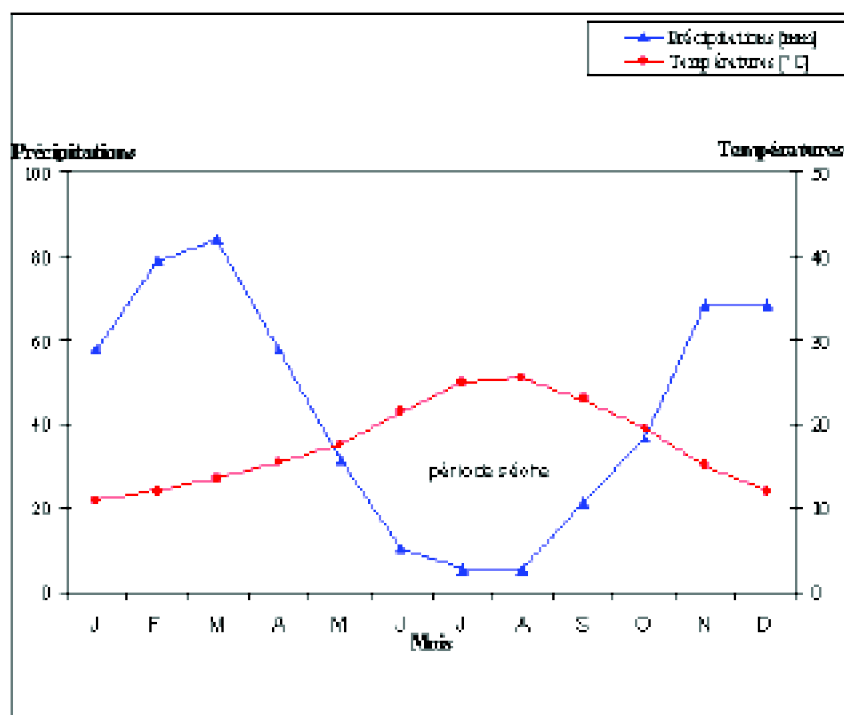


Figure 7 : Variation de la CEC en fonction de l'argile

Cette tendance n'est pas clairement établie concernant la relation entre la CEC et la MO (figure 8).

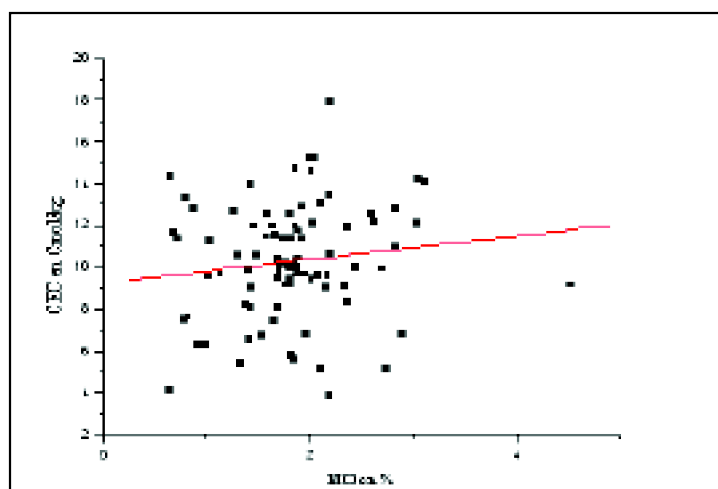


Figure 8 : Variation de la CEC en fonction de la matière organique

Ce résultat concorde avec celui obtenu par Djili et Daoud, (2001). Ces derniers, ont en effet, conclu que la matière organique n'a pas d'effets significatifs sur la CEC des sols du nord de l'Algérie, par contre la CEC est fortement corrélé à la fraction argileuse.

c) Relation entre le taux matière organique et le taux d'argile

Des travaux ont conclu que la matière organique est fortement corrélée avec la fraction fine du sol. En effet, Brogowsky et al. (1992) cités par Djili (2000) ont montré que l'humus des entisols est associé principalement aux particules limoneuses et argileuses dans une

région aride du Sahara. D'après les auteurs précités, la fraction fine peut retenir entre 72 et 90 % de l'humus total du sol.

Dans notre cas, les deux paramètres ne sont pas bien corrélés ($r = 0,15$). Cependant, l'allure de la droite de régression (figure 9) montre qu'aux forts taux d'argile correspondent de forts taux de matière organique. La distribution du nuage de points épars indique que pour des taux élevés d'argile peuvent correspondre de faibles taux de matière organique. Lors de l'étude à petite échelle des sols du Nord de l'Algérie Djili, (2000) a conclu que les taux d'argile n'ont aucune relation avec les taux de matière organique.

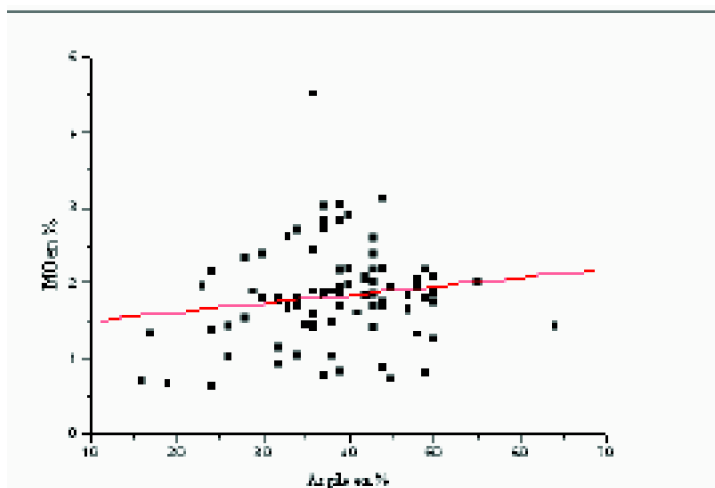


Figure 9 : Variation de la matière organique en fonction de l'argile

d) Relation entre le pH et les taux de calcaire

Djili et Daoud (1999) ont évalué la relation quantitative entre le pH et le carbonate de calcium dans le cas des sols du Nord de l'Algérie. Cette évaluation montre que les teneurs en carbonate de calcium des sols influence le pH dans un domaine de variation qui serait compris entre 0% et 2,5% correspondant à une valeur maximale de 7,82. Au-delà de ce seuil, les particules de carbonate de calcium auront uniquement un effet stérique sur les propriétés du sol.

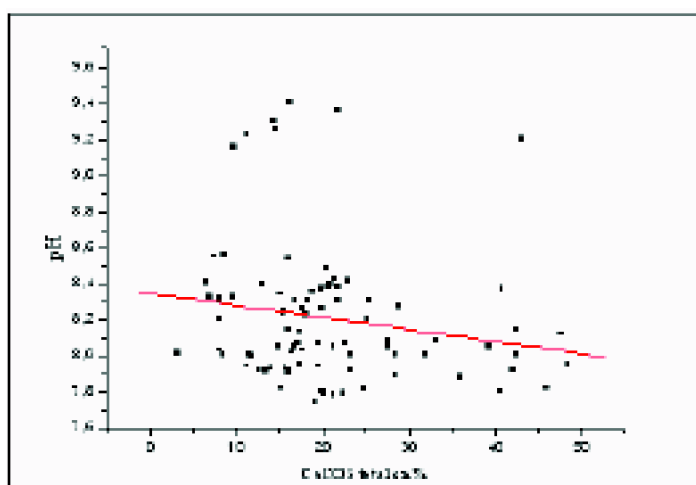


Figure 10 : Variation du pH en fonction du calcaire total

Dans notre cas les deux paramètres ne sont pas bien corrélés ($r = -0,18$). D'autre part, le taux de calcaire varie entre 3,20% et 48,40%, le pH varie entre 7,74 et 9,40. Le taux de calcaire est supérieur à 2,5% pour tous les échantillons analysés, ce qui explique le fait que l'influence directe du calcaire total sur le pH ne soit pas établie (figure 10). Cependant, on remarquera que le pH est alcalin pour tous les échantillons ($>7,74$)

e) Relation entre le calcaire total et le calcaire actif

L'analyse des données des deux paramètres montre que celles-ci sont cohérentes pour tous les échantillons. En effet, le taux de calcaire total est supérieur à celui du calcaire actif. Ceci s'explique par le fait que le calcaire actif représente la partie fine du calcaire total. On remarquera par ailleurs que la corrélation entre les deux paramètres est hautement significative ($r=0,63$). La droite de tendance (figure 11) indique qu'au fort taux de calcaire total correspondent de fort taux de calcaire actif. Cependant, le nuage de points montre qu'aux forts taux de calcaire total peuvent correspondre de faible taux de calcaire actif.

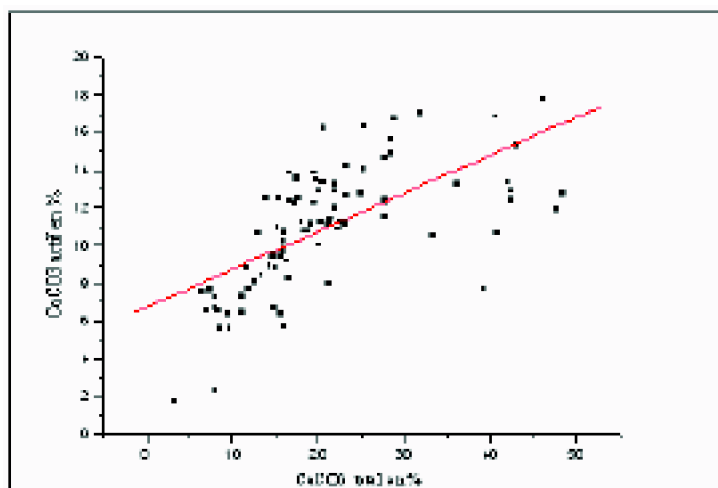


Figure 10 : Variation du calcaire actif en fonction du calcaire total

CONCLUSION

Les tests de concordances et le contrôle de vraisemblance ont révélé que la qualité des données est hétérogène. En effet, la somme des bases échangeables prise avec la capacité d'échange cationique montre une incohérence et ce pour tous les échantillons analysés. Par contre, le taux de calcaire actif concorde bien avec le taux de calcaire total.

Nous avons déterminé la variabilité spatiale des principaux paramètres pédologiques sur l'ensemble des données. Il en ressort trois catégories de variables telles que rapportées par la bibliographie (Walter 1990 et Arrouays 1997) :

- La première catégorie caractérisée par une faible variabilité ($CV < 15\%$) est représentée par le pH et la densité apparente,
- La deuxième dont la variabilité est moyenne ($15\% < CV < 30\%$) est représentée par

le taux d'argile et la CEC.

La troisième catégorie caractérisée par une forte variabilité ($CV > 30\%$) est représentée par la conductivité électrique, les taux de calcaire total et les taux de matière organique.

Au niveau des unités cartographiques, il a été démontré que celles-ci appartiennent à des populations différentes. Cependant, le coefficient de variation de certains paramètres est élevé à l'image du calcaire total dont le coefficient varie entre 40 et 48,75% et la matière organique 29,69 et 41,14 %. Cette forte variabilité intra-unité met en cause le zonage effectué pour ces paramètres. En revanche, l'argile et la CEC présentent des coefficients moyens ce qui permet de valider leur zonage.

L'étude des corrélations entre variables a démontré pour notre cas que la matière organique n'a pas d'effet significatif sur la C.E.C. En revanche, celle-ci est fortement corrélée à la fraction argileuse. Ce résultat corrobore avec celui obtenu par Djili et Daoud (2001).

Le calcaire total et l'argile ne sont pas bien corrélés entre eux. Ces deux paramètres coexistent dans tous les échantillons analysés, l'augmentation de l'un des paramètres induit la diminution de l'autre.

La zone étudiée est caractérisée par une pluviométrie annuelle de 525mm correspondant au domaine des sols calcaire Djili (2000). Les relations entre la matière organique et le calcaire total d'une part et entre le pH et le calcaire total d'autre part ne sont pas clairement établies. Par ailleurs, les sols sont caractérisés par des taux d'argiles élevés et relativement riches en matière organique et exclusivement calcaires à pH alcalin. Cette description concorde avec celle de Djili (2000) concernant les sols calcaires dans le nord de l'Algérie.

Chapitre VI

6. Analyse thématique des critères de cartographie de sol

Introduction

La cartographie pédologique a pour objectif de délimiter des unités de sols supposées être homogènes, en se basant sur des critères ayant une valeur discriminante sur le plan spatial. Schématiquement, les unités naturelles de paysage sont individualisées. Ensuite, après le recueil d'informations morphologiques, les unités de sol sont délimitées. Le contenu de ces dernières est précisé par des observations complémentaires sur le profil et des mesures quantitatives de paramètres physiques et chimiques du sol.

Les plages cartographiques sont délimitées en tenant compte simultanément de l'ensemble des critères de cartographie. Dans chaque plage cartographique, les valeurs de chaque critère cartographique sont théoriquement constantes. Conceptuellement, la carte pédologique est en fait le croisement à l'échelle de l'horizon et à l'échelle du profil de cartes monoparamétriques de chaque critère de cartographie. Dans la réalité, la réalisation et la lecture des cartes sont simplifiées par l'utilisation de la classification des

sols.

Cependant, de nombreuses études font état d'une variabilité très importante des propriétés du sol à très courtes distances (Walter, 1990). De ce fait, l'assimilation de l'unité cartographique à l'unité taxonomique mène à une omission de la variabilité spatiale (Bornand et Robbez-Masson, 1998). Ce constat entraîne donc une remise en cause des possibilités d'emploi d'une carte pédologique comme estimateur fiable des propriétés du sol

De ce fait, nous avons jugé utile d'analyser la fiabilité de la carte pédologique de Hennaya en se basant sur la comparaison des cartes thématiques (ou cartes monoparamétriques) dérivées de la carte pédologiques (CTP) avec celles obtenues directement en utilisant les observations de terrain (CTO). Les thèmes retenus ne sont autres que les quatre principaux critères de cartographie utilisés pour l'établissement de la carte pédologique. Il s'agit de la texture, la couleur, l'intensité de l'effervescence à l'HCl et de la profondeur. Il s'agit en fait, dans un premier temps, de mettre en évidence les ressemblances et dissemblances pour un même thème entre les CTP et les CTO. Par la suite, le résultat du croisement de toutes les CTO sera comparé à la carte pédologique initiale. Ainsi, cette analyse se fera à l'échelle d'un seul critère de cartographie, ensuite à l'échelle de l'horizon (horizon de surface, de sub-surface et de profondeur) et enfin à l'échelle du profil.

Les résultats permettront de discuter la précision de la carte pédologique et de hiérarchiser les critères de cartographie des sols développés dans la plaine de Hennaya.

Lors de l'élaboration de la carte pédologique les critères de cartographie utilisés sont la profondeur, la couleur, la texture et l'effervescence à l'HCl. La carte pédologique a fait ressortir 13 unités cartographiques. Dans chaque unité cartographique, les caractéristiques pédologiques et donc les critères de cartographie ne devraient présenter en principe aucune variation latérale significative. L'extraction des cartes thématiques à partir de la carte pédologique devrait aboutir à un nombre d'unités cartographiques inférieur ou égal à celui de la carte pédologique.

Résultats

Le résultat de l'extraction des cartes thématiques à partir de la carte pédologique est indiqué par le tableau 35.

Tableau 35 : Nombre d'unités recensées pour l'horizon de surface, de subsurface et de profondeur obtenues à partir de la carte pédologique.

Thème	Nombre d'unités dans l'horizon de surface	Nombre d'unités dans l'horizon de sub-surface	Nombre d'unités dans l'horizon de profondeur
La profondeur	-	-	10
La couleur	8	11	13
La texture	9	11	13
L'effervescence à l'HCl	7	8	13

D'après le tableau 35, le nombre d'unités issues de l'extraction de la carte pédologique est inférieur ou égal à 13. Ce résultat est donc logique et prévisible.

6.1 Analyse thématique à l'échelle d'un seul critère de cartographie

Dans ce qui suit, nous envisageons successivement l'étude de la profondeur, la texture, la couleur et l'intensité de l'effervescence à l'HCl.

6.1.1 La profondeur (P)

Lors de la prospection, nous avons identifié trois classes de sols selon la profondeur. Il s'agit des sols peu profonds ($P < 30$ cm), des sols moyennement profonds ($30 \text{ cm} < P < 80$ cm) et des sols profonds ($P > 80$ cm).

La comparaison des figures 12 et 13 indique la présence de quelques différences entre les deux cartes thématiques. En effet, la carte thématique pour ce paramètre révèle 15 unités cartographiques pour la CTO (figure 12) contre uniquement 11 pour la CTP (figure 13). De même, ces deux figures révèlent des différences notables de classes de profondeurs des sols, en particulier dans le nord-ouest et le sud-est du périmètre étudié. D'une façon globale, la CTP favorise les sols peu profonds au nord-ouest et les sols moyennement profonds au sud. Dans le reste du périmètre, le sol est relativement profond, il existe une certaine similitude entre les deux cartes (dominance des sols profonds).

La quantification des résultats indique, comparativement à la CTO, une sous-évaluation par la CTP des sols profonds et une surestimation des sols peu profonds. En effet, les sols profonds et les sols peu profonds occupent respectivement 48 % et 13 % de la superficie totale selon la CTP contre 61 % et 5 % pour la CTO (tableau 36). Il s'avère aussi que la CTP surestime légèrement la superficie des sols moyennement profonds par rapport à la CTO, les taux d'occupation de cette classe étant respectivement de 39 % et 36 %.

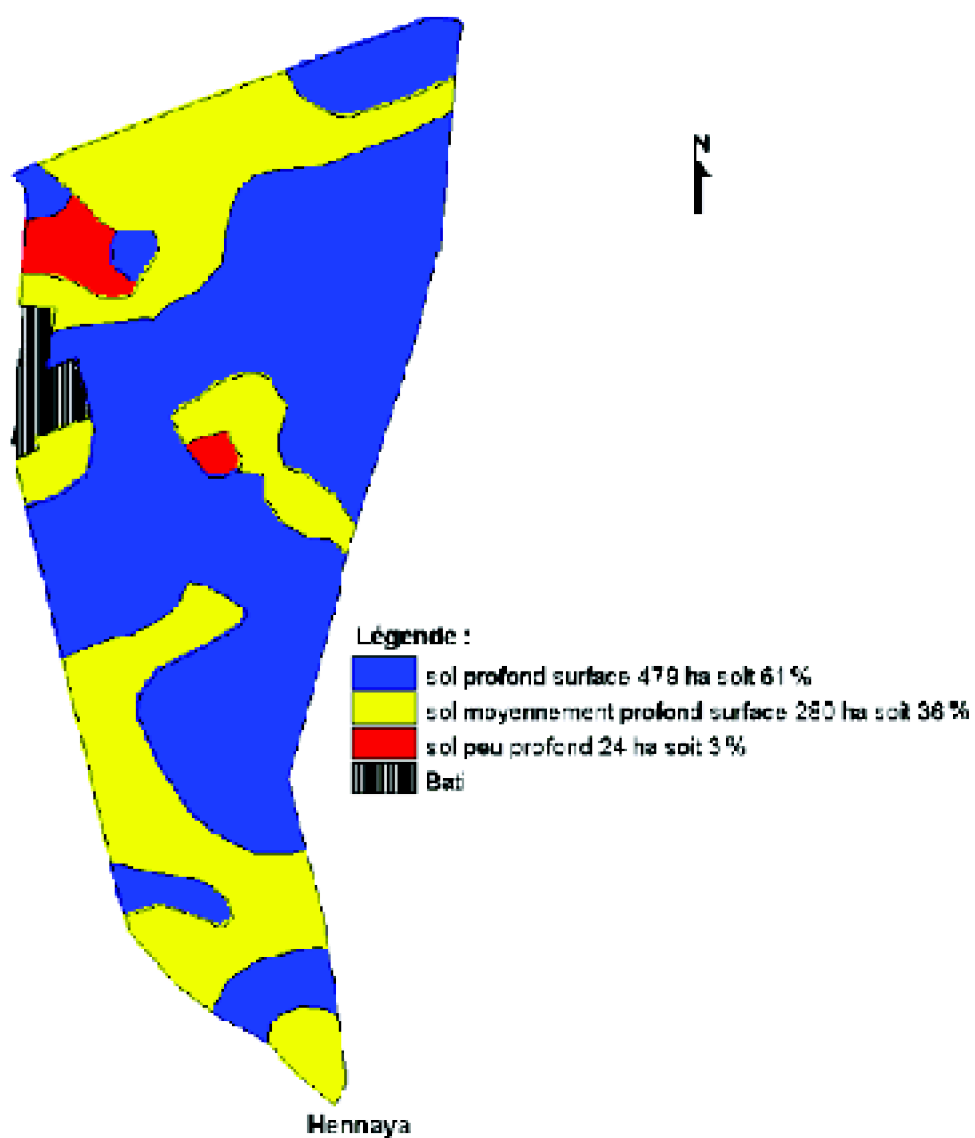


Figure 12 : Carte thématique de la profondeur issue des observations. Echelle : 1/25 000

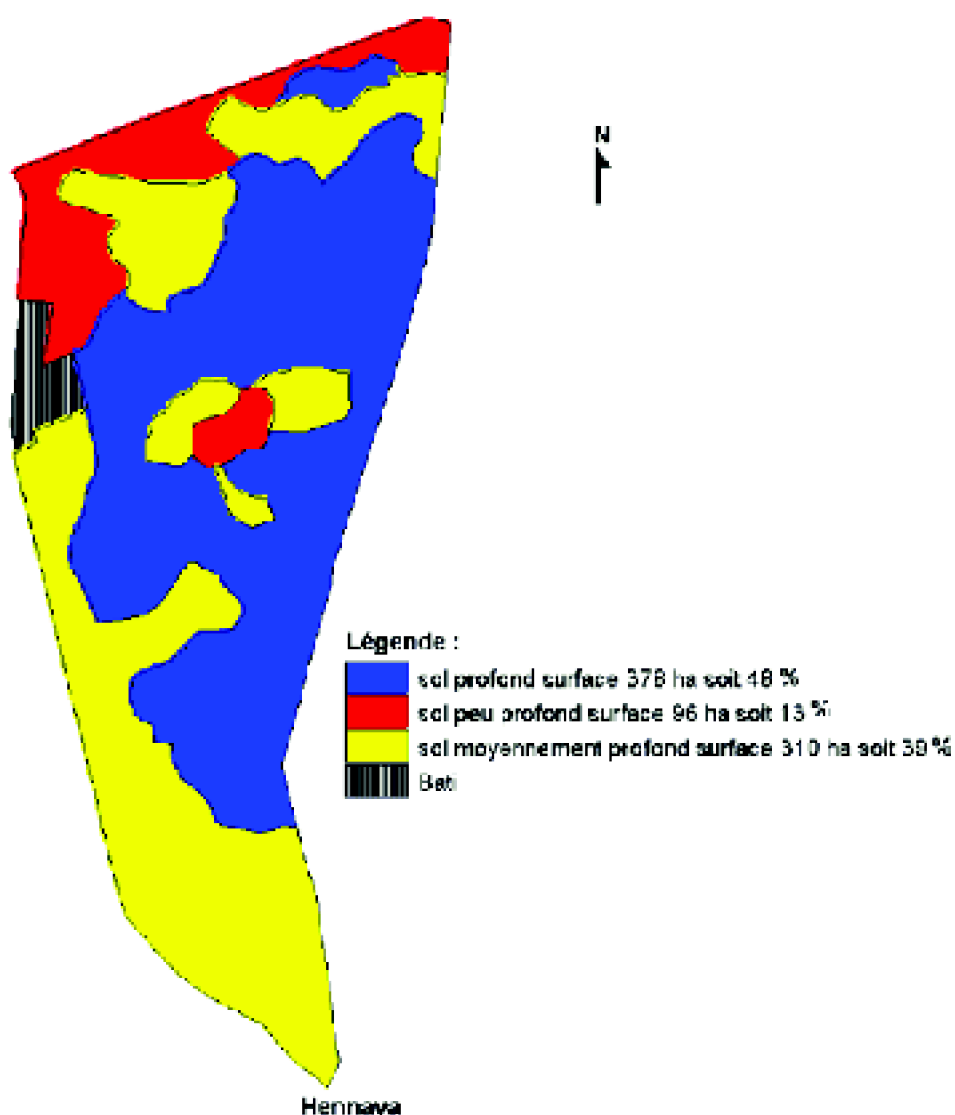


Figure 13 : Carte de profondeur issue de la carte pédologique Echelle : 1/25 000

Classe de profondeur	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de surface	Surface (ha)	% de surface
Sol peu profond (%)	96	13	24	3
Sol moyennement Profond (%)	310	39	280	36
Sol profond (%)	378	48	479	61

Tableau 36 : Répartition des classes de profondeur d'après la carte pédologique et les observations.

6.1.2 La texture

Horizon de surface

L'observation des figures 14 (CTO) et 15 (CTP) indique que quatre classes de texture (argileuse, argilo-limoneuse, équilibré et limono-argileuse) concernent l'horizon de surface. La CTO fait ressortir 34 unités cartographiques contre 9 pour la CTP. De ce fait, la répartition des classes de texture est particulièrement différente entre les deux types de carte sur l'ensemble du périmètre comme le montrent les figures 14 et 15.

Sur le plan de la quantification de ces classes, la CTP sous-estime, par rapport à la CTO, les textures argilo-limoneuses et limono-argileuses et surestime les textures argileuses et équilibrées. En effet, les textures argilo-limoneuses et limono-argileuses représentent respectivement 1 % et 56 % de la superficie totale dans la CTP contre 18 et 59 % dans la CTO ; les textures argileuses et équilibrées représentent quant à elles, 30 % et 13 % dans la CTP contre 20 % et 3 % dans la CTO (tableau 37).

Texture	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
Limono-argileuse	438	56	462	59
Argileuse	235	30	157	20
Équilibrée	102	13	23	3
Argilo-limoneuse	8	1	141	18

Tableau 37 : Type et proportion des textures de l'horizon de surface

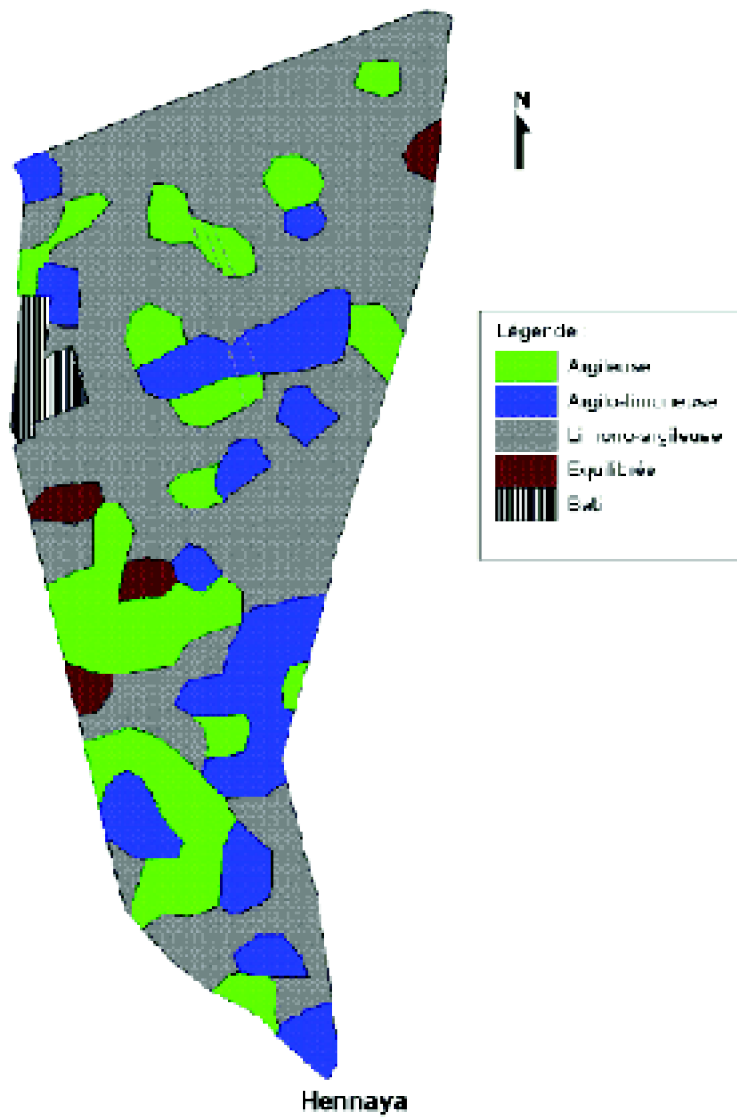


Figure 14 : Carte thématique de la texture observée de l'horizon de surface. Echelle : 1/25 000

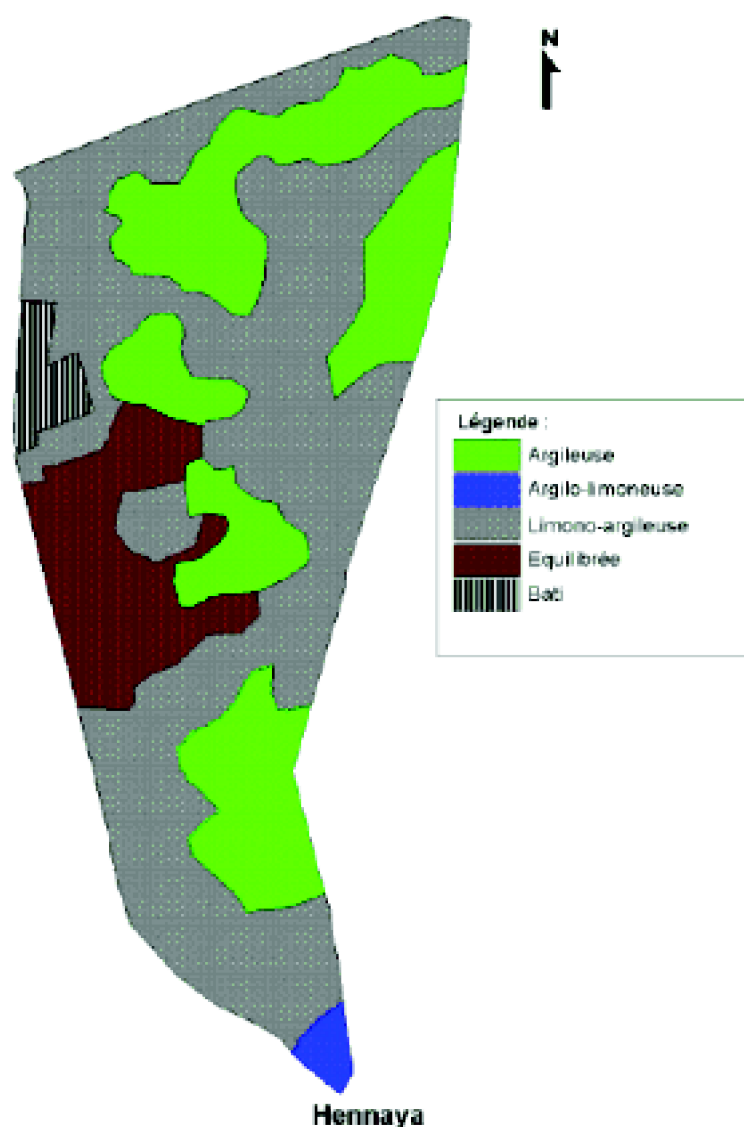


Figure 15 : Carte de la texture de surface issue de la carte pédologique. Echelle : 1/25 000

Horizon de subsurface

L'analyse visuelle des figures 16 (CTO) et 17 (CTP) révèle d'importantes différences entre les deux types de carte. Effectivement, la CTO indique la présence de 41 unités cartographiques dont la classe texturale argilo-limoneuse occupe approximativement le tiers de la superficie du périmètre alors que la CTP n'en comptabilise que 11 unités et ne révèle pas d'unité argilo-limoneuse. De même, il ressort que l'unité 'absence d'horizon' de subsurface est différente entre les deux types de carte au nord et au sud de la zone étudiée.

La quantification des figures 16 et 17 (tableau 38) montre que, par rapport à la CTO, la CTP surestime les superficies limono-argileuses et argileuses et sous-estime fortement les textures équilibrées et argilo-limoneuses. Les superficies occupées par les textures limono-argileuses et argileuses représentent respectivement 57 % et 31 % dans la CTP

contre 22 % et 20 % dans la CTO ; les textures équilibrées et argilo-limoneuses, quant à elles, représentent respectivement 2 % et 0 % dans la CTP contre 20 % et 33 % dans la CTO. L'absence d'horizon de subsurface correspond aux rendzines (profil de type AR) qui occupent 10 % de la superficie totale selon la CTP et uniquement 5 % selon la CTO.

texture	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
Limono-argileuse	446	57	172	22
Argileuse	243	31	157	20
Équilibrée	16	2	157	20
Argilo-limoneuse	-	0	258	33
Absence d'horizon	78	10	39	5

Tableau 38 : Type et proportion des textures de l'horizon de sub-surface

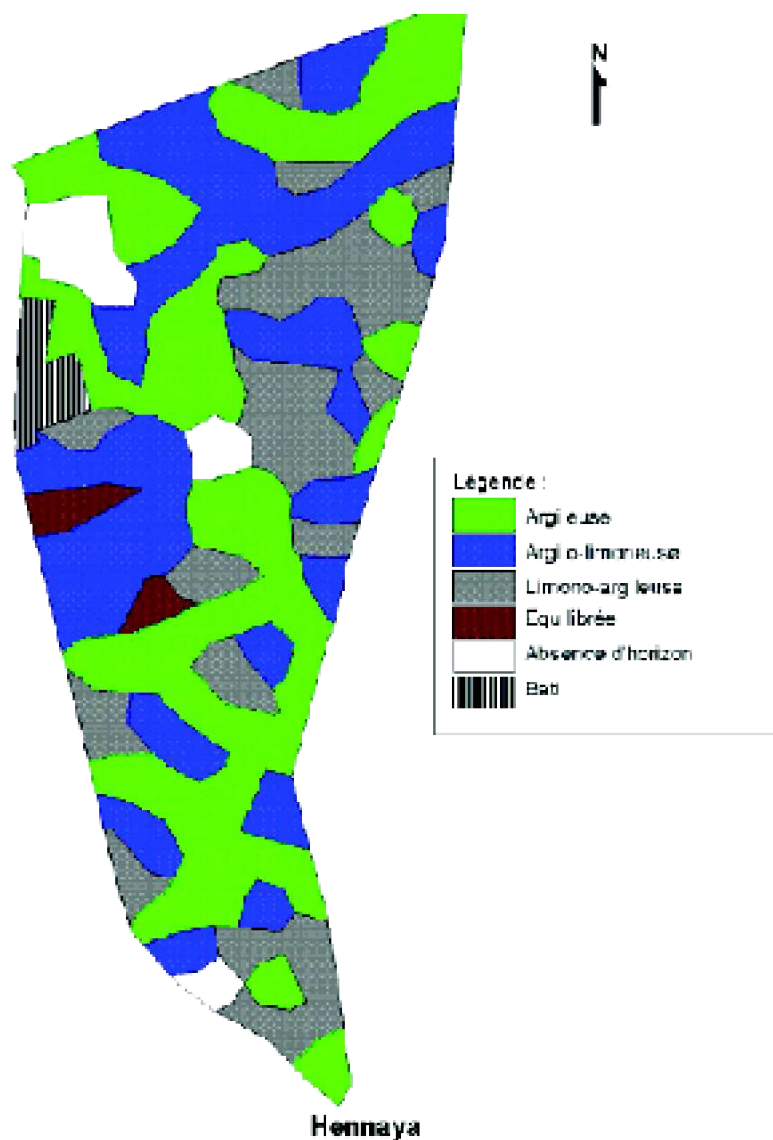


Figure 16 : Carte de la texture observée de l'horizon de sub-surface. Echelle : 1/25 000

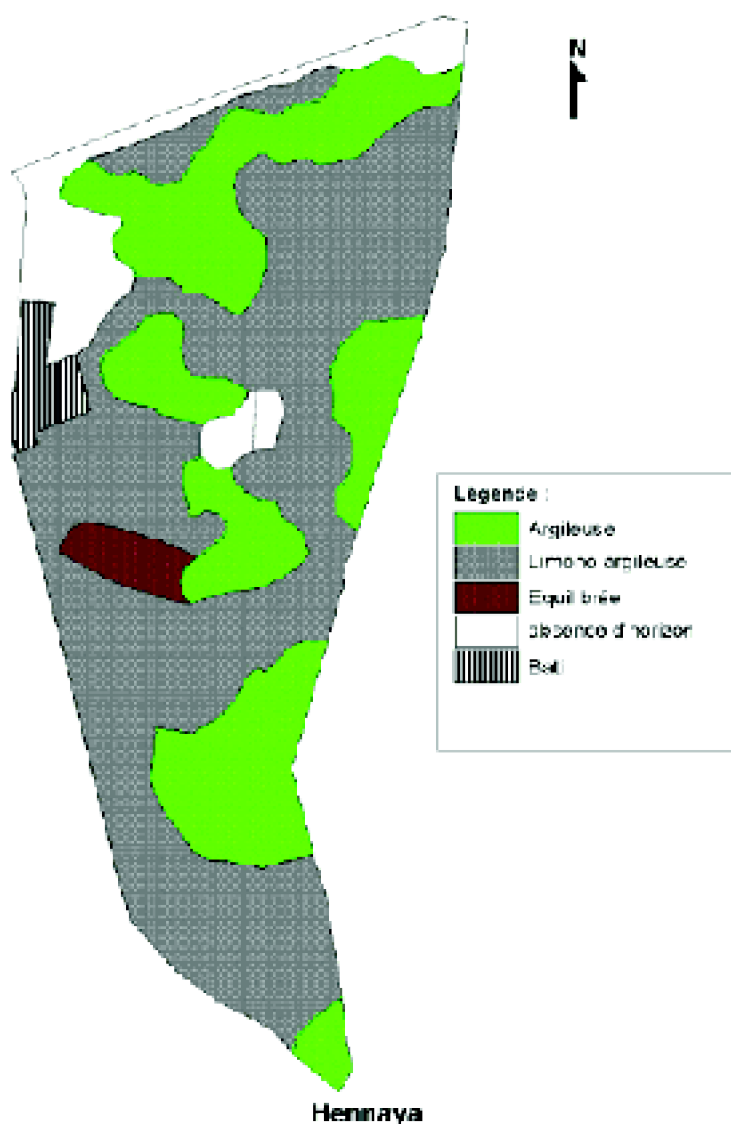


Figure 17 : Carte de la texture de sub-surface issue de la carte pédologique. Echelle : 1/25 000

Horizon de profondeur :

Les figures 18 (CTO) et 19 (CTP) révèlent des différences notables entre les deux types de cartes, en particulier dans la partie médiane du périmètre d'étude. En effet, les d'unités cartographiques sont beaucoup plus petites et plus nombreuses (48 unités) dans la CTO et sont plus grandes et moins nombreuses (14 unités) dans la CTP. De même, la CTO se constitue de 9 unités cartographiques alors que la CTP n'en a que 6.

Le tableau 39 indique que la CTP surestime, par rapport à la CTO, les superficies de textures limono-argileuses (33 % contre 19 %) et équilibrées (13 % contre 4 %), sous-estime les superficies argileuse (25 % contre 29 %) et 'absence d'horizon' (30 % contre 32 %) et ignore les superficies argilo-limoneuses, sablo-argileuses, limoneuses et limono-sableuses.

texture	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
Limono-argileuse	258	33	149	19
Equilibrée	102	13	31	4
argileuse	198	25	227	29
Absence d'horizon	235	30	251	32
Argilo-limoneuse	-		102	13
Sablo-argileuse			8	1
limoneuse			8	1
Limono-sableuse			8	1

Tableau 39 : Type et proportion des textures de l'horizon de profondeur

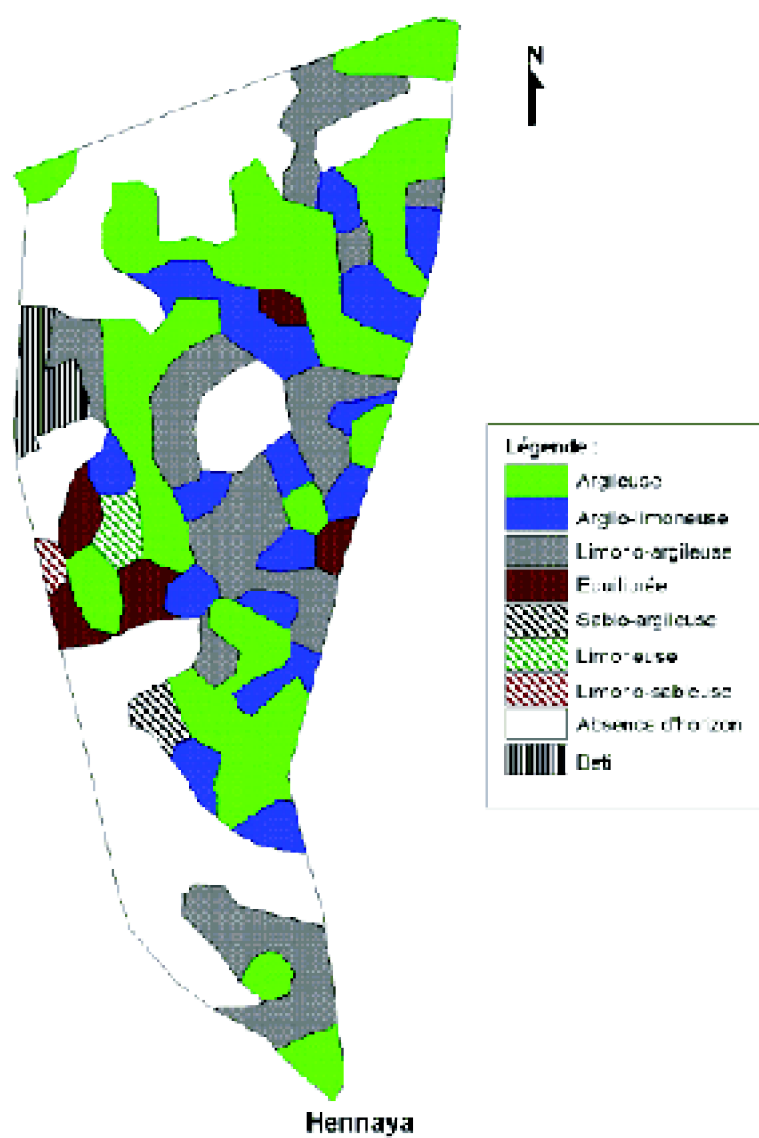


Figure 18 : Carte thématique de la texture observée de l'horizon de profondeur. Echelle : 1/25 000ème

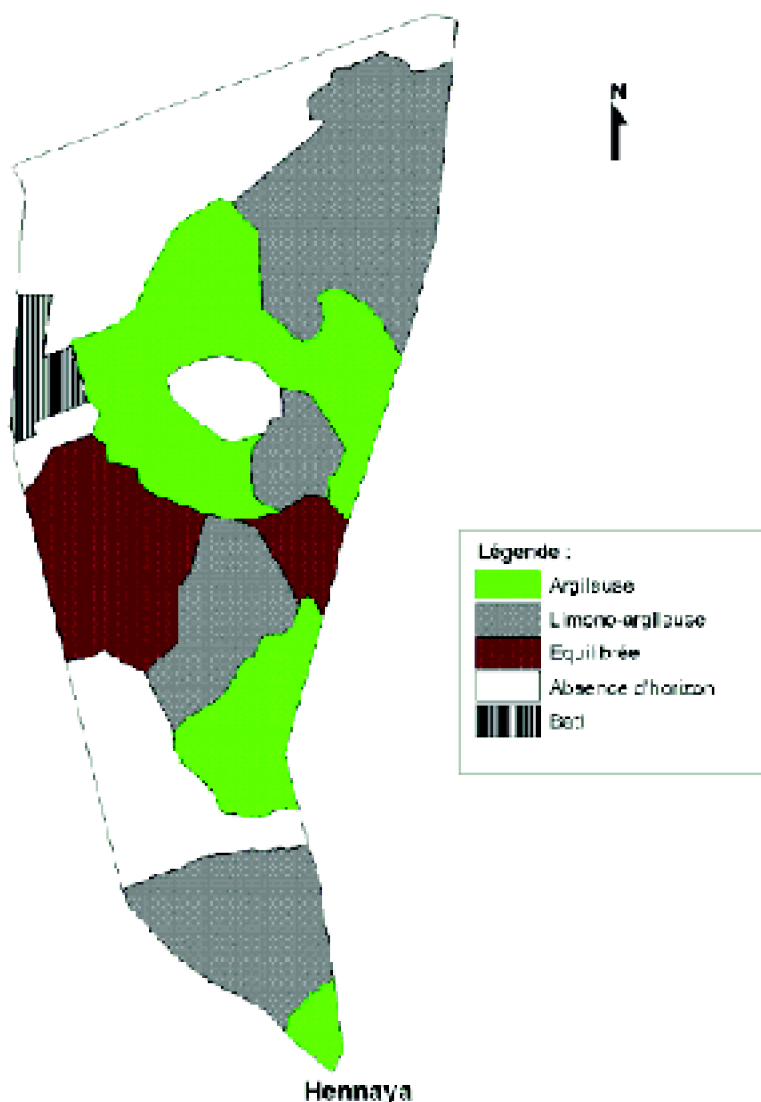


Figure 19 : Carte de texture de l'horizon de profondeur issue de la carte pédologique.
Echelle : 1/25 000

6.1.3 La couleur

La couleur du sol est un critère fort de la cartographie pédologique. Elle occupe une place privilégiée dans les différents systèmes de classification des sols (USDA, 1994 ; CPCS, 1967 ; WRB, 2006). La couleur est déterminée sur le terrain par la charte des couleurs ou code Munsell (Revised Standard soil color charts, 1991). Dans la thématique qui suit, nous avons effectué des regroupements des couleurs en se basant uniquement sur les classes de couleurs vernaculaires proposées par le code des couleurs Munsell, l'objectif étant de mettre en évidence le maximum de variabilité spatiale des paramètres pédologiques décrits sur le terrain.

Horizon de surface

La figure 20 (CTO) se distingue de la figure 21 (CTP) du fait que les nombres de classes de couleur et d'unités cartographiques y sont nettement plus importants. En effet, la CTO se compose de 36 unités cartographiques et comporte 11 classes de couleur, contre 12 unités cartographiques et 4 classes de couleur pour la CTP.

L'analyse du tableau 40 montre que les différences entre les deux cartes sont également importantes sur le plan quantitatif. Ainsi, les couleurs 7,5YR3/2, 7,5Y5/4, 5YR4/3 et 2,5YR2/4 représentent respectivement 19 %, 39 %, 34 % et 8 % de la superficie totale dans la CTP contre 44 %, 10 %, 35 % et 2 % environ pour la CTO. Les autres classes de couleurs sont faiblement représentées dans la CTO (entre 1 et 3 % environ) et sont par contre complètement ignorées par la CTP.

La couleur	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
7,5 YR3/2 (brownish black)	145	19	345	44
5 YR4/3 (reddish brown)	266	34	274	35
7,5YR5/4 (dull brown)	305	39	78	10
2,5 YR2/4 (very dark reddish brown)	63	8	15	2
7,5YR5/2 (grayish brown)			8	1
10 YR4/3 (dull yellowish brown)			15	2
7,5YR6/6 (orange)			15	2
5YR6/4 (dull orange)			8	1
2,5YR4/4 (dull reddish brown)			8	1
5YR4/6 (reddish brown)			8	1
5YR5/8 (bright reddish brown)			8	1

Tableau 40: Type et proportion des couleurs de l'horizon de surface

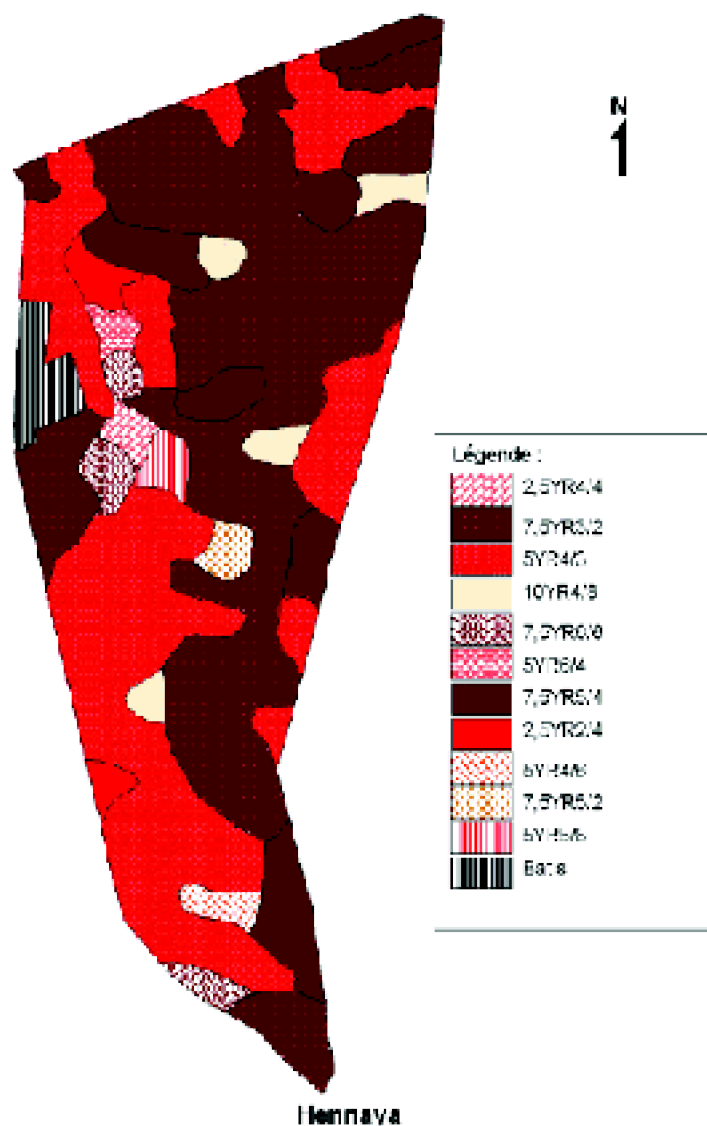


Figure 20 : Carte de couleur issue des observations de l'horizon de surface. Echelle : 1/25 000

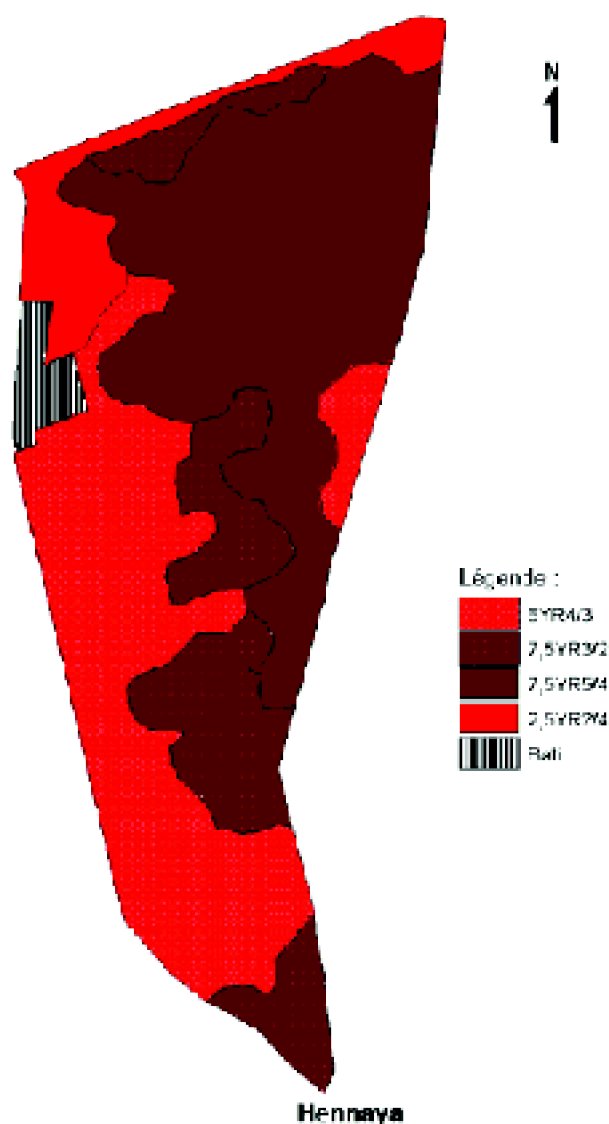


Figure 21 : Carte de la couleur de l'horizon de surface issue de la carte pédologique.
Echelle 1/25 000

Horizon de sub-surface

La CTO (figure 22) pour ce paramètre se compose de 47 unités cartographiques et sa légende comporte 9 classes de couleur. A ce niveau, nous avons regroupé quelques classes de couleur entre elles et ce pour des raisons de lisibilité du document. La CTP (figure 23), quant à elle, se compose de 17 unités cartographiques et sa légende ne comporte que 4 classes de couleur. De ce fait, les deux cartes thématiques pour ce paramètre sont donc assez différentes.

Les taux d'occupation de chaque classe de couleur sont également très différents entre la CTO et la CTP (tableau 41). On remarque aussi que parfois, même si le taux d'occupation d'une classe de couleur est sensiblement le même entre les deux cartes thématiques (la classe de couleur 2,5YR2/4 occupe 3 % de la superficie aussi bien dans

la CTO que dans la CTP), la répartition spatiale de cette classe est très différente (la CTO comporte 4 unités cartographiques pour la classe 2,5YR2/4 alors que la CTP n'en comporte qu'une seule).

La couleur	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
7,5 YR3/2 (brownish black)	180	23	290	37
5 YR4/3 (reddish brown)	266	34	172	22
7,5 YR5/4; 7,5 YR6/3 (dull brown)	235	30	132	17
2,5 YR2/4 (very dark reddish brown)	23	3	23	3
Absence d'horizon	78	10	23	3
7,5 YR5/2; 7,5 YR4/2 (grayish brown)			23	3
7,5 YR4/3 (brown)			8	1
10 YR4/3; 10 YR5/4 (dull yellowish brown)			78	10
5 YR3/3 (dark reddish brown)			15	2
5 YR6/3 (dull orange)			9	1
7,5 YR5/6 (bright brown)			8	1

Tableau 41 : Type et proportion des couleurs de l'horizon de sub-surface

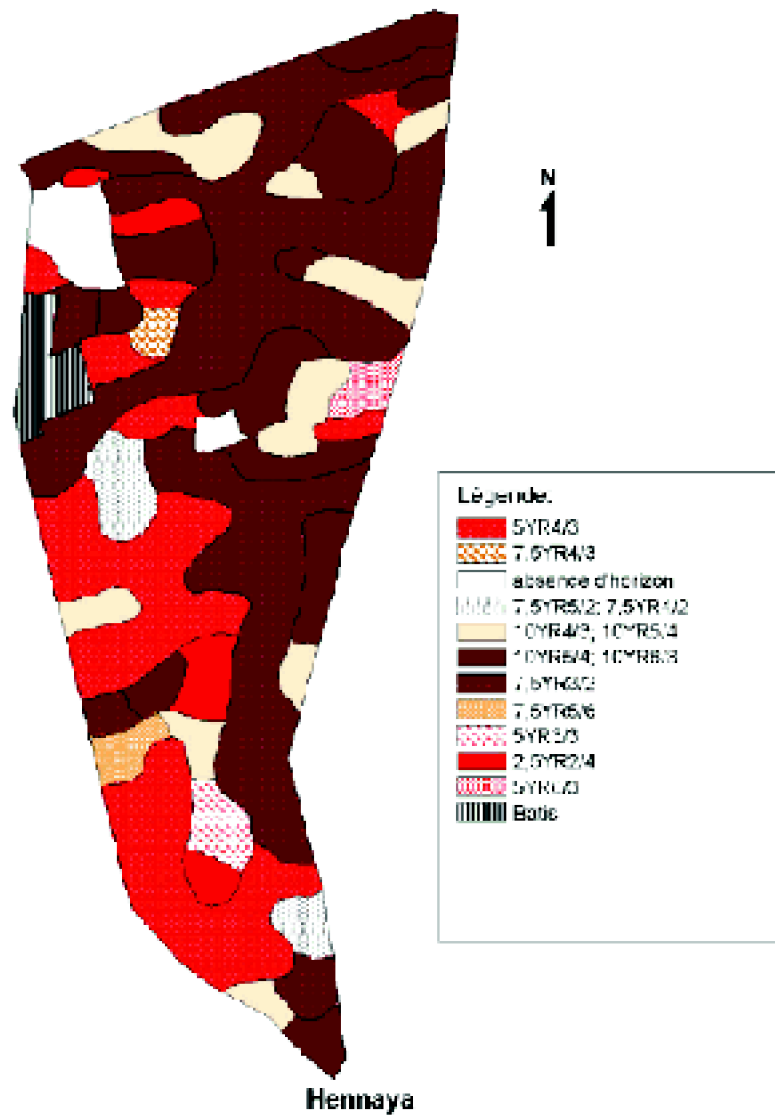


Figure 22 : Carte thématique de la couleur issue des observations de l'horizon de subsurface. Echelle : 1/25 000

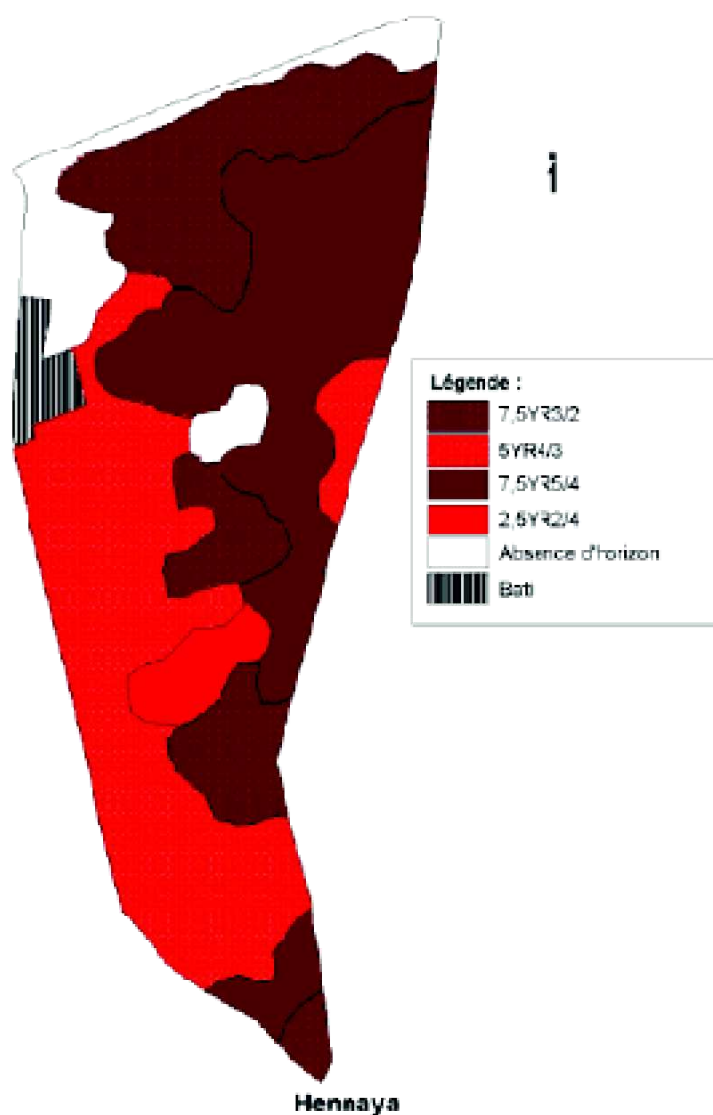


Figure 23 : Carte de la couleur de l'horizon de subsurface issue de la carte pédologique.
Echelle : 1/25 000

Horizon de profondeur

La comparaison des figures 24 et 25 révèle d'importantes différences entre la CTO et la CTP. En effet, la CTO se caractérise par 57 unités cartographiques correspondant à 10 classes de couleur alors que la CTP n'en comptabilise que 13 unités cartographiques et 4 classes de couleur. Il s'avère donc que la carte pédologique n'a pas tenu compte de six classes de couleurs et rend compte assez mal de la distribution du critère couleur.

L'analyse du tableau 42 révèle que les superficies occupées par chacune des classes de couleur (traduite par les taux d'occupation des classes) sont différentes selon que l'on considère la CTO ou la CTP. Ces différences concernent non seulement les superficies totales de chaque classe de couleur, mais aussi le nombre d'unités cartographiques de chaque classe et leur répartition spatiale dans le périmètre d'étude.

La couleur	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
7,5 YR3/2 (brownish black)	271	35	117	15
5 YR4/3 (reddish brown)	49	6	39	5
7,5YR4/2; 7,5YR5/2 (grayish brown)	151	19	78	10
7,5YR6/4; 10YR6/3 (dull orange)	65	8	70	9
2,5 YR2/4 (very dark reddish brown)	23	3	23	3
Absence d'horizon	222	28	258	33
7,5YR5/4 (dull brown)			70	9
10YR4/3 ; 10YR5/4 (dull yellowish brown)			55	7
10 YR7/1 (bright gray)			31	4
7,5YR2/1 (black)			15	2
10YR3/2 (brownish black)			8	1
5 YR4/6 (brown)			8	1
2,5YR5/8 (bright reddish brown)			8	1

Tableau 42 : Type et proportion des couleurs de l'horizon de profondeur.

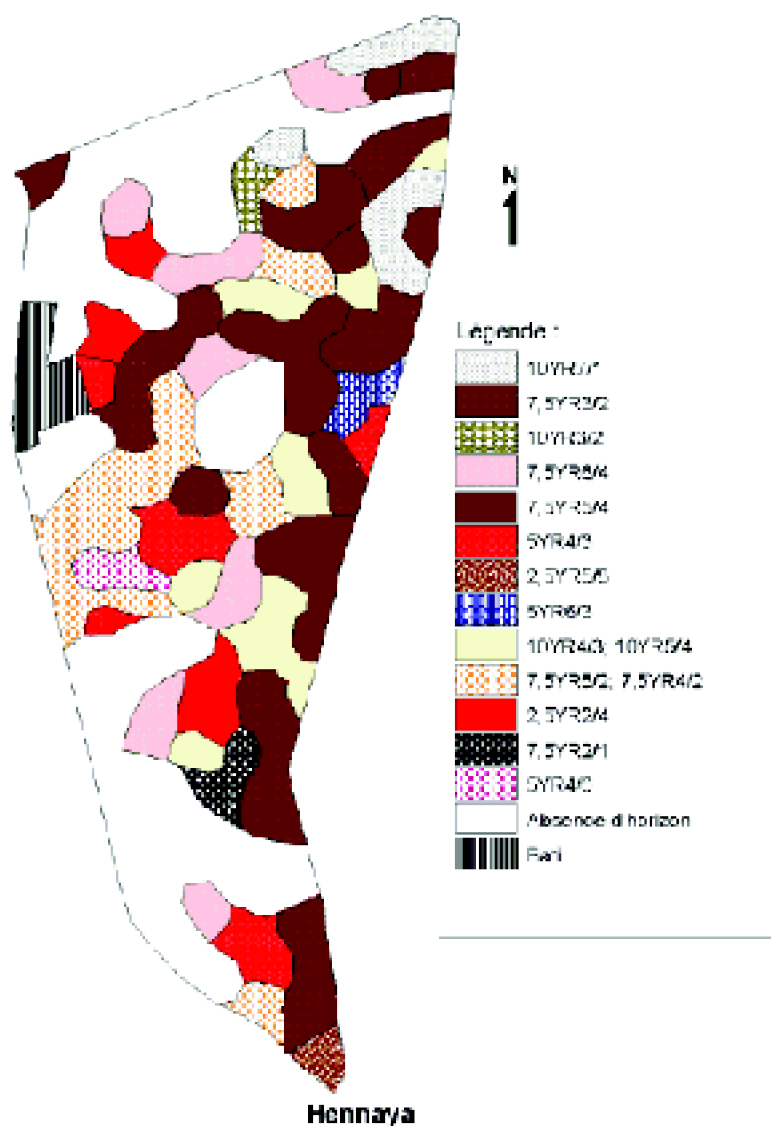


Figure 24 : Carte thématique de la couleur de l'horizon de profondeur. Echelle : 1/25 000

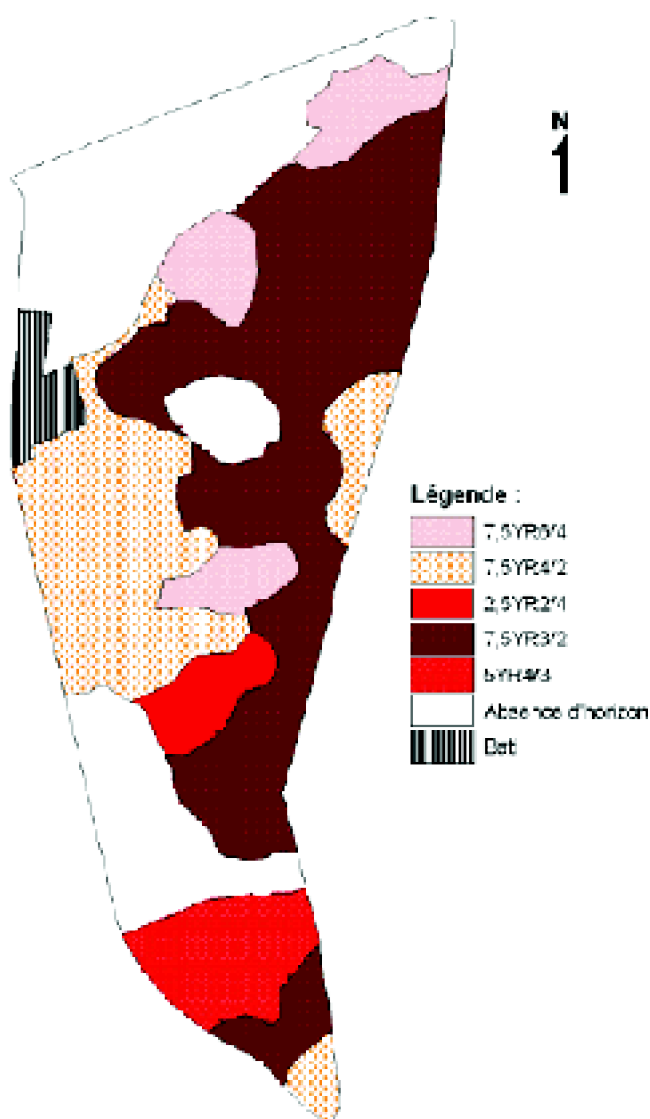


Figure 25 : Carte de la couleur de l'horizon de profondeur issue de la carte pédologique.
Echelle : 1/25 000

6.1.4 L'effervescence à l'HCl :

Le test à l'HCl permet de détecter la présence ou l'absence du calcaire dans le sol, son utilisation lors de la prospection pédologique est donc nécessaire. Lors de la cartographie des sols de Hannaya, trois classes d'intensité de l'effervescence à l'HCl ont été recensées, il s'agit des effervescences faibles, moyennes et fortes.

Horizon de surface

La figure 26 (CTO) se compose de 12 unités cartographiques représentant 3 classes d'effervescence à l'HCl. En revanche, la figure 27 (CTP) ne se compose que de 7 unités cartographiques qui ne représentent que 2 classes d'effervescence à l'HCl. De même, il s'avère que la CTP privilégie la classe des effervescences moyennes au détriment des

autres classes. Ce résultat est confirmé par le tableau 43 qui indique que les effervescences fortes et moyennes de la CTO se partagent équitablement la superficie cartographiée (49 % environ) ne laissant qu'une surface infime (1 % environ) aux faibles effervescences ; dans la CTP, les taux d'occupation sont de l'ordre de 72 %, 28 % et 0 % respectivement pour les effervescences moyennes, fortes et faibles.

effervescence	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
forte	219	28	391	50
moyenne	564	72	384	49
faible		0	8	1

Tableau 43 : Classe et proportion de l'effervescence de l'horizon de surface

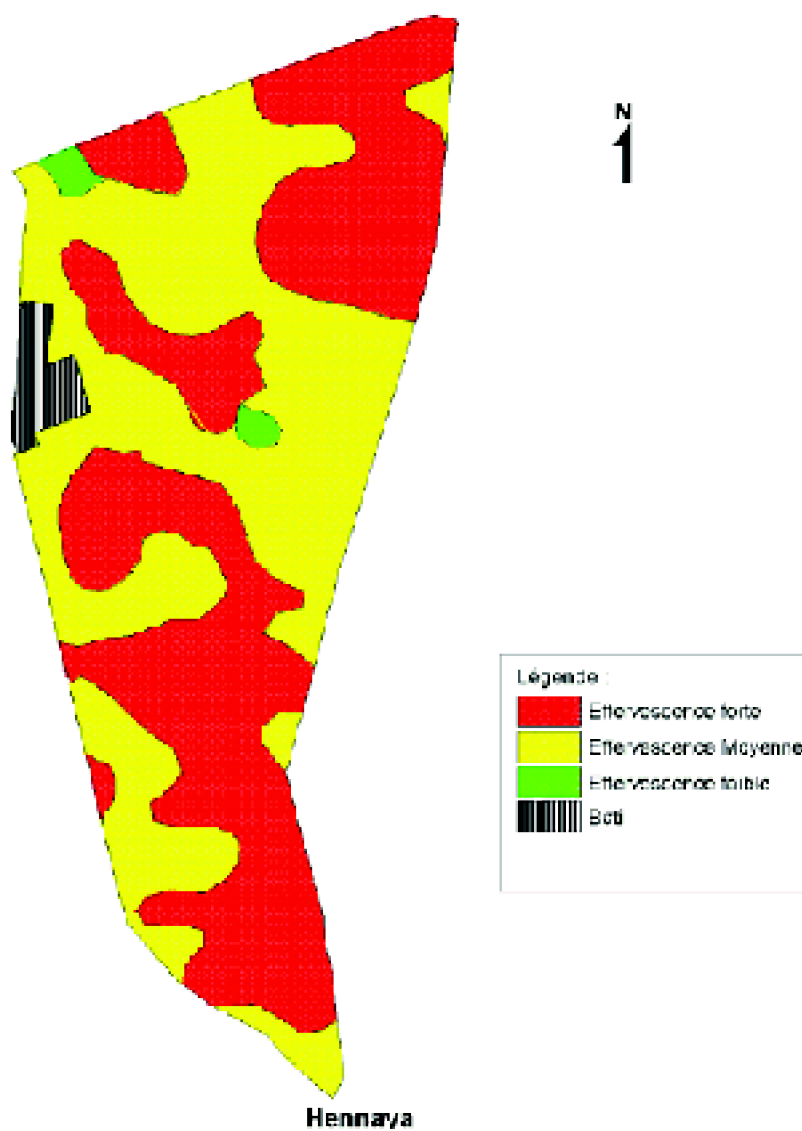


Figure 26 : Carte thématique de l'effervescence à l'HCl de l'horizon de surface issue des observations. Echelle : 1/25 000

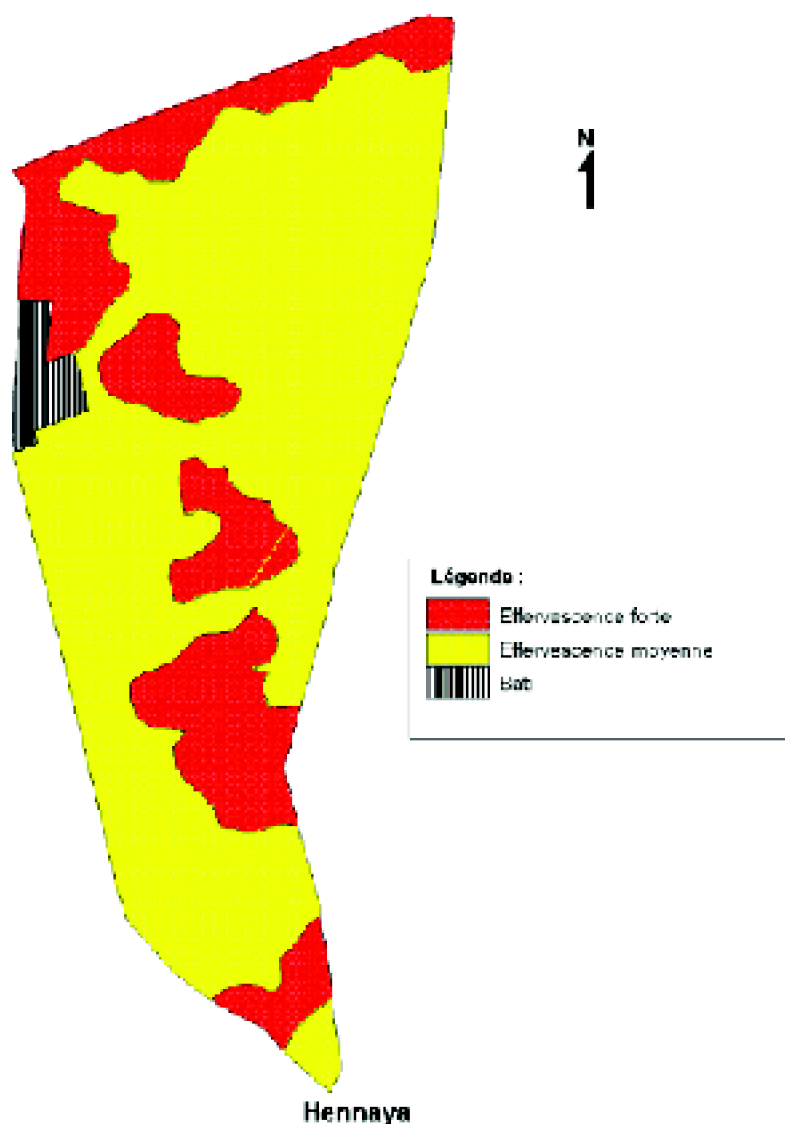


Figure 27 : Carte de l'effervescence à l'HCl de l'horizon de surface issue de la carte pédologique. Echelle : 1/25 000

Horizon de subsurface

En ce qui concerne l'horizon de sub-surface, les mêmes remarques peuvent être reconduites. En effet, il existe de fortes différences entre les figures 28 et 29 que se soit sur le nombre d'unités cartographiques qui les composent ou dans leur répartition spatiale ou encore sur le nombre de classes recensées. Ici aussi, il ressort que la CTP privilégie la classe des effervescences moyennes (79 % de la superficie) au détriment des autres classes (tableau 44).

effervescence	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
forte	94	12	384	49
moyenne	619	79	360	46
faible	-	-	8	1
Absence d'horizon	71	9	31	4

Tableau 44 : Classe et proportion de l'effervescence de l'horizon de sub-surface

Horizon de profondeur

Comme pour les horizons de surface et de subsurface, l'analyse des figures 30 et 31 relatives aux horizons de profondeur révèle des différences fondamentales entre la CTO et la CTP. En effet, ces différences concernent aussi bien le nombre d'unités cartographiques qui composent chacune des 2 cartes (18 unités pour la CTO et 13 unités pour la CTP) que sur leur répartition spatiale ou encore leur taux d'occupation (tableau 45). Ici aussi, Il ressort donc que l'effervescence forte est sous estimée par la carte pédologique qui la considère comme étant une effervescence moyenne. De même, certaines zones à forte ou moyenne effervescence sont considérées par la CTP comme zones à faible effervescence.

effervescence	Carte issue de la carte pédologique		Carte issue des observations	
	Surface (ha)	% de la surface	Surface (ha)	% de la surface
forte	188	24	384	49
moyenne	329	42	122	16
faible	31	4	7	1
Absence d'horizon	235	30	270	34

Tableau 45 : Classe et proportion de l'effervescence de l'horizon de profondeur

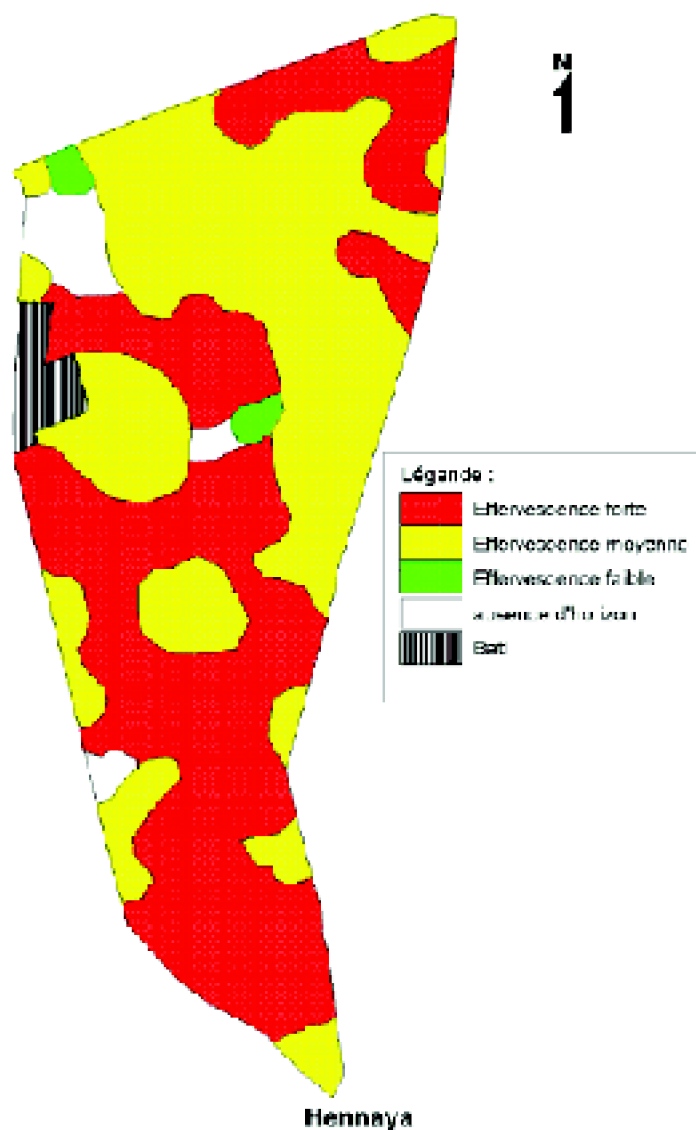


Figure 28 : Carte thématique de l'effervescence à l'HCl de l'horizon de subsurface issue des observations. Echelle : 1/25 000

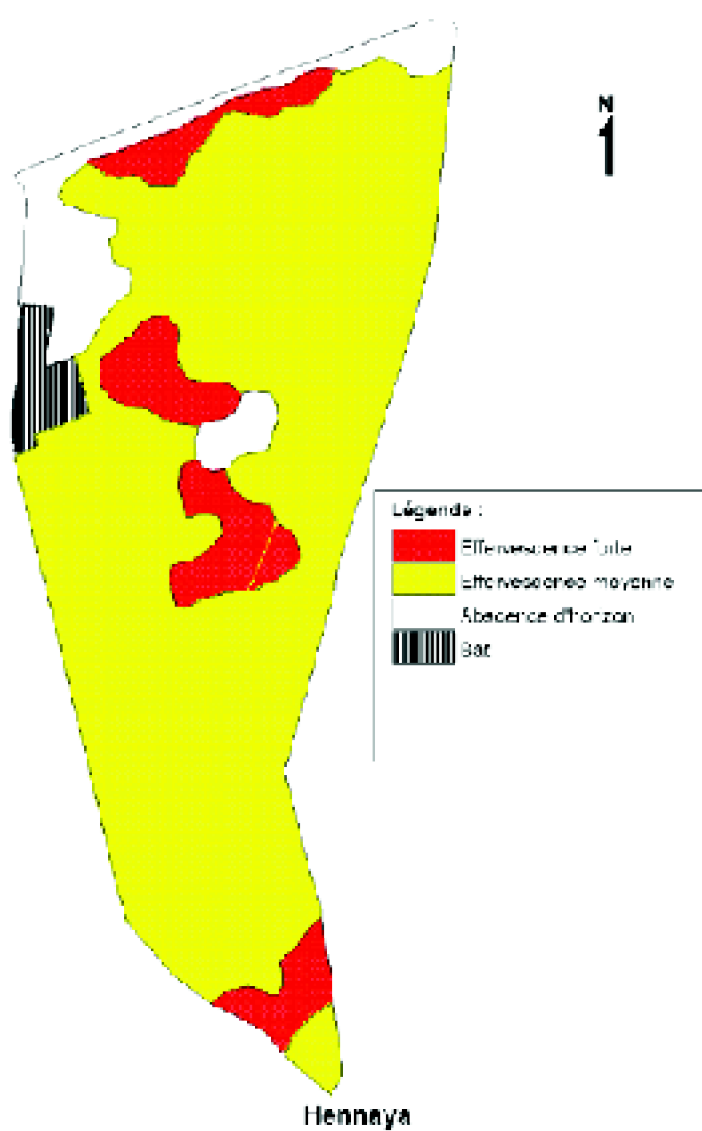


Figure 29 : Carte de l'effervescence à l'HCI de l'horizon de subsurface issue de la carte pédologique. Echelle : 1/25 000

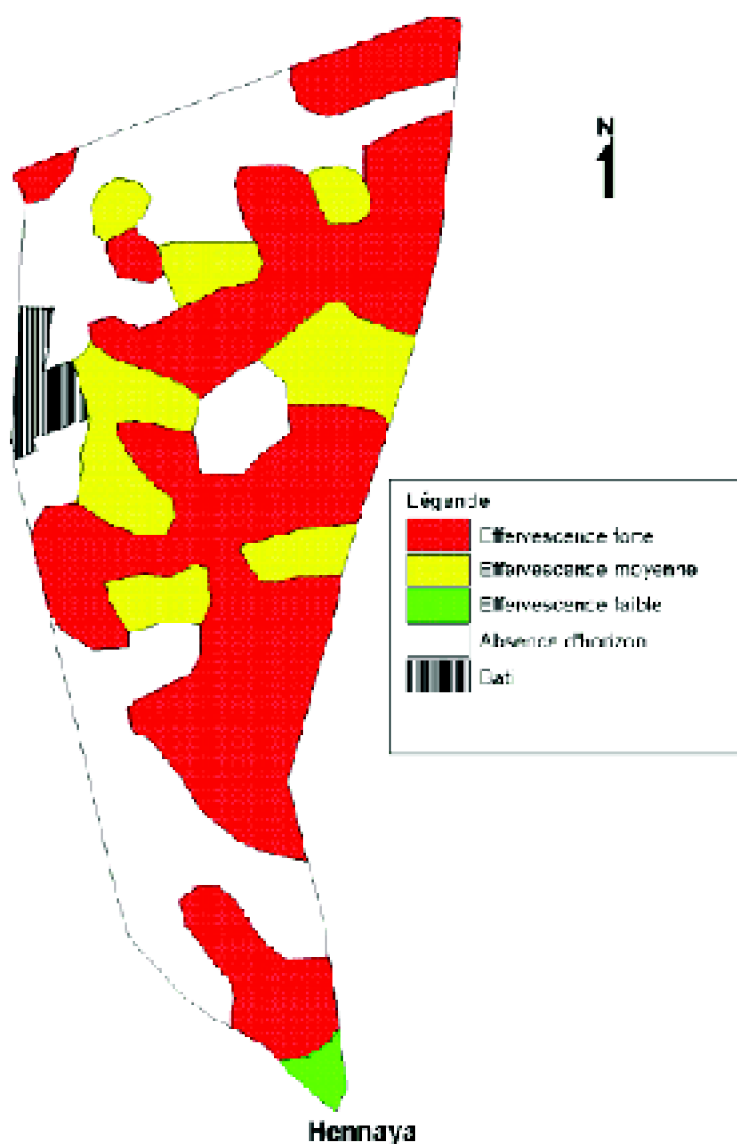


Figure 30 : Carte de l'effervescence à l'HCl de l'horizon de profondeur issue des observations. Echelle : 1/25 000

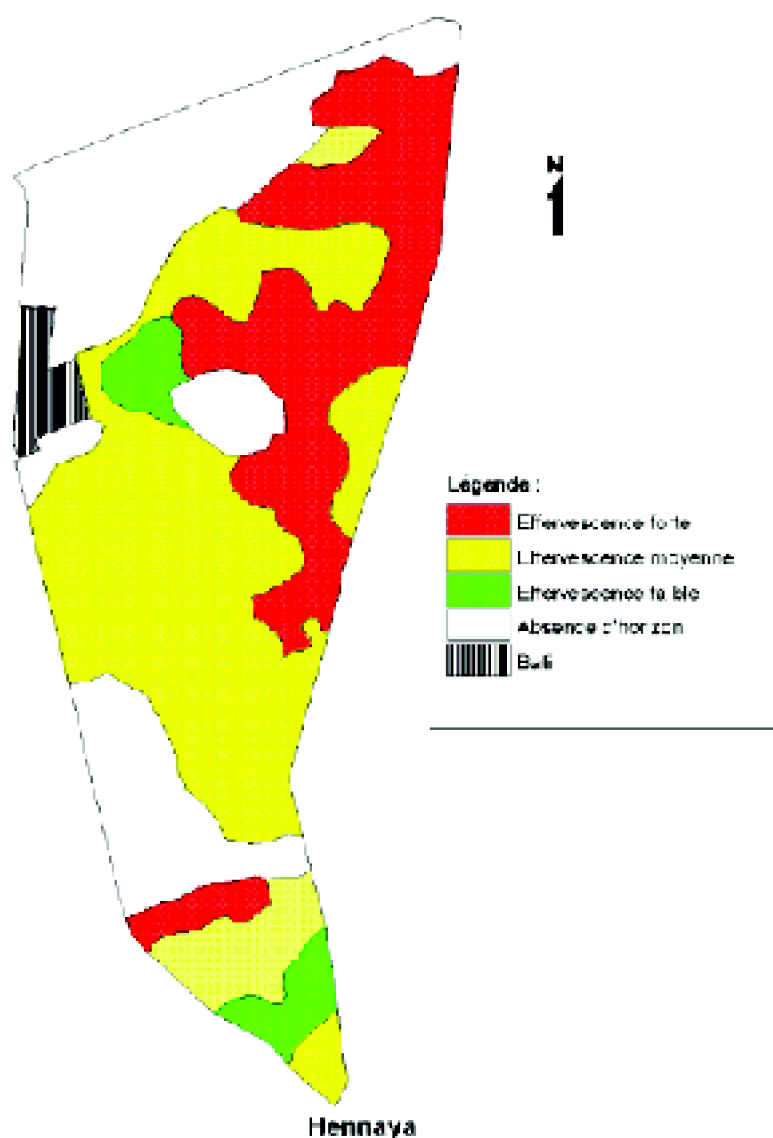


Figure 31 : Carte de l'effervescence à l'HCl de l'horizon de profondeur issue de la carte pédologique. Echelle : 1/25 000

Tous ces résultats permettent de conclure que les cartes thématiques issues des observations de terrain (CTO) sont assez différentes de celles qui dérivent de la carte pédologique (CTP). Malgré que la carte pédologique est élaborée selon une cartographie systématique, les résultats ont montré que, pour un même critère de cartographie, aucune CTO ne se superpose parfaitement à son homologue CTP et ce quel que soit l'horizon considéré (surface, sub-surface et profondeur). De ce fait, il s'avère donc que la synthèse des résultats lors de la réalisation de la carte pédologique se traduit par une importante déperdition de l'information ponctuelle recensée sur le terrain. Cette différence serait due au fait que le tracé des limites des plages cartographiques dans la carte pédologique s'est basé sur la synthèse de plusieurs observations verticales que le pédologue généralise à l'ensemble du sol appartenant à l'unité délimitée, ce qui se traduit généralement par une altération de l'information. Par contre, le tracé des limites des CTO est basé sur de nombreuses informations ponctuelles bien réparties dans l'espace. Legros (1996) évoque

une part de subjectivité attribuée au pédologue et annonce que «le cartographe, comme le peintre, a un style, c'est-à-dire des qualités et des défauts propres. Sa façon de dessiner et son expérience plus ou moins affirmée du terrain, le conduiront à réaliser des documents pas tout à fait similaires à ceux produits, dans les mêmes conditions, par ses collègues. Qu'on le veuille ou non, il existe une certaine part de subjectivité liée aux opérateurs ». Cependant, la spécificité du prospecteur ne justifie pas à elle seule les nombreuses différences entre les CTO et les CTP surtout lorsque celles-ci sont obtenues à partir de critères de cartographie ayant servis à la réalisation de la carte pédologique.

Après avoir analysé les différences entre les cartes thématiques issues de la carte pédologique et celles issues des observations de terrain, nous tentons, dans ce qui suit, de combiner l'ensemble des critères étudiés à travers le croisement des cartes monofactorielles, d'abord au niveau de l'horizon de surface, ensuite de l'horizon de sub-surface et enfin de l'horizon de profondeur.

Le croisement d'une carte contenant x unités avec une carte contenant y unités peut engendrer un minimum de $x*y$ nouvelles unités. Il se pose alors un problème de multiplicité des combinaisons cartographiques qui alourdit l'interprétation, il n'est pas rare de se retrouver avec un très grand nombre de combinaisons cartographiques dont certaines sont non représentatives. Compte tenu de cette imprécision liée au croisement des cartes, il est très discutable de vouloir en croiser plus de 2 ou 3 à la fois et de pouvoir les interpréter aisément (Legros et Bornand, 1989 cité par Gaddas, 2001) surtout que, généralement, les cartes possèdent un nombre de polygones dépassant la dizaine. Cela est d'autant plus vrai pour ce travail que les cartes dont on dispose possèdent un nombre d'unités dépassant la dizaine. Il faut donc procéder aux croisements des données cartographiques de manière à trouver la meilleure combinaison qui permette de déduire le type de sol.

6.2 Analyse thématique à l'échelle d'un seul horizon

Le croisement des différentes cartes thématiques relatives à un seul critère de cartographie a produit des cartes très complexes et difficiles à lire dont le nombre de plages cartographiques dépasse parfois les 400 (figures 32, 34, 36). Pour y remédier, nous avons adopté un principe consistant à favoriser la diminution du nombre d'unité de départ tout en conservant le maximum de variabilité sémantique renseignant sur le facteur de pédogenèse. Nous avons alors éliminé toutes les petites unités en se basant sur la loi du $\frac{1}{4}$ de cm^2 comme la plus petite surface cartographiée représentable sur des cartes papier (Boulaine, 1980 ; Mulders, 1987 ; Finke et al., 1998) cités par Gaddas (2001). Cette loi correspond au seuil de lisibilité ou encore de détectabilité cartographique. En appliquant cette norme pour une échelle de représentation au 1/25 000, la plage cartographique de superficie minimale est alors de 1,56 ha. En pratique, on procède à l'élimination de ces unités en les affectant à l'unité avoisinant ayant la plus grande limite commune. Après cette étape, le nombre d'unités pour les horizons de surface, de sub-surface et de profondeur est passé respectivement à 102, 130 et 95 (figures 33, 35, 37). Le tableau 46 indique les surfaces minimales ainsi que leur pourcentage respectif :

Tableau 46 : Proportion des surfaces minimales par rapport à la surface total

	Somme des surfaces Minimales (ha)	% de la surface total
Horizon de surface	67	9
Horizon de subsurface	70	9
Horizon de profondeur	96	12

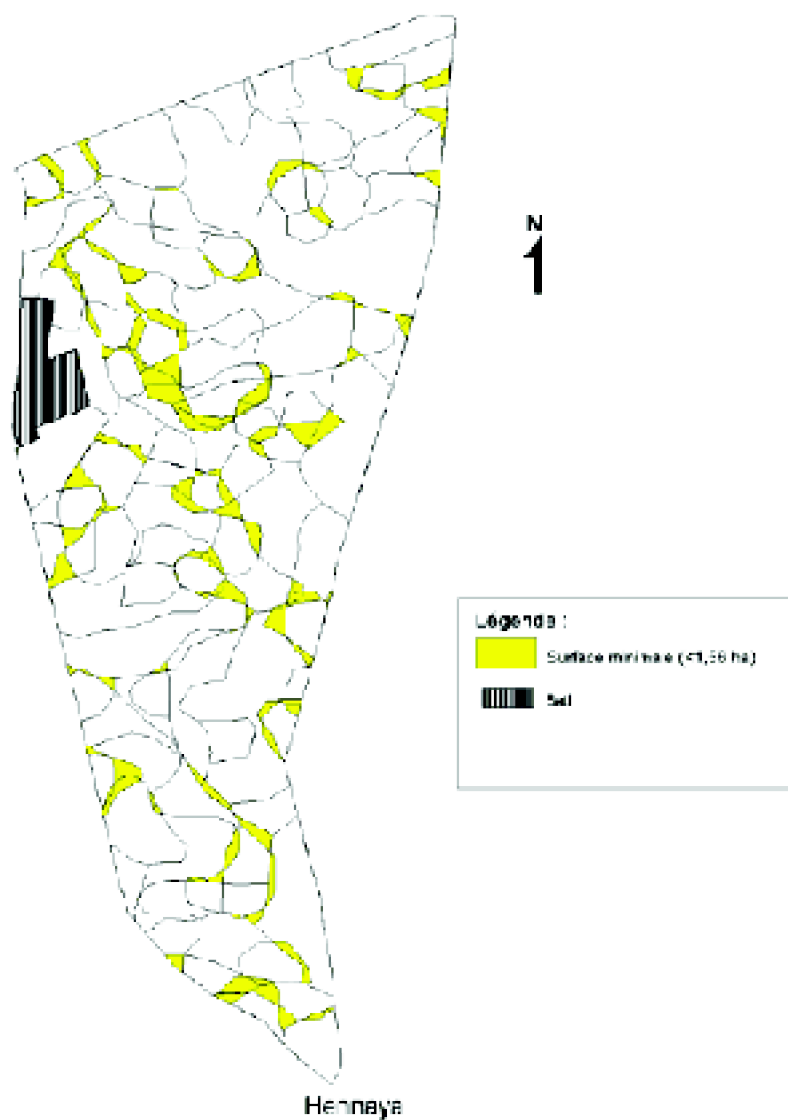


Figure 32: Carte croisement des critères de cartographie (couleur, texture et effervescence à l'HCl) de l'horizon de surface sans éliminer les unités minimales. Echelle : 1/25 000

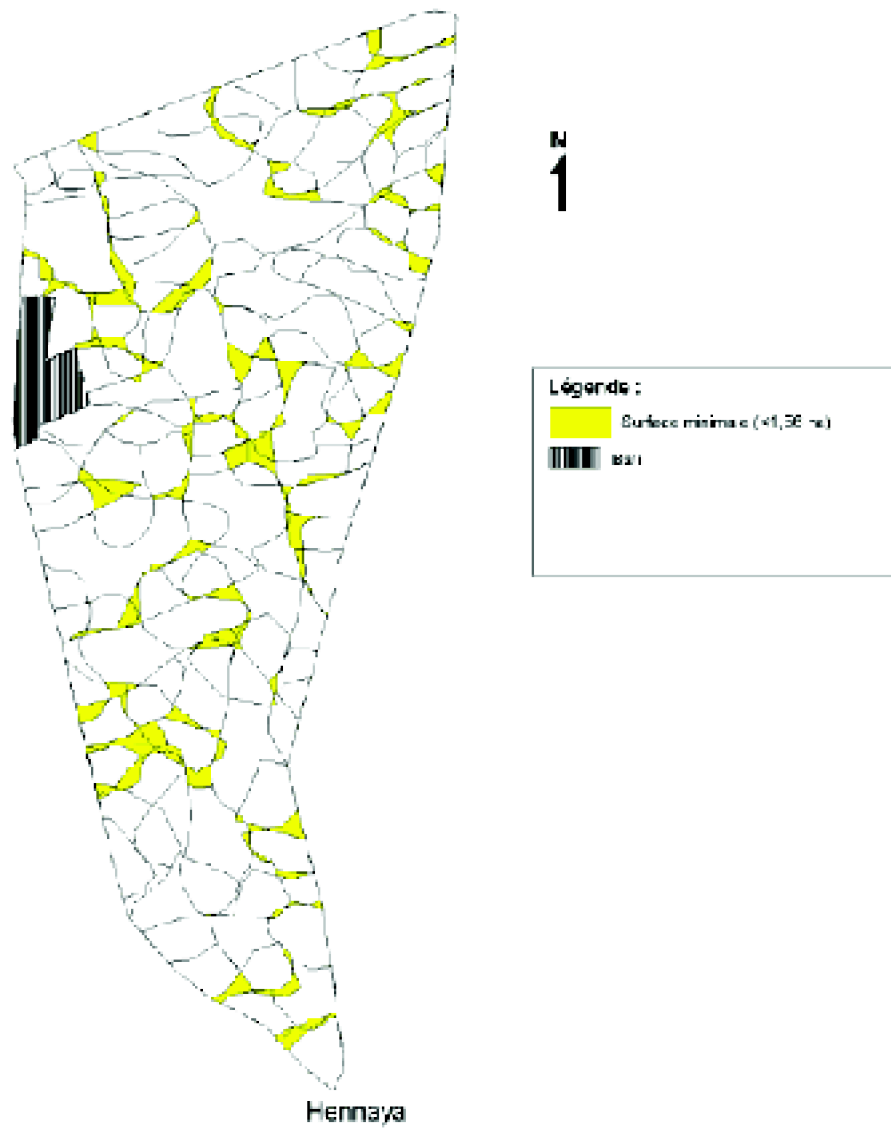


Figure 34 : Carte croisement des critères de cartographie (couleur, texture et effervescence à l'HCl) de l'horizon de subsurface sans éliminer des unités minimales.
Echelle : 1/25 000



Figure 35 : Carte croisement des critères de cartographie (couleur, texture et effervescence à l'HCl) de l'horizon de surface après élimination des surfaces minimales. Echelle : 1/25 000

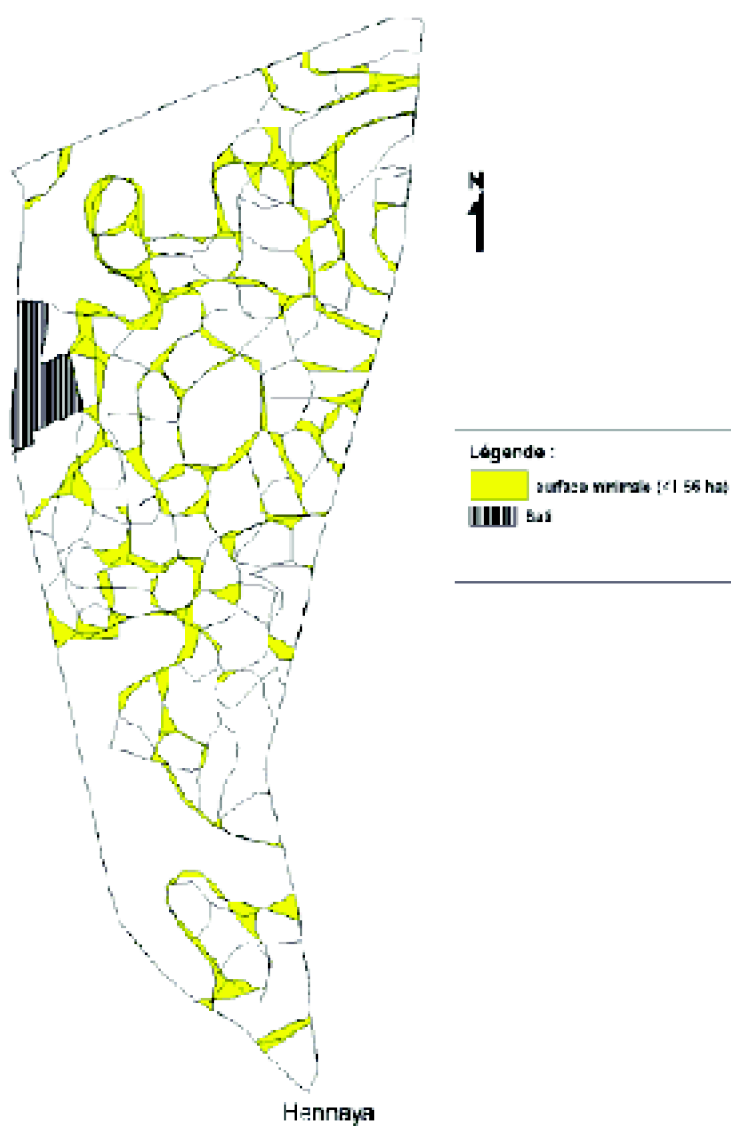


Figure 36 : Carte croisement des critères de cartographie (couleur, texture et effervescence à l'HCl) de l'horizon de profondeur sans éliminer les surfaces minimales.
Echelle : 1/25 000

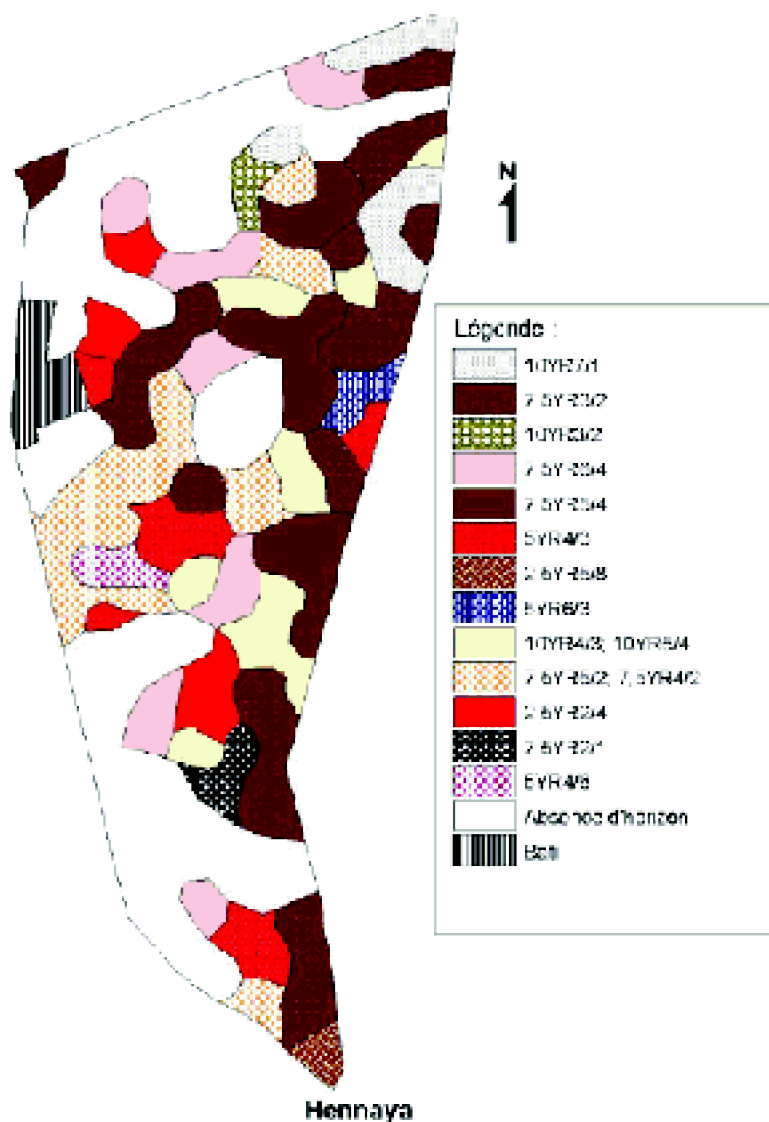


Figure 37 : Carte thématique de la couleur de l'horizon de profondeur. Echelle : 1/25 000

L'horizon de surface

Pour réaliser la carte de l'horizon de surface, nous avons superposé les cartes thématiques de la couleur, la texture et de l'effervescence à l'HCl. Le résultat de ce croisement (figure 33) a été ensuite confronté à la carte pédologique en effectuant différentes requêtes. Il ressort que la couleur constitue un critère discriminant pour les types de sol. En effet, la couleur rougeâtre (2,5YR et 5YR) caractérise les sols rouges, alors que la couleur brunâtre (7,5YR 3/2) caractérise les sols bruns calcaires.

L'horizon de sub-surface

Le croisement des cartes thématiques issues des observations de terrain (figure 35) a abouti à une carte composée de 130 unités cartographiques. La confrontation de cette dernière avec la carte pédologique fait ressortir des unités « d'absence d'horizon » qui

correspondent aux rendzines. A ce niveau également, la couleur rougeâtre (2,5YR et 5YR) caractérise les sols rouges et la couleur brun foncé (7,5YR3/2) caractérise les sols bruns calcaires. D'autre part, la couleur marron brunâtre (7,5 YR 5/4) indique surtout les sols marrons. Il s'avère donc que la couleur de l'horizon de subsurface est mieux corrélée avec la carte pédologique.

L'horizon de profondeur

Le croisement des cartes thématiques (figure 37) a fourni une carte ayant 95 unités. La comparaison entre le résultat du croisement et la carte pédologique met en évidence les sols à croûte et encroûtement. Mis à part les rendzines identifiées lors du croisement en subsurface, l'absence des horizons en profondeur correspond aux sols à encroûtement.

6.3 Analyse thématique à l'échelle du profil

Le résultat du croisement des cartes thématiques (figure 38), à savoir l'horizon de surface, l'horizon de sub-surface, l'horizon de profondeur et de la carte de profondeur fait ressortir 1528 unités cartographiques. Dans cette carte, la superficie correspondante à la somme des unités cartographiques minimales (la superficie d'une unité minimale est inférieure à 1,56 ha) représente 36 % de la surface totale du périmètre. L'élimination de ces unités minimales et leur affectation à l'unité cartographique avec laquelle elles partagent la plus longue frontière a réduit le nombre d'unité cartographique à 161 unités (figure 39) dont la légende reste (page 96) impossible à exploiter sous format imprimé (page 97), cependant l'exploitation sous format numérique est conseillée.

La synthèse des résultats précédant a permis de déterminer les critères de cartographie les plus efficaces pour la zone de Hennaya. En effet, il ressort que la profondeur du sol (profondeur de la croûte calcaire) et la couleur de l'horizon de sub-surface sont les critères les plus efficaces dans ce genre de milieu. Ces critères peuvent varier d'une région à une autre. En effet, dans une étude cartographique similaire menée dans la région de Staouali, Berbachi (1999) a conclu que les critères les plus importants sont le type d'horizon de subsurface (Bt, C, R), la texture de l'horizon de surface et subsurface (Sableuse, argileuse, argilo-limoneuse, argilo-sableuse) et la charge en éléments grossiers de surface (charge élevée).

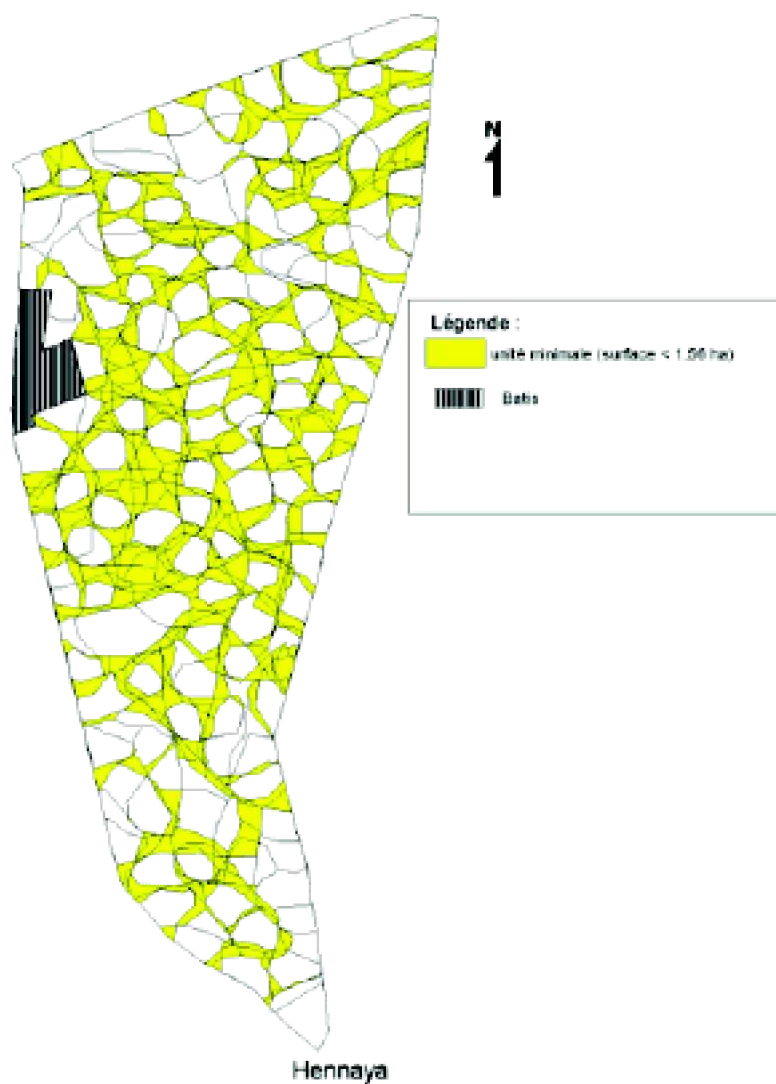
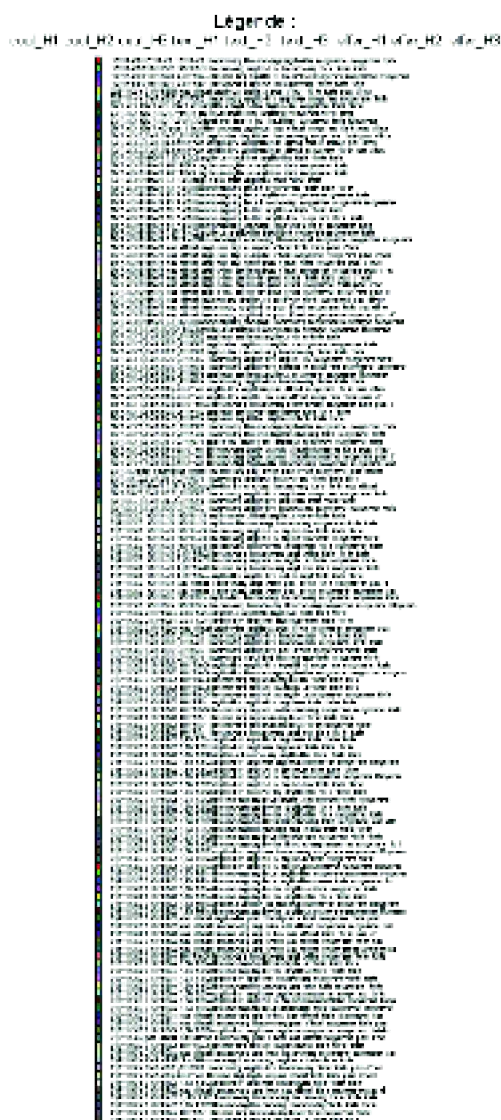


Figure 38 : Carte de croisement de l'horizon de surface, subsurface, de profondeur et la carte de profondeur sans éliminer les unités minimales. Echelle : 1/25 000



Figure 39 : Carte de croisement des horizons et la carte de profondeur après élimination les unités minimales. Echelle : 1/25 000



La réalisation d'une requête à partir de la carte de croisement finale (horizon de surface, horizon de subsurface, horizon de profondeur et la carte de profondeur) en utilisant les principaux critères de cartographie sélectionnés a permis de produire une carte pédologique (figure 40) en apportant des corrections dans les limites de sols, ce qui a eu pour conséquence la réduction de l'hétérogénéité des unités cartographiques vis-à-vis des critères de cartographie tout en explicitant leurs principales caractéristiques. Le résultat obtenu met en évidence que les sols peu profonds (absence de l'horizon de sub-surface) reposant sur dalle calcaire représentent les rendzines et que les sols rouges sont reconnus à travers leur couleur rouge caractéristique. Les sols bruns calcaires sont des sols profonds (≥ 120 cm) et leur couleur est brune (7YR 3/2). Les sols moyennement profonds de couleur brune sont des sols bruns calcaires à encroûtement calcaire. En fin, la couleur marron brunâtre (7,5 YR 5/4) caractérisent les sols marrons.

6.4 Comparaison de la carte pédologique semi-automatique (CPSA)

avec la carte pédologique classique (CPC)

Nous rappelons que la CPC est obtenue en utilisant la classification des sols et la notion du profil représentatif lors de son élaboration alors que la CPSA est obtenue après croisement des cartes mono-paramétriques issues des observations directes de terrain. Pour une meilleure comparaison des deux cartes, nous avons jugé plus opportun de les croiser entre elles et de réaliser une interprétation sous forme de tableaux. De ce fait, deux situations sont possibles :

- Les sols rencontrés dans la CPSA correspondent aux mêmes types de sols observés dans la CPC. Il s'agit dans ce cas d'une situation de concordance parfaite.
- Les sols rencontrés dans la CPSA ne correspondent pas aux mêmes types de sols de la CPC. Cette discordance peut être due entre autres à la méthode de généralisation excessive autour d'un profil moyen analysé adopté lors de l'élaboration de la CPC et qui aurait conduit à une perte d'information et donc de précision.

Le tableau 47 synthétise les surfaces de sol communes entre les deux types de cartes et les pourcentages de ces surfaces communes par rapport à la surface totale.

Tableau 47 : Surfaces communes et taux d'occupation par rapport à la surface totale

Sol	surface commune (ha)	% de surface commune / surface totale
Brun calcaire modal	130	17
Sol rouge	169	22
Sol marron	36	5
Sol brun calcaire encroûté	15	2
Rendzine	22	3
Total	372	49

Il s'avère donc que la surface commune entre les deux cartes n'est que de 49 % seulement par rapport à l'ensemble du périmètre d'étude. De ce fait, on peut considérer que la CPC comporterait 50 % d'erreur à cause, entre autres, à l'assimilation de l'unité cartographique à l'unité taxonomique et aux critères de cartographie qui ont été mal utilisés et mal hiérarchisés. Le croisement des deux cartes montre une très faible concordance pour les sols bruns calcaires encroûtés (2 %). Cette discordance entre les deux cartes est en réalité plus importante que les résultats obtenus dans le tableau 47. En effet, la comparaison visuelle des deux cartes révèle que les limites de plages ne se superposent pas parfaitement ou pas du tout.

Le tableau 48 récapitule la surface et le pourcentage de chaque type de sol dans chacune des deux cartes.

Tableau 48 : Surfaces et taux d'occupation des sols d'après la CPC et CPSA

Sol	CPC		CPSA	
	Surface (ha)	% du sol	Surface (ha)	% du sol
Brun calcaire modal	194	25	296	38
Sol rouge	271	35	213	27
Sol marron	188	24	121	15
Sol brun calcaire encroûté	56	7	129	16
Rendzine	74	9	23	3
Total	783	100	782	99

La comparaison des taux d'occupation de chaque type de sol (tableau 48) révèle des différences très importantes entre les deux cartes. Par exemple, la classe la plus représentée dans la CPC correspond aux sols rouges (35 %) et la moins représentée aux sols bruns encroûtés (7 %). Pour la CPSA, les sols dominants sont représentés par les sols bruns calcaires modaux (38 %) et les moins répandus par les rendzines (3 %). Dans le détail, la différence entre les deux cartes est de 13 % pour les sols bruns calcaires modaux, 8 % pour les sols rouges, 9 % pour les sols marron, 9 % pour les sols bruns encroûtés et de 6 % pour les rendzines.

L'observation des deux cartes pédologiques (figure 5 et 40) montre que les sols rouges se localisent essentiellement dans le sud ouest du périmètre. La généralisation excessive a fait que les sols rouges occupent pratiquement toute la zone ouest dans la CPC alors que la CPSA indique également une dominance de ces sols tout en montrant d'autres types de sols, essentiellement des sols bruns calcaires encroûtés, des sols bruns calcaires modaux et une petite zone représentant une rendzine. La même remarque peut être reconduite pour les rendzines qui occupent 9 % de la CPC et qui se localisent dans sa partie nord. Ces mêmes sols (rendzines) occupent uniquement 3 % de la CPSA et se localisent essentiellement dans le centre et le nord ouest de la zone ; dans la partie nord, on retrouve les sols bruns encroûtés, les sols marrons et les sols bruns calcaires modaux.

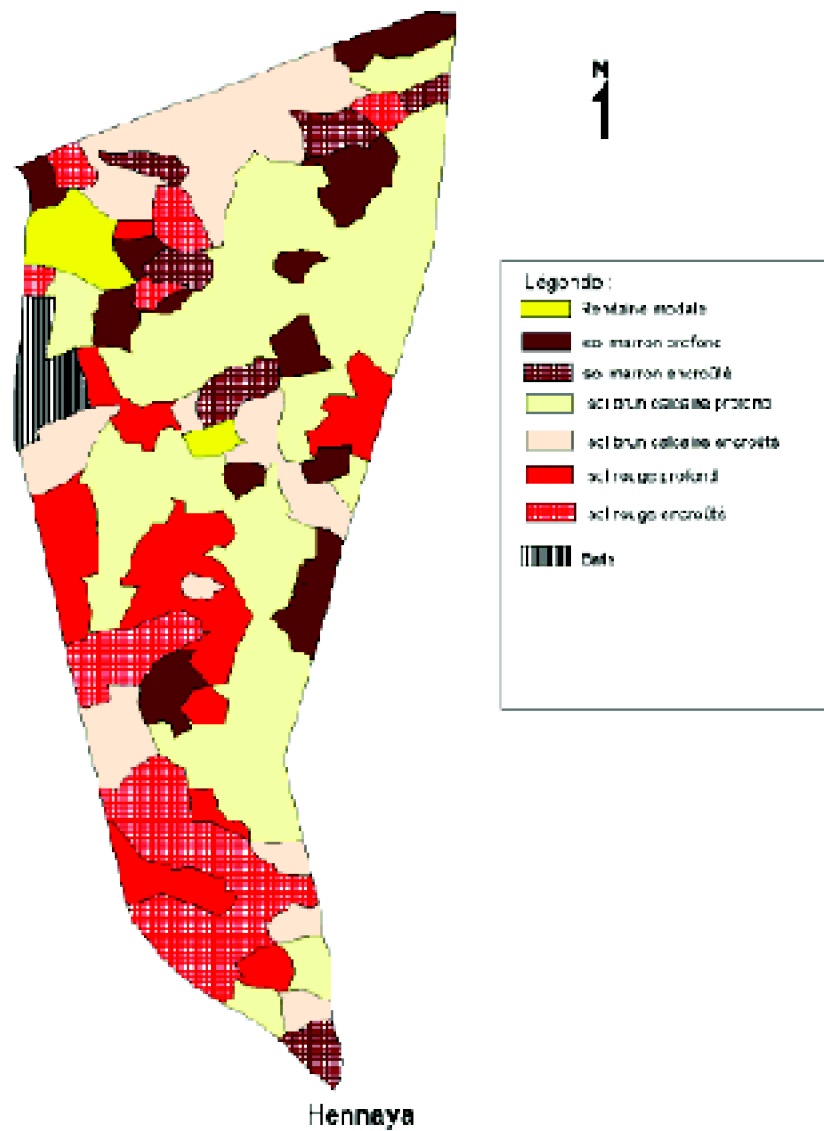


Figure 40 : Carte de pédologie semi-automatique (croisement des horizons et la carte de profondeur). Echelle : 1/25 000

Conclusion générale

La zone étudiée s'étale sur 783 ha. La cartographie pédologique au 1/25 000 menée selon les termes des références du cahier des charges a mis en évidence que les sols du périmètre de Hennaya sont représentés par trois classes de sols :

- La classe des sols calcimagnésiques est représentée par les sols bruns calcaires modaux, les sols bruns calcaires à encroûtement calcaire et les rendzines modales. Les sols de cette classe occupent une superficie de 324,02 ha correspondant à 41,38 % de la surface totale du périmètre cartographié. Les sols bruns calcaires modaux sont assez courants dans cette zone, ils occupent une superficie de 193,69 ha, soit 24,74 % de la surface totale. Les rendzines modales s'étalent sur 74,49 ha (9,51 % de la superficie totale) et les sols bruns calcaires sur encroûtement sur 55,84 ha, soit sur 7,13 % de la superficie total).

- La classe des sols isohumiques est représentée par les sols marron encroûtés, sur croûte calcaire. Cette classe occupe une superficie de 187,86 ha, soit 24 % de la superficie totale.

- La classe des sols à sesquioxydes de fer, rouges, recalifiés, formés sous un climat de type méditerranéen s'étale sur une superficie de 271,02 ha correspondant à 34,62 % de la surface totale.

D'une façon générale, les sols étudiés se caractérisent par la présence de fortes accumulations calcaires sous forme d'encroûtement, de croûte ou de dalle calcaire situées à différents niveaux de profondeur (35 cm < accumulation calcaire < 120 cm) et

qui constituent un facteur limitant pour les cultures. Globalement, les sols étudiés se caractérisent par des taux d'argiles élevés, ils sont calcaires, alcalins et relativement riches en matière organique.

L'évaluation des données de l'étude cartographique par le biais des tests de concordance et le contrôle de vraisemblance a révélé que la qualité des données est hétérogène. Par exemple, les données des bases échangeables ne concordent pas avec celles de la CEC.

Par ailleurs, cette étude a montré que les 137 profils réalisés étaient suffisants pour la cartographie du périmètre de Hennaya au 1/20 000. Néanmoins, le nombre d'échantillons prélevé aurait dû être plus important pour mieux cerner la variation spatiale intra-unité du calcaire total (CV = 40 %) et de la conductivité électrique (CV = 54 %). Le nombre nécessaire d'échantillons nécessaires est de 94 pour le calcaire et 114 pour la conductivité électrique au lieu des 87 échantillons prélevés.

L'analyse de la variabilité spatiale à l'intérieur d'une même unité cartographique a montré que le calcaire total, la matière organique et la conductivité électrique varient fortement dans l'espace ($26 \% < C.V < 67 \%$), que l'argile et la CEC sont moyennement variables ($18 \% < C.V < 28 \%$) et que le pH et la densité apparente sont faiblement variables ($C.V < 10\%$). Les forts coefficients de variation de certains paramètres sont élevés comme c'est le cas du calcaire total dont le coefficient varie entre 40 et 48 % et la matière organique ($30 \% < CV < 41 \%$). Cette forte variabilité intra-unité remet en cause le zonage effectué pour ces paramètres. En revanche, l'argile et la CEC présentent des coefficients de variation moyens, de ce fait, la validation de leur zonage ne comporte pas un grand risque.

L'étude des corrélations entre variables a démontré que dans le cas des sols étudiés, la matière organique n'a pas d'effet significatif sur la C.E.C. En revanche, cette dernière est fortement corrélée à la fraction argileuse qui la régule. Le calcaire total et l'argile coexistent dans tous les échantillons. Même si ces deux paramètres sont mal corrélés entre eux, les statistiques indiquent que, d'une manière globale, l'augmentation de l'un induit la diminution de l'autre.

La comparaison des cartes thématiques issues des observations de terrain à celles issues de la carte pédologique a permis de dégager les critères de cartographie les plus efficaces pour le périmètre d'étude. Ces critères de cartographie sont la profondeur du sol et la couleur de l'horizon de sub-surface. Ainsi et d'une façon globale, les sols peu profonds (absence de l'horizon de sub-surface) reposant sur dalle calcaire représentent les rendzines, les sols rouges sont reconnus par leur couleur rouge caractéristique (2,5 YR et 5 YR) et les sols bruns calcaires sont profonds (≥ 120 cm) et leur couleur est brune (7YR 3/2).

Les cartes thématiques issues des observations directes se distinguent de celles qui sont issues de la carte pédologique par le nombre et type des unités cartographiques. Cette différence signifie que l'assimilation de l'unité cartographique reconnue par son profil moyen à l'unité taxonomique de ce même profil moyen aboutie à une déperdition de l'information pédologique.

La réalisation d'une requête à partir de la carte de croisement finale (horizon de

surface, horizon de subsurface, horizon de profondeur et la carte de profondeur) en utilisant les principaux critères de cartographie sélectionnés a permis de produire une carte pédologique semi-automatique. La comparaison de cette dernière à la carte pédologique classique a révélé que seulement 49 % de la surface prospectée sont concordants entre les deux cartes. De ce fait, on peut considérer que la carte pédologique classique comporterait 50 % d'erreur à cause, entre autres, de l'assimilation de l'unité cartographique à l'unité taxonomique et aux critères de cartographie qui ont été mal utilisés et mal hiérarchisés. L'ampleur de la discordance entre les deux cartes pédologiques varie selon le type de sol considéré. La comparaison des taux d'occupation de chaque type de sol a révélé des différences assez importantes entre les deux cartes. Ces différences sont de l'ordre de 13 % pour les sols bruns calcaires modaux, 8 % pour les sols rouges, 9 % pour les sols marron, 9 % pour les sols bruns encroûtés et de 6 % pour les rendzines.

En réalité, la discordance entre les deux cartes est plus grande que celle calculée, car les limites des plages des deux cartes pédologiques ne se superposent pas parfaitement ou, parfois, elles ne se superposent pas du tout.

A l'issue de ce travail, il ressort que la carte pédologique réalisée selon les termes de références du cahier des charges en cours laisse apparaître de nombreuses carences et ne répond pas aux critères d'une démarche scientifiquement reconnue. Les principales carences sont les suivantes :

- La densité des observations et le nombre de profils à échantillonner (et donc le nombre d'échantillons à analyser) ne doivent pas être préalablement fixés.
- Les critères de cartographie n'ont pas été apparemment choisis avec rigueur et objectivité.
- La classification des sols recommandée par le cahier des charges semble prêter à confusion pour le prospecteur lors de classification de certain groupe.
- Les données de la description et de l'analyse des sols sont de mauvaise qualité.
- La carte pédologique comporterait au moins 50 % d'erreur par rapport à la réalité de terrain. La qualité du document produit pose donc le problème du contrôle a posteriori des études pédologiques.

Sachant que les études agropédologiques sont à la base des projets de mise en valeur (en irrigué), il serait souhaitable de poursuivre cette recherche par une analyse critique des études pédologiques les plus récentes. Les conclusions permettront de mieux définir les termes de références des cahiers des charges pour une qualité meilleure des documents produits.

Références bibliographiques :

- A.N.R.H, 2003- Inventaire des sols d'Algérie, 1963-2003 Doc. ANRH, direction de la pédologie, Alger.
- A.N.R.H, 2000- Bulletin des précipitations de la station de Mila Hennaya (1973-1996).
- ANRH, 1974- Cours de formation de prospecteurs pédologues.
- Arrouways D., 1987- Cartographie des sols et comportements agronomiques. Comparaison de données de cartographie et d'enquêtes agronomiques en vue de la thématisation d'une carte des sols. Science du sol. Vol 25/1 : 43-58
- Arrouways D., Isabelle Vion, Jolivet Cl., Dominique Guyon, Couturier A., Wilbert J., 1997- Variabilité intraparcellaire de quelques propriétés des sols sableux des Landes de Gascogne (France). Conséquence sur la stratégie d'échantillonnage agronomique. Etude et gestion des sols 4, 1, 5-16p.
- Bastet G., Bruand A., Quétin P., Cousin I., 1998- Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à de fonctions de pédotransfert (FPT) : Une analyse bibliographique. Etude et gestion des sols 5, 1, 1-23p
- Baize D., 1988- Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris, 1988.
- Berbachi K., 1999- Contribution à la connaissance des sols de la région de Staouali (Azur plage). Analyse thématique des critères de cartographie des sols. Thèse. Ing. INA, El harrach, 86 p.
- Bornant M., Legros J. P., Rouzet C., 1994 – Les banques de données-sols. Exemple du

- Languedoc-Roussillon. Etude et gestion des sols n°1, 67-82.
- Bornand M., Robbez-Masson J-M., 1998- Cartographie des sols et informatique : pour une thématique au service des utilisateurs. Mappemonde 49, (1).
- Boulaine J., 1980- pédologie appliquée. Masson, Paris, 220 p.
- BNEDER., 1993- Etude du développement Hydro-agricole à travers la wilaya de Tlemcen. Phase I. Identification des ressources en eau et des aires d'irrigation.
- Brabant P., 1993- Pédologie et système d'information géographique. Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG ? Cah.Orstom, sér.Pédol., vol. XXVIII, n°1, 1993 : 107-135.
- Bracke C., Véron P., Lejeune P., Rondeux J., Bock L., 2001- La carte des sols de Belgique et la cartographie numérique des sols de Wallonie. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 22-24 octobre, Orléans.
- Carré F., Girard M.C., McBratney A.B., 2002- Cartogénèse numérique des types de sols et de leurs incertitudes par la combinaison de corrélations sur les facteurs environnementaux et des géostatistiques. Application aux sols des environs de la Rochelle. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 22-24 octobre, Orléans.
- Chéry P., Dabas M., Julliot M., Saby E., Grenier G., 2002- Variabilité de la teneur en éléments grossiers sur une parcelle viticole de l'appellation des Graves : relation avec des données géophysiques. Journées Nationales de l'Etude des Sols, 22-24 octobre, Orléans.
- Chrétien J., King D., Hardy R., Meunier D., 1993 – Essai de modélisation spatiale des sols d'une région. Application aux plateaux calcaires bourguignons. Science du sol, Vol. 31, 3, 171- 191.
- C.P.C.S., 1967 : Classification des sols. Ed. I.N.R.A Paris. 96p
- Djili, K., 1983- cartographie des sols en milieu steppique calcaire. Thèse magister, I.N.A. El harrach, 100 p.
- Djili K., et Keslani R., 1996- Banque de données et contrôle de l'information pédologique. Un exemple d'application aux sols d'Algérie du Nord. Ann. de l'I.N.A., vol.16, n°1 et 2, 97-112.
- Djili K., Daoud Y., Ayache N., 1999- Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. Etude et gestion des sols, 6, 3, 201-213.
- Djili K., Daoud Y., 1999- Relation entre le pH et la teneur en carbonate de calcium des sols. Cas des sols du Nord Algérien. Agrochimica, Vol. XLIII-N. 3-4, 173-177
- Djili K., 2000- Contribution à la connaissance des sols du nord de l'Algérie. Création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. Thèse de Doct. D'Etat, I.N.A., Alger, 243 p.
- Djili K., Daoud Y., 2001-Relation entre l'argile, la matière organique et la capacité d'échange cationique des sols du Nord de l'Algérie. Agrochimica, Vol.XLV-N. 5 -6
- Douaoui A., 1996- Application de deux méthodes statistiques multivariées à la cartographie des sols. Ann. Agron. I.N.A., Vol. 16, N° 1 et 2, pp.113-126

-
- Duchaufour P., 1988- Abrégés en pédologie. Masson, Paris, 224 p
- Favrot J.C., 1989- une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle : la méthode des secteurs de référence. Science du sol. 27 (4): 351-368.
- Faure P., 1989- cartographie pédologique thématique assisté par ordinateur : le logiciel FORBAN. Science du sol. 27 (1): 81-84.
- Fournier B., 1989- Une méthode cartographique adaptée à certaines problématiques d'aménagement la cartographie « emboîtée ». Science du sol. 27 (1): 105-108.
- Flasse S., Felten V., Frankart R., 1991- Croisement de données multi-sources pour la détermination de l'aptitude des terres. Science du sol. Vol. 29 1. 55-69.
- Gaddas F., 2001- Proposition d'une méthodologie de cartographie des pédopaysages. Application à " la Moyenne vallée du Rhone". Thèse de doctorat. I.N.A.Paris-Grignon. 202 p.
- Gascuel-Oudoux C., 1987- Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, méthodes et résultats ; cas d'une variable : revue bibliographique. Agronomie, 7 (1), 61-71.
- 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. Science du sol, Vol. 27, 4, 335-350.
- Girard M-C., 1989- la cartographie en horizons. Science du sol, Vol. 27 (1), 41- 44.
- Haddouche I., Benhamouda F., Djili K., 2001- Cartographie pédopaysagique de synthèse par télédétection « images Landsat TM ». Cas de la région de Ghassoul (El Bayadh). 3 ème Colloque GEOFCAN, 25-26 septembre à Orléans.
- ISRIC, 1995- Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER).Procedures manuel. Revised edition. UNEP-ISSS-ISRIC-FAO.Ed. by V.W.P. van Engelan and T.T.Wen.ISRIC, Wageningen, Netherlands.125 p.
- Jamagne M., King D., Girard M.C., Hardy R., 1993- Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie. Science du sol. Vol. 31. 30. 141-169.
- King D., 1984 – Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées. Agronomie, 4 (5), 461- 472.
- King D., 1987- Modélisation de l'approche cartographique du comportement des sols. Science du sol. Vol. 52-2. 107-121.
- King D., Daroussin J., Arrouays D., 1989- Analyse cartographique et système d'information géographique en pédologie. Science du sol. Vol. 27. (1). 89-92.
- King D., Duval O., 1989- Traitement informatique des données pédologiques. La bibliothèque Logos. Science du sol. Vol. 27. (1). 77-80.
- Kaemmerer M., Revel J.-C., Barlier J.-F., 1991- Formation des amas friable et nodules calcaires dans des sols argileux en régions tempérée et semi-aride. Science du sol. Vol. 29. 1. 1 - 12.
- Lagacherie P., Ledreux C., Legros J.P., 1993- Modélisation de la connaissance d'un pédologue cartographe. Application à l'automatisation de cartographie pédologique à partir d'un secteur de référence. Mappemonde 4/93.
- Lagacherie P. et Obballos J., 2001- Utilisation d'un secteur de référence pour désagréger les unités cartographiques complexes d'un référentiel pédologique
-

- régional. Un premier essai en plaine viticole Héraultaise. Journées Nationales de l'Étude des Sols, 22-24 octobre, Orléans.
- Lagacherie P., 2002- Cartographie des sols et de leurs propriétés à un niveau sub-régional. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'habilitation à la recherche des recherches. Université Montpellier 2.
- Lahmar R., Arousseau P., Bresson L.M., 1989- Analyse de contenu d'une carte pédologique en horizon : les formules de sol. Science du sol. 27. (1). 45 - 48
- Legros J.P., 1978- Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. I.- Précision dans la délimitation des sols. Ann. Agron., 29 (5), 499-519.
- Legros J.P., 1978 – Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II.- Précision dans la caractérisation des unités de sols. Ann. Agron., 29 (6), 583-601.
- Legros et J. P., Bornand M., 1992- SIG et gestion des sols. Potentialités et limites d'application. Journées d'étude à l'EPFL, Lausanne, 6-7 Juillet 1992.
- Legros J. P., Falipou P., Dunand-Divol F., 1992- Vérification de la qualité de l'information dans les bases de données de sol. Science du sol, Vol. 30, 2, 117-131.
- Legros, 1996 J. P., 1996- Cartographie des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Coll. Gérer l'environnement, Presses Polytec. Et univ. Romandes, 370 p.
- Loukili M., Bock L., Engels P., et Mathieu L., 2000- Approche géomorpho-pédologique et système d'information géographique (sig) pour la gestion des terres au Maroc. Etude et Gestion des sols, 7, 1, 37 – 52.
- Mostéphaoui T., 1996- Utilisation de l'imagerie spatiale et des systèmes d'informations géographiques dans l'évaluation des potentialités agricoles du bassin versant de l'oued Guerrah, en vue de d'un aménagement hydro-agricole.
- Munsell., 1991- Revised standard soil color charts.
- ONM, 2000- Office National de la météorologie. Résumé annuel du temps en Algérie.
- Ruellan A., Dossé M., Fritsch E., 1989- L'analyse structurale de la couverture pédologique. Science du sol, Vol. 27, 4, 319-334.
- Shwartz Ch., Walter Ch., Claudot B., Bouédo Th., Arousseau P., 1997- Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. I. Constitution d'une banque de données cantonales.
- Techno Exportsroy, 1971- Etude agro-pédologique de la plaine de Hennaya (w.Tlemcen) au 1/50 000ème.
- Tessier D., Bruand A., Le Bissonnais Y., Dambrine E., 1996- Qualité chimique et physique des sols. Variabilité spatiale et évolution. Etude et Gestion des sols, 3, 4, 229-244p.
- Trouche G., Morlon P., 1999- Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (R.U) dans le périmètre de l'O.G.A.F. Environnement de la zone de Migennes (Yonne). Etude et Gestion des sols, 6, 1, 41 – 54.
- U.S.D.A., 1994: Keys of soil Taxonomy. Ed : Cornell university, 347 p.
- Voltz M., 1986- Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial.

Thèse Doc. Ing. 162 p.

Walter C., 1990- Estimation des propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : Cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Ille et Vilaine (France). Thèse Doctorat, Université de Paris 6, France, 172 p.

Walter C., 2002- Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. Mém. Scient. Université Henri Poincaré de Nancy. 93p.

WRB., 2006- World reference base for soil resources FAO, 145p.

Wu J., Ransom M.D., Kluitenberg G. J., Nellis M.D., Seyler H.L., 2001- Soil Sci. Soc. Am. J. 65 : 169-177

Liste des abréviations

ONM : Office National Météorologique.

ANRH : Agence National des ressources Hydriques.

L'E.N.HYD : Entreprise nationale des Etudes hydrauliques.

BNEDER : Bureau National des Etudes et Développement Rural.

C.E.C : Capacité d'échange cationique

C.E : Conductivité Eléctrique.

LA : Limono-argileux

AL : Argilo-limoneux

A : Argileux

TA : Très argileux.

MO : Matière organique.