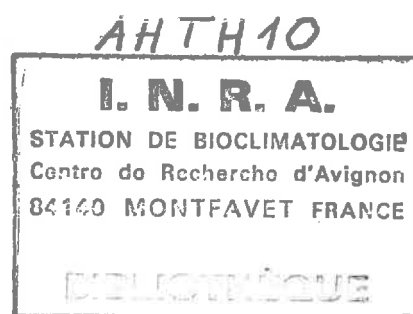


Richard ESCADAFAL

**CARACTÉRISATION DE LA SURFACE
DES SOLS ARIDES
PAR OBSERVATIONS DE TERRAIN
ET PAR TÉLÉDÉTECTION**

APPLICATIONS :
EXEMPLE DE LA RÉGION DE TATAOUINE
(TUNISIE)



2 OCT 1988

Editions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Collection **ÉTUDES et THÈSES**

PARIS 1989

Cet ouvrage a fait l'objet d'une Thèse de Doctorat d'Etat en pédologie,
soutenue le 24 avril 1989 à l'Université de ParisVI

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

*à mes parents,
pour le soutien et la confiance qu'ils m'ont toujours accordés*

*à Coco et Camille,
pour avoir patiemment supporté mes activités d'écrivain*

SOMMAIRE

RÉSUME	3
AVANT-PROPOS	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE	9
PREMIERE PARTIE : LE CADRE DE L'ÉTUDE	15
Chapitre 1: LE CONTEXTE RÉGIONAL	19
1.1 Le climat	19
1.2 Les roches	25
1.3 Les formations superficielles et la morphologie	26
1.4 La végétation	31
1.5 L'utilisation actuelle du milieu	32
Chapitre 2: LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE	35
2.1 Les facteurs de différenciation de la couverture pédologique	35
2.2 Organisation de la couverture pédologique	37
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	47
DEUXIEME PARTIE : L'OBSERVATION ET LA CARACTÉRISATION DE LA SURFACE DES SOLS SUR LE TERRAIN	49
Chapitre 3: DESCRIPTION DE LA SURFACE DES SOLS ARIDE	53
3.1 Introduction	53
3.2 Méthode développée	58
3.3 Les surfaces de la zone étudiée	84
Chapitre 4: PROPRIÉTÉS DE LA SURFACE DES SOLS	101
4.1 Introduction	101
4.2 Comportement des surfaces sous averses simulées	103
4.3 Suivi saisonnier de l'état de la surface d'un sol de la région	119
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	130
TROISIEME PARTIE : TÉLÉDÉTECTION DE LA SURFACE DES SOLS ARIDES	133
Chapitre 5: RÉFLEXION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR LA SURFACE DES SOLS	137
5.1 Les propriétés spectrales des matériaux pédologiques	137
5.2 Etude des relations entre couleur et réflectance	149
5.3 Les propriétés spectrales des surfaces naturelles	173
5.4 Conclusion	190
Chapitre 6: CARTOGRAPHIE DES ÉTATS DE SURFACE PAR TÉLÉDÉTECTION	191
6.1 Introduction : aperçu bibliographique	191
6.2 Les mesures fournies par les satellites	195
6.3 Relations luminances-caractéristiques des surfaces	200
6.4 Traitement des données-images	226
6.5 Application à la cartographie des ressources en sols	242
6.6 Autres applications de la télédétection des états de surface	251
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE	253
CONCLUSION ET BILAN DE L'ÉTUDE	255
BIBLIOGRAPHIE	267
ANNEXES	293
LISTE DES FIGURES	309
TABLE DES MATIERES	313

ABSTRACT

This dissertation is devoted to a study concerning the surfaces of arid soils and includes: methods for describing and characterizing the surfaces in the field and in the laboratory, experimental evaluation of surfaces physical behaviour, and remote sensing of surfaces based on detailed analysis of spectral properties.

Among the works devoted to the arid zones, several of them have recently emphasized the significant role played by the soil surface in the soil water balance, in the development of natural vegetation, in the hydrological cycle, in the desertification phenomena and also in the interpretation of remote sensing data.

In order to try to make a synthesis of these different aspects, a general study of this soil-atmosphere interface has been conducted, taking the Tataouine area (Southern Tunisia) as an example. This area, and particularly its soil mantle, is studied in part one.

The concepts and the new methods developed for the characterization of soil surfaces are discussed in part two. It includes a standardized description method, the statistical study of the surfaces particule size and micromorphological observations. The main types of surface aspects which were identified in the studied area through those methods are then subjected to infiltration tests under simulated rainfall. Moreover, a follow-up observation made in an experimental station allows to specify the seasonal variations of the surface moisture content and coherence. The behaviours observed are highly linked to the type of surface condition and vary considerably from one type to the other.

The third part deals first with the surfaces spectral properties. Their relations with ground data and particularly with the colour are analysed. In this respect, three main types of terrain data were found to be prevailing: (i) the roughness reduces the general reflectance (coarse elements and shrub vegetation); (ii) the mineralogical content modifies the visible/medium infrared reflectance ratio; (iii) the Munsell colour, when converted into R,G,B coordinates, is very highly correlated to the reflectance in the wavelenghts corresponding respectively to red, green and blue.

These results are used to propose simplified models relating the radiances measured by Landsat to surface data. These models are applied to MSS and TM images to compute maps of soil surface conditions, which were used here for soil mapping. Finally, a prospective study is made about the use of these soil surface maps for hydrological modeling and desertification monitoring.

In conclusion, this study shows how it is interesting to deal with arid zones through the characterization of the soil-atmosphere interface. This interface is common to many thematical approaches and earth observation satellites provide us with an increasing amount of data about the surfaces properties.

RESUME

Ce mémoire est consacré à une étude de la surface des sols arides, qui comprend: des méthodes de description et de caractérisation sur le terrain et au laboratoire, des mesures expérimentales de comportement, et une utilisation de la télédétection basée sur l'analyse détaillée des propriétés spectrales.

Parmi les travaux consacrés aux régions arides, plusieurs ont récemment souligné le rôle important que joue la surface des sols dans le bilan hydrique des sols, dans le développement de la végétation naturelle, dans le cycle hydrologique, dans les phénomènes de désertisation et également dans l'interprétation des images spatiales.

Pour tenter une synthèse de ces différents aspects nous avons entrepris une étude globale de cet interface sol-atmosphère, en prenant l'exemple de la région de Tataouine, dans le sud de la Tunisie. Cette région et sa couverture pédologique sont présentés dans la première partie.

La deuxième partie détaille les concepts et la méthode originale mis au point pour la caractérisation des surfaces. Elle inclut une description normalisée et hiérarchisée, l'étude statistique de la granulométrie, des observations micromorphologiques. Les grands types d'état de surface reconnus dans la région étudiée par cette méthode sont ensuite soumis à des tests d'infiltrabilité sous pluies simulées. Un suivi en station d'essai permet de plus de préciser les variations saisonnières de l'humectation et de la cohésion. Les comportements observés sont très liés au type d'état de surface et varient beaucoup d'un type à l'autre.

Dans la troisième partie sont d'abord étudiées les propriétés spectrales des surfaces. Leurs relations avec les variables de terrain, en particulier la couleur Munsell, sont analysées. Trois variables sont prépondérantes: la *rugosité* (abondance des éléments grossiers et des touffes de végétation) diminue la réflectance générale. La *dominante minéralogique* modifie le rapport réflectance visible/moyen infrarouge. Convertie en coordonnées R, G, B, la *couleur Munsell* est très fortement corrélée à la réflectance dans les longueurs d'onde correspondant respectivement au rouge, au vert et au bleu. Ces résultats servent de base à des modèles simplifiés reliant les luminances mesurées par Landsat aux variables de surface. Par application de ces modèles à des images MSS et TM de la région étudiée on obtient des cartes d'état de surface, utilisées pour la cartographie des ressources en sols. Leur utilisation en modélisation hydrologique et suivi de la désertisation est enfin discutée.

Le bilan de l'étude montre l'intérêt d'aborder les milieux arides par la caractérisation de l'interface sol-atmosphère, qui est le dénominateur commun à la plupart des thématiques, et dont les propriétés sont de mieux en mieux détectées par les satellites d'observation de la Terre.

AVANT-PROPOS

Les données de terrain sur lesquelles s'appuient les résultats présentés dans cet ouvrage ont été acquises entre 1979 et 1985 au cours de recherches sur les sols du Sud tunisien, menées à l'antenne de la Direction des sols à Gabès, dans le cadre du Protocole d'Accord signé le 12.12.1971 entre le Ministère de l'Agriculture de Tunisie et l'ORSTOM.

Ce travail a pu être réalisé et mené à son terme grâce au soutien, à l'aide et aux encouragements de nombreuses personnes qu'il m'est agréable de remercier ici.

Mes remerciements s'adressent en premier aux responsables qui, par leur fonctions, ont permis la réalisation de ce programme. En Tunisie, je pense plus particulièrement à M. Ahmed SOUISSI, Directeur des sols, et à MM. COLOMBANI et LEFEVRE, successivement Chefs de la mission ORSTOM, qui m'ont accordé leur confiance et ont soutenu mes recherches. A Gabès, MM. Ahmed MAMOU et Amor MTIMET, Chefs des arrondissements DRE et DS, m'ont aidé et ont mis leurs moyens logistiques à ma disposition.

Je remercie également, MM. Alain RUELLAN, Directeur Général de l'ORSTOM jusqu'en 1986, Yves GILLON, Directeur Délégué, Chef du Département Milieux et Activité Agricole, et Mme Yveline PONCET, Responsable de l'Unité de Recherche 3J de ce même département, qui ont permis le bon déroulement de mon travail de recherche.

Au cours des expérimentations et travaux de terrain, j'ai beaucoup apprécié la collaboration amicale de Jean ASSELINE, sa technicité et son sens de l'organisation nous ont permis d'obtenir des données de terrain de qualité, dans des conditions souvent difficiles. Dans ce domaine, l'assistance de Mr. Monji Hadj BELGACEM a été aussi précieuse.

Les personnels de l'arrondissement de Gabès m'ont beaucoup aidé, je les remercie chaleureusement, en particulier les membres du laboratoire d'analyse des sols, les dessinateurs et les chauffeurs.

A l'occasion de tournées de terrain dans les steppes de la Tunisie méridionale et dans différentes régions arides, j'ai eu de fructueuses discussions avec de nombreux collègues et experts, dont MM. AUBERT, BENDALI, BEN OUEZDOU, BUSSON, CASENAVE, COQUE, CAMUS, FAUCK, FEDOROFF, FERSI, FONTES, GAZZO, HUYN VAN NHAM, JOFFRE, KHALILI, LEPRUN, MOUGENOT, RIEU, RIOU, SEBILLOTE, TELAHIGUE, VALENTIN, VIELLEFON, WILLAIME et ZANTE; je les en remercie ici.

J'ai eu la chance de pouvoir bénéficier de l'expérience des naturalistes qui ont le plus étudié les milieux arides de la Tunisie, MM. FLORET, LE FLOCH et PONTANIER. Ils m'ont donné le goût de la recherche en zone aride et je leur en suis reconnaissant. Je suis même doublement à l'égard d'Edouard LE FLOCH, qui a également bien voulu relire ce manuscrit.

De retour en France, j'ai pu approfondir mes connaissances en télédétection et en colorimétrie auprès de plusieurs spécialistes français, dont MM. B.CERVELLE, J.C.PION, Ph.REBILLARD, F.M.SCHMITT et Y.THOMAS, que je remercie pour l'accueil qu'ils m'ont réservé. La collaboration amicale avec Mlle D. COURAULT (INA-PG) a été particulièrement efficace comme en témoignent nos publications communes dans le domaine des propriétés spectrales des sols.

Mes recherches se sont poursuivies à l'Unité de télédétection du Laboratoire d'Informatique Appliquée du Centre ORSTOM de Bondy. J'y ai beaucoup apprécié l'aide d'Annick AING et Isabelle RANNOU (travaux photos), Nicole DELARBRE et Liliane ZURETTI (coordination et mise en forme du texte de cet ouvrage), Marie-Thérèse MIGUET (recherches bibliographiques), de Serge CAS (téléthèque) et de Bernard LORTIC et Mamy RAKOTO (traitement d'images).

En dehors de ce service, de nombreuses personnes du Centre de Bondy m'ont apporté leur concours, je pense particulièrement à Mme SALADIN et MM. DANARD, DAUPELOUP, DERUELLE et MEUNIER (service cartographique), Mme DRIFFORT (textes des illustrations) et MM. BERTHE et QUINET (reprographie). Je remercie tout spécialement François-Xavier HUMBEL qui a bien voulu relire ce texte.

Ces lignes sont aussi l'occasion de remercier les chercheurs et professeurs spécialistes en télédétection appliquée aux sols et/ou aux régions arides, rencontrés à l'occasion de réunions de travail ou de colloques, pour les échanges scientifiques que nous avons eus et les encouragements amicaux qu'ils m'ont prodigués: Mmes Gina CALABRESI (ESRIN, Frascati, Italie), Marie-Françoise COUREL (Imagéo, Paris) et Anne B.KAHLE (J.P.L., Pasadena, U.S.A.), Mlles Mireille DOSSO (Univ. Paris VII) et Ilona JUHASZ (ISSS/WGRS, Budapest, Hongrie); MM. Marion F. BAUMGARDNER (Purdue University, West LaFayette, Indiana, U.S.A.), Jerzy CIERNIEWSKI (Agricultural University, Poznan, Pologne), Gerrit EPEMA et Michel MULDER (Agricultural University, Wageningen, Pays-Bas), Georges FRAYSSE (EARSeL, Paris), Ray D.JACKSON (U.S.D.A., Phoenix, Arizona, U.S.A.), et Marcel RAFFY (G.S.T.S., Strasbourg).

Enfin, j'ai réservé la dernière partie de cet avant-propos pour exprimer ma reconnaissance aux personnalités scientifiques qui m'ont fait l'honneur de siéger dans le jury de cette thèse :

Monsieur Georges PEDRO, Directeur de Recherches à l'INRA, Président du jury, qui m'a encouragé à présenter ce travail à deux titres, d'une part en tant que Président de la Commission Scientifique Hydrologie-Pédologie de l'ORSTOM, et d'autre part en tant que Responsable du D.E.A national et des thèses de Pédologie ;

Monsieur Michel-Claude GIRARD, Maître de Conférences à l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, qui a été, depuis son origine, le directeur scientifique du travail présenté ici. Il n'a pas hésité à venir sur le terrain, dans des conditions parfois précaires, pour me faire bénéficier de sa grande expérience en matière de télédétection appliquée aux sols. Nous avons ensuite passé de nombreuses heures dans son bureau pour de passionnantes discussions et mises au point méthodologiques; il a bien voulu être rapporteur de ce travail qui sans lui n'aurait peut-être pas vu le jour ;

Monsieur Pierre ROGNON, Professeur à l'Université Paris VI et Directeur du Laboratoire de Géodynamique des Milieux Continentaux, dont les grandes connaissances en géomorphologie et pédologie des régions arides et sahariennes et l'intérêt pour la télédétection appliquée à ces milieux m'ont été très profitables; il a également accepté d'être le rapporteur de ce mémoire ;

Monsieur Jean CHOROWICZ, Professeur à l'Université Paris VI et Responsable du Laboratoire de Géologie Structurale et de Télédétection, spécialiste de la télédétection appliquée aux roches, notamment en régions arides; l'intérêt qu'il a porté à ce mémoire et sa participation à ce jury ont été pour moi un grand encouragement ;

Monsieur Alain PODAIRE, Ingénieur au CNES, spécialiste des méthodes physiques en télédétection, qui m'a aidé dans mes premiers pas en colorimétrie et apporté son point de vue de physicien; son intérêt pour mes recherches de naturaliste a été très motivant ;

Monseur Marcel POUGET, Directeur de Recherches à l'ORSTOM, qui a été à la fois un ami, un guide par sa grande connaissance des sols de l'Afrique du Nord et en particulier de la Tunisie, un collègue par nos travaux et nos publications en commun, et un hôte en tant que Responsable de l'Unité de télédétection du Laboratoire d'Informatique Appliquée du centre ORSTOM de Bondy.

Introduction Générale

LES OBJECTIFS

Depuis plusieurs années, l'attention de différents spécialistes des milieux arides s'est portée vers l'observation de la surface des sols. En effet, dès les premières descriptions détaillées, les régions arides ont paru caractérisées par la présence d'organisations particulières à la surface des sols, en particulier des croûtes, parfois colonisées par des algues ou des lichens.

Les agronomes, pour leur part ont souligné le rôle d'obstacle mécanique de ces croûtes qui entravent souvent la levée des jeunes plantes. Les hydrologues ont ensuite montré que l'aptitude au ruissellement de nombreux sols arides est fortement dépendante de leur surface, certains matériaux limitent la perméabilité, d'autres la favorisent.

Les phytoécologues, quant à eux, ont observé que les possibilités de développement et de régénération de la végétation des steppes semblent, pour un sol donné, affectées par le type de surface. Les pédologues ont d'autre part intégré dans leur description de profils de sol la notation de caractères de la surface qui paraissent de bons critères de diagnostic (les traces d'érosion ou de sédimentation, et d'activité biologique, par exemple).

Parallèlement, le développement de l'étude de ces milieux par télédétection a montré que si la végétation steppique est très difficile à détecter, les images semblent surtout refléter des caractères de la surface des sols. Ces diverses constatations éparses semblent indiquer que la surface des sols arides mérite une approche plus complète, qui tente de réaliser une synthèse.

C'est ce que nous nous sommes proposés de faire dans ce travail en cherchant à répondre aux questions suivantes :

- L'observation de la surface des sols peut-elle réellement nous apporter des renseignements sur les types de sol d'une région, leur fonctionnement et leurs aptitudes,
- Quelles sont, parmi les caractéristiques de la surface, celles qui ont une influence sur les mesures réalisées par les satellites, et qui seraient donc ainsi "télédétectables".

LA DÉMARCHE SUIVIE

En abordant la surface des sols sous son aspect d'interface entre la couverture pédologique et l'atmosphère, son rôle particulier dans les écosystèmes arides apparaît nettement. Dès lors, l'hypothèse de base retenue dans notre travail est qu'elle constitue un objet d'étude en soi.

La première étape de la démarche suivie est logiquement de définir les limites de cet objet d'étude et de développer les outils conceptuels et les techniques qui permettent de le caractériser le plus complètement possible.

L'inventaire des différents aspects des surfaces devra ensuite révéler les variables de caractérisation les plus importantes et les principaux types de surfaces de la région étudiée. Dans cette étape les relations avec la couverture pédologique seront aussi précisées. Les comportements de ces différents types seront ensuite testés par des expérimentations.

La recherche des caractéristiques des surfaces ayant un impact sur les données de télédétection sera basée sur l'étude des propriétés spectrales des différents constituants. Leur intégration sera tentée par modélisation de l'interaction des surfaces hétérogènes avec le rayonnement solaire. Le domaine spectral étudié sera celui des satellites à haute résolution spatiale (Landsat et Spot) qui fournissent des images de notre objet suffisamment détaillées pour envisager des applications cartographiques.

Les résultats seront enfin appliqués à des images Landsat (MSS et TM) de la région étudiée pour tester les possibilités de télédétection des états de surface et les applications qui en découlent.

PLAN DE L'EXPOSE

Ce mémoire s'articule en trois parties :

La *première partie* présente le cadre de l'étude. Ceci permet de situer son contexte des points de vue climatique, géologique, botanique et agricole (chap.1). Ensuite, l'étude des sols sur le terrain permet de dégager les grands traits de la couverture pédologique et de son évolution actuelle (chap.2).

Dans la *deuxième partie* sont détaillées la méthode de description développée et les techniques de mesure des caractéristiques des surfaces. L'application à la région étudiée permet de définir les principaux types de surfaces (chap.3). Leur comportement sous pluies simulées est ensuite testé, alors qu'une expérimentation en station permet de suivre l'évolution saisonnière (chap.4).

Dans la *troisième partie* sont étudiées les propriétés spectrales des composants des surfaces. Parmi les variables apparaissant importantes, le rôle de la couleur fera l'objet d'une étude particulière (chap.5). Les résultats sont ensuite appliqués aux images Landsat pour tenter d'établir des cartes d'état de surface. L'utilisation de ces cartes est enfin discutée (chap.6).

Première Partie

LE CADRE DE L'ETUDE

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre d'un programme d'inventaire des sols de la Tunisie. Ils se sont déroulés dans la partie aride de ce pays, située en bordure nord-est du Sahara.

Une synthèse sur les sols et la végétation de cette *Tunisie présaharienne* a été présentée récemment par FLORET et PONTANIER (1982). Elle est basée sur des travaux réalisés principalement dans le domaine situé entre les latitudes de Gabès et Médénine (voir fig. 1).

Notre zone d'étude est plus méridionale, couvrant en partie le Massif des Matmatas, le Dahar et l'Ouara, (fig. 1 et pl. 1). Les principales caractéristiques de ce milieu sont décrites dans cette première partie, et plus particulièrement celles de la couverture pédologique, moins connue que dans la zone côtière.

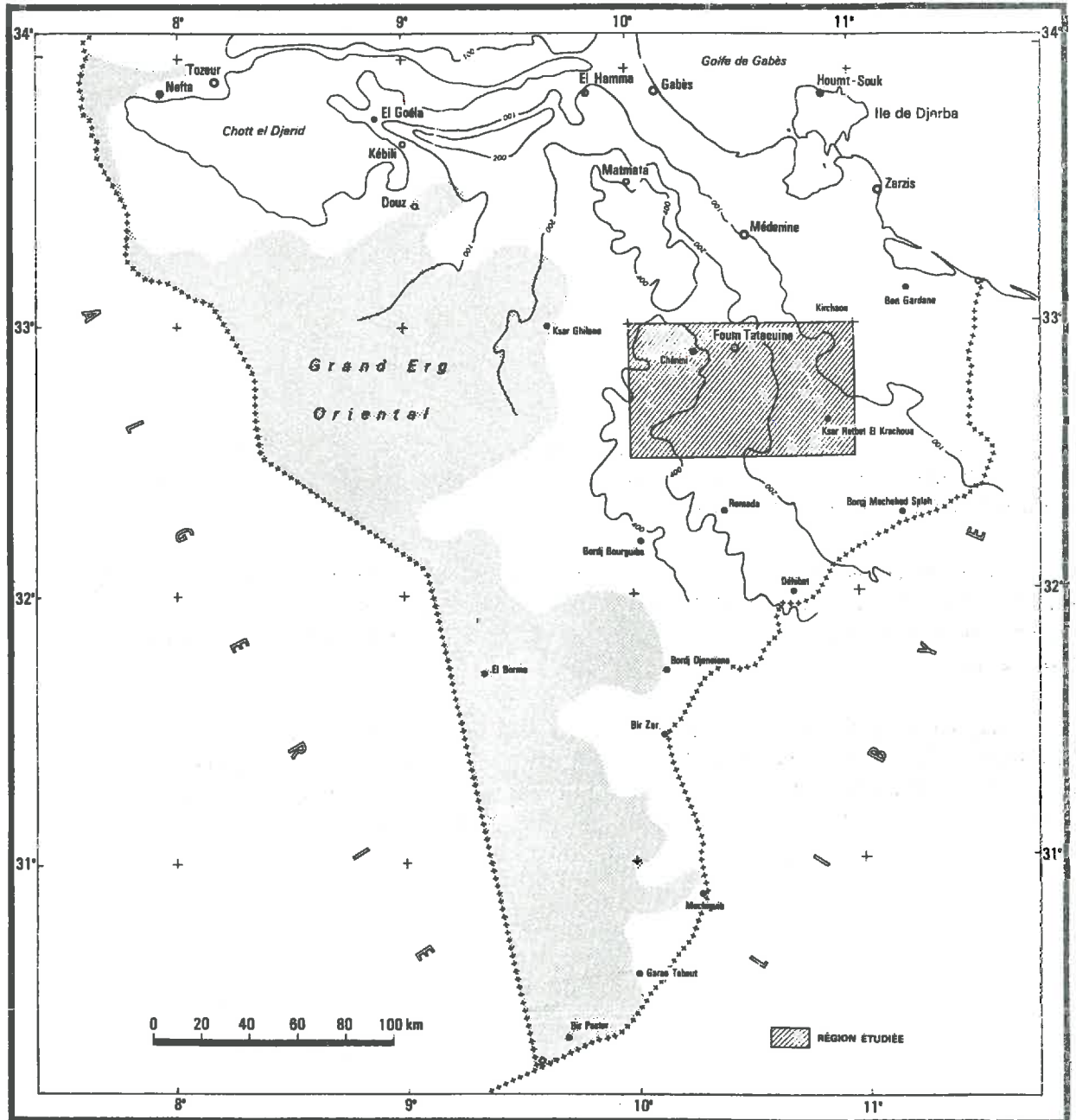


Figure 1. La Tunisie présaharienne et la situation de la zone étudiée

Chapitre 1

LE CONTEXTE RÉGIONAL

La région étudiée, centrée sur la ville de Tataouine, présente à la fois un caractère nettement aride et des milieux variés des points de vue de la lithologie, de la morphologie et de l'occupation du sol.

Elle est limitée par un rectangle de 100 km de large, compris entre les parallèles 32°25 et 33°N et les méridiens 9°50 et 10°50E, soit une superficie d'environ 6000 km². Les régions naturelles couvertes sont les suivantes (voir pl. 1) :

- au nord la plaine du Ferch et celle de Tataouine,
- au nord-est le Jebel Rehach,
- au centre la partie méridionale de la chaîne des Matmatas et la région des Ksars,
- à l'est les plateaux gypseux jusqu'à la Sebket Oum El Khrialate,
- au sud la cuvette de l'Oued Dekouk,
- à l'ouest le plateau du Dahar,
- au sud-est la plaine ensablée de l'Ouara.

1.1 LE CLIMAT

Du point de vue climatique, la Tunisie aride est soumise à deux influences opposées, celle du climat subtropical sec et chaud du Sahara, et celle du climat méditerranéen plus humide et tempéré venant du Golfe de Gabès. Dans la partie nord de la zone étudiée, la part des deux semble grossièrement équilibrée, alors que l'influence saharienne devient prédominante au sud (station de Remada).

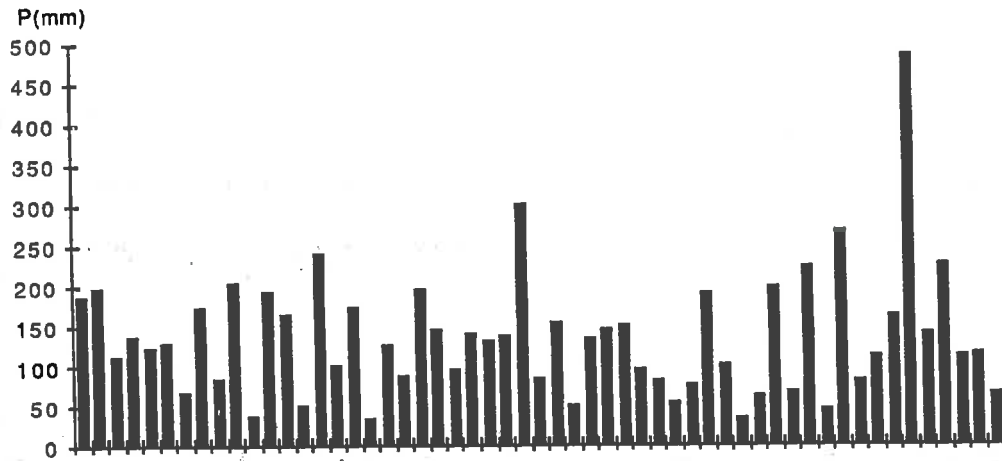


Figure 2. Variabilité interannuelle des précipitations à Tatatuine

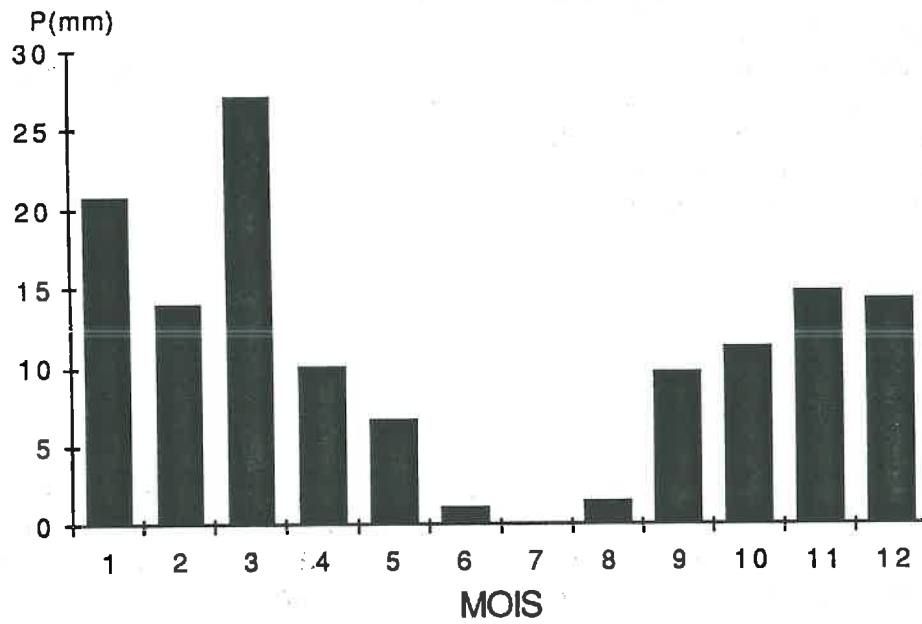


Figure 3. Précipitations moyennes mensuelles à Tatatuine

* Les moyennes interannuelles des *précipitations* à Tataouine (138 mm, 41 observations) et à Remada (88 mm, 21 observations) traduisent mal la réalité, car l'irrégularité est le trait dominant des précipitations. Ainsi, à Tataouine on a enregistré 485 mm en 1975-1976, contre seulement 34 mm, en 1950-1951 (FERSI, 1980), soit un coefficient de variabilité interannuelle supérieur à 14 (fig. 2).

La répartition des pluies semble suivre une logique saisonnière (voir fig. 3), mais en fait n'importe quel mois de l'année peut être sec; la seule saison nettement marquée est l'été, toujours très sec, en particulier le mois de juillet. Cette irrégularité se retrouve au niveau des précipitations journalières, dont le maximum enregistré est de 123 mm. Ceci signifie que la hauteur précipitée en 24 h peut parfois atteindre pratiquement la hauteur moyenne annuelle. Ce type d'évènement reste exceptionnel, avec une probabilité environ cinquantenaire, mais marque profondément le paysage à cause des fortes intensités pluviométriques qui y sont liées (FERSI, 1979).

* les *températures* sont toujours positives, très fraîches en hiver (un jour de gélée sous abri en moyenne par an) et très élevées en été, ce qui se traduit par une forte évapotranspiration potentielle (voir tableau 1). Les vents souvent violents aggravent encore la demande évaporative, particulièrement le "sirocco" vent saharien, chaud et sec. D'après les relevés, la fréquence annuelle du sirocco est de 37 jours à Tataouine; elle est certainement plus élevée à Remada, mais il n'existe pas à ce propos de données précises pour cette station.

TABLEAU 1 - TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES ET ETP À TATAOUINE ET REMADA

Station	M	mx	mn	Q	ETP ₁	ETP ₂
Tataouine	20,2	37,9	4,8	13	1085	1699
Remada	20,7	38,3	5,7	7	1119	1654

- M** : température moyenne annuelle (degrés C)
mx : moyenne des maxima du mois le plus chaud
mn : moyenne des minima du mois le plus froid
Q : quotient pluviothermique d'Emberger (EMBERGER, 1952)
ETP₁ : évapotranspiration potentielle (mm) estimée avec la formule de Thornthwaite (d'après LE HOUEROU, 1969)
ETP₂ : évapotranspiration potentielle (mm) calculée avec la formule de Riou (RIOU, 1980).

PLANCHE 1 - LES REGIONS NATURELLES DE LA ZONE ETUDIEE

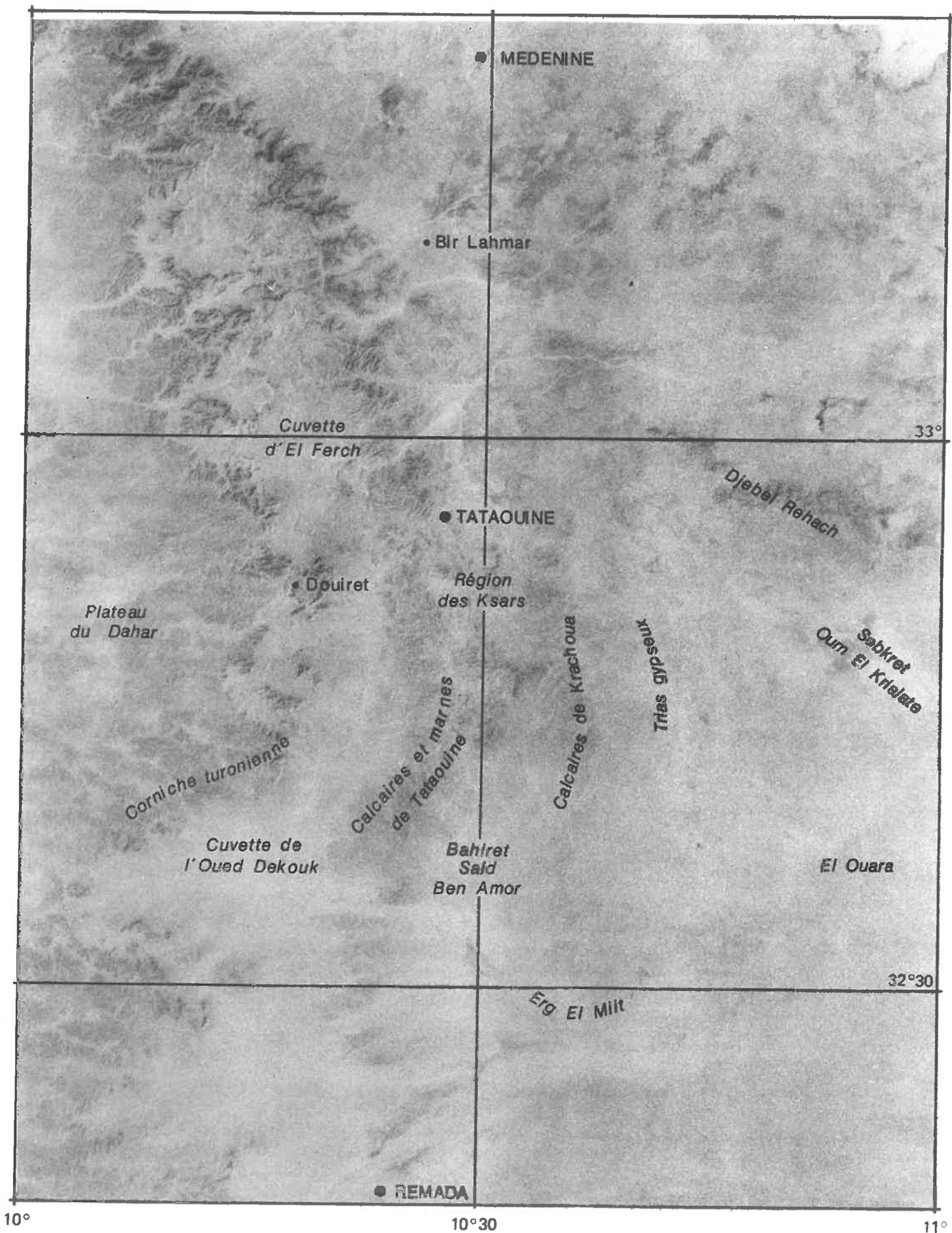
Cette image MSS Landsat du 4 avril 1981 (canal 7, orbite 205-37) reproduite à l'échelle du 1/500 000e, situe la zone étudiée comprise entre les parallèles 32°30 et 33°N.

Sa position de transition entre la Jeffara côtière (Médenine) et la région saharienne (Remada) apparaît clairement.

On remarque également le village de Bir Lahmar où a été implantée notre station expérimentale (voir chap.4).

Du nord au sud on distingue les régions naturelles suivantes :

- la cuvette d'El Ferch et la plaine alluviale de Tataouine.
- au nord-est le Jbel Rehach, reliefs gréseux.
- au centre, la partie méridionale de la chaîne des Matmatas et la région des Ksars, formées de reliefs calcaires.
- à l'est, les plateaux gypseux du lias et du trias qui s'étendent jusqu'à la Sebket Oum El Khrialate, vaste dépression salée.
- au sud, la cuvette de l'Oued Dekouk, limitée par la corniche turonienne.
- à l'ouest le plateau du Dahar et ses vallées envahies par les sables.
- au sud-est, la plaine ensablée de l'Ouara.
- au sud, l'Erg el Miit, vaste ensemble dunaire.



● MEDENINE

● Bir Lahmar

Cuvette
d'El Ferch

33°

● TATAOUINE

Djebel Rehach

Région
des Ksars

● Douiret

Plateau
du Dahar

Sabkret
Oum El Kihalate

Corniche turonienne

Calcaires et marnes
de Tazaouine

Calcaires de Krachoua
Trias gyps

Cuvette de
l'Oued Dekouk

Bahret
Saïd
Ben Amor

El Ouara

32°30'

EG El Milt

● REMADA

10°

10°30'

11°

* Le calcul du coefficient pluviothermique d'EMBERGER (1952) permet de situer la zone dans l'ensemble des *bioclimats* de la Tunisie délimités par LE HOUEROU (1959). Les valeurs du tableau 1 indiquent que Tatouine est caractérisée par un bioclimat méditerranéen aride inférieur, alors qu'à Remada il est de type méditerranéen saharien supérieur. L'influence saharienne est donc très nette.

1.2 LES ROCHES

La région étudiée se situe dans la partie médiane du dôme de la Jeffara, ensemble de formations d'âge secondaire qui s'étend jusqu'en Libye (ROBAUX et CHOUBERT, 1942; BUSSON, 1967). La structure de ce synclinal, effondré dans sa façade maritime, se traduit par une succession d'affleurements d'âge décroissant d'est en ouest et disposés en éventail.

Le paysage est dominé par les corniches et reliefs structuraux formés de roches dures. Les roches tendres ont été creusées en vallées et dépressions, occupées par des formations superficielles plus récentes. A partir des cartes géologiques et de l'observation du terrain, on peut distinguer, d'est en ouest, les grands ensembles lithologiques suivants (Pl. 1) :

- le *Jbel Rehach* est un affleurement *triasique* qui présente une cuesta gréseuse tournée vers le nord, avec un revers dolomitique en pente douce vers le sud ;
- les *formations gypseuses* du *lias* sont composées de bancs de gypse massifs, de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Elles forment un ensemble de collines disséquées, auxquelles succède vers l'est un vaste glacis d'érosion. Ce glacis est ponctué de collines alignées NE-SE, formées des intercalations de bancs calcaires. Dans ces gypses saccharoïdes on remarque des formes de dissolution de type karstique (dolines, grottes, fissures), et plusieurs dépressions salées (sebkhas).
- les *calcaires de Krachoua (Bathonien)* forment une première chaîne de montagnes nord-sud, limitant l'extension vers l'ouest des gypses.
- les *calcaires et marnes de Tataouine (Callovien et Oxfordien)* constituent une deuxième chaîne de montagnes plus imposante, séparée de la précédente par un ensemble de plaines et de vallées creusées dans les argiles et les grès.
- les *dolomies turoniennes* forment le troisième ensemble de montagnes couronnées d'une corniche massive, presque continue, très remarquable dans le paysage.

- enfin, le plateau du Dahar à l'ouest est un relief structural, formé de dolomies turoniennes et *calcaires sénoniens*, qui s'enfonce en pente douce sous les sables du Grand Erg Oriental du Sahara.

1.3 LES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET LA MORPHOLOGIE

Le modelé des paysages étudiés est typique de celui des régions sèches (TRICART et CAILLEUX, 1969). L'ossature du paysage est constituée par les *jbels*, affleurements de roches dures. Ces reliefs souvent abrupts sont ennoyés par des formations superficielles formant de vastes surfaces en pentes douces ou subhorizontales.

Ces formations attribuées au Quaternaire n'ont pas fait l'objet d'une cartographie systématique dans la zone étudiée. Les études géomorphologiques réalisées dans d'autres parties du sud de la Tunisie, les données paléoclimatologiques, les résultats d'études ponctuelles, et nos propres observations de terrain permettent néanmoins une interprétation générale de la nature et de la distribution de ces matériaux.

Les niveaux témoins des principales phases d'érosion et de façonnement des surfaces quaternaires décrites par COQUE (1962) et MENSCHING (1964) ont été retrouvées au nord de notre zone, dans la cuvette d'El Ferch, par CHAHBANI (1981).

De fait, comme dans le reste de la Tunisie et du Maghreb, l'empreinte de ces pulsations climatiques quaternaires est très nette dans le paysage et il est assez facile de distinguer, par leur étagement et leur emboîtement, des formations d'âges différents mises en place par des *processus hydriques*.

Ainsi, les piémonts des reliefs sont constitués de glacis et cônes de déjection de matériaux grossiers, peu triés. Les surfaces plus anciennes sont couvertes d'une épaisse dalle calcaire, c'est le cas des glacis des versants sud du Jbel Rehach et des montagnes de la région des Ksars (pl. 2).

Les matériaux plus fins ont été transportés plus loin formant les glacis limoneux et sableux du bassin versant de l'oued Dekouk, la Bahiret Saïd Ben Amor et les zones d'épandage dont les plus vastes s'étendent au Sud (alluvions sablo-caillouteuses de l'Ouara).

Deux dépressions semi-circulaires découpent le plateau dolomitique, la cuvette d'El Ferch au nord et celle, plus grande, de l'oued Dekouk au sud. Elles présentent le même type de distribution des matériaux, les plus grossiers sont à la

périphérie, en piémont des corniches. Dans la partie médiane s'étendent les glacis sableux et limoneux. Le centre est formé de terrasses gypseuses qui portent les traces d'une hydromorphie ancienne.

Un échantillon que nous avons prélevé au sein de ces formations dans un niveau détritique et organique de la berge de l'oued Dekouk, a été daté au laboratoire du centre ORSTOM de Bondy. La composition isotopique des carbonates de la fraction inférieure à 50 μm indique un âge *maximum* de 13240 ± 640 ans B.P. Cette donnée ponctuelle est insuffisante pour resituer précisément l'histoire de ce matériau parmi les différents épisodes pluvieux mis en évidence durant l'holocène (ROGNON, 1976, 1979, 1981; ROGNON et MISKOWSKI, 1987). En la rapprochant des paléolacs observés au Sahara (DUTIL, 1971; CALLOT, 1987) on peut néanmoins conclure que ces cuvettes ont fonctionné comme des lacs au Quaternaire récent.

La morphologie de ces paysages est également marquée par les *processus éoliens*, au moins de deux façons différentes.

Premièrement, les versants des vallées de la région des Ksars sont recouverts de matériaux carbonatés, sablo-limoneux, bien triés, connus au nord de la zone sous le nom de "limons des Matmatas". L'origine éolienne de cette formation a été récemment mise en évidence et permet d'interpréter l'importance de ces dépôts, souvent épais de plusieurs mètres, discordants sur les roches qu'ils recouvrent (COUDE-GAUSSEN et al., 1982, 1983). Ces loess péri-désertiques se retrouvent également dans les glacis et zones d'épandage des piémonts de la région des Ksars, par redistribution sous l'action de l'eau.

D'autre part, de nombreuses accumulations de sables fins éoliens sont rencontrées dans ce paysage. La plus importante est l'Erg el Miit, au sud. Les autres formes sont moins spectaculaires, mais tout aussi caractéristiques des paysages arides (FRYBERGER et GOUDIE, 1981). Les voiles sableux sont particulièrement étendus, et tous les intergrades avec les accumulations sous formes de champs de dunes sont présents: microdunes, buttes sableuses fixées par la végétation (nebkas), dunes éparses.

PLANCHE 2 - PAYSAGES DE LA REGION ETUDIEE***en haut* : La corniche turonienne.**

Cette puissante formation dolomitique forme un relief tabulaire interrompu par une cuesta qui domine la vallée d'El Itime.

Au premier plan, on remarque des cultures d'oliviers et de palmiers derrière les jessours, petits barrages empierrés.

***au centre* ; Les glacis de piémont.**

De vastes glacis s'étalent au pied du Jbel Itime, qui apparaît en arrière-plan. Entre les glacis anciens à dalle calcaire (surface pierreuse), s'insèrent des glacis plus récents, sablo-limoneux (surface labourée). La densité du couvert végétal est extrêmement faible.

***en bas* : La cuvette de l'Oued Dekouk.**

La vaste plaine qui occupe cette grande dépression circulaire est formée de glacis d'accumulation de sables. La végétation, dominée par *Arthrophytum Schmittianum*, est moins rare et sert de pâturage pour les camélidés.



1.4 LA VÉGÉTATION

La végétation spontanée actuelle est soumise à deux contraintes majeures, d'une part la rareté et l'irrégularité des précipitations, d'autre part l'exploitation par l'homme (cueillette du bois, pâturages, cultures épisodiques). L'adaptation physiologique à l'aridité se fait suivant deux stratégies :

- les *plantes annuelles* ont un cycle végétatif très court. Lors des périodes humides, en fonction du stock de graines, elles colonisent rapidement les milieux favorables. Sur les sols sableux, même peu épais, elles peuvent alors former un tapis de verdure relativement dense. Dans les mêmes conditions, les sols peu perméables ne porteront au contraire qu'une végétation très maigre.
- les *plantes pérennes* sont le plus souvent de petits buissons ligneux bas, constituant l'élément le plus stable du paysage végétal (voir pl.2). Ces végétaux prostrés exploitent un grand volume de sol avec leur racines, par contre, leur partie aérienne est peu développée et leur taux de couverture est très faible. Ils résistent à la sécheresse en limitant au maximum la transpiration entre les périodes où les réserves en eau du sol permettent leur croissance.

Dans ce contexte, les possibilités de développement de la végétation dépendent pour une grande part de la capacité des sols à absorber les eaux pluviales, les stocker et les restituer aux plantes. Les plantes réagissant en fait à l'aridité édaphique, des ensembles sols-végétation s'individualisent nettement (FLORET et PONTANIER, 1984).

Les phytoécologues ont défini plusieurs associations basées sur les plantes pérennes, avec des variantes et des faciès de dégradation (LE HOUEROU, 1969). Nous pouvons en retenir les éléments les plus marquants au niveau des unités de paysage :

Les **reliefs calcaires** du nord de la zone portent l'association à *Artemisia herba alba* et *Arthrophytum scoparium*, sous association à *Gymnocarpos decander*, avec un **faciès** à *Stipa tenacissima* (Alfa) dans les situations les moins dégradées. Sur les versants, cette association présente une variante à *Farsetia aegyptiaca*. Cette zone relativement plus arrosée présente donc des parcours assez intéressants sur les formations calcaires (taux de recouvrement de l'ordre de 5 à 15 %).

Sur l'**ensemble du Dahar**, l'influence saharienne se traduit par la présence de l'association à *Anthyllis sericea* et *Gymnocarpus decander*; elle présente un faciès à Alfa sur les hauteurs un peu moins arides. La sous association à *Helianthemum lipii* se développe à l'est, sous un bioclimat comparable, sur l'ensemble du plateau gypseux (taux de recouvrement inférieur à 10 %).

En **plaine**, sous bioclimat saharien, les grandes étendues à couverture pédologique épaisse portent l'association à *Arthrophytum schmittianum* et *Arthrophytum scoparium* (taux de recouvrement de 5 à 15 %).

Dans les **zones alluviales** les apports d'eau supplémentaires par ruissellement permettent le développement de *Retama raetam* en association avec *Traganum nudatum* et *Suaeda mollis* (avec 20 à 30 % de recouvrement).

Dans les **dépressions** fortement gypseuses et assez salées, c'est l'association à *Nitraria retusa* et *Salsola sieberi* qui prend le relais. Lorsque la salure est très forte on observe les groupements halophiles à *Salicornia arabica* (le recouvrement peut y dépasser 30 %).

Les **zones dunaires**, ne portent une végétation psammophile fixatrice à *Aristida pungens* que dans les situations les plus humides des glacis de versant du nord de la zone; dans le sud, les ergs ne présentent qu'une végétation interdunaire très éparse.

1.5 L'UTILISATION ACTUELLE DU MILIEU

La mise en valeur de cette région est basée essentiellement sur une agriculture de type traditionnel et familial :

- **l'élevage extensif** d'ovins et de caprins est de loin la spéculation la plus importante et concerne l'ensemble de la zone.

Les steppes du sud sont encore partiellement exploitées avec les techniques du semi-nomadisme, en particulier dans le Dahar et l'Ouara, où il n'existe pas de population sédentaire. Les troupeaux sont conduits à la fin de l'hiver et au début du printemps dans les zones qui ont bénéficié des pluies et qui portent donc une végétation annuelle de valeur fourragère intéressante. On y rencontre également de grands troupeaux de dromadaires auxquels sont réservés les parcours à végétation halophile, non consommée par les ovins et les caprins.

Dans la *partie nord* au contraire, les habitations et les villages sont nombreux et la population qui y vit fait parcourir moutons et chèvres à proximité du domaine familial. L'exploitation des parcours de ces montagnes et glacis n'est donc plus liée

au régime des pluies. Comparés aux parcours du sud, ils sont surpâturés, et de valeur médiocre bien qu'ils soient constitués de plantes de valeur pastorale supérieure. Cette dégradation accroît les risques de désertisation de ces milieux (FLORET et al., 1976).

- la **céréaliculture pluviale** est limitée aux sols meubles qui reçoivent des eaux de ruissellement de façon naturelle, ou par aménagement. L'orge est semé à la volée après des pluies d'automne un peu importantes. Les rendements sont très aléatoires, surtout vers le sud; mais c'est une culture extensive à faible investissement.

- la **culture d'oliviers et de palmiers** est pratiquée grâce au système des *jessours*, ouvrages en terre avec seuil empierré barrant les talwegs et les chenaux d'oueds alluvionnés. Ce système très ancien s'étend vers le nord ouest depuis la région des Ksars jusqu'à Matmata. Vers le sud de notre zone la densité des jessours diminue avec la raréfaction des précipitations, alors que les impluviums y sont de taille croissante.

Même si les surfaces concernées sont très faibles comparées aux vastes steppes, l'efficacité de ce système en termes de gestion de l'eau et des sols est incontestable. Malheureusement, il est coûteux en main d'oeuvre et laissé progressivement à l'abandon. L'érosion hydrique y fait alors des ravages avec les pertes en eau et les dangers d'inondation qui en découlent (BONVALLOT, 1980).

- les **cultures irriguées** sont restreintes à quelques jardins familiaux alimentés par des puits de surface dans la région de Tataouine et d'El Ferch. La mise en évidence d'un aquifère exploitable dans la cuvette de l'oued Dekouk pourrait permettre leur extension dans cette région (KHALLILI, 1985).

LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

De nombreuses études et cartes ont été publiées sur les sols du sud de la Tunisie et en particulier ceux de la zone côtière (BÉN AYED et al., 1966; ESCADAFAL, 1979; ESCADAFAL et MTIMET, 1982; LE HOUEROU, 1960; MTIMET, 1979, 1980; PONTANIER, 1968, 1972; PONTANIER et ZANTE, 1976; PONTANIER et VIELLEFON, 1977; POUGET, 1965, 1969).

Cependant ces études pédologiques ne s'étendent pas jusqu'à Tataouine. Seule la région du Ferch a été étudiée par FOURNET (1969). L'étude de la couverture pédologique de notre zone a donc nécessité un important travail de terrain, interprété à la lumière de ces données existantes sur les régions voisines.

2.1 LES FACTEURS DE DIFFÉRENCIATION DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

D'un point de vue global, l'indice d'aridité calculé d'après la formule de DE MARTONNE est de 4,6 pour la région étudiée, ce qui la classe dans les milieux à altération nulle, d'après PEDRO (1968, 1988).

De fait, sous le climat actuel, les précipitations sporadiques se traduisent le plus souvent par des flux d'eau intenses à la surface des sols, faibles et irréguliers en profondeur. Seuls les sols sableux infiltrent la plus grande partie des eaux pluviales. La majorité des sols sont peu humectés à cause d'une faible perméabilité superficielle. Les eaux de ruissellement sont alors entraînées vers les oueds ou vers les zones endoréiques. Les sols ne sont donc traversés par des flux hydriques importants que dans ces dernières situations.

Du fait de sa faible abondance, la végétation ne fournit que très peu de matière organique aux sols, les teneurs sont toujours inférieures à 1 %. Son influence directe sur la pédogénèse actuelle est donc négligeable. Par contre son rôle protecteur est important: elle piège les éléments fins apportés par le vent et diminue la susceptibilité des sols à l'érosion (NAHAL, 1984).

Parmi les processus d'évolution des sols reconnus dans les régions arides (BUOL, 1965; DREGNE, 1976; KOVDA et al., 1979), ceux qui se manifestent actuellement dans la région étudiée sont essentiellement :

- *le rajeunissement par érosion, ou au contraire par sédimentation hydrique ou éolienne.* Si l'érosion hydrique a fait l'objet de nombreuses mesures en Afrique du Nord (HEUSCH, 1983), l'action du vent est par contre moins bien connue. D'une façon générale, les quantités de matériaux transportés par le vent sont très importantes dans les régions arides (GOUDIE, 1978).

Dans la région étudiée, des vitesses de déflation de plusieurs centimètres par an ont été mesurées sur des sols sableux défrichés (LE HOUEROU, 1969). Inversement, au cours de l'année 1984, l'apport de poussières éoliennes au cours de trois tempêtes de sables a pu être estimé à 120 t/km^2 (ESCADAFAL, non publié). Ces poussières sahariennes actuelles sont comparables à celles qui ont formé les dépôts loessiques des Matmatas (COUDE-GAUSSEN et ROGNON, 1983).

- *la redistribution de sels solubles.* Sous l'action de la circulation de l'eau et par le jeu des dissolutions et reprécipitations, les chlorures, les sulfates et, dans une moindre mesure, les carbonates se déplacent dans les sols. Dans la plupart des sols, les flux hydriques internes sont faibles et ces phénomènes sont à courte distance.

Ils ne sont pas pour autant négligeables, car ils sont en particulier responsables du façonnement de nombreux paysages arides par les systèmes pédologiques à encroûtement calcaire (RUELLAN et al., 1977). Dans les cas extrêmes, ces redistributions de sels solubles sont très marquées dans les sols des dépressions, et très réduites pour les sols sous bioclimat saharien.

- *la steppisation,* décrite sous des climats méditerranéens moins arides (POUGET, 1980), peut être décelée ici dans certains sols sableux stabilisés. Ceux du nord de la zone présentent en effet une légère redistribution du calcaire et un début de structuration probablement liée à la maturation et la répartition de la matière organique. Ce phénomène n'est plus discernable sous bioclimat saharien, où la pédogénèse est concentrée en surface (DAN et al., 1982).

Contrastant avec cette faible intensité des processus actuels, la couverture pédologique de la région présente de nombreuses différenciations :

- *accumulations calcaires* sous formes variées, d'autant plus développées que le matériau est ancien: amas, nodules, encroûtements, croûtes et dalles. Ces accumulations sont très étendues ici comme dans tout le Maghreb aride (BOULAINÉ, 1961; RUELLAN, 1971, 1980; POUGET, 1980, 1981).
- *accumulations gypseuses* sous forme de croûtes de surface, encroûtements et amas. L'extension de ces formations est une caractéristique des sols du sud Tunisien (VIELLEFON, 1976; WATSON, 1979), particulièrement affirmée dans notre région où les affleurements de roches gypseuses sont abondants.
- *anciens horizons hydromorphes*: ces pseudogleys exondés se trouvent dans le centre des cuvettes, ils sont comparables à ceux des paléosols hydromorphes décrits dans la région de Gabès par POUGET (1965).

L'organisation interne de la couverture pédologique est donc nettement marquée par l'histoire de sa mise en place et de son évolution à travers le Quaternaire. Au contraire, les phénomènes actuels en affectent essentiellement la surface. En d'autres termes, l'organisation de la couverture pédologique dépend en premier lieu de la lithologie et de la nature des formations superficielles, elles-mêmes le plus souvent caractérisées par des formes de relief (éboulis, cônes de déjection, glacis, terrasses, dépressions fermées,...).

2.2 ORGANISATION DE LA COUVERTURE PÉDOLOGIQUE

2.2.1 Concepts utilisés

Dans cette étude d'inventaire nous nous plaçons à un niveau d'observation régional. Un premier niveau d'analyse permet de distinguer les **pédopaysages** (GIRARD, 1983), différenciés ici sur la base des grands ensembles lithologiques. Les liens étroits entre morphologie, nature des formations superficielles et organisation de la couverture pédologique observés ici sont une caractéristique des régions arides (ROGNON, 1980). Nous avons donc analysé chaque pédopaysage en suivant le concept d'unité *morpho-pédologique*, (KILIAN, 1972). Chaque unité est une portion du paysage caractérisée par une morphologie définie, un type de matériau originel, et un type de couverture pédologique associé.

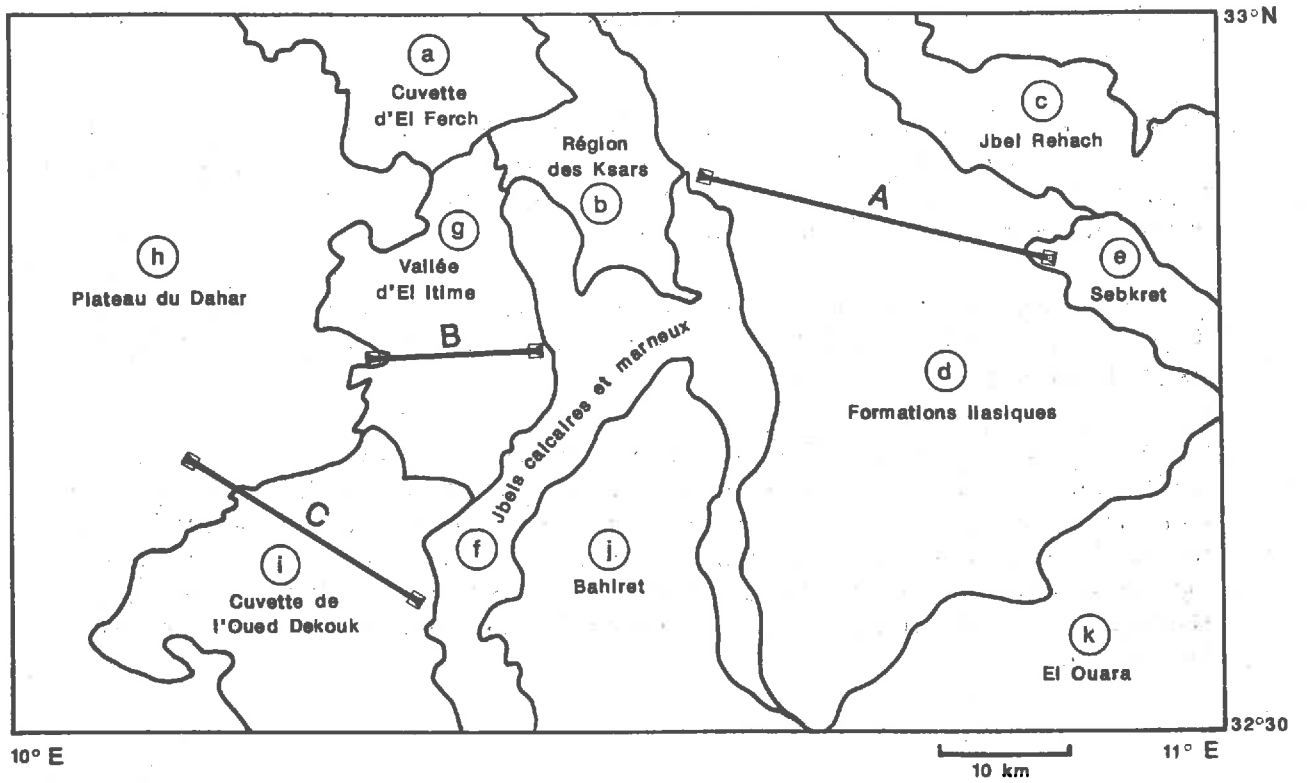


Figure 4. Carte de situation des pédopaysages de la zone étudiée

Dans chaque unité nous avons cherché à caractériser les horizons dominants et leur relations. Ces observations ont été traduites en les rattachant à des "sols-concepts" ou *taxons* (BOULAINÉ, 1980). Pour cela nous nous sommes référés à la classification française des sols utilisée en Tunisie, suivant les travaux de G.AUBERT (1962, 1965) et de la C.P.C.S. (1967).

Ce système est à la base de tout le corpus de cartes pédologiques réalisées en Tunisie. Le produit de notre travail devant s'y intégrer, nous avons choisi cette nomenclature, qui permet de situer les sols étudiés dans leur contexte pédologique.

Notre objectif est de réaliser une reconnaissance régionale des ressources en sols, nous n'étudierons donc pas ici la structure interne de ces unités ou leurs fonctionnements et transformations associés. C'est l'objet de l'analyse structurale (BOULET et al., 1982) qui se situe à un niveau d'observation beaucoup plus fin (à très grande échelle) et qui peut être considérée dans ce cas comme une étape suivante de l'étude de la couverture pédologique.

2.2.2 Prospection sur le terrain

Un premier contact sur le terrain avec l'ensemble de la zone étudiée et l'analyse des documents cartographiques disponibles a permis de reconnaître les pédopaysages suivants du nord au sud (fig. 4):

a) *la cuvette d'El Ferch*, dépression circulaire formée de glacis de colluvions calcaires convergeant vers une terrasse de sols gypseux au centre. Les sols et la morphologie en ont été étudiés par FOURNET (1968) et CHAHBANI (1981).

b) *La région des Ksars*, autour de la ville de Tataouine, caractérisée par des hauts reliefs calcaires dont les versants sont couverts de loess formant des vallées aux sols épais découpés en bad-lands et exploités par la technique des jessours. Ce paysage, qui débouche vers le nord par une plaine alluviale, est comparable à ceux étudiés par MTIMET (1984) dans la région de Matmata.

c) *Le Jbel Rehach*; ce massif gréseux et les glacis à dalle calcaire en piémont forment un paysage minéral monotone, en pente douce vers le sud, creusé de quelques vallées très étroites.

d) *Les Formations liasiques*: cette vaste étendue à l'est de Tataouine, dominée par les affleurements de roches gypseuses, est caractérisée par des sols variés: alluvions calcaires, barres carbonatées alternent avec les matériaux gypseux, les zones d'épandage sableuses, les dépressions salées, et les formations éoliennes.

e) La *Sebkhet Oum El Krialate*, grande dépression alimentée en eau saumâtre, domaine des sols engorgés et hypersalés (MAMOU, 1983).

f) Les *Jbels* calcaires et marneux du centre, reliefs disséqués qui sont le domaine des sols pierreux et érodés, sur fortes pentes.

g) La *vallée d'El Itime*, creusée entre les *Djbels* et le *Dahar*, présente un ensemble varié de glacis calcaires emboîtés.

h) Le *Plateau du Dahar*, étendue monotone de dolomies et calcaires faiblement ondulés. Les versants peu marqués sont couverts d'une dalle calcaire, et les fonds des vallées sont envahis par les sables désorganisant un réseau hydrographique qui ne fonctionne que rarement.

i) La *Cuvette de l'Oued Dekouk*, une vaste dépression circulaire présentant un large éventail de formations superficielles: éboulis et glacis de piémont, glacis anciens à dalle calcaire, glacis d'épandage récents, alluvions de différentes textures, terrasses, dépressions salées, formations éoliennes. Les sols y sont donc assez diversifiés.

j) La *Bahiret Saïd Ben Amor*, formée de glacis anciens à dalle et croûte calcaire, descendant des *djbels*. Un glacis sablo-limoneux plus récent s'insère dans cet ensemble convergeant vers le sud, où il est envahi par un erg.

k) L'*Ouara*, enfin, au sud est, zone d'alluvions sablo-caillouteuses, couverte de formations éoliennes (à voile éolien, *nebkas* et dunes).

Ces 11 pédopaysages sont d'étendue et de complexité différentes. Les trois dont les couvertures pédologiques sont les plus variées et les moins connues ont fait l'objet d'une prospection sur le terrain, à savoir les *formations liasiques* (d), la *vallée d'El Itime* (g) et la *cuvette de l'Oued Dekouk* (i).

Dans chacun des cas, les différentes unités morpho-pédologiques, reconnues par photointerprétation, ont été étudiées le long de toposéquences. Les sols ont été observés et échantillonnés dans des fosses et par sondages lors des vérifications. Les différentes hypothèses basées sur des relations entre morphologie, formations superficielles et sols, ont été testées et affinées au cours de la progression du travail selon la démarche pédologique génétique décrite par BOULAINÉ (1980, 1982).

Les descriptions de profils de sols ont été faites en suivant les recommandations du "Glossaire pour la description des sols de Tunisie et de leur Environnement", mis au point par la Direction des Sols (Ministère de l'Agriculture de Tunisie), l'ORSTOM et l'association Informatique et Biosphère (GIRARD et VIELLEFON, 1980). Un total de 177 sites a été étudié (environ autant de fosses que de sondages). Les échantillons de sols ont été analysés au Laboratoire de l'antenne régionale de la Direction des sols de Gabès (granulométrie, teneur en carbone, calcaire et gypse, conductivité; pour les méthodes utilisées voir POUGET, 1980, p.478-480).

2.2.3 Synthèse des observations

2.2.3.1 Caractères généraux des sols observés

Une étude statistique simple des observations de terrain et des données analytiques obtenues au laboratoire permet de dégager les grands traits caractéristiques des matériaux pédologiques de la zone étudiée :

- la *texture* est à dominante sableuse. Comme l'indiquent les histogrammes de la figure 5, les teneurs en argile et limons ne dépassent que rarement 50 %, alors que celles en sables fins sont le plus souvent comprises entre 45 et 65 %. Les sables grossiers sont également abondants et le taux de refus est élevé (éléments de taille supérieure à 2 mm). Ainsi, d'après le triangle de texture proposé par JAMAGNE (1967), la grande majorité des échantillons a une texture sablo-limoneuse ou sableuse. Les horizons supérieurs ont souvent une texture sensiblement plus grossière que les horizons de profondeur.
- la *structure* de ces matériaux est généralement *peu développée*, les horizons très sableux sont boullants (à l'état sec), passant à une structure massive à débit anguleux lorsque la teneur en éléments fins croît un peu. Les horizons sablo-limoneux présentent un début de structuration (polyédrique subanguleuse fine à moyenne, peu nette à nette).

Ce manque de structure est lié à la *faible teneur en argile (de 4 à 16 %)* et à la *très faible teneur en matière organique*. Celle-ci n'est jamais décelable sur le terrain et les taux mesurés au laboratoire varient de 0,1 à 0,25 %. Ceci se traduit également au niveau de la capacité d'échange, qui est faible (2 à 6 méq/100 g).

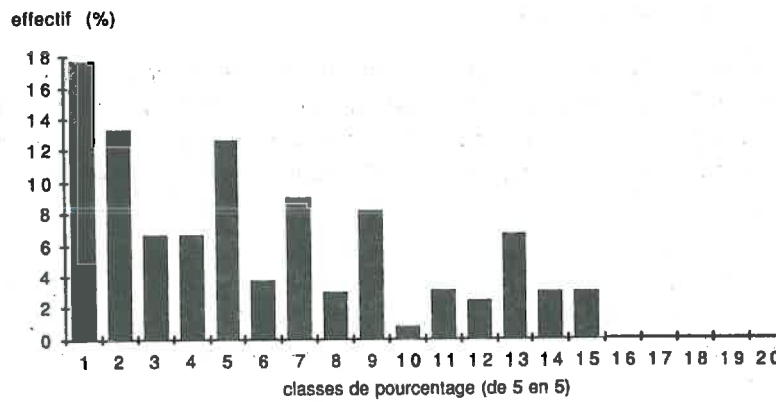
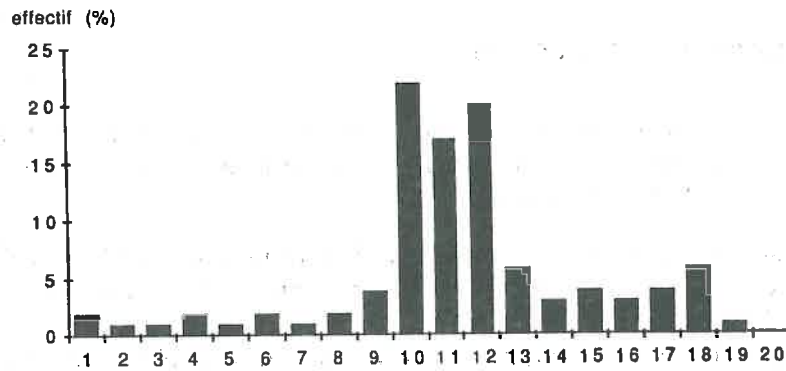
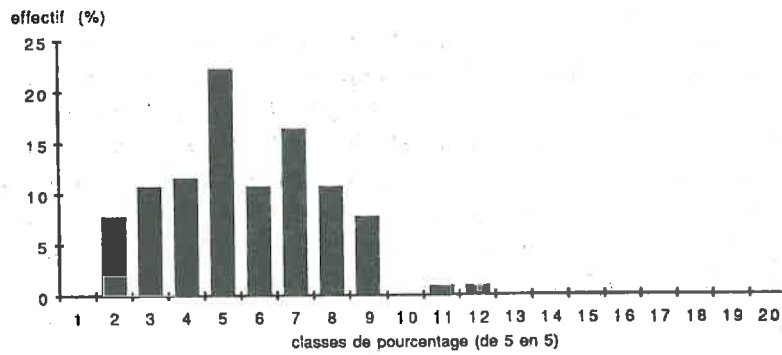


Figure 5. Histogramme des fréquences des teneurs observées dans les échantillons de sol étudiés

a) argile + limons, b) sables fins, c) refus

- parmi les autres caractères morphologiques, remarquons que la *couleur* varie assez sensiblement, elle est un bon critère de discrimination des différents horizons. La gamme des teintes Munsell observée est assez faible, essentiellement 5 et 7,5 YR, par contre la clarté et la pureté varient de 4 à 8 et de 2 à 8 respectivement (l'étude détaillée du rôle de la couleur des sols et de sa mesure est développée dans la troisième partie du mémoire).
- l'ensemble des horizons est marqué par la *présence de carbonates*, ce qui se traduit par une effervescence généralisée, forte à très forte, et un pH toujours basique, variant de 8,2 à 8,7.
- les *accumulations calcaires* et *gypseuses* sont abondantes, particulièrement dans les horizons de profondeur où nodules et amas sont fréquents. Cependant croûtes et encroûtements sont également souvent affleurants, notamment sur les pentes où l'érosion les a mis à nus.
- les *sels solubles* sont présents en quantité notable dans de nombreux sols, la conductivité électrique y dépasse 10 mS/cm au-delà de 60 cm de profondeur. Les chlorures (de sodium, principalement) constituent au moins les deux tiers des sels extraits de la solution du sol, le reste étant constitué de sulfates (de magnésium et de calcium). Dans les dépressions endoréiques, la conductivité est très élevée dans les horizons de surface (40 mS et au delà) et diminue souvent en profondeur.

Cette reconnaissance régionale a permis de proposer un schéma d'organisation de la couverture pédologique pour chacun des pédopaysages étudiés. Une présentation synthétique en est faite en suivant une coupe transversale (transect) dans chacun d'eux (lignes A,B et C de la fig. 4). Pour chaque transect, une figure illustre la distribution des "unités de sol", (unités morpho-pédologiques rattachées aux taxons de la classification française des sols).

La liste complète des unités, numérotées en suivant l'ordre de leur apparition dans la classification, est reportée en annexe 1. Les unités les plus caractéristiques de la région étudiée sont illustrées par des profils décrits en annexe 2.

2.2.3.2 les unités de sols des formations liasiques

Leur distribution est schématisée sur la fig. 6. D'ouest en est on distingue:

- les *lithosols sur roches calcaires* des djebels (unité 1), affleurements de roches fragmentées en blocs et cailloux; dans les fentes des reliques d'anciens sols et des produits de la désagrégation actuelle permettent le développement de la végétation qui y installe ses racines;

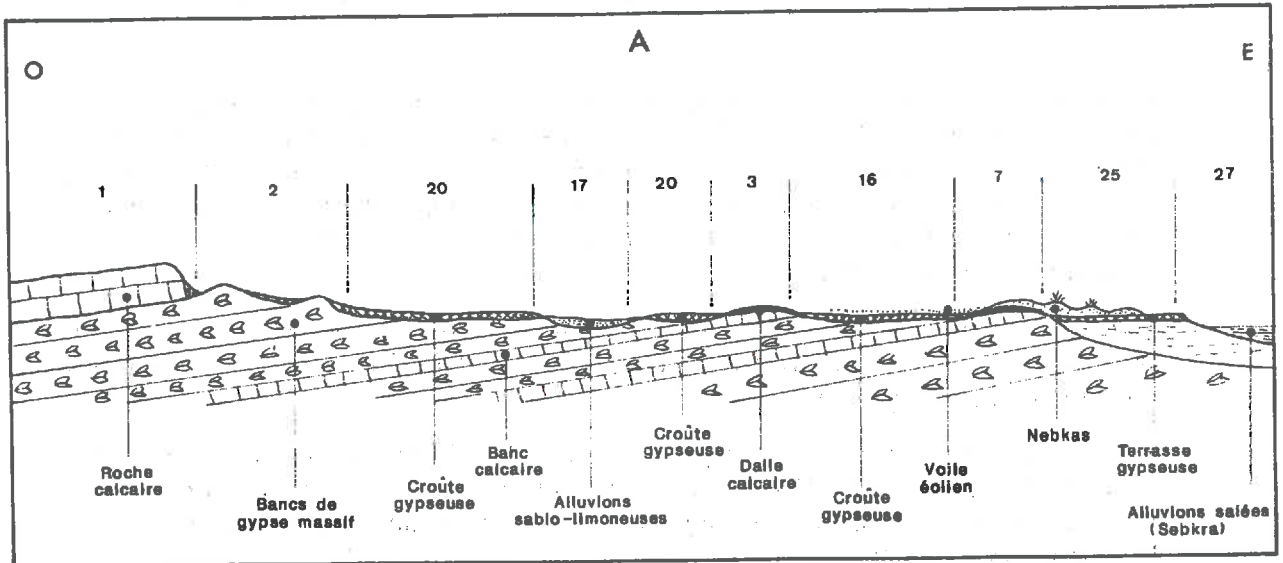


Figure 6. Coupe schématique montrant la distribution des unités de sols dans le pédopaysage des formations liasiques

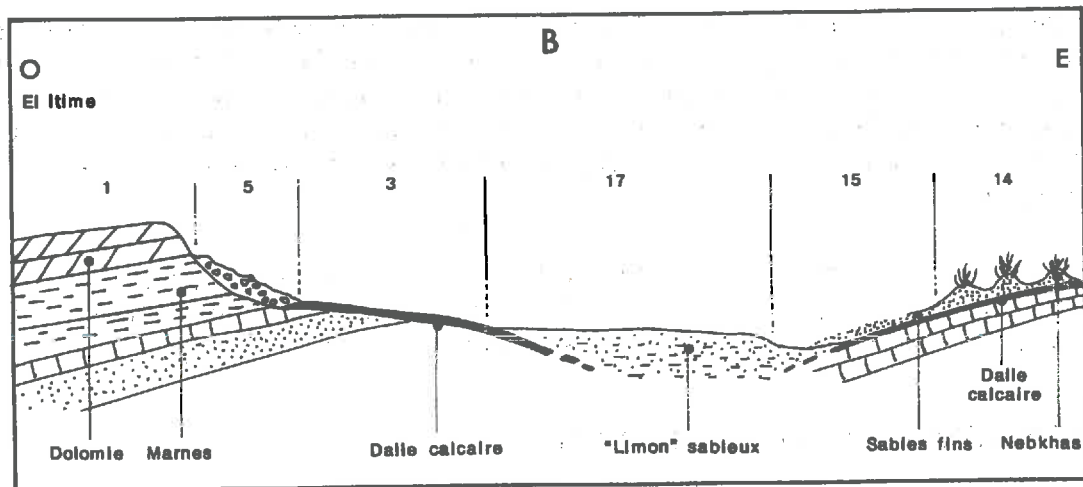


Figure 7. Coupe schématique montrant la distribution des unités de sols dans le pédopaysage de la vallée d'El Itime

- les *lithosols sur roches gypseuses* très érodées (unité 2), sur les collines disséquées au pied des reliefs;
- les sols *calcomagnésimorphes gypseux* à croûte gypseuse épaisse sur roche gypseuse altérée (unité 20), occupent le vaste glacis d'érosion qui s'étend à l'est des collines. Dans les parties basses, des sols *peu évolués d'apport alluvial* se sont développés sur les matériaux sableux des zones d'épandage (unité 17) ;
- les *lithosols sur dalle calcaire* couvrent les affleurements des barres calcaires intercalées au milieu des gypses (unité 3). En surface la dalle affleure en un reg très caillouteux ;
- plus vers l'est, ces deux derniers types de sols sont recouverts d'un voile de sable fin quartzeux (épais de 10 à 20 cm), on observe alors des sols *peu évolués d'apport éolien* sur croûte gypseuse (unité 16) et des sols *minéraux bruts d'apport éolien* sur dalle calcaire (unité 7), dans ce dernier cas il s'agit en effet de voiles sableux mobiles ;
- en bordure de la Sebkhet, sur une terrasse gypseuse recouverte d'un important dépôt de sables fixés (30 à 40 cm d'épaisseur), se développent des sols que nous avons rattachés à la *classe des sols isohumiques*, groupe des *siérozems* (unité 25), car ils présentent des traces de steppisation (voir plus haut) ;
- La Sebkhet, enfin, est le domaine des sols *halomorphes* à *structure dégradée* (unité 27).

2.2.3.3 les unités de sols de la vallée d'El Itime

De la même façon la fig. 7 illustre l'organisation des sols selon un transect en travers de cette vallée. Elle est relativement simple:

- à l'ouest, les *lithosols* (unité 1) des dolomies turoniennes surplombent les *régosols* sur marnes (unité 5);
- un grand glacis à puissante dalle calcaire érodée à reg de surface (*lithosols sur dalle calcaire*, unité 3) s'étend sur le piémont;
- les sols *peu évolués d'apport alluvial* sur matériau sablo-limoneux (unité 17) caractérisent les glacis récents emboîtés dans le précédent, qui s'étendent vers l'aval ;
- à l'est, les roches bathoniennes sont moulées par une dalle calcaire couverte par des formations éoliennes, correspondant à des *sols peu évolués d'apport éolien* (unité 15), localement fixés sous forme de nebkas par la végétation (unité 14).

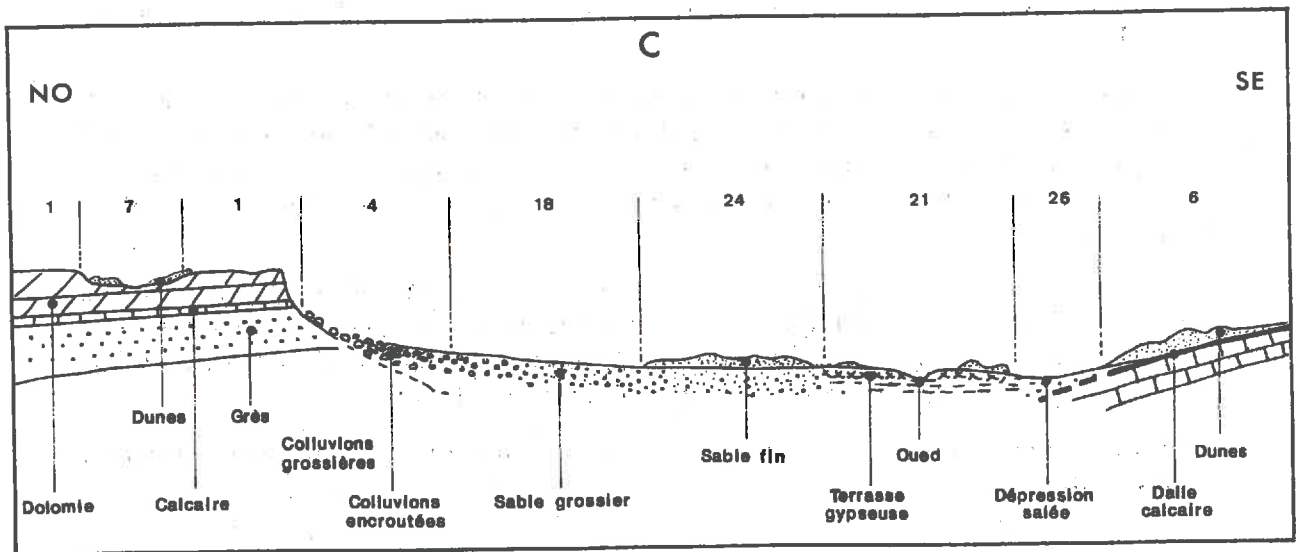


Figure 8. Coupe schématique montrant la distribution des unités de sols dans le pédopaysage de la cuvette de l'oued Dekouk

2.2.3.4 les unités de sols de la cuvette de l'Oued Dekouk

Le transect C, illustré par la fig. 8, s'étend de la bordure du Dahar jusqu'au calcaires bathoniens des jbel du centre de notre zone d'étude. Selon cette direction, il comprend:

- les *lithosols* sur dolomies turoniennes (unité 1), entaillées dans le Dahar par des vallées peu profondes envahies par les sables (*sols peu évolués d'apport éolien, à sables mobiles*, unité 7);
- en piémont de cette corniche, les sols des grès érodés cèdent la place aux *régosols sur colluvions grossières*, localement encroûtées (unité 4);
- un vaste glacis d'accumulation des produits de la désagrégation des grès porte *des sols peu évolués d'apport alluvial à sables grossiers* (unité 18), profonds et très filtrants;
- vers l'aval, les sables deviennent plus fins, enrichis en apports éoliens, ils forment des sols épais de type *siérozems*, localement encroûtés en profondeur (unité 24);
- au centre de la dépression, une terrasse gypseuse portant les traces d'une hydro-morphie ancienne (voir ci-dessus, paragraphe A), est caractérisée par des *sols calcomagnésimorphes gypseux à encroûtement* (unité 21), cette formation gypseuse est envahie par les sables et des remontées de nappes ont créé localement des petites dépressions salées (*sols halomorphes, salins*, unité 26),
- enfin à l'est, le revers des calcaires bathoniens est couvert de sables fins (*sols peu évolués d'apport éolien*, unité 7), accumulés sous forme de dunes vers le centre (unité 6).

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Les paysages de la zone étudiée sont soumis à un climat aride à tendance saharienne, qui se traduit par les caractères généraux suivants:

- un *couvert végétal très réduit* en dehors de sporadiques et courtes périodes humides,
- une *agriculture marginale*, restreinte aux zones aménageables pour la collecte des eaux pluies, la majorité de l'espace étant exploitée sous forme de *pâturages extensifs*,

- une *altération* et une *pédogénèse actuelles très limitées*, la couverture pédologique se réduit des affleurements de roches sédimentaires et de formations quaternaires qui en sont dérivées. Ainsi, les matériaux calcaires, gypseux et quartzeux (issus des grès) dominent, certains portant les traces d'une pédogénèse ancienne.

La couverture pédologique est actuellement *surtout affectée par des phénomènes de surface*: ablation, réorganisation et accumulation des matériaux pédologiques sous l'action du vent (abondance des sables éoliens) et des eaux pluviales. L'organisation de la surface des sols est ici un témoin fidèle de ces phénomènes, car elle est peu modifiée par les activités humaines.

Ainsi, dans cette région aride, *la surface des sols est une portion privilégiée de l'espace où la couverture pédologique affleure, d'où émerge la partie aérienne des végétaux et qui redistribue les principaux flux d'énergie, d'eau et de matières.*

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous allons voir comment caractériser cette partie superficielle des sols et son rôle d'interface, qui apparaît de plus en plus essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes arides.

Deuxième Partie

**L'OBSERVATION
ET LA CARACTÉRISATION
DE LA SURFACE DES SOLS
SUR LE TERRAIN**

Dans cette deuxième partie une revue des travaux publiés met en évidence le développement des études sur la surface des sols et les approches partielles des différents spécialistes. Une approche plus globale est proposée dans le chapitre 3 sous la forme d'une série de définitions et d'une méthode de description .

En application, une typologie des surfaces de la zone d'étude est établie à partir de l'analyse statistique des données de terrain. Les différents types de surface sont resitués dans le paysage, montrant les liens avec les sols et la végétation.

Dans le chapitre 4 l'influence de différents types de surface sur l'infiltration dans les sols et les possibilités de levée des plantules est évaluée par une expérimentation en station.

Ceci conduit à souligner en conclusion de cette deuxième partie le rôle très important de la surface des sols dans le fonctionnement des écosystèmes arides et l'intérêt de l'observer pour les caractériser.

DESCRIPTION DE LA SURFACE DES SOLS ARIDES

3.1 INTRODUCTION

3.1.1 Aperçu bibliographique sur l'étude de la surface des sols

La présence d'organisations particulières à la surface des sols est une caractéristique des régions arides qui a attiré l'attention des différents spécialistes de ces milieux.

Ainsi, dès 1948, FLETCHER et MARTIN signalent à la surface des sols de la région de Tucson, en Arizona, des *croûtes superficielles* de quelques millimètres d'épaisseur. Depuis, la présence de croûtes superficielles est apparue comme une caractéristique répandue dans la plupart des régions arides (ALPEROVITCH et DAN, 1973; SKUJINS, 1975; FAUCK, 1978; KOVDA et al., 1979).

Ces croûtes sont à rapprocher de celles qui se forment à la surface de certains sols cultivés par perte de structure. Ce dernier aspect agronomique a suscité de nombreux travaux sur l'impact des croûtes sur les cultures. Dès 1957, les expérimentations de HANKS et THORP ont montré que la formation de croûtes superficielles, phénomène connu sous le nom de *battance*, gêne considérablement le développement des plantules.

Depuis, les études se sont succédées pour mesurer les *propriétés mécaniques* de ces croûtes, leurs effets sur les différentes cultures (ARNT, 1960, 1965 ; FRELICH et al., 1973; HOLDER et BROWN, 1974; BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976) et les moyens pour en pallier les effets néfastes (BENNET et al., 1964; QUASHU et EVANS, 1967; PAGE, 1979).

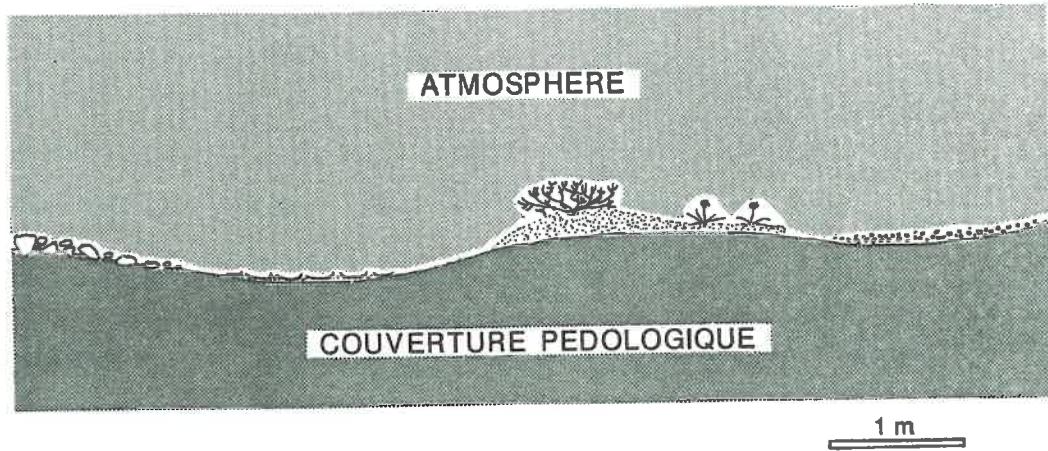


Figure 9. La notion de surface du sol en zone aride

Définie comme le volume de transition entre l'atmosphère et la couverture pédologique, la surface du sol, figurée ici en blanc, comprend aussi la végétation

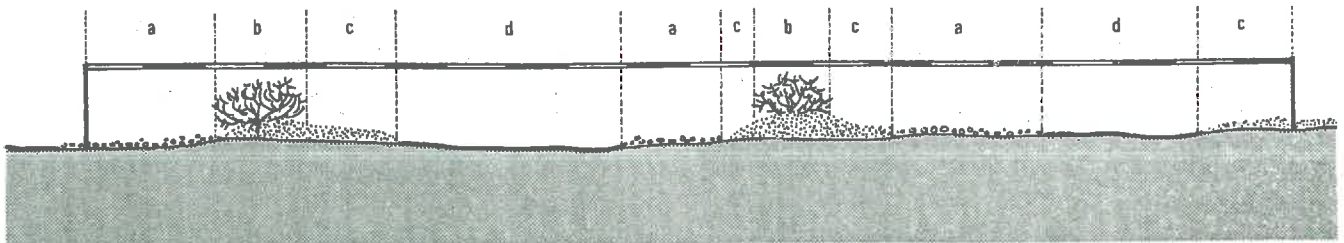


Figure 10. Principe de la mesure de l'abondance relative des ESE (états de surface élémentaires) par la méthode linéaire

Les différents ESE sont repérés par des lettres. Le long de chaque ligne, les longueurs qu'ils interceptent sont notées

Ces travaux se poursuivent actuellement, notamment en France, en relation avec l'influence de l'état hydrique du sol et des façons culturales (BOIFFIN, 1984; BOIFFIN et al., 1986).

Les hydrologues ont également étudié les crôutes de battance, montrant qu'elles ont une faible *conductivité hydraulique* et qu'elles freinent considérablement l'infiltration (RIOU, 1966; MORIN et BENYAMINI, 1977; HILLEL, 1974) et l'évaporation (BRESLER et KEMPER, 1970). Ces expérimentations en laboratoire ou en stations agronomiques ont progressivement été élargies à des essais en plein champ (FENECH et PAPY, 1977), notamment grâce aux techniques de simulation de pluies (voir chapitre 4), (LAFFORGUE et NAAH, 1976; COLLINET et VALENTIN, 1979).

C'est dans le domaine aride que l'étude des propriétés hydrodynamiques des crôutes naturelles a été particulièrement développée, en relation avec l'observation *micromorphologique* de leur organisation verticale (VALENTIN, 1985; ALBERGEL et al., 1986; ESCADAFAL et FEDOROFF, 1987).

Les crôutes sont donc apparues comme une caractéristique essentielle de la surface des sols arides, mais celle-ci comprend également bien d'autres éléments, par exemple : *des pavages de cailloux et de graviers, des placages de sable, des algues, des efflorescences salines*. Ces différents composants ont aussi un impact sur l'infiltration, le développement des plantes, la sensibilité du sol à l'érosion hydrique ou à la déflation, comme cela a été montré en particulier en Tunisie (ESCADAFAL, 1979; FLORET et PONTANIER, 1982; TELAHIGUE et al., 1987).

L'étude de l'infiltration sur les sols à surface irrégulière (labours, par exemple) a montré qu'une forte rugosité de la surface diminue considérablement le ruissellement (BURWELL et al., 1963; JOHNSON et al., 1979). Cette notion de rugosité, associée à celle de *cohésion*, est également un paramètre très important dans le calcul de la sensibilité d'un sol à la déflation (CHEPIL et WOODRUFF, 1963; SKIDMORE et al., 1970; BAGNOLD, 1973).

Notons enfin, que dès les premières recherches sur l'utilisation de la télédétection dans les zones arides, la prise en compte des caractéristiques de la surface des sols est apparue indispensable pour interpréter les images satellitaires (LONG et al., 1978).

En résumé de cette brève introduction, il apparaît que la surface des sols a intéressé et intéresse actuellement un nombre croissant de spécialistes qui chacun en étudient une ou plusieurs caractéristiques particulières. Face à cette diversité des approches nous avons cherché à adopter un point de vue plus global : **la surface des sols est abordée sous son aspect d'interface entre le sol et l'atmosphère.**

Contrairement aux régions où la végétation est abondante, cet interface est très mince dans les régions arides. Les flux d'énergie, d'eau, de solutés et de matières qui y circulent sont concentrés à la surface et en affectent la composition et l'organisation.

Cet interface n'est pas réduit à deux dimensions comme le sens mathématique l'entend, mais il a une épaisseur et c'est donc un volume. Dans cet esprit, nous proposons la *définition* suivante :

Surface du sol : Volume de transition entre l'atmosphère et la couverture pédologique.

Dans cette définition très large, la surface du sol comprend la partie superficielle de la couverture pédologique directement en contact avec l'atmosphère et dont l'organisation et/ou la composition diffèrent de celles du matériau sous-jacent; mais également les êtres vivants à la surface, algues, lichens, végétaux supérieurs et animaux (fig. 9). Dans les régions arides ces êtres vivants sont relativement peu abondants et la surface des sols est donc le plus souvent composée majoritairement de *matériaux pédologiques*.

Remarquons que cette même définition étendue à d'autres climats rejoint le concept d'*état de surface*, utilisé par BRUNEAU et KILIAN (1984) ou de *land-surface* des climatologues (BECKER et al., 1988).

Cependant, dans notre approche naturaliste, qui se veut opérationnelle sur le terrain, il s'agit d'*identifier* les composants et leur organisation, et non de les *paramétrer*. Aussi, avons nous développé une méthode de description basée sur l'*observation de la surface des sols au niveau macroscopique* et adaptée aux régions arides de la Tunisie.

3.1.2 Le problème de la description

Si les agronomes et les hydrologues se sont intéressés presque exclusivement à la mesure de la rugosité ou à la caractérisation de la battance, les naturalistes, par contre, ont prévu de décrire plus exhaustivement la surface des sols dans leurs glossaires et leurs fiches de relevé de terrain.

Ainsi les pédologues, lui consacrent en général une rubrique spéciale dans l'étude de l'environnement du profil décrit. La surface n'est pas alors considérée comme partie intégrante du sol mais comme un élément de diagnostic des conditions de milieu (MAGNIEN, 1969 et 1980; INFORMATIQUE ET BIOSPHERE, 1971; AUBERT et GIRARD, 1978; GIRARD, VIELLEFON et coll., 1980).

De la même façon les phytoécologues placent la surface du sol parmi les caractères externes du "substrat de la végétation", c'est-à-dire du sol (GODRON et al., 1968).

D'une façon générale, trois grandes rubriques sont prévues dans ces relevés :

- *indication du recouvrement des différents constituants.* Elle se résume à l'estimation de la pierrosité de surface dans les relevés pédologiques, qui précisent bien, par contre, la nature, la taille et le type de distribution de ces éléments grossiers (en poches, en placages, en affleurement, ...). Plus globalement, les phytoécologues mesurent ou évaluent le recouvrement des roches dures et blocs, des pierrailles (graviers et cailloux), de la terre fine (dont le sol nu), de la base de la végétation et de la litière (en précisant sa nature).

- *description sommaire du microrelief.* Elle est surtout qualitative, basée sur un ensemble de termes en décrivant la forme: plan, convexe, bosselé, en billons, en polygones,...(GODRON et al., 1968; INFORMATIQUE ET BIOSPHERE, 1971). MAGNIEN (1980) recommande cependant de noter les dimensions des ondulations, des réseaux de fentes et des effondrements. La description de certains accidents de la surface, plus modestes et plus spécifiques des régions arides, est prévue dans le glossaire pour le description des sols de Tunisie, comme les efflorescences salines, la battance, les accumulations de sables, les traces de pléinement,... (GIRARD, VIELLEFON et coll., 1980).

- *érosion.* C'est un critère majeur de la caractérisation de l'environnement d'un sol aride et ses manifestations sont notées dans une rubrique spécifique. Elle se limite parfois à un simple diagnostic sur le type d'érosion dominant. Dans tous les cas, sont distingués érosion hydrique et éolienne, ablation ou dépôt.

Finalement, que l'on suive les recommandations des pédologues ou celles des phytoécologues, on n'obtient qu'une description assez fragmentaire et qualitative de la surface. Ces approches ne rendent pas compte de l'organisation des différents constituants et de leur disposition relative. Certains de ces constituants sont mieux observés que d'autres et la description est perturbée par des interprétations. Par exemple, "érosion hydrique forte" n'est pas une description de l'aspect de la surface, mais une interprétation par le thématicien. En d'autres termes, la description n'est pas toujours objective, ni exhaustive.

3.2 MÉTHODE DÉVELOPPÉE

Le but que nous nous sommes assigné dans ce travail est de caractériser la surface des sols globalement, sous son aspect d'interface sol-atmosphère.

La méthode de description que nous avons développée tente de répondre à cet objectif par une démarche hiérarchisée, mise au point au cours de recherches menées en Tunisie présaharienne depuis 1981 (ESCADAFAL, 1981a et 1981b). Nous en exposerons les principes de base, conçus pour être applicables à d'autres milieux arides, en les illustrant par un exemple pris dans notre zone d'étude.

3.2.1 Définitions : état de surface et ESE

La caractérisation de la surface des sols par observation sur le terrain est limitée dans le temps et dans l'espace. Nous utiliserons donc la terminologie suivante :

état de surface : composition et organisation de la surface du sol à un instant donné.

Au niveau macroscopique, et a fortiori microscopique, un état de surface est nécessairement caractérisé suivant des sites d'observations.

Les surfaces des sols des régions arides sont souvent hétérogènes et composées de différentes plages, qui se distinguent à l'oeil nu par leur composition, leur couleur, leur granulométrie, leur microrelief, leur structure. L'étude d'un site doit pouvoir rendre compte de cette organisation de la surface en décrivant les états de surfaces élémentaires qui la composent (planche 3) .

état de surface élémentaire (ESE) : plage d'un état de surface qui peut être individualisée et caractérisée au niveau macroscopique.

Exemples d'ESE : épandage de gravillons quartzeux, sol nu à pellicule superficielle, butte sableuse, microdépression à croûte en écailles, touffe de végétation pérenne, voile sableux à plantes annuelles.

Remarquons que dans le cas le plus simple, un état de surface peut n'être composé que d'un seul ESE.

Cette partition d'un état de surface en ESE, que nous avons proposée dès 1981 (ESCADAFAL, 1981a et b), revient à aborder une surface hétérogène comme un assemblage d'éléments plus simples. Dans cette démarche hiérarchisée les ESE sont donc caractérisés individuellement. Leur mode d'association, défini par leur abondance et leur disposition relatives, caractérise un état de surface.

3.2.2 Mise en oeuvre

La méthode développée a pour but de rendre compte de la composition et de l'organisation la surface des sols d'une région donnée. Elle doit donc être basée sur la recherche d'une certaine représentativité des observations; il ne s'agit pas de décrire seulement une parcelle expérimentale.

3.2.2.1 Echantillonnage

Comme dans toute étude du milieu naturel, il n'est pas envisageable de faire une caractérisation exhaustive de toute la superficie à étudier. La description des états de surface s'effectue donc selon un plan d'échantillonnage.

Ce travail de terrain est précédé d'une stratification du paysage, basée sur l'interprétation des documents disponibles (photographies aériennes, données satellitaires, cartes topographiques et thématiques disponibles, et en particulier la carte pédologique, bien entendu) et sur les reconnaissances de terrain. Elle permet de délimiter un certain nombre d'unités et de formuler des hypothèses sur les types de surfaces qu'elles contiennent.

Dans chacune de ces unités la surface des sols est alors observée dans différents sites sur le terrain. La localisation des sites est fonction des hypothèses à tester, leur nombre dépend de la précision recherchée et de la variabilité du milieu. Contrairement au cas des sols que l'on ne peut observer que ponctuellement dans les tranchées, fosses et sondages, le choix des sites est facilité dans le cas des surfaces par le fait qu'elles sont directement observables.

Sur chaque site d'observation, la première étape du travail consiste à faire l'inventaire des ESE. La taille de la portion de surface observée dans chaque site est choisie de façon à ce que tous les ESE reconnus y soient représentés. Dans notre zone d'étude cela correspond à des portions de surface de quelques centaines de mètres carrés, au maximum. Dans le cas d'un état de surface composé d'un seul ESE, quelques mètres carrés suffisent pour le décrire en un site.

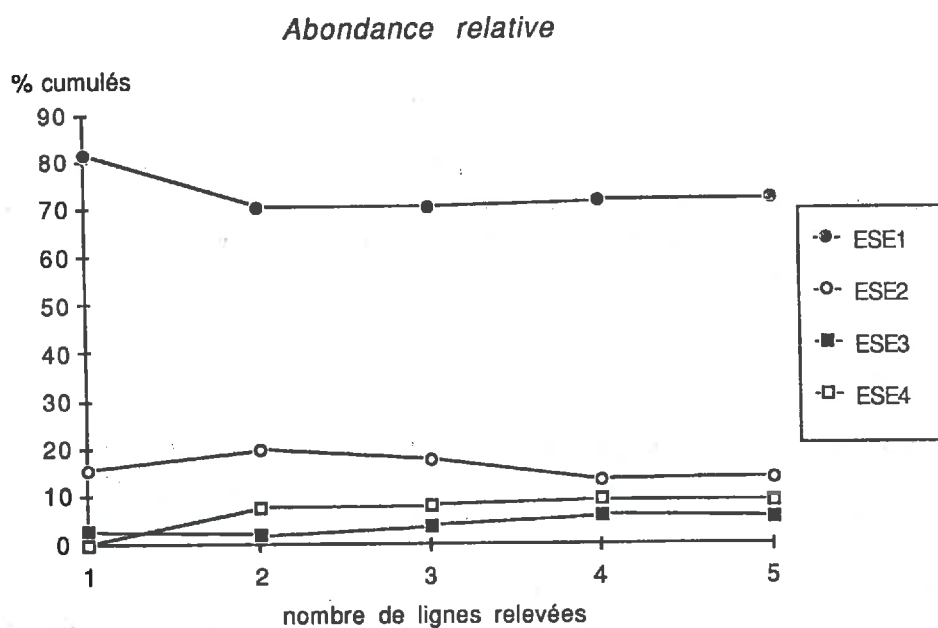


Figure 11. Evolution de l'abondance relative des ESE en fonction du nombre de lignes de 20 m relevées (valeurs cumulées).

Dans l'exemple illustré les proportions relatives des 4 ESE se stabilisent après 5 lignes relevées suivant la méthode linéaire (voir fig. 10).

Données utilisées : relevé SAD 8 (ci-dessous).

	ligne1	%cumulé	ligne2	%cumulé	ligne3	%cumulé	ligne4	%cumulé	ligne5	%cumulé
ESE1	81,70	81,70	59,20	70,45	70,50	70,47	75,40	71,70	73,00	71,96
ESE2	15,60	15,60	24,10	19,85	3,10	17,60	0,00	13,20	5,60	13,68
ESE3	2,70	2,70	1,10	1,90	7,70	3,83	11,80	5,83	3,30	5,32
ESE4	0,00	0,00	15,60	7,80	8,70	8,10	12,80	9,28	8,10	9,04

La représentativité de cet échantillon peut être estimée visuellement dans les cas les plus simples, en circulant sur le terrain autour du site observé. Dans les situations plus complexes une approche statistique de l'échantillonnage est nécessaire (GIRARD, 1983).

Dans cet ordre d'idées, nous avons utilisé une technique dérivée de la méthode des lignes-intercept utilisée en phytoécologie (LONG, 1958). Elle s'est révélée particulièrement bien adaptée au milieu étudié, où les ESE sont peu nombreux dans chaque site (3 ou 4 au maximum) et distribués en plages assez étendues (planche 3, p. 65).

La surface est observée le long de lignes de 20 m, matérialisées par un double décimètre à ruban, tendu sur le sol. Une ligne recoupe les différents ESE suivant une succession d'intervalles dont la longueur est notée en centimètres sur une fiche de relevé (fig. 10). La somme des intervalles où un ESE donné a été intercepté est une mesure de son abondance le long de la ligne. Les mesures sont répétées suivant des lignes de positions et de directions tirées au hasard. En suivant l'évolution du nombre d'ESE rencontrés et de leur abondance relative en fonction du nombre de lignes relevées, on constate généralement une stabilisation de ces variables (fig. 11). Le relevé est alors considéré comme représentatif du site étudié. Suivant le nombre d'ESE, cette stabilisation est observée entre 3 et 10 lignes. Lorsque ce nombre est nettement plus élevé, cela signifie que le site étudié est dans une zone de transition entre des états de surface différents.

3.2.2.2 Distribution relative des Etats de Surface Elémentaires (ESE)

Lorsqu'il y a plusieurs ESE sur une même site, hormis la méthode décrite ci-dessus pour en apprécier l'abondance relative, une esquisse cartographique permet d'en préciser la morphologie et la distribution. Les buttes, dépressions, sillons, axes de drainages, touffes de végétation sont positionnés sur un croquis à l'échelle.

Des photographies en couleurs complètent utilement cette esquisse cartographique. Les plus intéressantes sont celles qui procurent une vue d'ensemble de tout l'échantillon de surface décrit, elles permettent de mieux en cerner l'organisation.

A cet effet, nous avons développé différentes techniques de prise de vue en visée nadirale qui produisent des photographies de la surface sans déformations géométriques importantes. Elles peuvent être utilisées pour le planimétrage des superficies des différents ESE, ou analysées plus complètement par traitement d'image après numérisation.

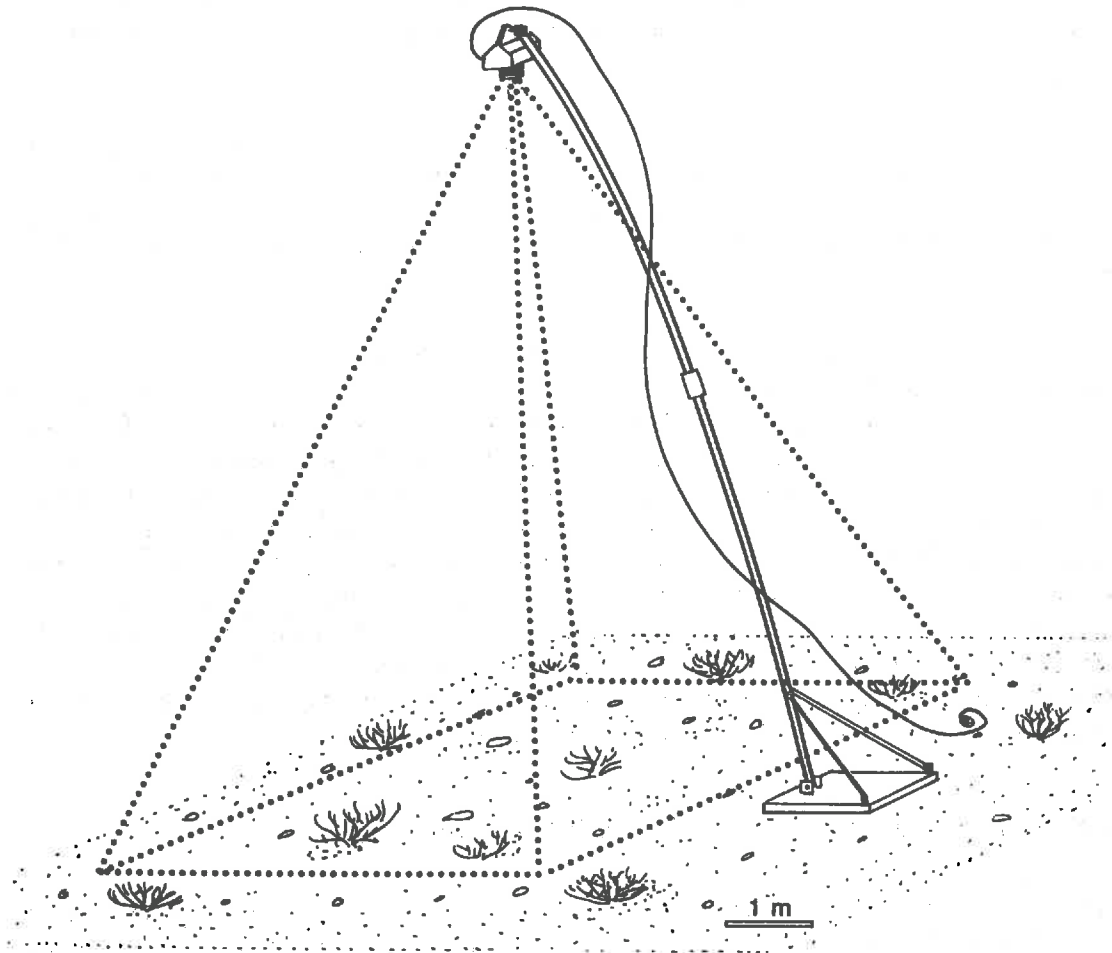


Figure 12. *Dispositif de photographie d'échantillons de surface en visée nadirale*

Les photographies des planches 3 et 6 ont été prises par l'auteur avec ce dispositif qui permet d'obtenir des photographies sans déformations importantes (planimétrables) couvrant un champ d'environ 4x7 m.

Un premier dispositif est constitué d'une perche de 9 m environ, fixée sur un socle maintenu au sol, qui s'élève au dessus de la surface à photographier (fig. 12). Une petite nacelle est suspendue par un cardan à l'extrémité supérieure de la perche. Cette nacelle contient un appareil photographique de format 24x36 mm, placé horizontalement et qui s'oriente verticalement sous l'effet de son poids. Cet appareil muni d'un moteur et d'un déclencheur à distance couvre un champ d'environ 7x5 m avec un objectif de 40 mm de focale (les photographies d'échantillons de surface reproduites sur les planches 3 et 6 ont été prises par l'auteur avec ce dispositif).

Pour pouvoir couvrir un champ plus vaste, un deuxième dispositif a été développé. Il est basé sur l'utilisation d'un cerf-volant dont la voilure autostabilisatrice a été spécialement conçue pour la prise de vue photographique. L'appareil photo équipé d'un moteur et d'une radiocommande est fixé sur l'armature et pointe vers le nadir. Cet engin économique très facile à transporter, mis en oeuvre par deux personnes, est bien adapté aux régions arides, souvent ventées et aux espaces dégagés. La planche 4 (p. 68) montre un exemple de surface photographiée avec ce dispositif.

3.2.2.3 Description des ESE

Chacun des différents ESE, dont la mesure des proportions et l'étude de la disposition ont été réalisés dans l'étape précédente, est ensuite décrit en passant en revue toutes les variables pédologiques et biologiques pertinentes. Pour les définir, le vocabulaire normalisé proposé par les différents glossaires de description des sols et de l'environnement a été utilisé (GODRON et al., 1968; ORSTOM, 1969; ACCT, 1978; AUBERT et GIRARD, 1978; GIRARD, VIELLEFON et coll., 1980).

Une fiche de description établie sous forme d'un bordereau de saisie et reprenant toutes ces variables a été mise au point pour la Tunisie présaharienne (ESCADAFAL, 1981b). Les rubriques retenues dans notre zone d'étude :

- **Surface relative** : pourcentage de la superficie de l'échantillon occupé par l'ESE considéré ;
- **Horizon affleurant** : partie supérieure des horizons du sol à l'affleurement. La couleur, la texture, l'effervescence et la nature, la taille et l'abondance des éléments grossiers et figurés y sont notés ;

PLANCHE 3 - EXEMPLE D'ETAT DE SURFACE

(photographié en visée nadirale)

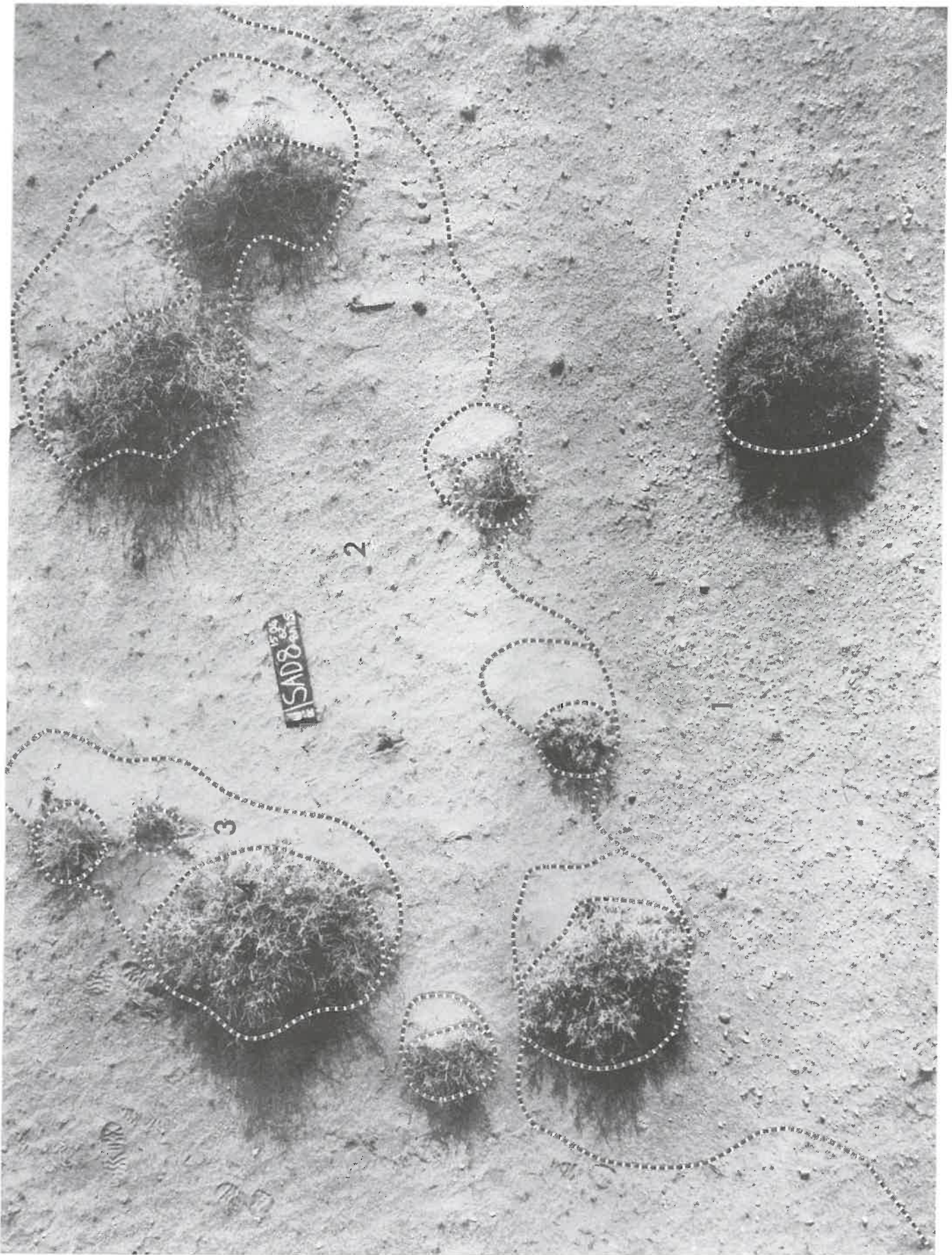
Echantillon de surface photographié avec le dispositif de prise de vues décrit figure 12. La règle portant les références a une longueur de 50 cm.

L'échantillon photographié (réf. SAD 8) est situé dans la cuvette de l'Oued Dekouk, dans l'unité pédologique n° 18.

Les traits pointillés matérialisent les limites des différents **Etats de Surface Elémentaires (ESE)**.

On distingue ainsi :

- 1) **ESEsg** : état de surface élémentaire à sables grossiers dominants et petits graviers,
- 2) **ESEs** : état de surface élémentaire à sables fins et grossiers,
- 3) **ESEsf** : état de surface élémentaire à sables fins éoliens (déposés au pied des touffes de végétation),
- 4) **ESEvg** : état de surface élémentaire de type végétation, touffes d'*Arthrophytum Schmittianum* sur sable fin éolien.



• **Recouvrement** : la partie supérieure de la couverture pédologique est souvent recouverte par des dépôts discontinus de différents éléments (sables, graviers, cailloux, par exemple). On note, l'épaisseur et l'abondance de ces éléments, puis leur *couleur*, leur nature, leur taille. Pour les éléments grossiers, la forme, le degré d'altération ou de patine sont des variables importantes. De même le type de contact entre ces éléments et le sol (enchâssement, présence de vésicules) ;

• **Végétaux** : le recouvrement des algues, mousses, lichens et végétaux supérieurs est noté, ainsi que leur état phénologique. Pour les végétaux supérieurs, le nom d'espèce et les dimensions sont également notés ;

• **Matières organiques** : l'abondance des différents éléments suivants est indiquée ainsi que leur degré de liaison avec les éléments minéraux :

- *litière*, éléments végétaux morts fragmentés, jonchant le sol (l'état de décomposition est précisé),

- *matières organiques d'origine animale*, déjection d'animaux sauvages ou domestiques, cadavres d'animaux (insectes principalement) ;

• **Activités biologiques** : nature et abondance des traces telles que fourmillières, terriers, etc...

• **Efflorescences** : *couleur*, nature, forme et abondance des éventuels dépôts de sels ;

• **Microrelief** : ici est précisé le microrelief propre de l'ESE décrit en notant sa forme (butte, dépression, chenal) et ses dimensions;

• **Organisation superficielle** : dans cette rubrique sont décrites les organisations particulières qui peuvent apparaître à la surface :

- pores et fentes, dimension et densité,

- pellicules et croûtes, litages, vésicules,

- "nanorelief" (ESCADAFAL, 1981a): abondance et amplitude des accidents de la surface dont la taille s'exprime en millimètres (piquetages, stries, ondulations,)

La *couleur* est une variable fréquemment relevée. C'est en effet un critère de détermination sur le terrain largement utilisé en pédologie. Suivant la norme rappelée dans les glossaires et manuels de prospection sur le terrain, la couleur est notée par comparaison avec les planches de l'atlas Munsell des couleurs de sol (MUNSELL COLOR COMPANY, 1971). Cette méthode est fiable si l'on s'entoure des précautions recommandées par les colorimétristes, rappelées par MELVILLE et ATKINSON (1985).

La mesure et le rôle de la couleur, en relation avec la composition des sols et surtout avec leurs propriétés spectrales, sont des aspects qui se sont révélés très importants au

**PLANCHE 4 - ECHANTILLON DE SURFACE PHOTOGRAPHIE
A BASSE ALTITUDE**

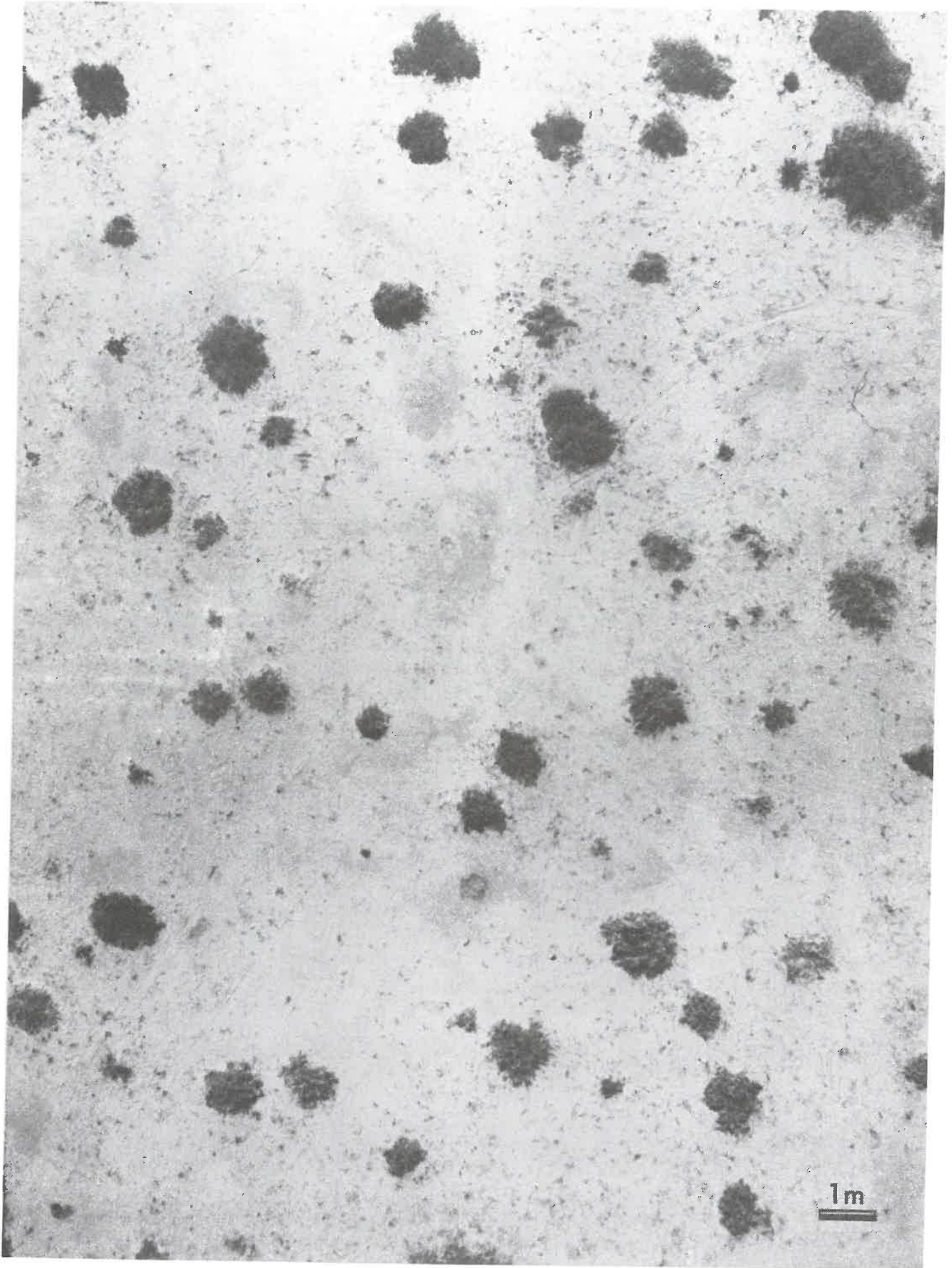
Différents dispositifs permettent de photographier des échantillons de surface à basse altitude. Le plus évident est la prise de vue depuis un petit avion de tourisme. Cette technique a été développée pour l'étude de la végétation en Arizona (WARREN et DUNFORD, 1986).

Ici, nous avons utilisé un système autonome et facile à mettre en oeuvre en zone découverte: un cerf-volant orientable, à voilure autostabilisatrice, conçu pour la prise de vue.

La zone photographiée est située sur un glaciaire sableux, à proximité du site SAD 8 (décrit sur la planche 3).

Ce milieu porte une végétation pérenne relativement abondante (voir pl.2, photo 3). Mais la visée nadirale fait bien apparaître son taux de recouvrement réel qui reste malgré tout très modeste.

Ce type de photographie donne une vision du milieu étudié compatible avec celle des mesures faites par les capteurs des satellites. Ainsi, à titre d'exemple, le champ de visée instantané du Thematic Mapper de Landsat est de 30x30 m .



cours de notre étude. Ils sont développés en détail dans la troisième partie de ce mémoire.

Exemple de description d'un état de surface

Dans le cas de l'état de surface observé sur le site SAD8 (voir planche 3) quatre ESE ont été distingués :

- **ESE 1.** occupe 72 % de l'état de surface. Recouvrement de 3 à 5 mm d'épaisseur, à sables grossiers dominants et petits graviers, sec, couleur Munsell 7,5 YR 6/6, structure particulaire, quelques vésicules à la base. 2 % de débris végétaux secs. Microrelief à ondulations centimétriques, de type "ripple-marks".
- **ESE2.** Occupe 14 % de l'état de surface. Horizon affleurant à sables fins et sables grossiers et rares cailloux (1 %), sec, couleur Munsell 5 YR 6/6, structure massive fragile, fine pellicule superficielle (moins de 1 mm). Quelques débris végétaux.
- **ESE 3.** Occupe 6 % de l'état de surface. Recouvrement de 2 à 5 cm d'épaisseur, à sables fins, sec, couleur Munsell 7,5 YR 6/8, structure particulaire bouillante. 5 % débris végétaux. Microrelief en buttes à flèches orientées vers l'est, entourant les touffes de végétation.
- **ESE 4.** Occupe 8 % de l'état de surface. Recouvrement de 5 à 10 cm d'épaisseur, à sables fins, sec, couleur Munsell 7,5 YR 6/8, structure particulaire bouillante. Végétation : touffe hémisphérique d'*Arthrophytum schmittianum* de 50cm de hauteur en moyenne. 10 % débris végétaux, galeries d'insectes. Microrelief : centre des buttes (voir ESE précédent).

3.2.3 Composition de la surface du sol

La composition des différents ESE est précisée par des déterminations au laboratoire sur des échantillons prélevés sur le terrain. La panoplie des analyses classiques en pédologie est applicable : granulométrie, dosage des carbonates, des sulfates, du gypse, du fer, du carbone et autres éléments; mesure du pH, de la conductivité électrique, etc. (BONNEAU et SOUCHIER, 1979) .

Suivant que l'on veut préciser des différenciations ou au contraire obtenir une valeur globale, la stratégie d'échantillonnage sera différente. En cela, la caractérisation analytique des matériaux de surface ne diffère pas de celle des horizons plus profonds des sols.

Par contre, l'expression des résultats doit tenir compte de la spécificité de l'organisation des surfaces. Nous avons détaillé cet aspect dans le cas de l'expression des résultats de la mesure des tailles des éléments minéraux présents à la surface du sol, ou *granulométrie* prise au sens large.

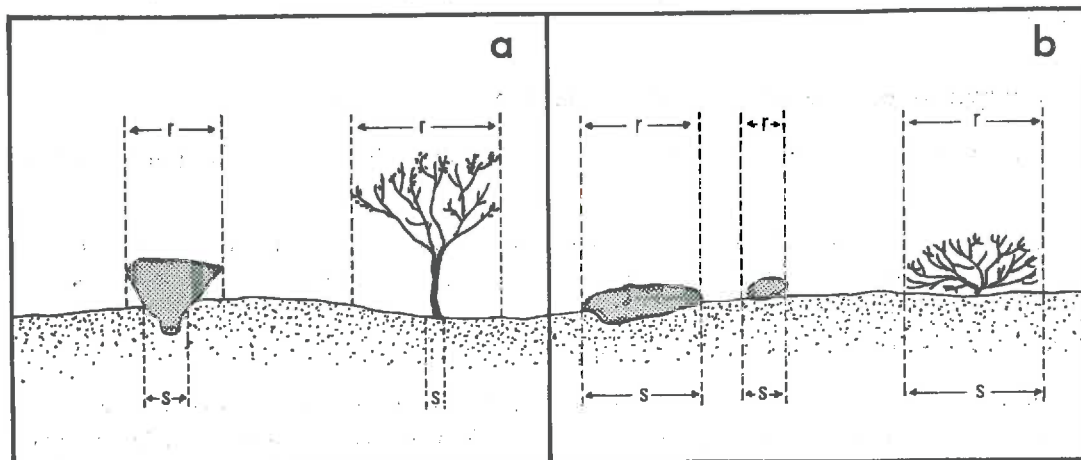


Figure 13. Les notions de taux de recouvrement (r) et de pourcentage de la surface du sol occupée par les éléments grossiers et la végétation

En théorie ces deux notions sont différentes (a), en pratique elles peuvent être confondues dans la zone étudiée (b)

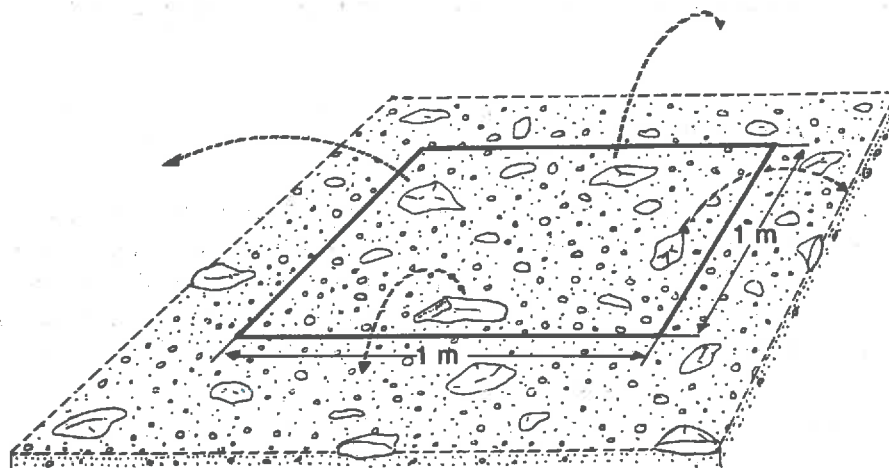


Figure 14. Méthode de prélèvement des échantillons d'ESE (états de surface élémentaires) à éléments grossiers, en vue du calcul de la granulométrie apparente

Sur une placette de 1 m^2 , les cailloux sont dénombrés par comptage manuel, le reste est prélevé exhaustivement pour être tamisé au laboratoire.

3.2.3.1 Granulométrie des ESE

La description des ESE sur le terrain amène à noter l'abondance des différents éléments minéraux qui le composent: horizon affleurant, sables, graviers, cailloux, etc... Dans les cas les plus simples cette abondance est estimée visuellement à l'aide de planches de référence comme celles présentées en annexe du code Munsell (MUNSELL COLOR COMPANY, 1971). Il s'agit alors d'une estimation sur le terrain de la fraction de la surface de l'ESE couverte par l'élément considéré, le taux de *recouvrement*.

Dans le cas d'ESE composés de nombreux éléments de tailles variées, l'estimation visuelle du taux de recouvrement de chaque fraction est difficile. On prélève alors un échantillon pour une détermination au laboratoire. La mesure de la masse de chacune des classes d'éléments est une information peu satisfaisante en elle-même. En effet, les éléments les plus gros peuvent représenter la plus grande partie de la masse de ces matériaux et n'occuper par contre qu'une faible fraction de la surface.

Or, c'est bien le *pourcentage de la surface occupée* par les différents éléments qui est la donnée essentielle pour interpréter l'influence de la granulométrie d'un ESE sur ses propriétés spectrales ou son aptitude à l'infiltration, par exemple.

A remarquer que les notions de *taux de recouvrement* et de *fraction de la surface occupée* sont légèrement différentes. Dans la région étudiée, la forme des éléments grossiers et leur disposition permet de confondre ces deux notions (voir fig. 13).

*** Modèle de calcul du taux de recouvrement des différents éléments : granulométrie apparente d'un ESE**

Une technique d'échantillonnage et un modèle adaptés aux surfaces de la zone étudiée ont été développés pour calculer le taux de recouvrement des différents composants minéraux classés suivant leur dimensions. Les classes de dimensions retenues sont les suivantes :

- blocs, de taille supérieure à 20 cm
- gros cailloux, de 10 à 20 cm,
- cailloux moyens, de 5 à 10 cm,
- petits cailloux, de 2 à 5 cm.,
- gros graviers, de 10 à 20 mm,
- graviers moyens, de 5 à 10 mm,
- petits graviers de 2 à 5 mm,
- sables grossiers 0,2 à 2 mm,
- sables fins de 0,05 à 0,2 mm,
- éléments fins (argile et limons), de taille inférieure à 0,05 mm.

Technique de mesure

La mesure du recouvrement de chacun de ces types d'éléments a été tentée directement sur les photographies nadirales que nous avons prises, mais ils se sont révélés difficiles à discerner.

La méthode développée est donc basée sur l'analyse d'un échantillon observé sur le terrain. Le cas des blocs est comparable à celui des horizons affleurants, il est facile de mesurer le pourcentage de la surface qu'ils occupent. L'abondance des autres éléments composant un ESE donné est mesurée par prélèvement sur une placette de 1 m² (fig. 14). Suivant leur taille, deux stratégies sont adoptées :

- les cailloux sont *dénombrés*. Prélevés un par un, leur taille est mesurée avec un gabarit et le nombre de cailloux dans chacune des trois classes prévues est enregistré sur la fiche de terrain (fig. 14).
- le reste des éléments (graviers, sables et éléments fins) est collecté sur la placette en mettant à nu le premier horizon du sol. Ils sont ensuite tamisés au laboratoire, alors qu'une analyse granulométrique classique est appliquée à la terre fine (fraction inférieure à 2 mm).

Modèle de calcul du recouvrement

L'aire, S_i , occupée par la classe de cailloux i , dans la placette échantillonnée est approximée par l'équation simple :

$$S_i = n_i \cdot Sm_i$$

où, n_i est l'effectif de la classe, Sm_i la surface moyenne d'un caillou de la classe i .

Pour la zone étudiée, d'après les formes observées sur le terrain, les cailloux peuvent être assimilés à des *ellipsoïdes* d'aplatissement 2/3, posés à plat sur la surface. Dans ce cas,

$$Sm_i = \pi \frac{2}{3} \left(\frac{dm_i}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{6} dm_i^2$$

où dm_i est le diamètre médian de la classe i

Les graviers sont par contre assimilés à des sphères. Compte tenu de leur taille et de leur nombre élevé, il n'est généralement pas possible de les dénombrer. L'approximation suivante est alors utilisée:

Le volume, V_i , de la classe de graviers i , est estimé d'après son poids, P_i mesuré par tamisage au laboratoire, et la densité moyenne des graviers, D_r , soit :

$$V_i = \frac{P_i}{D_r}$$

Soit, D_1 le diamètre moyen des éléments de la classe i . Le volume d'un élément sphérique de diamètre D_1 est

$$V_{1e} = \frac{\pi \cdot D_1^3}{6}$$

Sa section, S_{1e} est

$$S_{1e} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}$$

Soit, S_i la surface occupée par la fraction i , et n le nombre de graviers contenu dans cette fraction

$$S_i = n \cdot S_{1e} = \frac{V_i}{V_{1e}} \cdot \frac{\pi D_1^2}{4}$$

soit,

$$S_i = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_i}{D_r \cdot D_1}$$

La somme de tous les S_i pour les blocs, les trois classes de cailloux et les graviers gros et moyens donne l'aire de la partie de la placette occupée par les éléments grossiers. Le reste de la placette est considéré comme occupé par une couche à laquelle les autres classes d'éléments contribuent en proportion de leur masse déterminée au laboratoire.

Exemple (cas de l'ESE SAD35.1)

L'échantillonnage sur une placette de $1m^2$ suivant la méthode décrite a donné les valeurs suivantes pour cet ESE de composition granulométrique très variée :

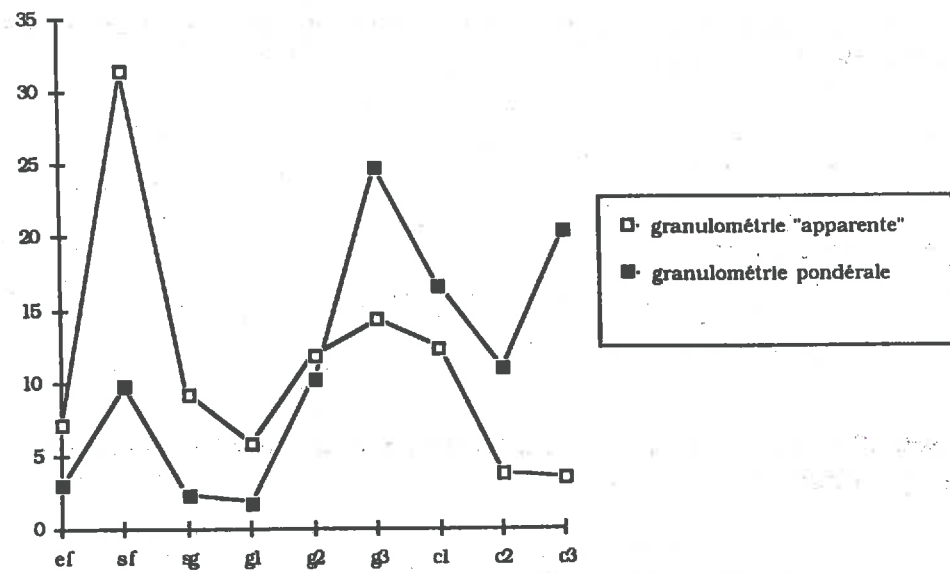


Figure 15. Expression de la granulométrie d'un ESE à éléments grossiers en pourcentage pondéral et en taux de recouvrement (granulométrie apparente)

- nombre de cailloux 10-20 cm (c3) : 3
- nombre de cailloux 5-10 cm (c2) : 13
- nombre de cailloux 2- 5 cm (c1) : 192

Le reste des matériaux de surface présents dans la placette a été collecté et emporté au laboratoire.

Résultats des déterminations au laboratoire :

- poids total (à l'état sec) : 7,8 kg.
- refus au tamis à maille de 10 mm (graviers g3) : 47,7 %
- refus au tamis à maille de 05 mm (graviers g2) : 19,8 %
- refus au tamis à maille de 02 mm (graviers g1) : 03,5 %

Par ailleurs, l'analyse granulométrique de la fraction inférieure à 2 mm ("terre fine") a donné les valeurs suivantes :

- argile et limons (éléments fins, ef) : 15 %
- sables fins (sf) : 65 %
- sables grossiers (sg) : 19 %.

Les étapes du calcul du recouvrement sont les suivantes :

$$\begin{aligned} d_{m_i} \text{ de } c3 &= 15 \text{ cm, soit } S_{m_i}(c3) = 117,8 \text{ cm}^2 \\ d_{m_i} \text{ de } c2 &= 7,5 \text{ cm, soit } S_{m_i}(c2) = 29,4 \text{ cm}^2 \\ d_{m_i} \text{ de } c1 &= 3,5 \text{ cm, soit } S_{m_i}(c1) = 6,4 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Le pourcentage de la placette occupée par les cailloux est alors :

$$\begin{aligned} c3 &= 3 \cdot S_{m_i}(c3) / 100 = 3,5 \% \\ c2 &= 13 \cdot S_{m_i}(c2) / 100 = 3,8 \% \\ c1 &= 192 \cdot S_{m_i}(c1) / 100 = 12,3 \% \end{aligned}$$

Les graviers occupent quant à eux (en prenant $D_r = 2,6 \text{ g/cm}^3$) :

$$\begin{aligned} S_1(g3) &= 1,5 \cdot 3720 \text{ g} / 2,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^3 / 1,5 \text{ cm} = 1430 \text{ cm}^2, \text{ soit :} \\ g3 &= 14,3 \% \end{aligned}$$

Suivant le même calcul,

$$g2 = 11,88 \%$$

Les éléments de taille inférieure à 5 mm sont considérés comme formant une couche dans laquelle ils sont en mélange. Cette couche recouvre la fraction de la placette non occupée par les cailloux et les gros et moyens graviers, soit 54,2 %. En supposant que chaque composant contribue à cette couche en fonction de sa masse on obtient le résultat intermédiaire suivant : $g1 = 10,7 \%$ de la couche, $sg = 17 \%$, $sf = 58 \%$, $ef = 13,3 \%$.

Ce qui donne en taux de recouvrement au niveau de la placette entière :

$$\begin{aligned} g1 &= 5,8 \% \\ sg &= 9,2 \% \\ sf &= 31,4 \% \\ ef &= 7,2 \% \end{aligned}$$

A titre de comparaison, en assimilant les éléments grossiers dénombrés sur la placette à des ellipsoïdes d'aplatissement 2/3 en largeur et 1/3 en épaisseur, on peut estimer leur masse.

Le pourcentage pondéral des différentes éléments composant la placette est alors de :

$$c1 = 20,4 ; c2 = 11 ; c1 = 16,6 ; g3 = 24,8 ; g2 = 10,3 ; g1 = 1,8 ; sg = 3,0 ; sf = 9,8 ; ef = 2,3.$$

La fig. 15 illustre ces deux modes d'expression de la composition de l'échantillon.

Ce modèle simple exprime ainsi l'abondance de chaque classe de taille d'éléments en pourcentage de l'ESE (état de surface élémentaire) occupé. Habituellement, les résultats d'une analyse granulométrique sont exprimés en pourcentage pondéral. Notre modèle permet de calculer une *granulométrie apparente*, basée sur un certain nombre d'approximations et de simplifications. Elle n'a donc qu'une valeur indicative, mais qui rend mieux compte de l'organisation des surfaces, telle qu'elle est perçue sur le terrain et telle qu'elle intervient dans les interactions avec le rayonnement solaire et l'atmosphère.

De la même façon, on pourrait utiliser la composition minéralogique des différentes fractions pour exprimer la composition en termes de recouvrement, calculant ainsi la composition apparente d'un ESE.

3.2.3.2 Composition moyenne d'un Etat de surface

Au niveau hiérarchique supérieur, suivant les définitions que nous avons proposées (voir 3.2.1), un état de surface est considéré comme un assemblage de n états de surface élémentaires (ESE), dont chacun occupe une fraction a_i de l'aire totale. L'abondance moyenne d'un composant j de cet état de surface, Rm_j , est alors égale à la somme des abondances de ce composant dans chaque ESE, R_{ij} , pondérée par a_i , soit :

$$Rm_j = \sum R_{ij} \cdot a_i$$

Ce type d'expression des résultats analytiques prend toute sa signification dans l'analyse de l'interaction de la surface avec les flux d'eau (infiltration), mais aussi avec le rayonnement solaire (télédétection).

En effet, les capteurs embarqués sur les satellites de télédétection mesurent le rayonnement solaire réfléchi par des portions de surface qui sont le plus souvent composites. La caractérisation de ces surfaces par description des ESE et calcul de valeurs pondérées est une méthode qui permet de rendre compte de la composition moyenne d'un site à l'échelle de la mesure satellitaire (ESCADAFAL et POUGET, 1986). Nous verrons en particulier dans quelles conditions ce principe peut s'appliquer à la couleur et les conséquences importantes qui en découlent (voir 5.3).

Exemple :

Considérons le cas du site SAD8 que nous avons pris comme exemple précédemment. Quatre ESE différents y ont été reconnus, décrits et analysés. Les mesures sur le terrain et les calculs donnent les valeurs suivantes pour l'abondance du sable fin (sf) exprimée en recouvrement (granulométrie apparente) :

ESE1 : 46,9 % ; ESE2 : 63 % ; ESE3 : 40,4 ; ESE4 : 0 % (masqué par la végétation).

Chacun de ces ESE couvre respectivement 72, 14, 6, et 8 % de l'état de surface. L'abondance moyenne du sable fin (sf) est donc égale à :

$$0,47 \cdot 72 + 0,63 \cdot 14 + 0,40 \cdot 6 = 45 \%$$

En appliquant le même calcul pour les autres composants on obtient la granulométrie apparente moyenne de l'état de surface considéré.

**PLANCHE 5 - QUELQUES ETATS DE SURFACE ELEMENTAIRES
CARACTERISTIQUES DE LA ZONE ETUDIEE**

Chaque photographie couvre un champ d'environ 20x30 cm.

<p>ESE à cailloux et graviers (colluvions grossières)</p> <p style="text-align: right;">1</p>	<p>ESE à graviers et cailloux sur sol nu (reg de dalle calcaire)</p> <p style="text-align: right;">2</p>	<p>ESE à graviers, cailloux et sable fin (reg de dalle ensablé)</p> <p style="text-align: right;">3</p>
<p>ESE à graviers moyens (colluvions fines)</p> <p style="text-align: right;">4</p>	<p>ESE à petits graviers et sables grossiers (glacis sableux)</p> <p style="text-align: right;">5</p>	<p>ESE à sables fins (voile éolien)</p> <p style="text-align: right;">6</p>
<p>ESE gypseux (croûte gypseuse affleurante)</p> <p style="text-align: right;">7</p>	<p>ESE salin (sol de dépression salée, à struct. soufflée)</p> <p style="text-align: right;">8</p>	<p>ESE à sol nu (sol limono- sableux, battant)</p> <p style="text-align: right;">9</p>



3.2.4 Observations micromorphologiques

Lors de la description des ESE, une attention particulière est donnée aux organisations spécifiques des surfaces en observant à la loupe une section verticale des premiers millimètres. Cette description permet de reconnaître les différents litages et le type de porosité qui y est associé.

Des pores vésiculaires ont souvent été décrits dans les croûtes superficielles des sols désertiques, ils sont formés par piégeage de bulles d'air lors des phases d'inondation de la surface (SPRINGER, 1958 ; EVENARI et al., 1974).

Pour étudier plus finement ces micro-organisations, le recours au microscope s'impose. La micromorphologie est d'ailleurs devenue un des aspects essentiels de l'étude des sols et en particulier de leur fonctionnement (BREWER, 1964; BULLOCK et al., 1985). Elle connaît un développement rapide, notamment en liaison avec les nouvelles technologies en microscopie électronique et de microanalyse. Son application à l'étude des croûtes des surfaces cultivées (BISHAY et STOOPS, 1975; PAGLIAI et LA MARCA, 1979 ; CHEN et al., 1980) ou naturelles (EVANS et BUOL, 1968; VALENTIN, 1985) est assez récente.

Comme tous les échantillons de sols, ceux de la surface doivent être indurés avant de pouvoir être débités en lames observables par transparence. Les surfaces que nous avons étudiées sont très fragiles à l'état sec. Le prélèvement des échantillons dans des cylindres de PVC a donc été précédé d'une lente humectation par capillarité à partir d'un anneau de garde, pour en augmenter la cohésion.

Ils ont ensuite été transportés à l'état humide au laboratoire de Gabès proche de notre terrain, où ils ont été séchés à l'air, puis imprégnés par des résines appropriées. Après durcissement de la résine, ils ont pu être acheminés sans difficultés au laboratoire spécialisé de l'INA-PG pour la préparation des lames minces (GUILLORE, 1980). Les photos de la planche 7 (p. 115) représentent des photogrammes (GUILLORE, 1981) de 4 échantillons de surface prélevés dans notre zone. Elle est commentée lors de l'interprétation des mesures sous pluie simulée (voir 4.2.3).

3.3 LES SURFACES DE LA ZONE ÉTUDIÉE

Au cours de la prospection de la zone d'étude, les différents états de surface ont été inventoriés par observation sur le terrain, suite à l'interprétation des documents photographiques disponibles.

3.3.1 Quelques types de surfaces remarquables

Parmi les états de surface observés, un certain nombre se distinguent très aisément sans devoir recourir à des descriptions très fines. Ils correspondent à des situations un peu particulières; on distingue notamment :

- **les états de surface LABOURES**, qui caractérisent les zones cultivées derrière les *jessours* ou dans les dépressions non salées (voir première partie).

Composés de matériaux meubles sableux à sablo-limoneux, pauvres en éléments grossiers, ils présentent un microrelief important dû aux labours. Ils sont couverts de végétation verte au printemps après des pluies favorables, puis de résidus secs, après la récolte

Leur aspect est donc variable au cours de l'année, mais ils se distinguent des autres états de surface par une forte rugosité et une végétation relativement plus dense. Comme les cultures ne représentent qu'un faible pourcentage de l'aire étudiée, un seul type a été distingué dans cette situation.

- **les états de surface SALINS**, rencontrés dans les dépressions salées sont caractérisés, à l'état sec, par la présence d'efflorescences salines de couleur claire.

L'horizon de surface, sablo-limoneux à limoneux, sans éléments grossiers, présente souvent une pellicule superficielle à "nanorelief" piqueté ou craquelé, reposant sur un matériau à structure particulière soufflée (voir photo 8, planche 5).

La couleur de ce type d'état de surface varie avec l'état hydrique qui fluctue en fonction des précipitations et des remontées de nappes. Une végétation halophyte verte entretenue par ces nappes peut souvent se maintenir toute l'année avec un taux de recouvrement de l'ordre de 20 à 40 %. Ce type d'état de surface est donc caractérisé par une végétation pérenne assez dense, mais aussi une humidité variable. Limités aux dépressions endoréiques salées ("garet" et "sebkhet"), ils sont également regroupés dans un seul type.

- **les états de surface GYPSEUX**, formés d'affleurements d'horizons gypseux, soit des roches gypseuses altérées en surface, soit des accumulations secondaires de gypse dans les sols sous forme d'encroûtement et de croûtes.

La couleur est très claire (couleur Munsell 7,5 YR 8/2) et l'aspect mat à pulvérulent; le microrelief est parfois polygoné jamais très accentué (photo 7, planche 5).

- **les états de surface à BLOCS** : affleurements de roche dure en blocs et cailloux, très étendus dans notre zone ils caractérisent tous les reliefs.

Suivant la nature et le faciès des roches, la taille et la forme des blocs varient dans tous les cas, le microrelief ou la rugosité sont très marqués. La patine toujours présente sur ces blocs, donne une couleur généralement assez claire (5 YR 7/2 à 7,5 YR 7/3).

En dehors de ces cas limites, la surface des sols de la zone étudiée présente toute une gamme d'états de surface, composés de sol nu affleurant, de sables fins et grossiers, de graviers et de cailloux et de végétation pérenne, en diverses proportions.

Des échantillons représentatifs de ces états de surface ont été étudiés en utilisant la méthode décrite ci-dessus (voir 2.2). Suivant cette approche, ils sont considérés comme des assemblages d'états de surface élémentaires (ESE). Nous allons donc voir en premier, les différents types d'ESE rencontrés.

3.3.2 Typologie des Etats de Surface Élémentaires (ESE)

3.3.2.1 Caractérisation des ESE par la granulométrie.

Au cours de la prospection, les ESE (états de surfaces élémentaires) rencontrés qui ne correspondaient pas à un des grands types définis plus haut ont été étudiés systématiquement. Dans chaque cas une placette de 1m a été échantillonnée suivant la méthode de détermination de la granulométrie apparente décrite en 3.2.3.1.

Malgré les difficultés d'accès et le temps limité disponible, 42 sites ont été étudiés. A raison de 1 à 3 ESE par site, c'est un ensemble de 63 placettes qui a été échantillonné. Chaque placette a été choisie de façon à correspondre à l'aspect dominant de l'ESE dans lequel elle est prélevée. Même si cette recherche visuelle de représentativité est facilitée dans le cas des surfaces, ce n'est pas un échantillonnage statistique. Sans prétendre donc à établir des valeurs absolues, les mesures faites sur ces échantillons vont nous

TABLEAU 2. GRANULOMÉTRIE APPARENTE ET COULEUR MUNSSELL DES ÉCHANTILLONS D'ETATS DE SURFACE ÉLÉMENTAIRES PRÉLEVÉS DANS LA ZONE D'ÉTUDE

n°	ref	ef	sf	sg	g1	g2	g3	c1	c2	c3	TS	CS	PS
1	1-1	12,0	55,3	24,9	6,7	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0	5,0	6	6
2	1-2	8,0	77,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
3	2-1	32,4	33,9	8,3	20,5	3,3	0,9	0,0	0,0	0,0	7,5	7	4
4	3-1	5,0	35,0	60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
5	3-2	32,5	34,0	8,3	20,3	3,3	0,9	0,0	0,0	0,0	7,5	5	6
6	3-3	8,0	77,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	6
7	4-1	21,6	39,7	7,7	18,2	2,8	2,0	0,0	1,5	5,9	7,5	7	4
8	5-1	6,6	46,4	29,8	17,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	6
9	5-2	7,0	76,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	6
10	6-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	61,0	10,0	7,5	7	4
11	6-2	7,0	77,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	6
12	7-1	5,8	40,4	26,0	27,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	8
13	7-2	8,0	63,0	29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
14	8-1	20,7	46,9	22,5	9,3	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	5,0	6	6
15	8-2	8,0	63,0	29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
16	9-1	10,6	31,9	16,5	39,3	1,3	0,3	0,0	0,0	0,0	7,5	6	8
17	9-2	9,0	77,0	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	4
18	9-3	18,6	44,5	17,8	18,3	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
19	10-1	6,0	94,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	6	8
20	11-1	15,1	27,0	11,3	38,5	6,8	0,8	0,0	0,0	0,0	5,0	7	6
21	12-1	8,1	46,5	19,2	3,3	2,3	8,1	8,7	1,5	2,4	7,5	6	6
22	13-1	5,8	58,4	33,1	0,5	0,1	0,1	0,8	1,2	0,0	7,5	6	6
23	14-1	6,9	42,9	12,6	23,5	7,2	3,7	2,3	0,3	0,0	7,5	6	6
24	15-1	7,0	81,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	8
25	15-2	10,0	90,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	8
26	16-1	6,0	53,3	15,0	24,5	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
27	16-2	7,9	64,3	26,7	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	8
28	17-2	10,0	71,0	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
29	19-1	0,0	0,0	0,0	16,0	11,0	9,0	20,0	26,0	24,0	7,5	6	6
30	20-1	6,0	59,0	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
31	21-1	0,0	0,0	0,0	8,5	10,0	10,0	21,0	39,0	10,0	7,5	7	6
32	21-2	8,0	80,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
33	22-1	11,0	75,0	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
34	23-1	3,9	25,6	48,1	22,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
35	23-2	6,0	62,0	32,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
36	23-3	6,7	41,8	35,1	10,4	1,3	1,4	2,6	0,6	0,0	7,5	6	6
37	24-1	67,0	30,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	4
38	25-1	20,4	42,5	21,3	13,2	1,3	0,5	0,0	0,0	0,0	5,0	7	4
39	25-2	5,8	23,8	41,8	27,5	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	7	6
40	25-3	8,0	77,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
41	26-1	8,9	52,1	11,9	15,7	4,1	1,5	4,4	0,0	0,0	7,5	7	6
42	29-1	7,4	57,3	2,7	1,6	2,6	4,7	16,0	6,5	1,2	6,3	6	6
43	30-1	7,2	50,5	32,5	0,3	0,1	0,4	5,1	3,8	0,0	7,5	6	6
44	31-1	28,8	37,3	3,5	19,4	2,1	3,9	5,9	3,8	3,5	7,5	6	6
45	32-1	6,9	22,3	23,9	45,5	0,6	0,0	0,4	0,3	0,0	7,5	7	4
46	32-2	41,0	56,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	6
47	33-1	7,5	24,1	25,9	21,8	12,7	5,2	2,6	0,3	0,0	7,5	7	4
48	34-1	10,2	25,4	13,2	37,3	11,4	1,7	0,8	0,0	0,0	7,5	6	6
49	35-1	7,3	31,4	9,2	5,8	11,9	14,3	12,3	3,8	3,5	7,5	6	6
50	36-1	5,8	17,9	12,0	8,7	24,1	12,8	14,3	3,5	0,0	7,5	7	4
51	37-1	7,1	16,6	11,3	10,2	18,7	14,7	11,0	6,5	3,5	7,5	7	4
52	38-1	24,0	52,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	7	4
53	38-2	2,8	8,6	5,8	4,2	24,1	12,8	14,3	3,5	23,6	7,5	7	6
54	38-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	70,0	7,5	7	4
55	39-1	10,5	45,0	19,5	23,2	1,7	0,1	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
56	39-2	23,0	69,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
57	41-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,5	31,0	49,5	5,0	8	2
58	41-2	9,0	57,0	33,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5	6	6
59	41-3	3,9	17,1	33,6	33,9	3,4	0,6	2,0	0,0	0,0	5,0	6	6
60	42-1	7,5	29,0	19,6	16,5	11,0	4,0	1,9	0,0	1,2	7,5	7	6
61	53-1	18,4	27,8	7,5	22,9	24,4	2,3	0,6	0,0	0,0	7,5	7	4
62	54-1	7,4	48,9	16,1	17,4	13,0	1,8	0,7	0,0	0,0	6,3	6	6
63	58-1	6,8	30,4	11,1	27,5	19,2	5,0	0,0	0,0	0,0	5,0	6	2

LEGENDE :

- ef : éléments fins (argile et limons, inf. à 0,05 mm)
- sf : sables fins de 0,05 à 0,2 mm.
- sg : sables grossiers 0,2 à 2 mm
- g1 : petits graviers de 2 à 5 mm.
- g2 : graviers moyens, de 5 à 10 mm,

- g3 : gros graviers, de 10 à 20 mm,
- c1 : petits cailloux, de 2 à 5 cm.
- c2 : cailloux moyens, de 5 à 10 cm,
- c3 : gros cailloux, de 10 à 20 cm
- TS, CS et PS : teinte, clarté et pureté de la couleur Munsell de l'échantillon à l'état sec.

permettre de classer et de comparer les ESE plus précisément qu'à l'aide de simples descriptions de terrain.

Les valeurs de recouvrement dans chacune des classes de taille des éléments apparaissent dans le tableau 2, ainsi que la teinte, la clarté et la pureté de la couleur Munsell observée à l'état sec.

3.3.2.2 Analyse multidimensionnelle et classification des ESE.

Ce tableau de 12 variables et 63 individus représente un ensemble de 756 données. Pour l'analyser, nous avons eu recours aux méthodes statistiques multidimensionnelles (DAGNELIE, 1975; FENELON, 1981).

Parmi celles-ci, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode essentiellement descriptive qui est applicable aux tableaux de données dont les variables sont quantitatives, c'est-à-dire aux tableaux de mesures (LAGARDE, 1983).

Le principe d'une ACP consiste à transformer p variables quantitatives initiales, toutes plus ou moins corrélées entre elles, en p nouvelles variables quantitatives, non corrélées, appelées composantes principales.

Dans le cas de notre tableau de données, nous avons retenu les pourcentages de recouvrement comme variables "actives", alors que celles correspondant à la couleur, qui ne sont pas du tout exprimées dans les mêmes unités, ont été prises comme variables "supplémentaires" (PHILIPPEAU, 1986). Elles n'entrent donc pas dans le calcul des composantes principales, mais apparaissent projetées sur le graphique selon la même échelle que les autres.

Les résultats du calcul indiquent que les trois premières composantes expliquent 83 % de la variance. L'étude des données dans cet espace donne donc une vision d'ensemble assez satisfaisante. La fig. 16 exprime les corrélations des variables avec ces trois premières composantes, projetées selon deux plans différents. Ainsi par exemple, la variable *sf* (taux de recouvrement en sable fin) est très fortement corrélée avec l'axe 1, qui correspond à la première composante.

L'analyse de ces deux schémas met en évidence les caractéristiques de notre série de données :

- la variable *sf* s'oppose très nettement aux variables "graviers" (*g1, g2, g3*) et "cailloux" (*c1, c2, c3*)
- la variable *sg* (sables grossiers) corrélée avec l'axe 2 est bien individualisée et s'oppose aux éléments fins (var. *ef*) sur l'axe 3.

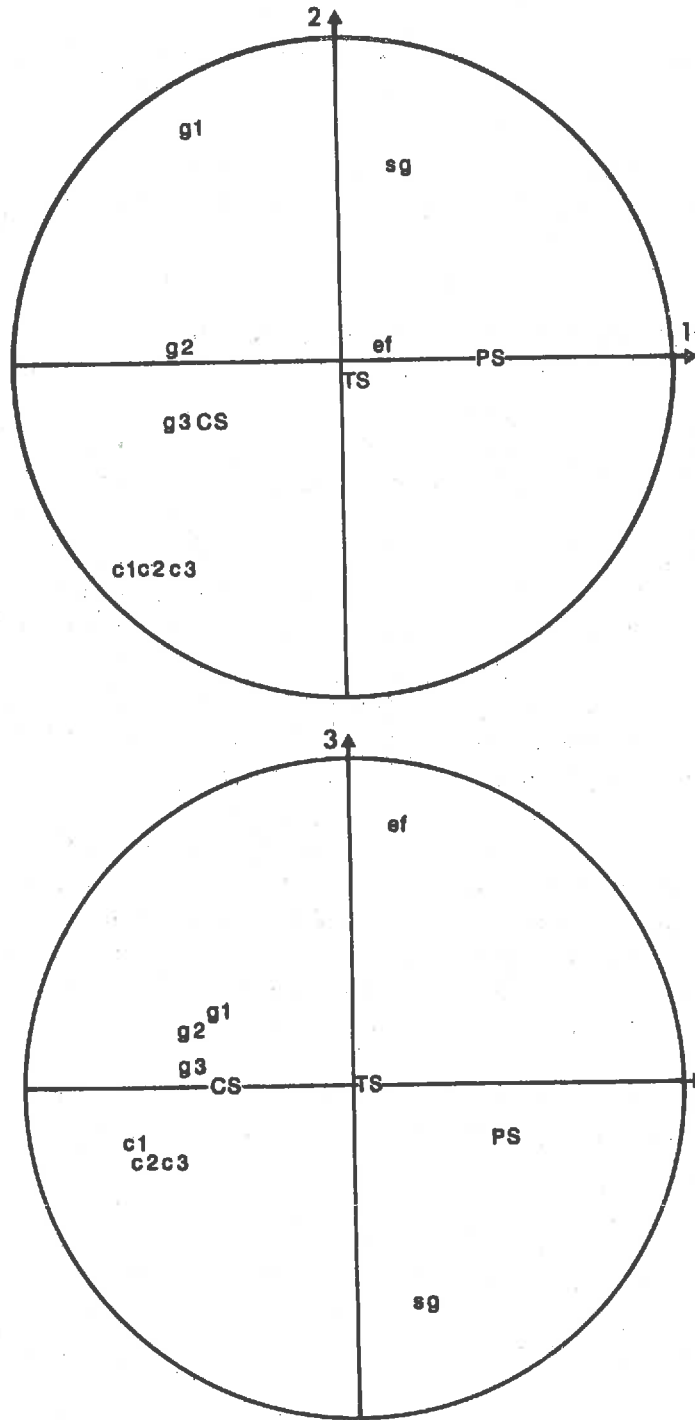


Figure 16. Analyse en composantes principales (ACP) de la série de 63 échantillons d'ESE : cercles des corrélations entre les variables et les trois premiers axes

Les variables actives sont les données de granulométrie apparente. Les données de couleur sont en variables "supplémentaires" (voir tab. 2 pour la signification des symboles).

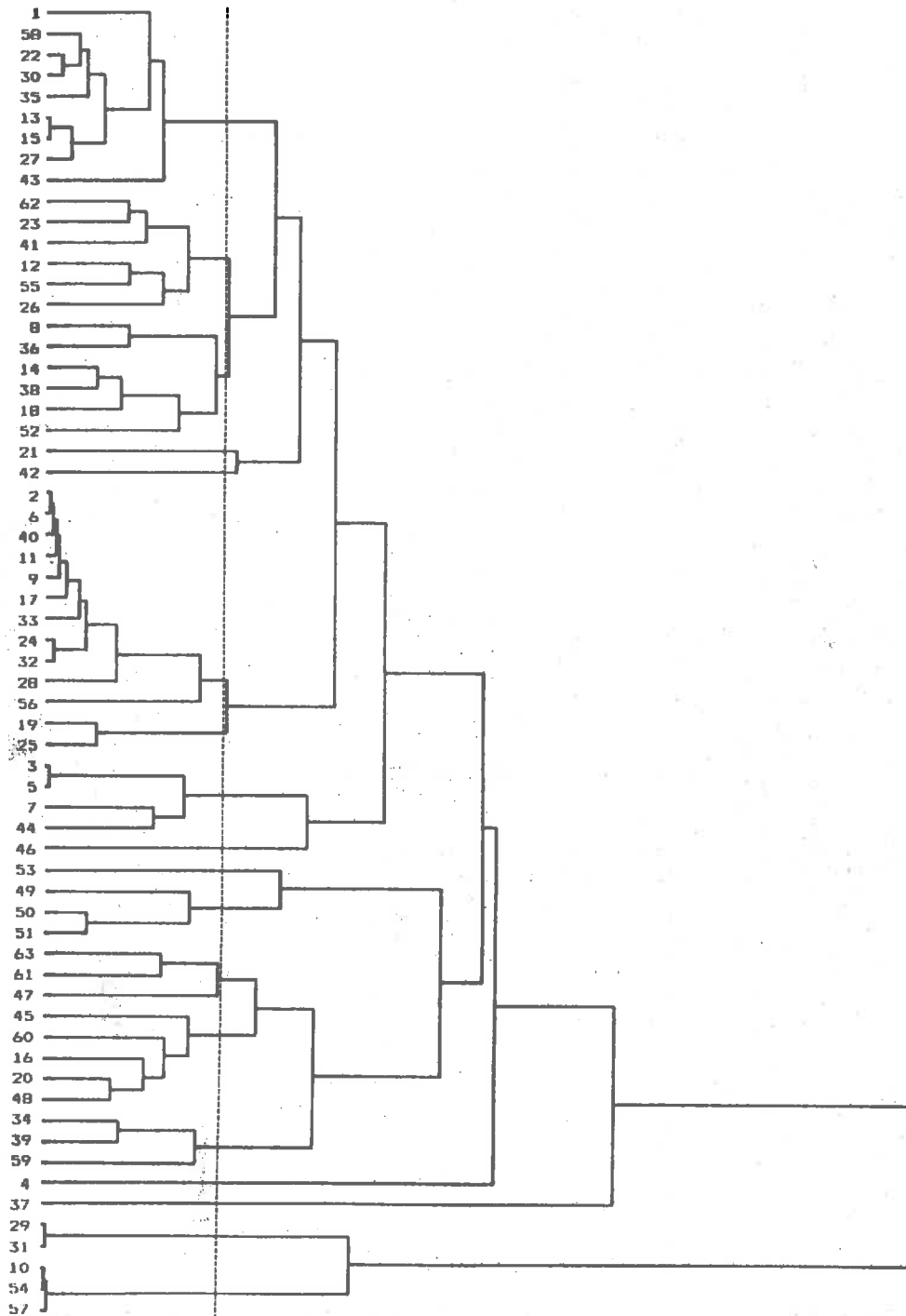


Figure 17. Arbre de la hiérarchie entre les 63 échantillons d'états de surface élémentaires (ESE) calculé par classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les données de granulométrie apparente.

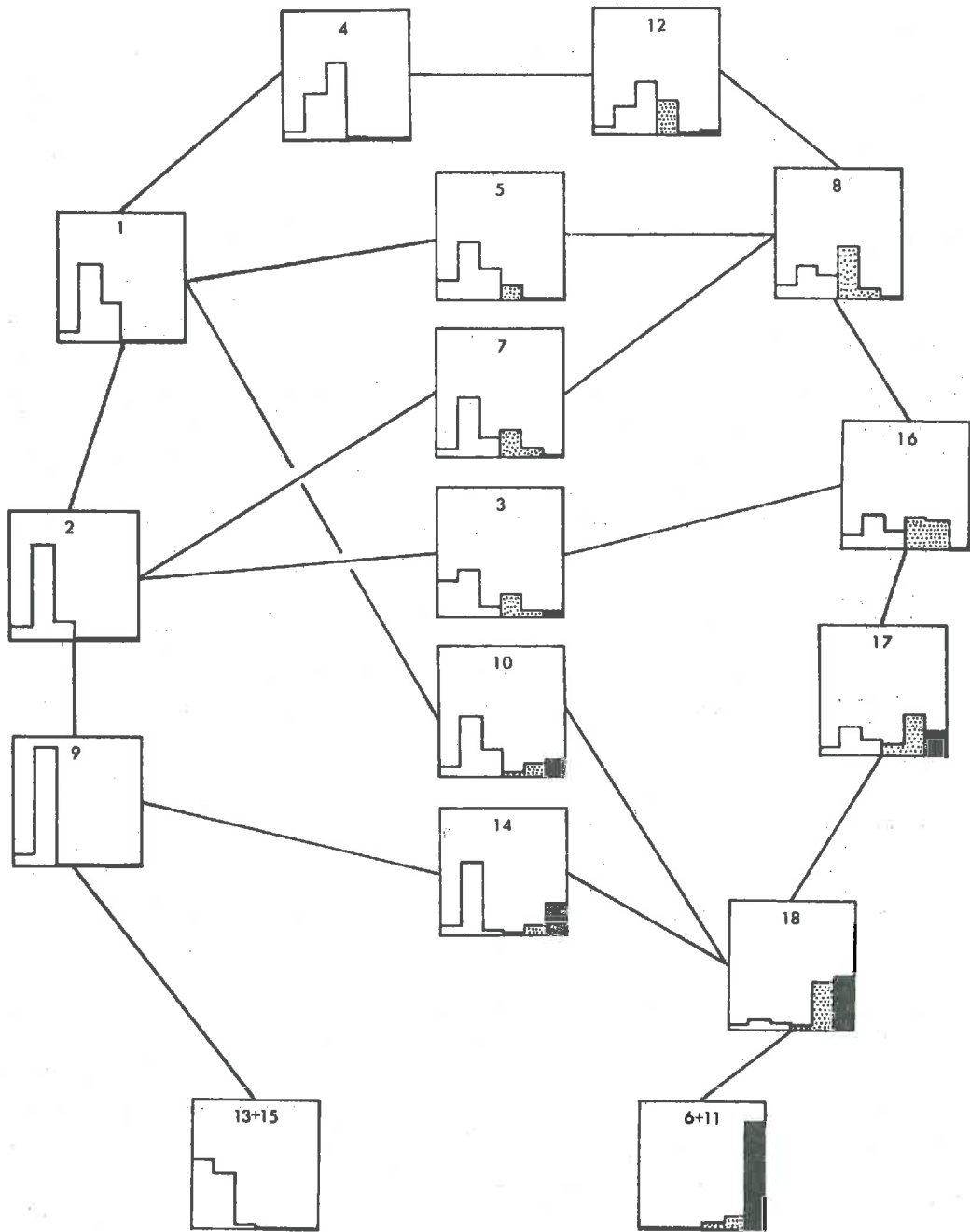


Figure 18. Composition moyenne des 16 classes d'états de surface élémentaires (ESE) obtenues par classification ascendante hiérarchique (voir fig. 17)

Chaque petit carré représente un histogramme des pourcentages des six tailles granulométriques utilisées, soit successivement pour la terre fine ef, sf et sg (en blanc), puis les graviers g1 et g23 (en pointillé) et enfin les cailloux c123 (en noir). Ces tailles sont précisées dans le tableau 2.

- les variables **c1**, **c2**, **c3** (cailloux) d'une part, et **g2**, **g3** (gros et moyens graviers) d'autre part, sont nettement corrélées entre elles,

- la teinte (**TS**) est une variable peu significative (effectivement dans notre échantillon elle ne prend que deux valeurs très proches), alors que la pureté (**PS**) est liée à **sf**, et la clarté (**CS**) aux graviers et aux cailloux.

Les variables qui sont corrélées entre elles apportent une information redondante, elles ont été fusionnées pour la suite des traitements. Ainsi, seules les six variables suivantes ont été retenues pour le classement des observations : **ef**, **sf**, **sg**, **g1**, **g23** ($=g2+g3$), **c123** ($=c1+c2+c3$).

Pour regrouper les observations en classes (en vue de la typologie), la méthode de la *Classification Ascendante Hiérarchique* (CAH) a été retenue. Elle est basée sur le regroupement des observations d'après les distances qui les séparent dans l'espace des variables. Ici, il s'agit donc d'un espace à six dimensions; comme ces variables sont exprimées dans la même unité, la distance euclidienne a été utilisée (FENELON, 1981).

La fig. 17 représente l'arbre de la hiérarchie entre les échantillons d'ESE obtenu par cette méthode de classification. La distance entre les individus puis les regroupements constitués y apparaissent en abscisse. Suivant le niveau de la hiérarchie où l'on se place le nombre de classes obtenu est différent.

Nous avons choisi une partition en 18 classes, matérialisée par le trait vertical pointillé sur la fig. 17. Ce choix qui peut paraître arbitraire est en fait le résultat d'un compromis entre le nombre de classes qui doit être minimisé, et la variance interclasse qui doit être maximisée. Dans l'option choisie elle représente 96 % de la variance totale.

Le tableau 3 indique la composition des 18 classes obtenues. A noter que dans cette partition la variance intraclasse est généralement faible, ce qui est également un critère positif.

On remarque un certain nombre de classes à un seul individu, correspondant à des ESE peu représentés. Par souci de simplification, les classes 6 et 11 d'une part, et 13 et 15 d'autre part, ont été regroupées, elles correspondent aux deux extrêmes de la gamme des ESE étudiée.

PLANCHE 6 - EXEMPLES D'ETATS DE SURFACE

Ces échantillons de surface ont été photographiés dans le pédopaysage de la cuvette de l'Oued Dekouk avec le dispositif décrit figure 12.

La règle portant les références a une longueur de 50 cm.

<p>Etat de surface à cailloux de couleur claire (<i>reg de croûte calcaire</i>)</p> <p style="text-align: right;">1</p>	<p>Etat de surface à sables grossiers et sables fins liés aux touffes de vég. (<i>glacis sableux</i>)</p> <p style="text-align: right;">2</p>
<p>Etat de surface sableux à "ripple-marks" (<i>petite dunes coalescentes</i>)</p> <p style="text-align: right;">3</p>	<p>Etat de surface à blocs et cailloux (<i>éboulis de piémont</i>)</p> <p style="text-align: right;">4</p>
<p>Etat de surface à cailloux et sables (<i>reg de dalle calcaire ensablé</i>)</p> <p style="text-align: right;">5</p>	<p>Etat de surface gypseux et sableux (<i>terrasse gypseuse de l'Oued Dekouk</i>)</p> <p style="text-align: right;">6</p>

Les aspects remarquables des surfaces de la zone étudiée apparaissent bien sur ces photographies :

- la rareté de la végétation qui est exclusivement formée de touffes denses de plantes ligneuses,
- les variations de granulométrie et de couleur des matériaux pédologiques,
- l'importance des ombres portées par la végétation et les éléments grossiers (photos 2 et 4).



TABLEAU 3. REGROUPEMENT DES ESE ÉCHANTILLONNÉS EN 18 CLASSES PAR CAH SUR LES DONNÉES DE GRANULOMÉTRIE APPARENTE.

N° clas.	effectif	contenu des classes
1	9	1 13 15 22 27 30 35 43 58
2	11	2 6 9 11 17 24 28 32 33 40 56
3	4	3 5 7 44
4	1	4
5	6	8 14 18 36 38 52
6	3	10 54 57
7	6	12 23 26 41 55 62
8	5	16 20 45 48 60
9	2	19 25
10	1	21
11	2	29 31
12	3	34 39 59
13	1	37
14	1	42
15	1	46
16	3	47 61 63
17	3	49 50 51
18	1	53

Finalement, les 16 classes ainsi obtenues sont représentées sur la fig. 18. Elles sont ordonnées en fonction de leur composition granulométrique exprimée par les valeurs moyennes de chacune des six variables utilisées. Des traits matérialisent leurs filiations. Un certain nombre de classes intermédiaires apparaissent au centre de la figure. En suivant de gauche à droite la séquence proposée sur cette fig. 18, plusieurs grands types d'états de surface élémentaires se distinguent :

- les ESE à SOL NU, (ESE_{sn}) sans recouvrement sableux, ni élément grossier, représentés par les classes 13 et 15.
- les ESE à SABLES FINS (ESE_{sf}), très représentés dans notre échantillon, sont presque uniquement composés de sables fins, matériaux éoliens très triés. La classe 9 correspond au type pur, la classe 2 à la transition vers le type suivant.
- les ESE SABLEUX (ESE_s), sont composés de sables fins et grossiers et représentés par la classe 1.
- les ESE à SABLES GROSSIERS (ESE_{sg}), la classe 4 en représente le type pur, peu rencontré, la classe 12 est le type plus courant, à sables grossiers associés aux petits graviers.
- les ESE à GRAVIERS (ESE_{gr}), dont la classe 16 représente le type central, avec une variante plus riche en petit graviers (classe 8), et en transition avec le type suivant, une variante plus riche en gros éléments (classe 17).

TABLEAU 4. ABONDANCE MOYENNE DES DIFFÉRENTS TYPES D'ESE PAR UNITÉ PÉDOLOGIQUE. (VOIR CHAP.2 POUR LA SIGNIFICATION DES NUMÉROS ET LA DÉFINITION DES PÉDOPAYSAGES)

unités p.	ESEgy	ESEbl	ESEca	ESEgr	ESEsg	ESEs	ESEsf	ESEsn	ESEsa	ESEvg	ESEla
A) 1		70	20					5		5	
2	80						7	10		3	
20	70			5			5	15		5	
17						20		20		10	50
20	70			5			5	15		5	
3			90					7		3	
16	40			5			42	10		3	
7			50				40	5		5	
25	20					20	54			6	
27								25	60	15	
B) 1		70	20					5		5	
5		60	30					9		1	
3			90					7		3	
17h			12		30			50		7	1
17b					10			80		8	2
15				10		70		13		5	2
14			5			15	60	0		20	
C) 7		0	40			14	40			6	
1		70	20					5		5	
4		15	75	8						2	
18					70	14	6			8	2
24					20	11	60			9	
21	60					10		15	7	8	
26								30	60	10	
6						30	65			5	

TABLEAU 5. MATRICE DES CONTRASTES ENTRE LES UNITÉS MORPHO-PÉDOLOGIQUES DES FORMATIONS LIASIQUES, D'APRES LEUR ÉTAT DE SURFACE

	1	2	3	7	16	17	20	25	27
1									
2	+								
3	o	+							
7	+	+	o						
16	+	o	+						
17	+	+	+	-	+				
20	+	-	+	+	o	+			
25	+	o	+	+	-	+	o		
27	+	+	+	+	+	o	+	+	

Les nombres renvoient aux numéros des unités morpho-pédologiques et les symboles expriment l'intensité du contraste (- : faible, o : moyen, + : fort).

- les ESE à CAILLOUX (ESEca), représentés par les classes 6+11, et la classe 18, à cailloux et graviers, en transition avec le type précédent.

La planche 5 (p. 80) illustre ces différents types d'états de surfaces élémentaires par des photographies en prise de vue rapprochée.

3.3.2.3 Rôle de la couleur dans la caractérisation des ESE

La planche 5 montre bien les importantes variations de granulométrie entre les différents ESE, mais aussi des différences de couleur notables. Sur le terrain ces nuances de couleur sont encore plus nettes. Les couleurs des 64 échantillons d'ESE étudiés apparaissent dans le tableau 2. Elles ont été observées à l'état sec et notées par comparaison avec l'atlas Munsell des couleurs de sols (voir 5.3.4.1).

On remarque que si la teinte à l'état sec (TS) varie peu, la clarté (CS) et surtout la pureté (PS) varient dans une gamme beaucoup plus large (5 à 8 et 2 à 8, respectivement). En d'autres termes, les surfaces des sols de la région étudiée sont d'une teinte rouge brun à rouge jaunâtre, relativement claire à très claire, et plus ou moins saturée (pure).

C'est cette dernière caractéristique qui est la plus discriminante. En effet, la gamme de pureté s'étale des gris rosâtre, une couleur pâle (pureté 2), au rouge orangé assez vif pour les valeurs de pureté de 8. Celle-ci correspond d'ailleurs au maximum de pureté prévu dans l'atlas utilisé, soit une couleur de sol très saturée. Ainsi, la couleur permet des distinctions importantes parmi les états de surface ayant un même type de granulométrie :

- parmi les états de surface à éléments grossiers (ESEgr et ESEca) ceux qui ont des couleurs moyennement claires et de pureté élevée correspondent à des surfaces anciennes (reg de dalle calcaire des glacis quaternaires anciens). Au contraire, les couleurs claires et peu saturées caractérisent les surfaces caillouteuses des colluvions et des alluvions récentes.

- parmi les états de surface sans éléments grossiers, c'est la couleur qui permet le plus facilement de les différencier sur le terrain. En effet, les états de surface à sables fins sont toujours d'un rouge orangé vif (5 YR 6/8) alors que ceux à sables grossiers sont de couleur plus pâle (7,5 YR 7/6). Cette caractéristique semble assez générale dans les milieux désertiques (WALKER, 1979). Les ESE à sol nu sont plus foncés (7,5 YR 6/6). A l'opposé les états de surface gypseux sont blanchâtres (7,5 YR 8/2).

La couleur qui est une variable très utilisée pour caractériser les sols sur le terrain joue donc un rôle tout aussi important dans la caractérisation de leur surface.

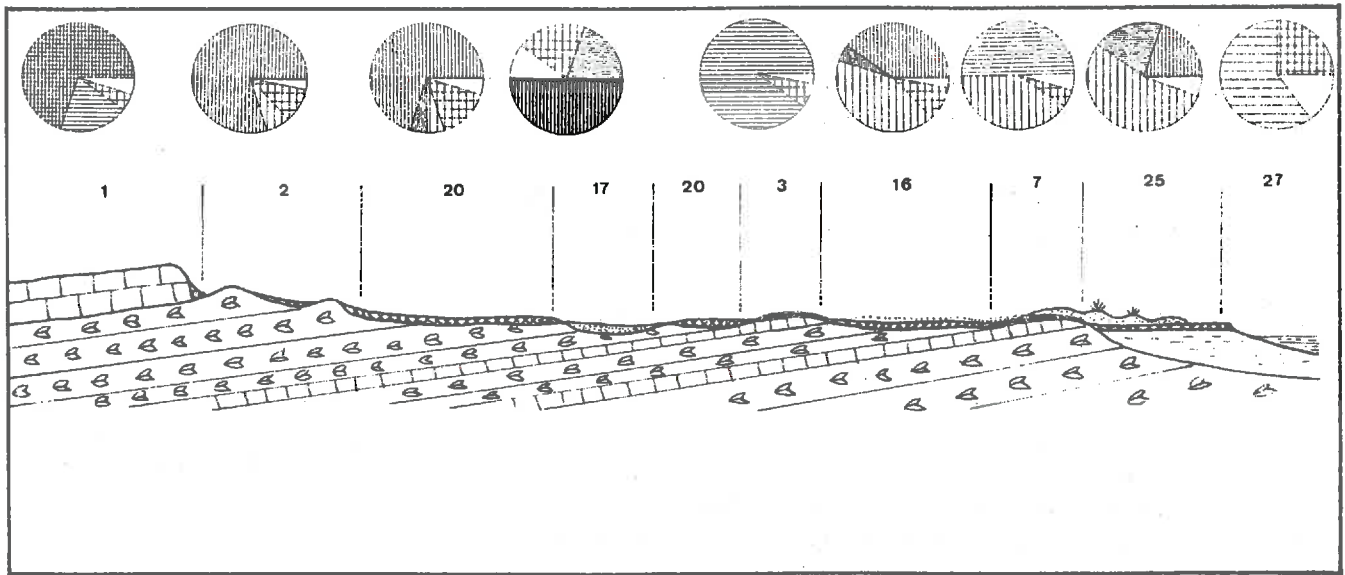


Figure 19. Proportions relatives des différents types d'ESE formant la surface des unités morpho-pédologiques du pédopaysage des formations liasiques (voir fig. 6)

ESEgy	ESEbl	ESEca	ESEgr	ESEsg	ESEs	ESEsf	ESEsn	ESEsa	ESEvg	ESEla

La définition des symboles est donnée au paragraphe 3.3.2.2.

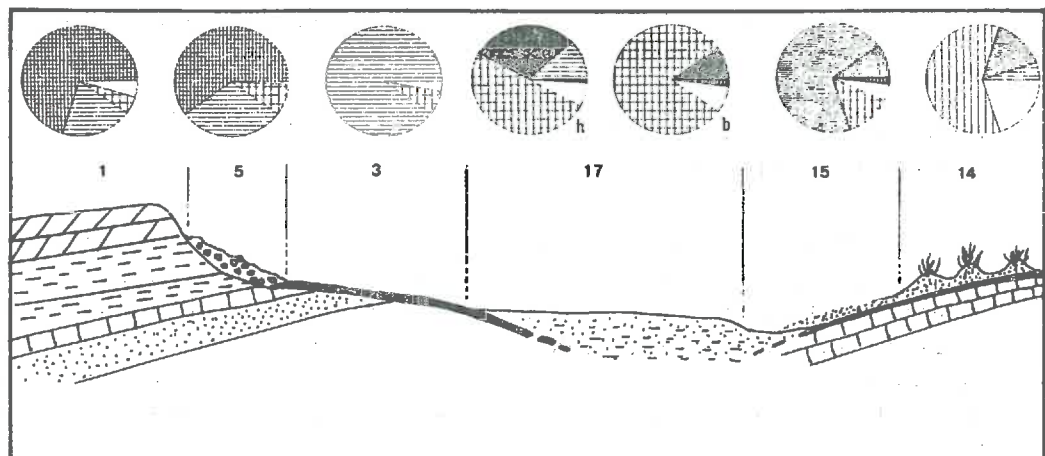


Figure 20. Proportions relatives des différents types d'ESE formant la surface des unités morpho-pédologiques du pédopaysage de la vallée d'El Itme (voir fig. 7)

3.3.3 Les Etats de surface dans le paysage

Les états de surface rencontrés dans la zone étudiée sont constitués d'un ou plusieurs des ESE décrits au paragraphe précédent, généralement associés à des *végétaux pérennes*.

La partie stable de la végétation est en effet presque toujours sous forme de touffes denses plus ou moins hémisphériques, que nous considérons également comme des ESE d'un type un peu particulier, le type végétation (ESEvg). Nous avons vu que dans la méthode de description développée, les dimensions de ces touffes sont notées ainsi que l'espèce végétale et l'état phénologique. Nous n'avons donc considéré ici que les éléments stables de la végétation à la surface du sol, c'est à dire les plus fiables dans une démarche de caractérisation.

La végétation annuelle dont le développement sporadique est totalement dépendant des précipitations est souvent associée aux ESE sableux, qui facilitent son développement comme nous le verrons dans le chapitre suivant. Elle est alors un des composants de ces ESE.

La végétation est donc prise en compte dans notre approche globale, même si les matériaux pédologiques dominent largement. Le type de végétation est d'ailleurs très fortement lié aux conditions édaphiques, si bien qu'à un type de sol correspond le plus souvent une association végétale, comme l'ont montré les travaux des phytoécologues (voir 1.4).

Suivant la situation dans le paysage, les types d'état de surface rencontrés se présentent sous la forme d'associations variées d'ESE.

La figure 19 illustre les variations de l'état de la surface des sols suivant les unités morpho-pédologiques du pédopaysage des formations liasiques. Les proportions relatives des 11 types d'ESE retenus (tab. 4) y apparaissent en diagramme circulaire. Les unités morpho-pédologiques y apparaissent bien différenciées par leurs surfaces. Leur degré de différenciation peut être exprimé par le contraste entre les états de surface, d'autant plus élevé que les ESE qui les composent diffèrent (tab. 5).

Les unités dont les états de surface se ressemblent (contraste faible) sont soit développées sur le même matériau géologique, soit envahies par des dépôts éoliens. Ainsi, même quand elles correspondent à des classes différentes de sols, ces unités ont en fait des propriétés voisines. Ces mêmes observations peuvent être faites pour les unités des paysages de la vallée d'El Itime et de la cuvette de l'oued Dekouk dont les états de surface sont schématisés sur les fig. 20 et 21.

A l'intérieur d'une même unité, des gradients de granulométrie s'observent souvent selon la pente. La partie amont est toujours la plus grossière, comme cela est symbolisé par les deux états de surface "haut" (h) et "bas" (b) dans l'unité 17 de la vallée d'El Itime.

Les relations illustrées par ces trois figures représentent une large gamme de situations rencontrées dans le milieu étudié. On peut en déduire que, dans ce cas, *l'état de la surface des sols est fortement lié au type d'unité morpho-pédologique.*

En effet de ce point de vue, la zone d'étude présente un cas favorable, en particulier parce que le milieu naturel, et donc l'aspect de la surface des sols, sont peu soumis à l'action de l'homme et présentent des faciès "spontanés". Nous verrons dans la dernière partie comment cet intéressant résultat va nous permettre d'utiliser la télédétection de la surface des sols dans un travail de cartographie pédologique.

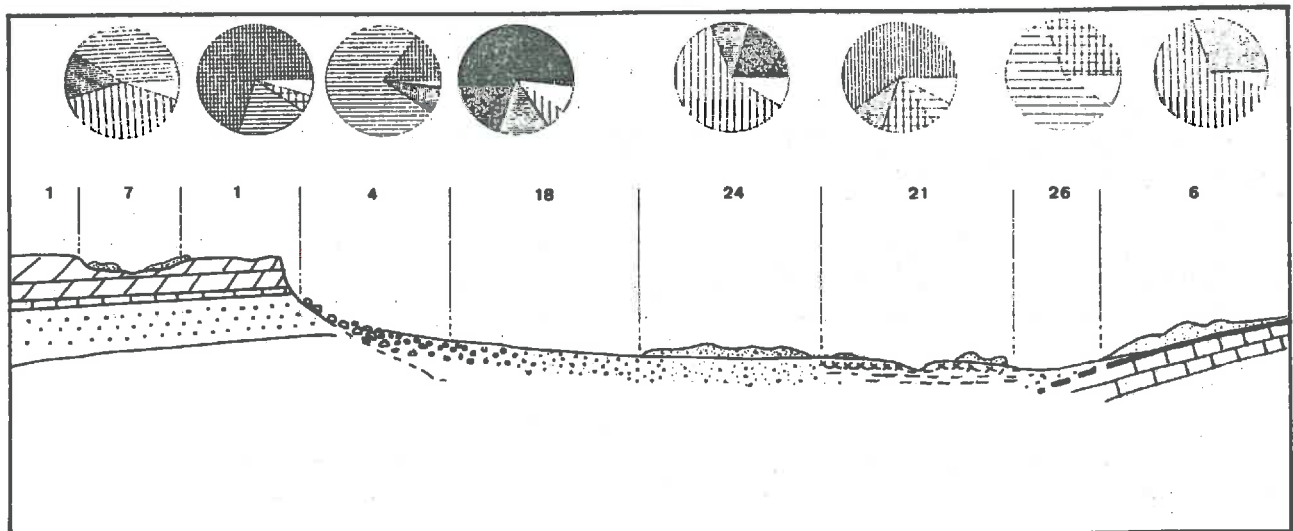


Figure 21. Proportion relatives des différents types d'ESE formant la surface des unités morpho-pédologiques du pédopaysage de la cuvette de l'oued Dekouk (voir fig. 8)

La définition des symboles est donnée au paragraphe 3.3.2.2.

ESEgy	ESEbl	ESEca	ESEgr	ESEsg	ESES	ESEsf	ESEsn	ESEsa	ESEvg	ESEla

PROPRIÉTÉS DE LA SURFACE DES SOLS

4.1 INTRODUCTION

Les descriptions morphologiques ne sont qu'une façon de caractériser la surface des sols. Si l'on s'intéresse au fonctionnement des milieux, seules des mesures permettent de quantifier les différents flux qui interviennent à la surface des sols. Parmi ceux-ci, les *flux d'énergie* sont de loin les plus importants, les flux d'eau et de matières solides sont relativement faibles et irréguliers. Le rayonnement solaire (direct et diffusé) qui atteint la surface des sols est pour partie réfléchi, pour partie absorbé, selon l'*albédo* de la surface (PERRIN de BRINCHAMBAUT, 1963) Le rayonnement absorbé est alors transformé en rayonnement thermique et/ou en chaleur latente (évaporation).

L'interaction du rayonnement solaire avec la surface des sols sera étudiée dans la troisième partie. La mesure des flux thermiques et de l'évaporation ne sera pas abordée ici, car elle fait appel à des techniques au sol et des capteurs de satellites particuliers qui sont hors du propos que nous nous sommes fixés (voir introduction générale).

En fait, pour comprendre le fonctionnement des milieux arides où l'eau est le principal facteur limitant la productivité biologique, c'est l'étude des paramètres modulant les flux d'eau qui est le point essentiel. Nous avons vu en introduction à cette deuxième partie que ces flux d'eau sont fortement influencés par les caractéristiques de la surface des sols.

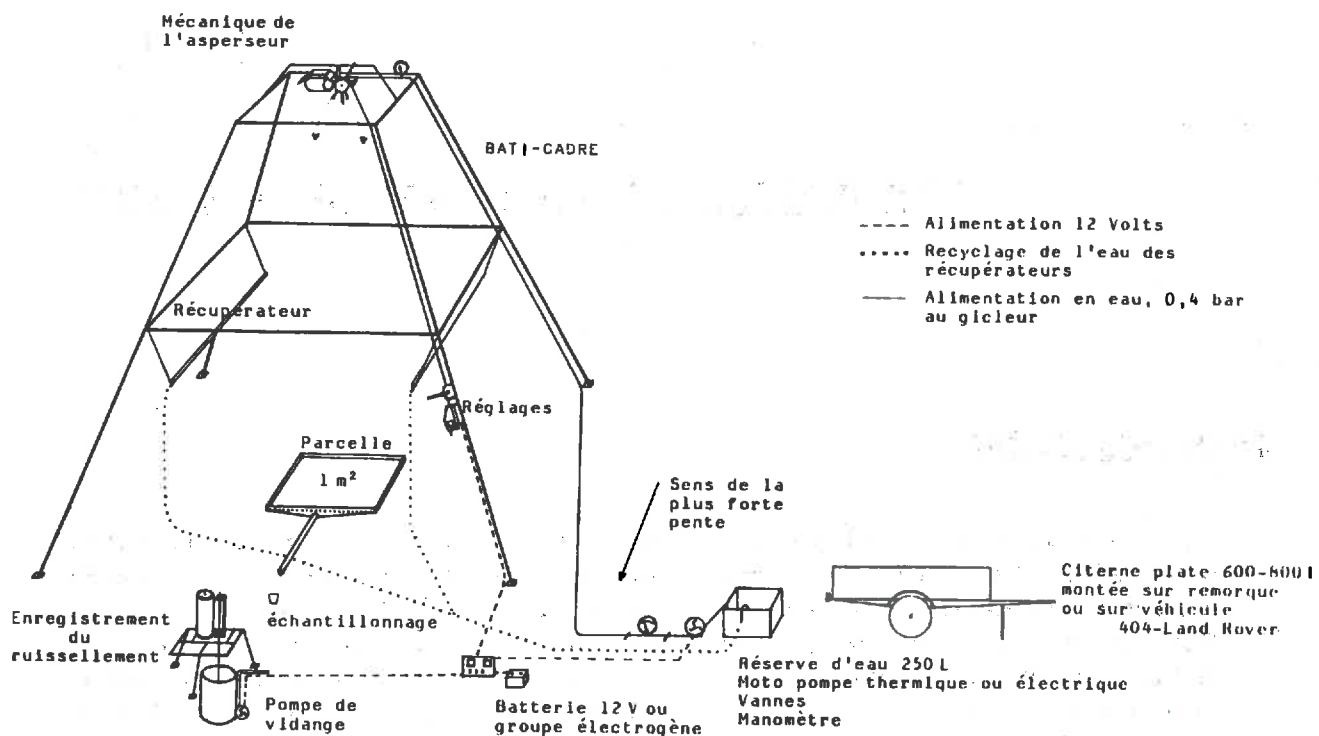


Figure 22. Le dispositif de simulation de pluie utilisé (d'après Asseline, 1984)

Un gicleur animé d'un mouvement de balancier réglable en amplitude arrose, du haut d'une tour démontable bâché, une parcelle limitée par un cadre métallique enfoncé dans le sol. L'eau qui ruisselle sur cette parcelle de 1 m² est recueillie dans une cuve dont les variations de niveau sont enregistrées par un limnigraphe à mouvement rapide.

Ainsi par exemple, les études de bilan hydrique sur bassins versants expérimentaux réalisées dans le Sud tunisien ont mis en évidence le rôle améliorant des surfaces à recouvrement sableux (voile éolien) dans le processus d'infiltration. Ces mêmes surfaces diminuent également sensiblement l'évaporation par rupture de capillarité entre le sol et l'atmosphère (FLORET et PONTANIER, 1982).

Mais c'est surtout avec le développement des techniques de simulation de pluies que les études d'hydrodynamique superficielle des sols ont pu se développer (COLLINET et LAFFORGUE, 1979; COLLINET et VALENTIN, 1979, 1984; VALENTIN, 1981; CHEVALLIER, 1982). Pour caractériser les propriétés des surfaces de notre zone d'étude du point de vue du cycle de l'eau, nous avons choisi de mesurer le comportement hydrodynamique de ces surfaces en utilisant ces techniques de simulation de pluie.

En effet, les observations en conditions naturelles sont longues, car les pluies sont rares et les dispositifs de mesures permanents sont une technique lourde qui produit peu de données. La simulation permet au contraire, grâce au dispositif léger et mobile utilisé, de réaliser facilement des mesures sur plusieurs types de surfaces soumises à différents types de pluies. Ces essais ponctuels ont été complétés par un suivi saisonnier des propriétés de la surface en relation avec le développement des plantules, réalisé sur plusieurs années en station expérimentale.

4.2 COMPORTEMENT DES SURFACES SOUS AVERSES SIMULÉES

4.2.1 Méthodologie

4.2.1.1 Appareillage

Le principe de base de tous les dispositifs de simulation de pluie est de produire des gouttes d'eau de taille et d'énergie cinétique comparables à celles des gouttes de pluies naturelles observées dans le milieu étudié. L'appareil utilisé ici est conçu pour produire un flux de gouttes de répartition spatiale homogène, l'intensité de la pluie est réglable et stabilisable pendant la durée de l'essai qui est modifiable à volonté.

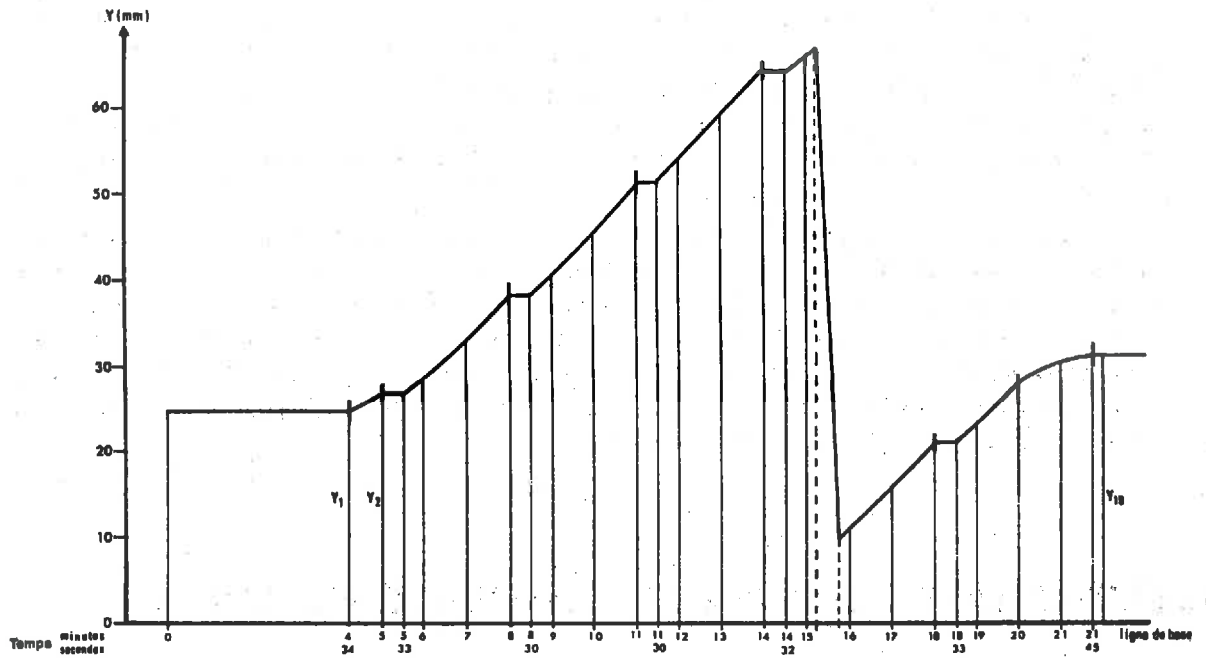


Figure 23. Exemple d'enregistrement du niveau (Y) de la cuve obtenu au cours d'une averse simulée

Les paliers observés correspondent aux prélèvements d'échantillons d'eau, la baisse de niveau à une vidange de la cuve pour éviter son débordement

Cet appareil est dérivé de celui mis au point par l'ORSTOM à Abidjan (ASSELINÉ et VALENTIN, 1978; ASSELINÉ, 1981). Inspiré de l'infiltromètre à aspersion de BERTRAND et PARR (1960), l'appareil est constitué d'une petite tour démontable qui permet d'arroser une parcelle d'essai de 1 m² avec des intensités variables et réglables au cours de l'averse.

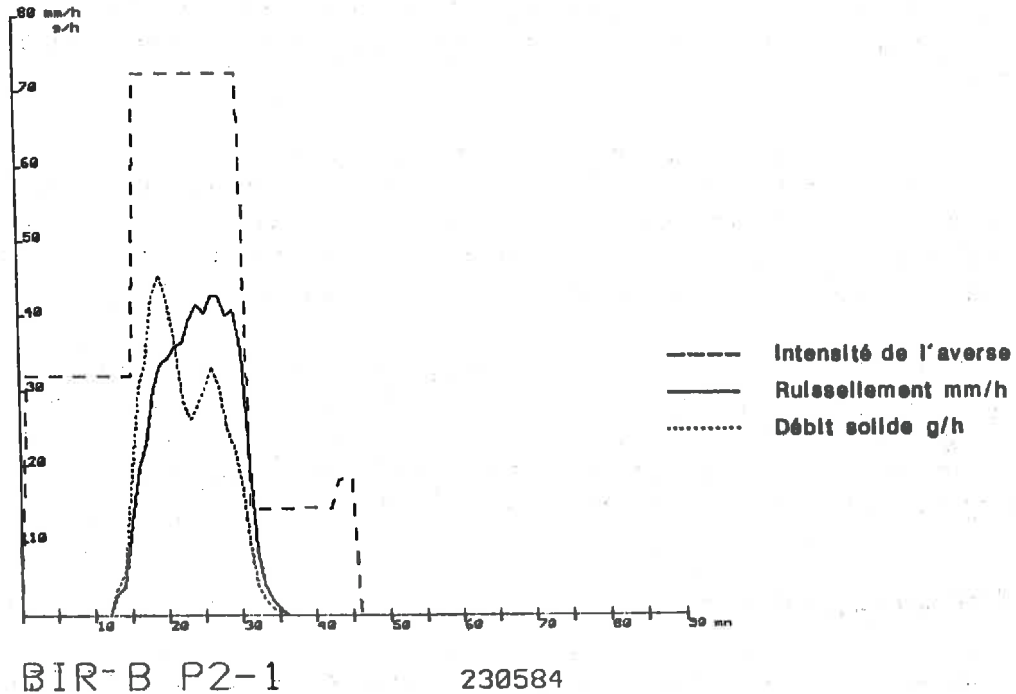
La taille réduite de la parcelle est nécessaire pour assurer la mobilité du dispositif et permettre de réaliser des mesures fines au niveau des états de surface élémentaires (ESE). Le modèle construit en Tunisie a été adapté aux conditions d'utilisation du Sud Tunisien, en améliorant son autonomie et la gamme d'intensités pluviométriques réalisable (ASSELINÉ, 1984).

Au sol, la parcelle de mesure est limitée par un cadre métallique de 1 m de côté, l'eau qui y ruisselle est recueillie à l'exutoire, dans une cuve dont le niveau est enregistré par un limnigraphe à mouvement rapide (fig. 22). Par ailleurs, des échantillons de l'eau ruisselée sont prélevés à intervalles réguliers. Leur turbidité est mesurée au laboratoire par pesée après séchage à l'étuve.

4.2.1.2 Protocole expérimental

D'après les données météorologiques disponibles sur la région et celles que nous avons recueillies sur la station de Bir Lahmar (voir 4.3.2.1), près de la moitié des précipitations annuelles a lieu sous forme de courtes averses de faible intensité, ne donnant lieu à aucun ruissellement. Les autres correspondent à quelques épisodes pluvieux d'intensité moyenne; ce sont eux qui alimentent les sols en eau et sont générateurs de ruissellement.

Dans le protocole d'essai que nous avons appliqué (tab. 6), l'averse 1 simule ce type d'événement, en utilisant une séquence de trois intensités différentes reproduisant au mieux les averses réellement observées. Nous l'avons fait suivre à quelques heures d'intervalle d'une averse d'intensité élevée et de fréquence environ cinquantenaire (averse 2, tab. 6). Nous avons ainsi cherché à simuler un événement exceptionnel, pour évaluer le ruissellement et l'érosion maxima au cours de ces orages aux conséquences souvent catastrophiques.



No	SEQ	DUREE (mn)	INTENS. (mm/h)	HAUTEUR (mm)	LRUISS. (mm)	PI (mm)	PE (mm)	Kru (o/o)	W (mm)	EROS (g)
1		15.0	32.0	8.0	0.2	6.6	1.4	2.8	7.8	0.3
2		15.0	72.5	18.1	9.2	0.0	18.1	50.9	8.9	8.2
3		12.0	14.0	2.8	0.5	0.0	2.8	17.1	2.3	0.2
4		3.0	18.0	0.9	0.0	0.0	0.9	0.0	0.9	0.0
TOT.		45.0	34.1	29.8	9.9	6.6	23.2	33.3	19.9	8.7

Figure 24. Exemple des courbes du ruissellement et du débit solide obtenues sur la parcelle SN soumise à une pluie simulée (averse 1)

Les calculs et le traçage des courbes ont été réalisés sur microordinateur avec le logiciel d'exploitation des limnigrammes et des mesures de turbidité des échantillons d'eau mis au point par ESCADAFAL et ASSELINE (1985).
Voir la signification des symboles dans le texte.

TABLEAU 6. PROTOCOLE D'AVERSSES SIMULÉES UTILISÉ
(LES DEUX AVERSES SONT APPLIQUÉES À 24H D'INTERVALLE ENVIRON)

état du sol	intensité (mm/h)	durée (mn)	hauteur totale (mm)
averse 1 a sec	30	15	28,75
	70	15	
	15	15	
averse 2 humide	120	20	40

Ce protocole a été appliqué au cours de deux campagnes à un ensemble de six parcelles correspondant à six grands types d'états de surfaces élémentaires (ESE) observés dans la zone d'étude :

- **Parcelle SN** : ESE à SOL NU, implantée sur le sol sablo-limoneux de la station de Bir Lahmar (voir 4.3.1),
- **Parcelle SF** : ESE à SABLES FINS, implantée sur le même sol, recouvert d'une voile de sables fins éoliens,
- **Parcelle SG** : ESE à SABLES GROSSIERS, implantée dans la cuvette de l'Oued Dekouk (unité pédologique n°18),
- **Parcelle GR** : ESE à GRAVIERS, implantée dans la vallée d'El Itime, (unité pédologique n°15),
- **Parcelle CA** : ESE à CAILLOUX, implantée sur le glacis à dalle calcaire de la vallée d'El Itime, (unité pédologique n°3),
- **Parcelle GY** : ESE GYPSEUX, implantée sur la terrasse gypseuse de l'Oued Dekouk (unité pédologique n°21).

4.2.2 Résultats

Les données de terrain obtenues avec l'infiltromètre se présentent essentiellement sous deux formes, d'une part un limnigramme, enregistrement détaillé des variations du niveau de la cuve au cours de l'expérience, d'autre part les teneurs en sédiments des échantillons d'eau prélevés (turbidités).

**TABLEAU 7. CARACTÉRISTIQUES DES AVERSES SIMULÉES ET PARAMETRES
HYDRODYNAMIQUES MESURÉS SUR LES PARCELLES D'ESSAI IMPLANTÉES
DANS SIX TYPES D'ÉTATS DE SURFACE ÉLÉMENTAIRES (ESE)
(VOIR LA SIGNIFICATION DES SYMBOLES DANS LE TEXTE)**

Parcelle	averse	durée (mn)	I (mm/h)	Pu (mm)	Pi (mm)	Rx (mm/h)	Fn (mm/h)	Lr (mm)	Dm (mm)	Li (mm)	Kr (%)	Ki (%)	E (g/m ²)
SN ESE à SOL NU	1a	15,0	32,0	8,0	6,6			0,3		7,7	3,7	96,3	0,0
	b	15,0	72,5	18,1	0,0	42,0	30,5	9,2		8,9	50,8	49,2	9,5
	c	15,0	16,0	4,0	0,0			0,4	0,0	3,6	10,0	90,0	0,0
	total	45,0	40,2	30,1	6,6			9,9	0,0	20,2	32,9	67,1	9,5
	2	20,0	119,5	32,8	2,4	85,0	34,5	26,7	0,7	5,4	67,1	16,5	25,4
SF ESE à SABLES FINS	1a	15,0	30,6	7,7	7,7			0,0		7,7	0,0	100,0	0,0
	b	15,0	71,3	17,8	5,9	3,0	68,3	0,3		17,5	1,7	98,3	0,0
	c	15,0	14,5	3,6	0,0			0,0	0,0	3,6	0,0	100,0	0,0
	total	45,0	38,8	29,1	13,6			0,3	0,0	28,8	1,0	99,0	0,0
	2	18,5	122,5	37,7	5,6	63,0	59,5	13,7	0,5	23,5	36,6	62,3	20,1
SG ESE à SABLES GROSSIERS	1a	16,0	30,3	8,1	8,1			0,0		8,1	0,0	100,0	0,0
	b	15,0	69,2	17,3	17,3			0,0		17,3	0,0	100,0	0,0
	c	14,0	20,2	4,7	4,7			0,0	0,0	4,7	0,0	100,0	0,0
	total	45,0	39,9	30,1	30,1			0,0	0,0	30,1	0,0	100,0	0,0
	2	20,0	116,0	38,7	38,7			0,0	0,0	38,7	0,0	100,0	0,0
GR ESE à GRAVIERS	1a	15,0	29,6	7,4	7,4			0,0		7,4	0,0	100,0	0,0
	b	15,0	66,5	16,6	1,8	29,0	37,5	5,4		11,2	32,6	67,5	2,6
	c	15,0	19,2	4,8	0,0			0,3	0,0	4,5	6,3	93,8	0,1
	total	45,0	38,4	28,8	9,2			5,7	0,0	23,1	19,9	80,2	2,7
	2	20,0	118,5	39,5	1,6	90,0	28,5	28,3	1,3	9,9	71,7	25,1	12,8
CA ESE à CAILLOUX	1a	15,0	30,5	7,6	3,5			1,5		6,1	19,4	80,3	1,0
	b	15,0	68,6	17,2	0,0	56,0	12,6	13,2		4,0	76,7	23,3	13,1
	c	15,0	19,7	4,9	0,0	9,0	10,7	2,9	0,3	1,7	59,3	34,7	1,9
	total	45,0	39,6	29,7	3,5			17,6	0,3	11,8	59,1	39,7	16,0
	2	20,0	113,0	37,7	1,9	99,0	14,0	30,3	2,3	5,1	80,3	13,5	41,2
GY ESE GYPSEUX	1a	15,0	31,5	7,9	7,9			0,0		7,9	0,0	100,0	0,0
	b	16,0	69,0	18,4	2,3	9,0	60,0	1,7		16,7	9,0	90,8	0,6
	c	14,0	19,6	4,6	0,0			0,1	0,0	4,5	1,5	97,8	0,0
	total	45,0	40,0	30,8	10,2			1,8	0,0	29,0	5,6	94,2	0,6
	2	20,0	120,5	40,2	2,0	51,0	69,5	14,3	0,8	25,1	35,8	62,4	18,6

La pente du limnigramme correspond aux débits instantanés à l'exutoire de la parcelle, donc à la mesure du ruissellement. L'intensité d'infiltration est ainsi déterminée par différence entre intensité de pluie simulée et intensité de ruissellement, l'évaporation au cours de l'expérience étant considérée comme négligeable. Cependant du fait de l'interruption de l'écoulement normal de l'eau hors de la parcelle à chaque prélèvement, le limnigramme présente des paliers dont il faut tenir compte lors de son dépouillement (fig. 23). Le traitement de ces données est donc relativement long et sujet à erreurs au cours des différentes étapes des calculs.

Pour faciliter ces derniers et gagner en temps et en fiabilité, un programme sur micro-ordinateur portable a été développé en langage Basic. Il réalise tous les calculs à partir de l'introduction des hauteurs mesurées sur le limnigramme et des données sur les prélèvements d'eau (ESCADAFAL, 1984 et ESCADAFAL et ASSELINE, 1985). Les résultats sont exprimés sous formes de tableaux et des courbes de ruissellement et de débit solide. La fig. 24 présente à titre d'exemple les résultats obtenus par traitement des données recueillies sur la parcelle SN au cours de la première averse.

Les différentes variables hydrodynamiques que l'on peut déduire de ces mesures sous pluies simulées ont été détaillées dans les travaux des hydrologues, en particulier par LAFFORGUE (1977), LAFFORGUE et CASENAVE (1980), CASENAVE, (1982). Les variables et notations suivantes sont utilisées dans le tableau des résultats de nos essais (tableau 7) :

- I** : intensité de l'averse (mm/h), mesurée précisément avec un bac pluviométrique (selon les conditions de l'essai, elle peut en effet différer sensiblement de l'intensité nominale)
- Pu** : pluie utile (mm), ou hauteur totale de l'averse appliquée
- Pi** : pluie d'imbibition, hauteur de pluie appliquée jusqu'à l'apparition du ruissellement (mm)
- Rx** : ruissellement maximum stabilisé (mm/h)
- Fn** = $I - Rx$: infiltration minimale stabilisée (mm/h)
- Lr** : lame ou hauteur d'eau ruisselée (mm)
- Dm** : détention superficielle mobilisable (mm), correspond à la petite quantité d'eau qui ruisselle après la fin de la pluie
- Li** = $Pu - Lr - Dm$: lame infiltrée (mm)
- Kr** = Lr/Pu : coefficient de ruissellement (%)
- Ki** = Li/Pu : coefficient d'infiltration (%)
- E** : "érosion", quantité totale de terre exportée hors de la parcelle (g/m^2)

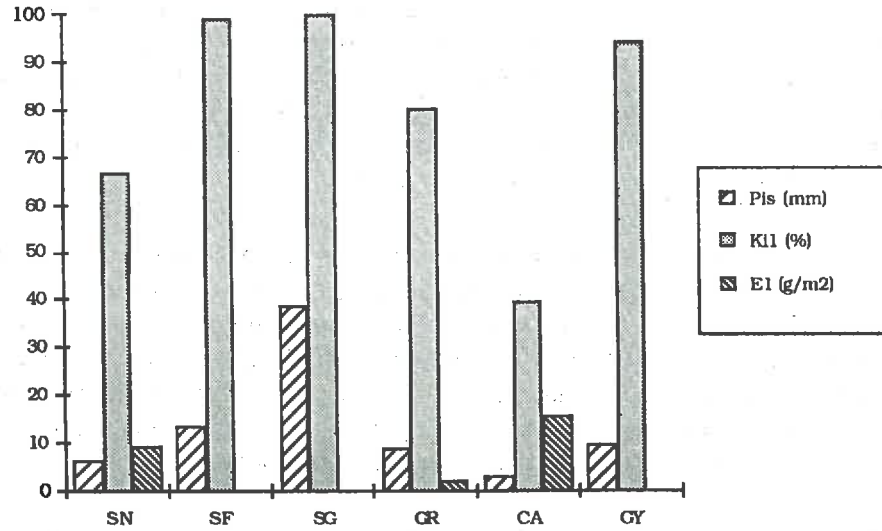


Figure 25. Pluie d'imbibition (sur sol sec, P_{is}), coefficient d'infiltration (k_{i1}) et érosion (E_1) mesurés sur les six parcelles testées au cours de l'averse 1

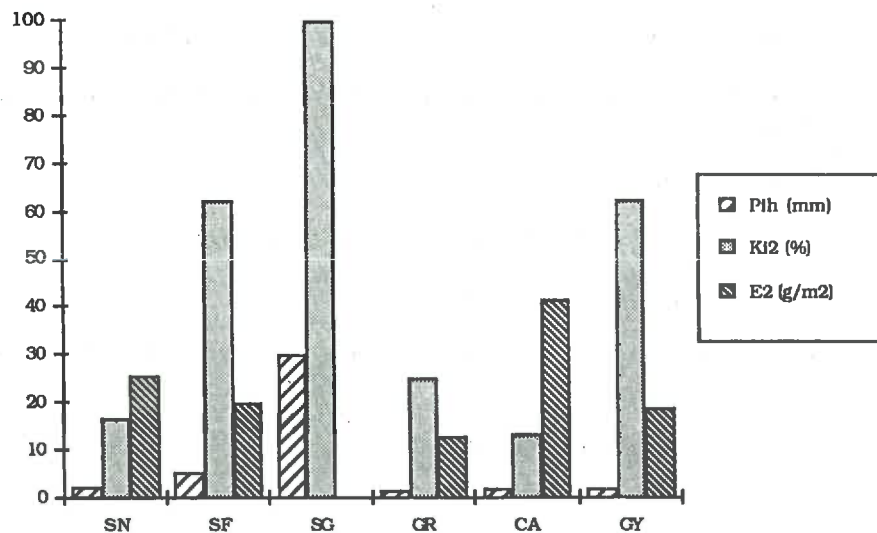


Figure 26. Pluie d'imbibition (sur sol humide, P_{ih}), coefficient d'infiltration (k_{i2}) et érosion (E_2) mesurés sur les six parcelles testées au cours de l'averse 2

La *pluie d'imbibition*, P_i , permet de comparer les conditions d'apparition du ruissellement dans les différents ESE et selon que le sol est sec (averse 1) ou humide (averse 2).

Le *coefficient d'infiltration*, K_i , est l'une des variables les plus significatives pour mettre en évidence les différences de comportement hydrodynamique. C'est le rapport de la quantité d'eau totale d'eau infiltrée au cours de l'averse, L_i , à la hauteur de la pluie simulée, P_u (quantité totale d'eau apportée). Une première lecture du tableau 7, montre que ce coefficient K_i varie ici de 13,5 à 100 %. Les six ESE étudiés présentent donc des *aptitudes à l'infiltration très différentes*.

En intégrant sur la durée de l'averse le débit solide, calculé à partir du ruissellement et de la turbidité, on obtient une estimation de la quantité de terre exportée hors de la parcelle d'essai ("érosion"). C'est une mesure de la *susceptibilité du sol à l'érosion hydrique (érodabilité)*. Dans ce cas également les données du tableau 7 montrent une gamme de variation importante de l'érosion, E , mesurée sur les différentes parcelles.

4.2.3 Discussion

4.2.3.1 Différences entre parcelles et influence de l'état hydrique

Au cours de la **première averse**, sur sol sec, le *coefficient d'infiltration est très élevé* pour les parcelles GY, SF et SG ($K_i = 94-100\%$), moyen pour GR et SN, et médiocre pour CA (voir fig. 25).

Cette dernière parcelle est en effet la première à ruisseler peu après le début de l'averse, alors que seulement 3,5 mm de pluie ont été appliqués. Pour SN, cette *pluie d'imbibition*, P_i , est également faible. Les autres parcelles infiltrent toute l'eau apportée au cours de la première phase (a) de la pluie ($I = 30$ mm/h). Le ruissellement ne s'y déclenche qu'au cours de la deuxième phase (b, $I = 70$ mm/h), pour GR, puis GY et SF où il reste très faible. La parcelle SG a par contre absorbé la totalité de la pluie ($P_i \geq P_u$). Ces différences se manifestent également au niveau de l'érosion, nulle à très faible pour SG, SF et GY, elle atteint 16 g/m^2 sur la parcelle CA, ce qui reste relativement faible.

Au cours de la **deuxième averse** d'intensité très élevée (120 mm/h) intervenant sur sol humide, les *coefficients d'infiltration diminuent fortement*, passant à 60 % environ pour SF et GY, et descendant en dessous de 20 % pour SN et CA (fig. 26).

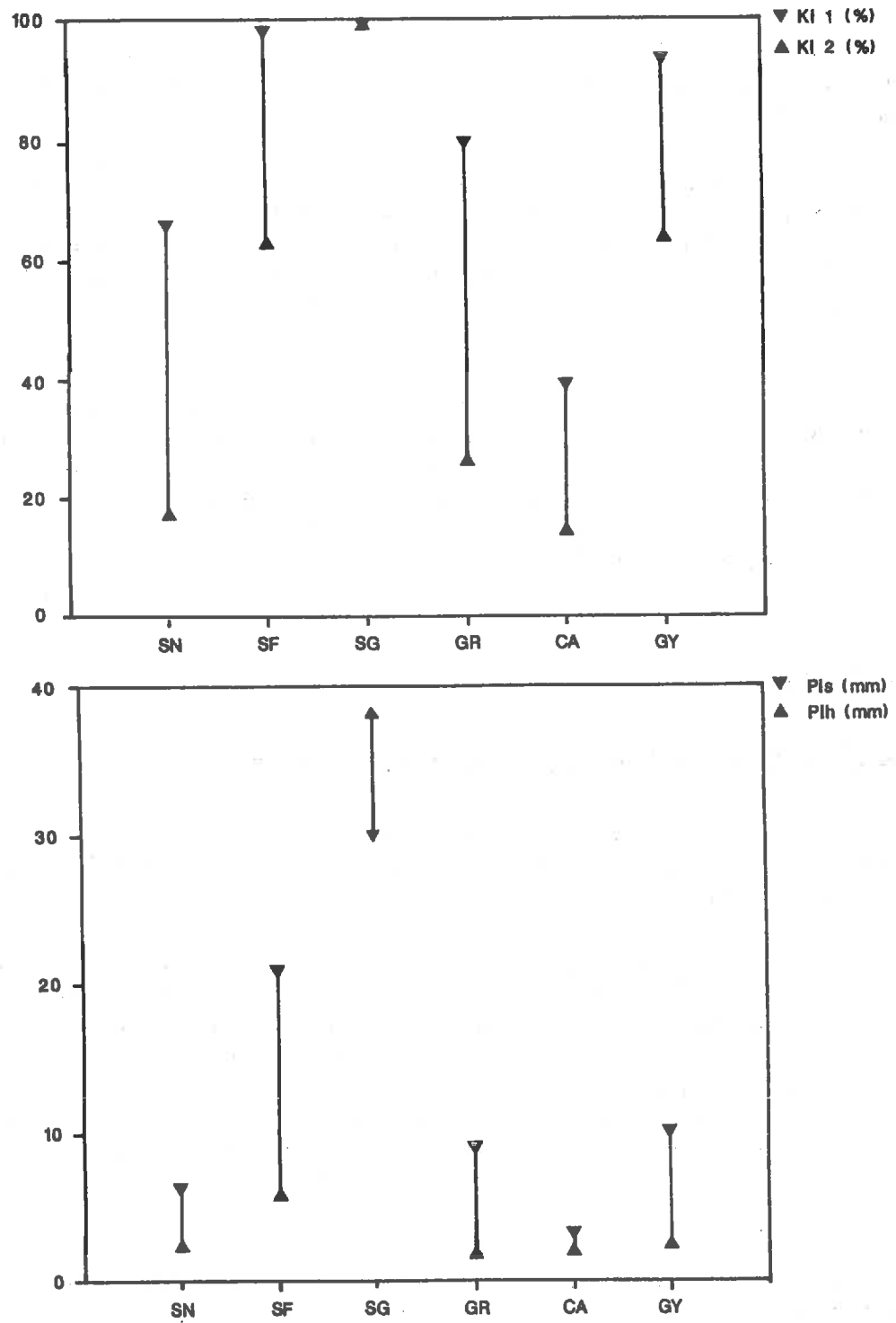


Figure 27. Différences de comportement hydrodynamique observées entre les six parcelles testées

a) Coefficients d'infiltration moyens au cours des deux averses.

b) Pluies d'imbibition sur sol sec (averse 1) et sur sol humide (averse 2).

Exception remarquable, l'infiltration est totale dans la parcelle SG. Dans le cas de cette averse, on a donc encore $P \geq P_u$ (soit 38,7 mm) pour cette parcelle, alors que dans les autres, la pluie d'imbibition (P_i) varie entre 1,6 et 5,6 mm. L'érosion se manifeste dans toutes les parcelles, sauf SG, bien entendu. Elle avoisine 20 g/m^2 dans les trois parcelles SN, SF et GY, bien que le ruissellement soit nettement plus faible dans ces deux dernières. Un maximum de 41 g/m^2 est atteint pour la parcelle CA, ce qui n'est pas surprenant vu le très faible coefficient d'infiltration ($K_i = 13,5 \%$).

4.2.3.2 Interprétation des différences de comportement entre parcelles

Le comportement hydrodynamique varie donc considérablement d'une parcelle à l'autre comme le résume la fig. 27. En passant d'un extrême à l'autre, on constate que :

- l'ESE à CAILLOUX (parcelle CA) est de loin le moins favorable à l'infiltration. Ce reg de dalle calcaire est formé de cailloux et gros graviers enchâssés dans un matériau meuble. Ces éléments grossiers réduisent la fraction de la surface qui peut être percolée par l'eau, alors que le matériau pédologique meuble est peu perméable du fait de sa texture limono-sableuse.

L'observation de lames minces d'échantillons prélevés sur ce site montre une organisation micromorphologique assez complexe (pl. 7, photo 3). Elle est caractérisée en particulier par la présence d'un micro-horizon argilo-limoneux de 0,8 à 1,2 mm d'épaisseur, à assemblage porphyrique et structure laminaire, situé entre le pavage d'éléments grossiers et le premier horizon du sol (ESCADAFAL et FEDOROFF, 1987). Au contact des éléments grossiers on observe de très nombreuses vésicules, pores sphériques parfois coalescents (pl. 7, photo 4). Elles se forment par piégeage de bulles d'air sous un écoulement boueux. ALBERGEL et al. (1986) ont montré que l'abondance de ces vésicules est effectivement un indice de faible perméabilité des surfaces.

- l'ESE à SOL NU (parcelle SN) est également caractérisé par une aptitude à l'infiltration relativement faible à l'état humide. Ceci est lié à la texture limono-sableuse du sol.

A l'état sec, par contre, l'infiltration est assez élevée au début de la pluie, la baisse de perméabilité semble donc liée à une réorganisation de la surface sous l'action de la pluie, formant une pellicule continue de faible conductivité hydraulique, comme cela a été montré sur des sols de texture comparable (MORIN et BENYAMINI, 1977). Cette fine pellicule est clairement visible sur le photogramme de lame mince. Elle est formée d'un micro-horizon limono-argileux épais de quelques centaines de microns, qui suit les irrégularités du matériau sous-jacent et le colmate à peu près uniformément (pl. 7, photo 1).

- l'ESE à GRAVIERS (parcelle GR) est essentiellement formé de graviers et cailloux plus ou moins libres, reposant sur un sol alluvial dont la terre fine a une texture nettement sableuse. Malgré la présence de ces éléments grossiers, l'infiltration y est relativement élevée; c'est un cas intermédiaire avec les ESE sableux.

- l'ESE GYPSEUX (parcelle GY), est un cas assez particulier, le ruissellement y apparaît assez vite (Pi faibles à l'état sec et humide), mais il n'atteint pas des intensités élevées. *Bien que cet ESE soit essentiellement formé d'un encroûtement gypseux induré, l'infiltration y est globalement bonne, y compris sous l'averse de forte intensité.*

Dans ce cas également, l'analyse micromorphologique permet de mieux comprendre ce résultat. L'observation des lames minces montre que l'encroûtement est constitué de fins cristaux de gypse (60 à 150 μm) emboîtés de façon assez lâche. A un fort grossissement ces microcristaux apparaissent le plus souvent orientés perpendiculairement à la surface (ESCADAFAL et FEDOROFF, 1987). Ils créent des discontinuités dans la fine pellicule limono-argileuse (50 à 100 μm) qui recouvre l'ensemble. Il n'y a donc pas ici de colmatage de la surface (pl. 7, photo 5).

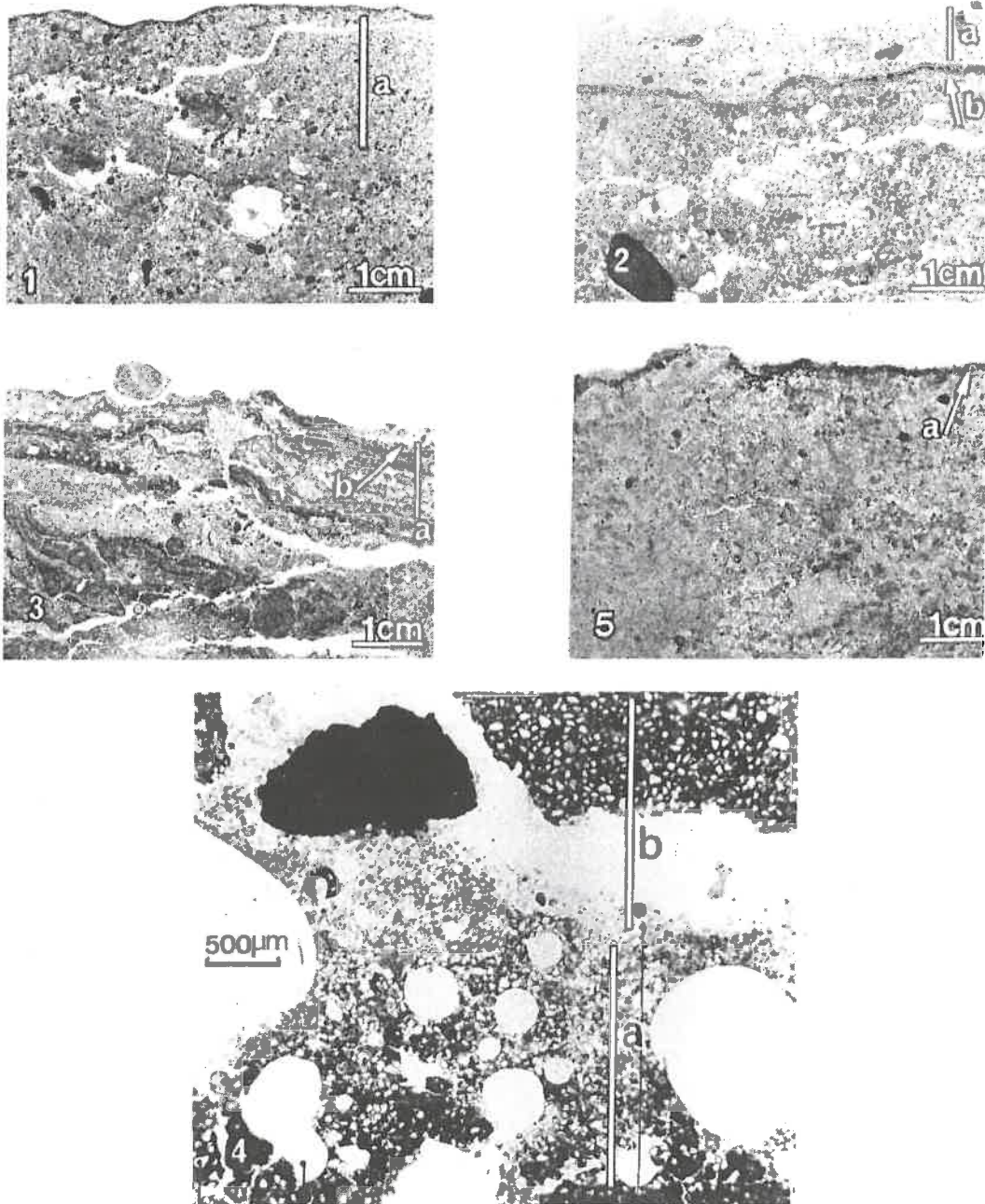
- l'ESE à SABLES FINS (parcelle SF), est constitué d'un recouvrement de sables fins quartzeux sur le même sol limono-sableux affleurant dans le cas de l'ESE à SOL NU (parcelle SN). C'est un voile éolien typique des surfaces des paysages de la Tunisie présaharienne.

Ce voile modifie considérablement les propriétés hydrodynamiques du sol, puisque l'infiltration au cours de la première averse est supérieure de 40 % à celle observée sur la parcelle SN. Au cours de la deuxième averse, cet effet s'accroît fortement, le *coefficient d'infiltration est alors presque quatre fois supérieur*. Le voile éolien protège donc le sol, en empêchant la formation d'une pellicule peu perméable sous l'impact des gouttes de pluie.

- l'ESE à SABLES GROSSIERS (parcelle SG) est formé d'une couche de sables grossiers sur un sol sableux, dans lequel les sables grossiers sont assez abondants. Cette couche s'est probablement individualisée sous l'action du piétinement du sol par les animaux et du vannage de la surface par le vent.

L'infiltration est très forte sur cet ESE, puisqu'elle a été totale au cours des deux averses. Ceci semble lié à la texture grossière du sol. Cependant, lorsque ce sol affleure, sa morphologie et ses propriétés sont à peu près les mêmes que celles observées sur la parcelle SN, sol nu sablo-limoneux (ESCADAFAL et FEDOROFF, 1987).

**PLANCHE 7 - ORGANISATION SUPERFICIELLE DE QUELQUES
ETATS DE SURFACE ELEMENTAIRES
(Photogrammes de lames minces)**



- 1- état de surface élémentaire de type "sol nu" (ESEsn). Le matériau sablo-limoneux (a) est colmaté en surface par un micro-horizon limono-argileux.
- 2- état de surface élémentaire à sables grossiers (ESEsg). (a) micro-horizon sableux granulaire ; (b) micro-horizon limono-argileux à vésicules.
- 3- état de surface élémentaire à cailloux (ESEca), sur reg de dalle calcaire. (a) micro-horizon polygénique laminaire à nombreuses vésicules, (b) micro-horizon discontinu avec pavage de graviers et de cailloux.
- 4- détail de la surface de l'ESEca (microphotographie en lumière naturelle).
- 5- état de surface élémentaire gypseux (ESEgy). (a) micro-horizon limono-argileux localement interrompu par des micro-cristaux de gypse, recouvert d'un micro-horizon sableux discontinu.

Le rôle protecteur des recouvrements sableux est donc ici à nouveau spectaculairement illustré. En lame mince observée à la loupe binoculaire, la pellicule couvrant le premier horizon du sol apparaît nettement sous le recouvrement de sables grossiers, mais elle semble marquée de discontinuités (pl. 7, photo 2). La mince couche de sable grossier empêcherait donc la pellicule de se reconstituer. Ceci ne paraît pourtant pas tout à fait suffisant pour expliquer de telles différences d'infiltrabilité, une étude microscopique ou ultramicroscopique permettrait peut-être d'éclairer ce point.

4.2.3.3 Bilan des essais sous pluies simulées

Les sols des régions arides, et notamment ceux du milieu étudié, ont une très faible stabilité structurale du fait de leur texture et de la quasi absence de matière organique. Et en effet, comme pour les sols instables sous climat tempéré (BOIFFIN, 1984), l'impact de la pluie sur le sol nu se traduit ici également par la formation d'une **pellicule** à la surface du sol et une baisse de l'infiltration.

Comme nous l'avons souligné en introduction, cet effet des organisations pelliculaires sur l'infiltration des pluies a été mis en évidence dans de nombreuses autres régions arides, en particulier dans le Sahel (VALENTIN, 1981; CHEVALLIER et VALENTIN, 1984). Dans le cas du sol gypseux, l'assemblage lâche, mais rigide, de microcristaux à sa surface résiste à l'action mécanique de la pluie, et de fait l'infiltration se maintient à toutes les intensités.

La présence d'**éléments grossiers** en surface a pour effet de réduire l'infiltration, de façon particulièrement spectaculaire dans le cas de la parcelle CA. Des résultats contraires ont été obtenus par TROMBLE (1976) sur des sols de parcours en Arizona; le ruissellement y est corrélé négativement avec l'abondance des cailloux et des graviers.

En fait, l'état de surface élémentaire à cailloux que nous avons étudié, est formé de gros éléments de dalle calcaire enchâssés dans un matériau meuble peu perméable. Les éléments grossiers de la parcelle GR sont plus petits et peu liés au matériau sur lequel ils reposent; l'infiltration y est meilleure. De fait, différents travaux ont montré que les graviers diminuent le ruissellement (EPSTEIN et al., 1966; COLLINET et VALENTIN, 1979). Du fait de leur petite taille, la pression exercée par les graviers sur l'horizon sous-jacent est faible et ils ne sont généralement pas **enchâssés**, contrairement aux cailloux. *Le degré de liaison des éléments grossiers avec le sol sous-jacent semble donc jouer un rôle déterminant dans l'infiltrabilité.*

Ceci rejoint le cas des états de surface élémentaires à **recouvrement sableux** qui protègent le sol de l'impact de la pluie, où l'infiltration est excellente. Ces sables sont très triés par le vent et ne contiennent pas de fraction fine. Leur perméabilité n'est donc

pas ici limitée par la présence d'éléments fins comme cela a été observé sur des sables légèrement limoneux (KEMPER et NOONAN, 1970).

L'influence de la topographie et du microrelief n'ont pu être pris en compte dans cette étude, compte tenu de la taille réduite de la parcelle de mesure. En général, plus le **microrelief** est accentué, plus l'infiltration est élevée, comme cela a été nettement mis en évidence dans les études de simulation de pluie sur parcelles cultivées, notamment en Tunisie aride (ESCADAFAL et al., 1986).

L'effet des microreliefs naturels a été relativement peu étudié à notre connaissance, sauf par ECKERT et al., (1978) qui ont surtout insisté sur l'impact des techniques de gestion des parcours. Dans notre zone d'étude, les microreliefs les plus importants sont formés par les buttes sableuses liées aux touffes de végétation, leur effet est donc doublement positif sur l'infiltration, par leur texture et leur morphologie.

En ce qui concerne la **pen**te, son effet se manifeste principalement au niveau de l'érosion. Les mesures de turbidité des eaux ruisselées nous ont permis de calculer les quantités de terre exportées des parcelles, en suspension dans l'eau, au cours des averses simulées.

Des différences importantes entre parcelles ont été observées. Cependant, cette mesure ne donne en fait qu'une idée de l'érodabilité intrinsèque des matériaux de surface. Elle ne tient pas compte des éléments qui sont transportés autrement qu'en suspension, ni de l'effet de la pente et de la concentration du ruissellement. Or ce sont en fait les facteurs essentiels dans les processus d'érosion hydrique linéaire qui caractérisent les paysages étudiés. Les données d'"érosion" que nous avons obtenues sont donc à interpréter dans cette perspective.

En conclusion, nos expérimentations ont permis de mettre en évidence *de grandes différences dans l'aptitude à l'infiltration des parcelles et de montrer qu'elles sont fortement liées à la granulométrie des ESE.*

Ces résultats sont corroborés par ceux présentés par CASENAVE et VALENTIN (1988) dans une sythèse de nombreuses mesures faites sous pluies simulées au Sahel. Ils se sont particulièrement intéressés à un type d'état de surface, les croûtes, et montrent que des liens existent entre le type génétique et les coefficients d'infiltration. Cependant au sein d'un même type génétique ces coefficients peuvent varier beaucoup en fonction de la composition granulométrique.

Ainsi, la typologie des ESE de notre zone d'étude basée essentiellement sur la granulométrie, a l'avantage d'être *objective* (elle ne nécessite pas d'interprétation génétique) et d'être *facilement mise en relation avec le comportement hydrodynamique.*

4.3 SUIVI SAISONNIER DE L'ÉTAT DE LA SURFACE D'UN SOL DE LA RÉGION.

Jusqu'à présent nous avons vu comment notre méthode de description hiérarchisée permet de caractériser l'état de la surface d'un sol à un instant donné, et les techniques de mesure des propriétés hydrodynamiques des ESE (états de surface élémentaires) qui la composent.

Cette vision instantanée d'une surface peut n'être que très partielle si son état varie notablement en fonction du temps. Pour avoir une idée de cette variabilité, nous avons réalisé, par une expérimentation en station, un suivi de l'évolution saisonnière de la surface d'un sol caractéristique de notre zone d'étude.

Une station d'expérimentation a été implantée entre Médenine et Tataouine, à 3 km à l'ouest du village de Bir Lahmar (voir pl. 1), dans une friche, sur un sol sablo-limoneux à nodules calcaires typique de la région (ESCADAFAL, 1979; MTIMET, 1984). Il porte une végétation rare de ligneux bas et d'annuelles variées, dérivée de la steppe par mises en culture épisodiques.

Des études phytoécologiques ont mis en évidence un blocage dans la régénération de ces friches postculturales. Certaines espèces, en effet, ne parviennent pas à se réinstaller après l'abandon de la culture (TELAHIGUE, 1981; TELAHIGUE et al., 1987). Ces auteurs ont suggéré que l'influence des états de surface sur la germination des plantules puisse intervenir dans ce phénomène.

La surface de ce sol sablo-limoneux présente une alternance de sol nu et de sol recouvert de sables fins voile éolien, soit deux états de surface élémentaires typiques de la région. Leur aptitude à l'infiltration a été mesurée sous pluies simulées sur les parcelles SN et SF, dont les résultats ont été développés au paragraphe précédent.

4.3.1 Dispositif expérimental

L'objectif de cette étude est de suivre les variations de l'aspect et des propriétés de la surface du sol en relation avec les conditions climatiques. Celles-ci ont été caractérisées grâce à un poste météorologique complet (mesures des températures de l'air et psychrométrie), un dispositif pluviométrique et pluviographique et deux anémomètres complétant l'installation. Les données météorologiques ont été relevées trois fois par jour (ESCADAFAL et MTIMET, 1981b).

Pour observer les éventuelles modifications saisonnières de l'aspect de la surface, deux parcelles-échantillons de 8 m x 4 m y ont été délimitées. Comparables en tous points, elle couvrent chacune une mosaïque des deux types d'ESE. La première parcelle a fait l'objet d'un suivi morphologique basé sur des descriptions réalisées après chaque

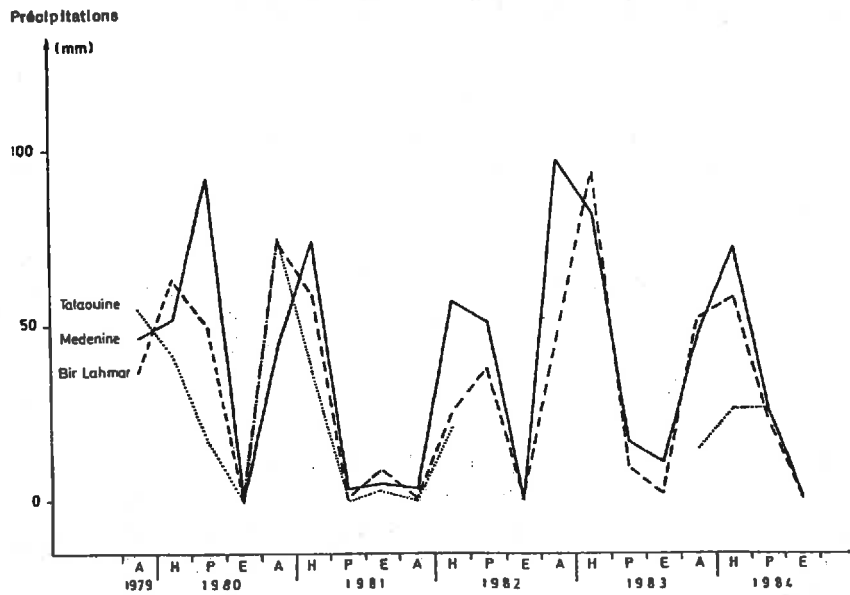


Figure 28. Répartition saisonnière des précipitations mesurées à Bir Lahmar et observées sur les stations voisines

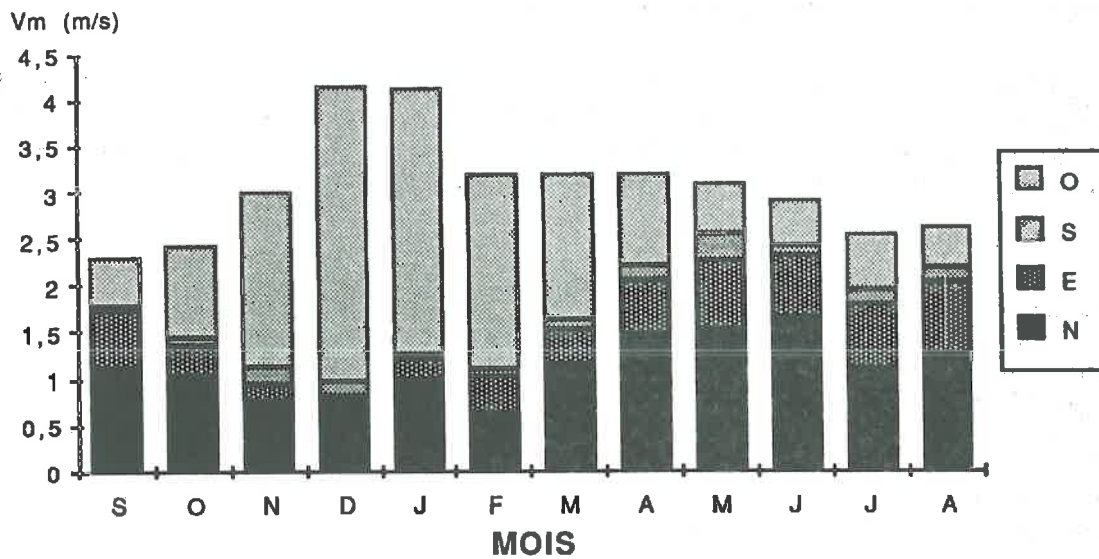


Figure 29. Vitesse moyenne mensuelle des vents et fréquence par direction mesurées à la station de Bir Lahmar (1980-1983)

événement climatique important. A cet effet, les fiches de terrain et la technique de photographie à la verticale décrites dans le chapitre 2 ont été utilisées. De plus, un filet à maille de 10 cm a été placé à l'horizontale, à 15 cm au dessus de la parcelle pour permettre un repérage fin des changements de répartition des états de surface élémentaires.

Parallèlement, l'évolution de l'humidité de surface a été suivie par prélèvements réguliers d'échantillons sur la deuxième parcelle. La teneur en eau pondérale a été mesurée dans chaque état de surface élémentaire selon les strates suivantes: 0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, puis tous les 20 cm jusqu'à 1 m.

La *cohésion* du sol nous a paru être un paramètre intervenant dans le développement des plantules. L'effet d'obstacle des croûtes de battance sur la levée des semis a été souligné depuis longtemps par les agronomes (HANKS et THORP, 1957; HANKS, 1960; HOLDER et BROWN, 1974; BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976, parmi de nombreux travaux). Ces études se sont souvent appuyées sur la mesure des propriétés mécaniques de la surface des sols (GOYAL et al., 1979).

Les premiers dispositifs développés, tels le module de rupture (RICHARDS, 1953) ou le fil de pêche enterré (BENNET et al., 1964), ont été abandonnés au profit d'appareils sophistiqués, comme les pénétromètres enregistreurs (HEGARTY et ROYLE, 1977; BRADFORD et GROSSMAN, 1982). Dans la catégorie des petits appareils portables, robustes, peu onéreux et faciles à mettre en oeuvre, nous avons sélectionné un *scissomètre de poche* (LIU et THORNBURN, 1962; SEROTA et JANGLE, 1972). Ce type d'appareil, couramment utilisé pour des tests de résistance des matériaux dans les travaux publics, a été employé avec succès par PAGE et HOLE (1977) dans une étude de l'effet de la cohésion d'un sol cultivé sur la levée. Nous avons ainsi réalisé, simultanément aux mesures d'humidité, des mesures de la *résistance au cisaillement* de la strate la plus superficielle (0-2 cm).

Enfin, le *développement des jeunes plantules* qui apparaissent spontanément après les périodes pluvieuses a été suivi au printemps par comptage sur une série de 6 placettes maillées de 50 cm de côté. L'ensemble de cette station a été mis en défens; elle a également servi de support à d'autres expérimentations sur l'évolution des surfaces labourées et scarifiées en conditions naturelles ou sous pluies simulées (ESCADAFAL et al., 1986).

**TABLEAU 8. PRÉCIPITATIONS JOURNALIÈRES OBSERVÉES À BIR LAHMAR ENTRE 1979 ET 1985
(CLASSÉES PAR HAUTEUR)**

PLUIE-JOUR (mm)		Pj<1	1<Pj<5	5<Pj<10	10<Pj<20	20<Pj<30	30<Pj<40	40<Pj<50	Pj<50
20j	j	3	9	3	3	1	0	0	1
1979/1980	mm	1,5	18,6	15,2	36,8	26,1	0	0	51,0
149mm	%	1	12,5	10,2	24,7	17,5	0	0	34,1
22j	j	6	7	5	2	1	1	0	0
1980/1981	mm	3,3	17,8	34,0	29,5	21,3	35,2	0	0
141,1mm	%	2,4	12,6	24,1	20,9	15,1	24,9	0	0
14j	j	5	5	1	2	1	0	0	0
1981/1982	mm	1,8	8,3	5,4	29,1	18,2	0	0	0
62,8mm	%	2,9	13,2	8,6	46,4	28,9	0	0	0
19j	j	4	6	4	2	2	1	0	0
1982/1983	mm	2,4	12,6	27,9	35,6	40,4	33,7	0	0
152,6mm	%	1,6	8,2	18,3	23,3	26,5	22,1	0	0
16j	j	2	5	4	1	3	1	0	0
1983/1984	mm	1,0	11,3	24,3	10,0	54,2	31,4	0	0
132,2mm	%	0,7	8,5	18,4	7,6	41,0	23,8	0	0
28j	j	5	10	7	3	2	1		
1984/1.3.85	mm	2,5	18,1	43,4	45,0	53,5	30,0		
192,4	%	1,3	9,4	22,5	23,4	27,8	15,6		

**TABLEAU 9. NOMBRE D'AVERSSES PAR CLASSES D'INTENSITÉ À BIR LAHMAR
(OBSERVATIONS PLUVIOGRAPHIQUES DU 27.09.79 AU 16.01.85)**

Imax sur 5 min (mm/h)	0-<2	2-<5	5-<10	10-<20	20-<30	30-<40	40-<50	50-<60	60-<70	70 et +
Nombre d'averses	78	17	26	11	7	5	5	3	1	2
% N Total (>2mm)		22	33	14,3	9,1	6,5	6,5	3,9	1,3	2,6
Moy. Imax sur 5mn		3,2	6,2	14,1	23,7	33,3	43,6	56,0	60,0	99,0
Hauteur cumulée	113,0	37,5	54,5	51,5	28,0	50,0	53,5	59,0	6,5	42,5
Hauteur moyenne	1,4	2,2	2,1	4,7	4,0	10,0	10,7	19,6	6,5	21,3
% Hauteur totale	22,8	7,2	11,0	10,4	5,6	10,1	10,8	11,9	1,3	8,6
% Hauteur averses>2 mm/h		9,8	14,2	13,4	7,3	13,1	14,0	15,4	1,7	11,1

4.3.2 Résultats

4.3.2.1 Mesures climatiques

L'état hydrique du sol, et de sa surface en particulier, dépend en premier des apports d'eau sous forme de précipitations, mais aussi des températures et des vents. Les apports sous forme de condensations occultes (rosée) n'ont pas été mesurés ici, ils ont été estimés dans une station plus côtière du sud Tunisien à environ 2,5 % de l'apport total (BOURGES et al., 1977).

a) fréquence et intensité des précipitations

Sur la période 1979-1984 la moyenne annuelle des hauteurs d'eau précipitées est de 127,6 mm contre 155,6 mm sur la même période à Médenine, station située 21 km au nord. La répartition saisonnière de ces pluies est très variable, seul l'été est généralement sec, alors que tous les mois des autres saisons de l'année peuvent être pluvieux, avec une dominante pour les mois d'hiver (fig. 28). Les différences entre trois stations de Bir Lahmar, Médenine et Tataouine qui apparaissent sur cette même figure, montrent également que la répartition spatiale est loin d'être régulière. Quant à la variabilité interannuelle, elle atteint un facteur 3 entre 1981-82 et 1984-85.

L'importance des averses est également très variable, les pluies faibles sont les plus nombreuses alors que la fréquence des pluies importantes varie suivant les années (Tab. 8). Les intensités observées montrent à quel point ces pluies sont irrégulières, ainsi, 22,8 % de la hauteur d'eau tombée correspond à des averses dont l'intensité maximale sur 5mn est inférieure à 2 mm/h, alors que les averses d'intensité maximale supérieure à 40 mm/h représentent 42,2 % des autres averses (tab. 9).

b) températures et régime des vents

La moyenne des températures est de 11,6° en hiver et de 27,4° en été, avec des minima autour de 0 à 2° et des maxima avoisinant les 45°. Le régime des vents est une alternance de vents d'ouest assez irréguliers et parfois violents et de vents d'est plus faibles et réguliers, mais soutenus comme le montre les moyennes mensuelles de la fig. 29. Plusieurs tempêtes de sables sont survenues, mais elle n'ont pas fait l'objet de mesures particulières.

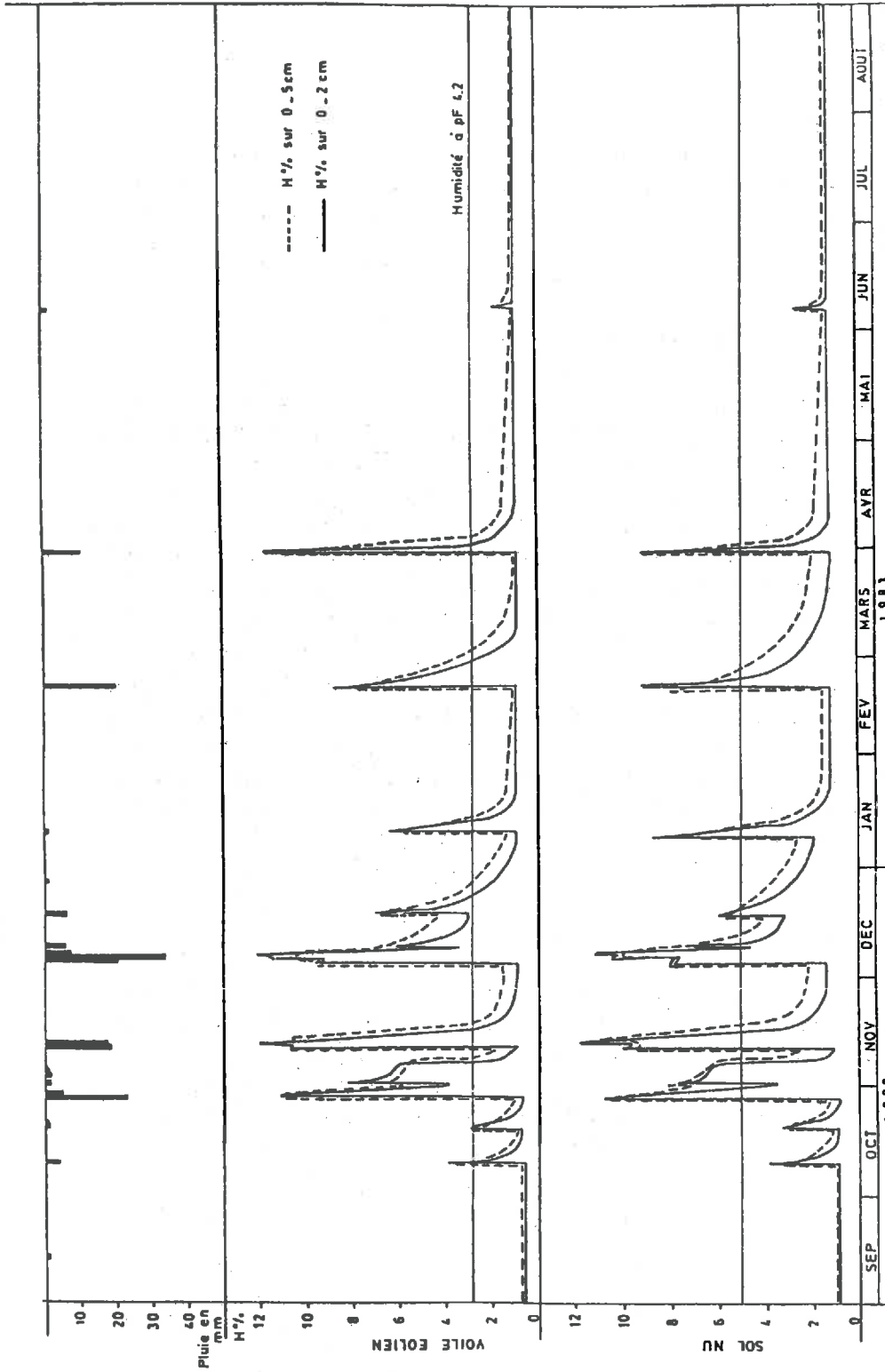


Figure 30. Précipitations et Humidité pondérale (H%) mesurée selon deux profondeurs sur le sol nu et le voile éolien à la station expérimentale de Bir Lahmar (exemple de l'année 1982-1983)

Les deux courbes sont très semblables, mais on remarque que le voile éolien se dessèche plus vite et que les humidités à pF 4,2 sont nettement différentes.

4.3.2.2 Evolution morphologique

Les observations et photographies des parcelles ont permis de mettre en évidence une faible évolution de la morphologie de la surface des parcelles suivies. Des modifications de la répartition du voile éolien ont été observées, surtout après des vents violents. Mais à la pluie importante suivante, le sable se replace près des touffes de végétation et les surfaces de sol nu réapparaissent. Les seuls éléments de la surface qui ont nettement varié sont les végétaux qui se sont développés après chaque phase pluvieuse importante. Une accumulation de débris organiques et un épaississement du voile éolien ont été observés sur la première parcelle, mais il s'agit peut-être d'un artefact dû à la présence du filet.

De fait, la morphologie de la surface étudiée n'a que peu évolué en quatre ans. Ceci peut être dû à la taille restreinte de l'échantillon. L'évolution vers une extension du voile éolien se dessine pourtant, l'augmentation du couvert végétal qui s'observe après plusieurs années de mise en défens devant accélérer cette tendance.

Nous retiendrons de cette expérience que *les variations ponctuelles de l'état de la surface liées aux vents de sable ou aux précipitations paraissent se compenser à l'échelle annuelle.*

4.3.2.3 Humidité de surface

Les mesures d'humidité pondérale réalisées sur la parcelle d'essai ont permis de suivre l'évolution saisonnière de l'état hydrique du sol pendant la période 1980-1983. La figure 30 représente, en regard des données pluviométriques journalières, les variations de la teneur en eau des strates 0-2 cm et 0-5 cm dans le cas de l'année 1982-83.

Sur l'ensemble des trois années, nous avons distingué les périodes favorables à la germination et au développement de jeunes plantes spontanées, en utilisant l'humidité à pF 4,2 comme indicateur de l'aptitude de la strate considérée à satisfaire leurs besoins en eau. Comme l'humidité à pF 4,2 est plus élevée pour le sol nu, bien que ce dernier se dessèche moins vite, le nombre et la durée des périodes favorables aux germinations y est plus faible que pour le voile éolien (fig. 30). Ces paramètres sont récapitulés, pour l'ensemble des trois années de mesures, sur la figure 31.

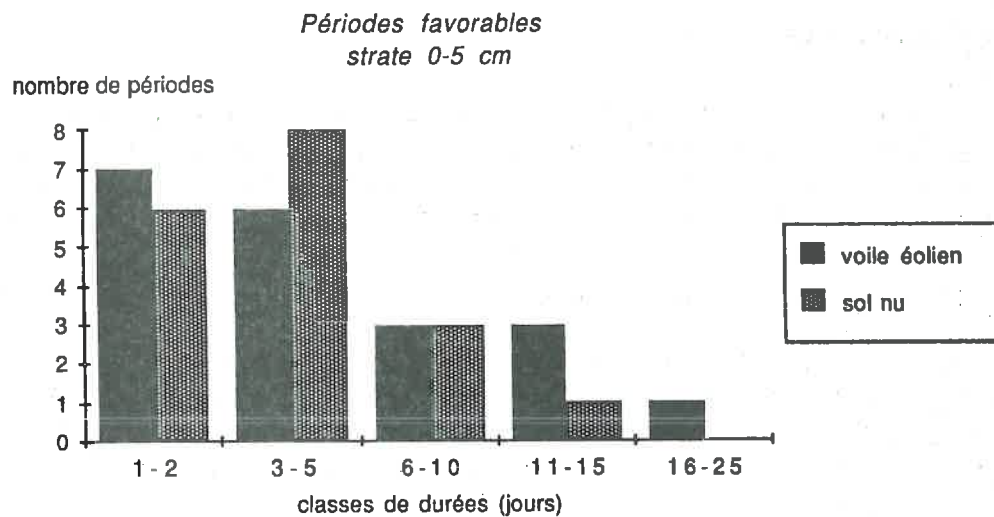
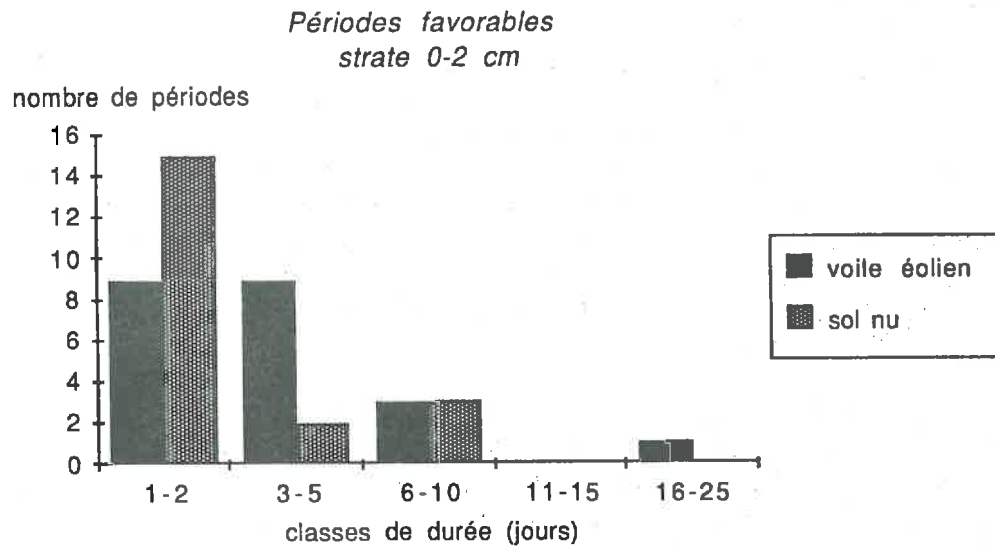


Figure 31. Nombre de périodes favorables au développement des jeunes plantules sur le sol nu et sur le voile éolien, classées par durées (Station de Bir Lahmar, hiver 1980- été 1983)

- a) Nombre de périodes pendant lesquelles la strate 0-2 cm a une humidité supérieure à pF 4,2.
 b) Nombre de périodes pendant lesquelles la strate 0-5 cm est à une humidité supérieure à pF 4,2.

4.3.2.4 Cohésion et taux de germination

a) cohésion

La mesure de la résistance du sol au cisaillement entre 0 et 2 cm a été réalisée en même temps que celle de l'humidité. Elle est assez délicate car les ailettes de l'appareil doivent pénétrer dans le sol sans le fracturer, suivant la difficulté 10 à 30 répétitions ont été faites par mesure. Le graphique de la fig. 32 montre les valeurs moyennes obtenues en fonction de l'humidité, dans le cas du sol nu et du voile éolien.

Les propriétés mécaniques de ces deux états de surface élémentaires sont très différentes. Le sable sec est très peu résistant au cisaillement; au contraire le sol nu est très cohérent en dessous de 5 % d'humidité, la résistance devient très élevée et l'appareil ne peut plus alors être introduit dans le sol sans le briser. Lorsque l'humidité augmente le sable devient légèrement plus résistant, alors que la cohésion du sol nu diminue; ainsi les valeurs de résistance de ces deux matériaux se rapprochent à l'état humide.

b) taux de germination

Les comptages réguliers ont montré que la densité maximale des jeunes plantules, qui se développent spontanément après humectation du sol, est atteinte 20 à 30 jours après une pluie conséquente (d'au moins 30 mm environ). Dans le cas du sol nu, le maximum observé a été de 50 plantules au m² contre 140 pour le voile éolien, lors de nos mesures du printemps 1981. Ces valeurs ne sont qu'indicatives, car, contrairement aux autres mesures, ces comptages n'ont pu être réalisés sur plusieurs années avec un nombre de répétitions suffisant.

4.3.3 Discussion

Ces données sur l'évolution saisonnière de la surface d'un sol du Sud Tunisien amènent quelques remarques sur le développement de la végétation annuelle, et le choix des dates d'observation de la surface en fonction des objectifs de l'étude.

4.3.3.1 Influence des états de surface sur les germinations

Les périodes favorables à la germination de jeunes plantes ont été définies un peu arbitrairement en utilisant l'humidité au pF 4,2 comme valeur seuil. La durée de ces périodes n'a donc pas de signification absolue, mais exprime des tendances et permet des comparaisons.

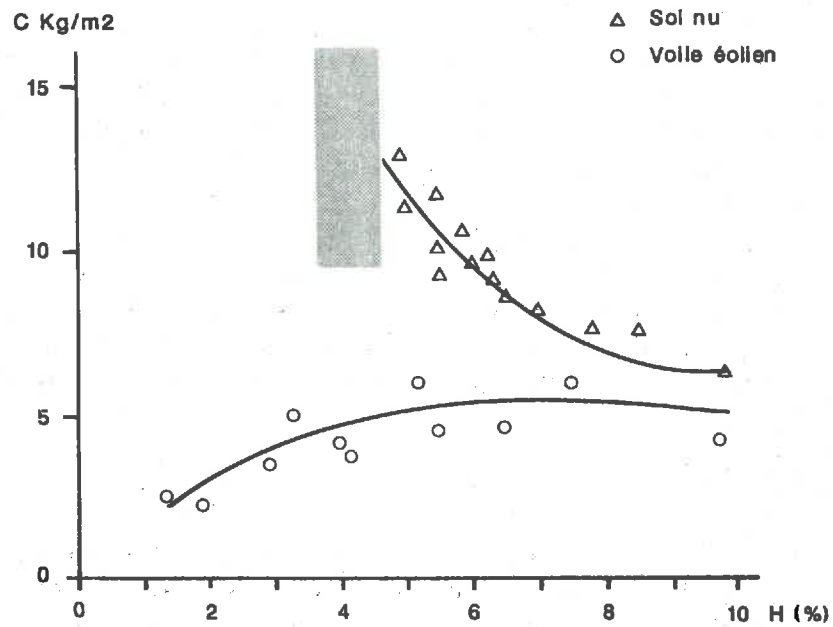


Figure 32. Cohésion de la surface du sol nu et du voile éolien en fonction de la teneur en eau (H)

Valeurs moyennes de mesures de résistance au cisaillement (C)
réalisées avec un scissomètre de poche dans la tranche 0-2 cm.

Zone en grisé : En dessous de 5 % de teneur en eau, le sol nu devient trop cohérent pour permettre la pénétration de l'instrument de mesure, la cohésion tend vers des valeurs très élevées.

Cette durée des périodes favorables à la germination est toujours supérieure dans le cas du voile éolien, quelle que soit la strate considérée. La figure 31 montre en effet que le sol nu est caractérisé par un nombre élevé de périodes favorables courtes, alors que le voile éolien présente un nombre plus important de périodes favorables longues. Comme on pouvait s'y attendre, la strate 0-2 cm se dessèche plus rapidement, mais les petites pluies isolées contribuent plus nettement à son humectation dans le cas du voile éolien, et c'est en hiver que le nombre de jours favorables est le plus élevé.

La température de l'air et les vents interviennent dans la vitesse de dessiccation du sol. Ils modulent donc les possibilités de développement des plantules liées avant tout au régime des précipitations. La précision des mesures n'a pas été suffisante pour mettre en évidence ces nuances. Les vents chauds sahariens (sirocco) sont pourtant connus pour leur action dévastatrice sur les jeunes plantules, mais nous n'en avons pas observé en période de germination pendant les trois années de mesure. Notons simplement qu'en hiver, période la plus favorable hydriquement, les températures moyennes sont suffisantes pour permettre un développement des végétaux (à l'exception de quelques courtes périodes froides). Les possibilités de germinations sont par contre nulles en été par absence ou manque d'eau.

Dès que sa teneur en eau descend en dessous de 5 %, ce qui correspond au pF 4,2, le sol nu devient très cohérent, alors que le sable devient bouillant. Ainsi, lorsque la strate 0-2 cm est desséchée, les plantules peuvent continuer à pousser dans le voile éolien, si elles sont alimentées en eau par la strate inférieure. Dans la même situation hydrique, le sol nu bloque au contraire la levée de plantules qui ne peuvent traverser la partie la plus superficielle indurée par dessiccation. Ce phénomène est d'ailleurs bien connu des agronomes et des phytoécologues.

En appliquant cette observation aux résultats présentés sur la fig. 31, on en déduit que la proportion des périodes favorables est de 13,4 % par an sur la surface à voile éolien (durée moyenne 6,1 jours), contre 5,1 % et une durée moyenne de 2,4 jours pour le sol nu. Or, les différences de taux de germination observées entre les deux états de surface sont du même ordre.

Les problèmes de développement spontané des plantules constatés par les phytoécologues sur les parcours dégradés, semblent donc liés au fait que les états de surface à sol nu y dominant, états très peu favorables aux germinations spontanées, comme nous venons de le montrer. Remarquons enfin que la cohésion étudiée ici joue également un rôle très important dans la sensibilité du sol à la déflation. Avec le microrelief, ce sont les paramètres édaphiques principaux intervenant dans les équations d'estimation de l'érosion éolienne (WOODRUFF, 1965).

4.3.3.2 Observation de la surface en fonction de ses fluctuations saisonnières

Force est donc de constater qu'en Tunisie présaharienne, la végétation annuelle ne peut se développer que lors de courts épisodes et sur des états de surfaces favorables. Ainsi, la surface des sols n'y est le plus souvent couverte que d'une steppe lâche de ligneux bas pérennes.

En dehors des interventions humaines à fort impact (surpâturage, défrichement, cultures, et travaux non agricoles), l'état de la surface des sols de la région étudiée semble donc présenter un aspect relativement stable à une échelle interannuelle. Ce constat est basé sur nos mesures en station, mais aussi nos observations tout au long des prospections sur le terrain depuis 1979. Cependant, le choix de la période d'observation de la surface doit tenir compte des fluctuations de son état en fonction des événements climatiques et des objectifs de l'étude.

Si l'on veut caractériser les matériaux de surface, il faut éviter de le faire après une période de vents forts qui auront dispersé les sables. Après une pluie, les différents matériaux sont mieux visibles, et il peut être intéressant de les observer à l'état humide, puis à l'état sec, sachant que l'humidité a un effet variable sur la couleur.

Pour observer les différences de comportement hydrique entre les surfaces, une observation faite quelques semaines après des pluies importantes peut mettre en évidence les zones ayant permis un développement de la végétation spontanée. Ce type d'observation permettrait un classement des milieux en fonction de leur aridité édaphique (FLORET et PONTANIER, 1984).

En tenant compte des variations prévisibles ou connues de l'état de la surface des sols de la région, il est donc possible de déduire de son observation certains caractères du milieu, comme l'ont montré les relations étroites entre sols, végétation et états de surface mises en évidence dans la première partie. Cette conclusion a de nombreuses applications pour la cartographie thématique de ces milieux, en particulier par télédétection.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

L'importance de certaines caractéristiques de la surface du sol a été remarquée pratiquement depuis le début de l'étude des zones arides, et particulièrement soulignées ces dernières années. Pour tenter de dépasser les approches partielles de chacune des différentes disciplines étudiant les milieux arides, nous avons proposé une démarche plus complète, basée sur une approche globale de la surface du sol considérée comme l'interface sol-atmosphère.

La **première étape** de cette approche a consisté à définir les limites de l'objet d'étude, puis à forger des outils de sa caractérisation sur le terrain .

Une méthode de description macroscopique a été mise au point, elle est basée sur une caractérisation hiérarchisée des états de surface: *une surface complexe est considérée comme un assemblage d'états de surface élémentaires (ESE)*. Chacun d'eux est alors décrit en détail sur le terrain, puis étudié au laboratoire (déterminations analytiques, observations au microscope).

La végétation pérenne fait partie intégrante de la surface du sol. Peu abondante, elle se présente ici essentiellement sous forme de touffes et elle est décrite comme un ESE. La distribution des ESE est mesurée sur le terrain par des techniques linéaires et sur des photographies rapprochées ou à basse altitude. Cette approche hiérarchisée permet d'estimer la composition moyenne de la surface du sol.

Ensuite, la caractérisation des surfaces de la zone étudiée a été faite à l'aide d'une analyse statistique multidimensionnelle des différents types d'ESE (états de surface élémentaires) rencontrés. Onze types principaux d'ESE ont été reconnus d'après leur composition et leur granulométrie, et leur couleur. Dans les trois pédopaysages étudiés, une forte relation a été observées entre les types d'états de surface et les unités morphopédologiques.

Dans la **deuxième étape**, des mesures sous pluies simulées ont montré que les caractéristiques morphologiques (granulométrie, organisation) de la surface des sols peuvent être reliées à des propriétés hydrodynamiques, telles les coefficients d'infiltration. De même, l'aptitude à la levée des plantules est également fortement dépendante des états de surface. La description des surfaces devient alors un élément de diagnostic du fonctionnement des milieux arides.

Un suivi en station a montré par ailleurs que, mis à part les fluctuations de la végétation liées aux précipitations, la composition de la surface des sols paraît peu modifiée à l'échelle pluri-annuelle. Avec des dates bien choisies les observations peuvent être interprétées en termes de fonctionnement ou d'écologie des milieux.

Cependant, les observations de terrain sont nécessairement ponctuelles. Dans la troisième partie nous allons voir comment les instruments d'observation régulière et exhaustive de la Terre que sont les satellites de télédétection peuvent être utilisés pour tenter une généralisation spatiale.

Troisième Partie

**TÉLÉDÉTECTION
DE LA SURFACE DES SOLS ARIDES**

Les satellites d'observation de la Terre fournissent des mesures du rayonnement émis ou réfléchi dans différentes longueurs d'onde par la surface du Globe et son atmosphère. Notre objectif est d'obtenir à partir de ces mesures, des informations détaillées sur la surface des sols arides.

Nous ne nous intéresserons donc ici qu'aux données des *satellites* à radiomètres imageurs à *haute résolution spatiale*, en particulier celles des satellites de la série Landsat. Ces données sont des mesures de l'énergie solaire réfléchie par la surface des sols dans les domaines spectraux visible, proche et moyen infrarouge, arrangées sous une forme matricielle: les images.

Dans un premier temps (chapitre 5) nous étudierons l'interaction du rayonnement solaire avec les différents composants de la surface des sols, et en particulier dans le domaine visible, en relation avec la couleur. Puis nous aborderons les propriétés spectrales des surfaces naturelles complexes, considérées comme des assemblages de composants élémentaires. Ceci nous permettra de faire le lien avec les méthodes de caractérisation des surfaces sur le terrain, développée dans la deuxième partie.

Dans un deuxième temps (chapitre 6), nous chercherons à appliquer ces résultats aux données satellitaires. En utilisant des modèles et des traitements simples d'images, une cartographie des états de surface de la région étudiée sera réalisée. Enfin, nous aborderons l'utilisation des documents obtenus dans le domaine la cartographie des types et des propriétés des sols arides .

REFLEXION DU RAYONNEMENT SOLAIRE PAR LA SURFACE DES SOLS

Les données satellitaires utilisées, provenant des capteurs MSS et TM de Landsat, couvrent un domaine spectral s'étendant de 400 à 2400 nm, soit du visible à l'infrarouge moyen. Dans ce domaine et au moment du passage du satellite, l'émission du sol est très largement inférieure au rayonnement solaire réfléchi (FRASER et CURRAN, 1976). Dans l'étude de l'interaction rayonnement-sol nous ne nous intéresserons donc qu'à l'absorption et à la réflexion, l'émission étant négligée.

5.1 LES PROPRIÉTÉS SPECTRALES DES MATÉRIAUX PÉDOLOGIQUES

5.1.1 La réflectance spectrale mesurée au laboratoire

5.1.1.1 Méthodologie

La *réflectance spectrale* est le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente en fonction de la longueur d'onde. Sa mesure précise se fait au laboratoire avec un spectrophotomètre sur de petits échantillons, de l'ordre de 1 cm^2 . Ce rapport peut varier en fonction des angles d'illumination et de visée. Pour s'affranchir de ces variations, on mesure la réflectance *hémisphérique* en employant une sphère intégratrice (fig. 33).

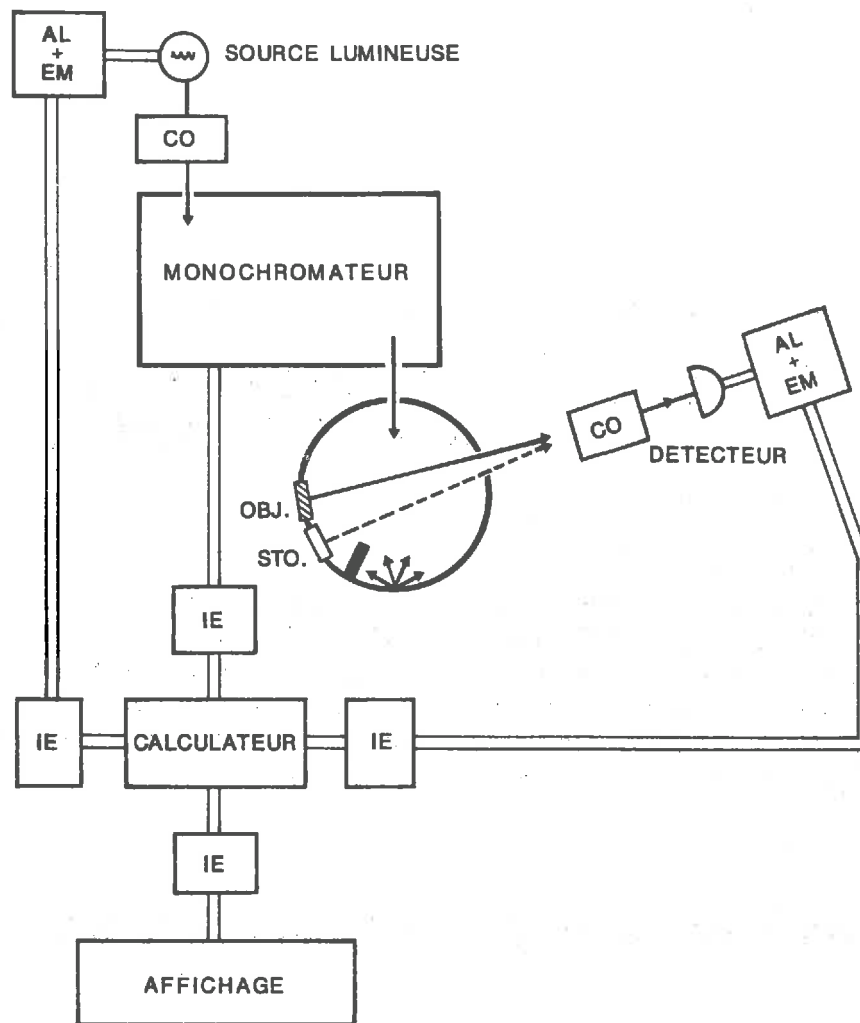


Figure 33. Schéma des principaux composants d'un spectrophotomètre équipé pour la mesure de la réflectance spectrale diffuse (adapté de Wyszecki et Stiles, 1982)

AL+EM : alimentation et équipement de mesure
 CO : coupleur optique
 IE : interface électronique
 OBJ. : objet soumis à la mesure
 STD : standard de référence

Cette technique, utilisée sur des matériaux très variés, a été appliquée aux minéraux et aux roches, notamment par HUNT et al. (1970, 1971, 1972, 1973), et CERVELLE et al. (1977). SHIELDS et al. (1966), CONDIT (1970) et plus récemment ORLOV et al., (1980), COMBE, (1984), TRAUBE (1985) et COURAULT (1986), l'ont appliquée aux sols.

Avec un tel appareillage, les échantillons de sols doivent être placés verticalement, il faut donc soit les coller sur un support, soit les mettre dans des boîtes. Cette dernière solution est préférable, elle permet d'éviter de souiller l'intérieur de la sphère et de faire la mesure sur une épaisseur suffisante. En utilisant comme couvercle de la boîte une mince lame de fluorine, très transparente à toutes les longueurs d'onde utilisées, les mesures ne sont pratiquement pas altérées.

Remarquons enfin que ce système permet également de traiter des échantillons humides, si nécessaire. L'ensemble des précautions opératoires ont été revues et détaillées récemment par FERNANDEZ et SCHULZE (1987). Dans le cas des courbes de sols que nous allons analyser, les échantillons ont été séchés à l'air, puis tamisés à 2 mm et placés dans des boîtes pour déterminer les propriétés spectrales de la terre fine.

5.1.1.2 Les courbes obtenues

La fig. 34 présente un exemple de courbes de réflectance spectrale obtenues au laboratoire pour 4 échantillons de surface très différents prélevés dans la zone d'étude. Le tableau 10 précise les caractéristiques de ces échantillons. Ces courbes montrent que les caractéristiques spectrales les plus spectaculaires sont concentrées dans le domaine infrarouge.

Pour tester le degré de généralité de cette observation, nous avons réalisé une étude détaillée d'une série d'échantillons de sols diversifiés. Nous avons ainsi analysé un ensemble de 84 courbes de réflectance, provenant de plusieurs études menées à l'INA-PG sous la direction de M.C. GIRARD (COMBE, 1984; TRAUBE, 1985; COURAULT, 1986). Les caractéristiques de ces échantillons sont reportées en annexe 3. L'analyse statistique de ces courbes a montré que leur allure se différencie nettement dans les deux domaines spectraux, visible et infrarouge (COURAULT et al., 1988).

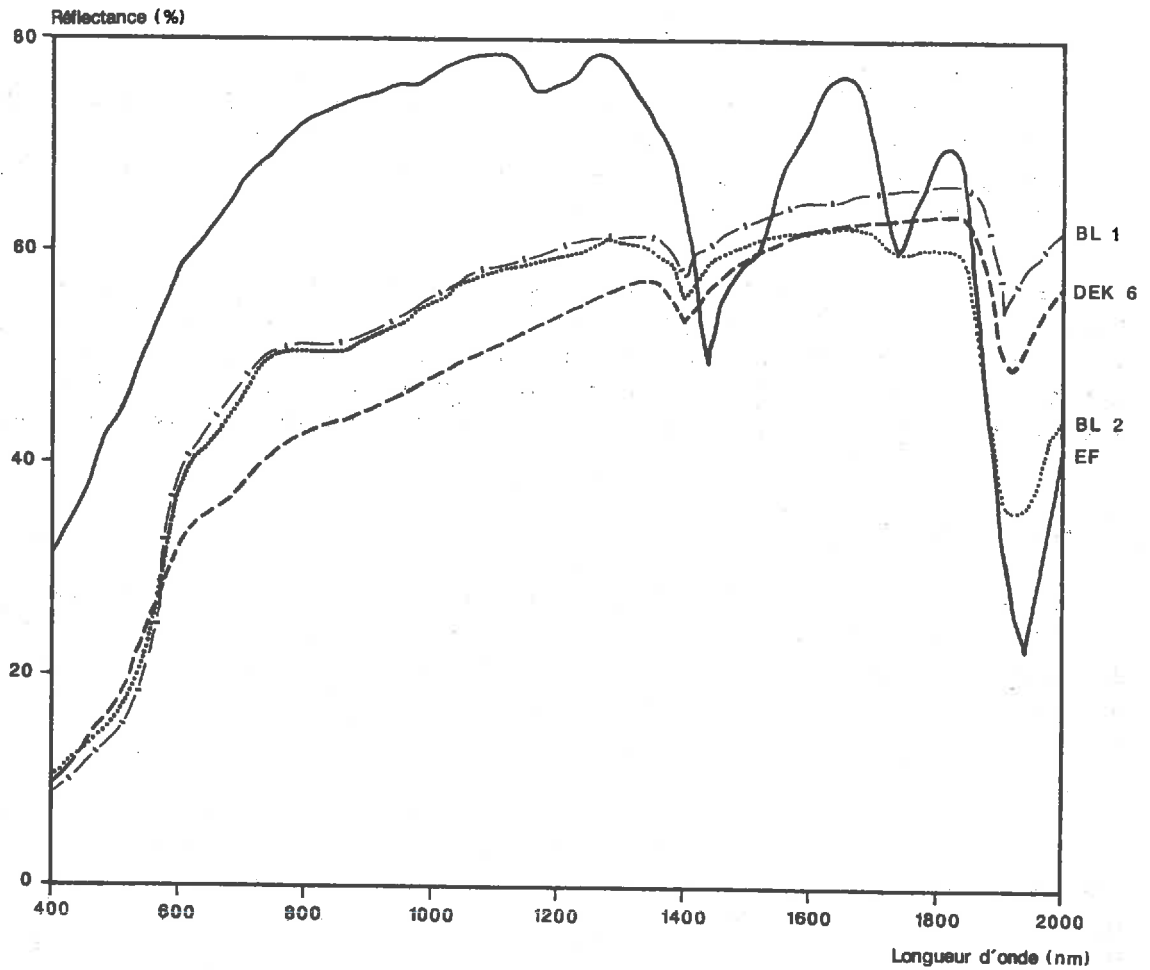


Figure 34. Exemple de courbes de réflectance diffuse obtenues au laboratoire pour 4 échantillons de sols du Sud Tunisien

(leurs caractéristiques analytiques apparaissent dans le tableau 10).
mesures réalisées par D.COURAULT au laboratoire de M.PROST, INRA, Versailles

TABLEAU 10. CARACTÉRISTIQUES DE 4 ÉCHANTILLONS DE SURFACE DE SOLS DE LA RÉGION DE TATAQUINE SOUMIS AUX MESURES SPECTROPHOTOMÉTRIQUES (VOIR FIG.34)

Réf.	couleur Munsell	granulométrie			CaCO ₃	Fer total	matière organ.
		A	L	S			
BL1	5 YR 6/8	2	6	92	1,5	0,3	0
BL2	5 YR 5,5/8	5	14	81	2,9	0,8	0
DEK6	10 YR 6/4	10	18	73	7,8	1,1	0,35
E.F.	10 YR 8/2	(gypse : 73)			3,0	0	0,35

A: argile, L: limons, S: sables (%)

Nature des échantillons:

BL1: sable fin quartzueux éolien (ESEsf)*, N°53

BL2: sol nu sablo-limoneux à nodules calcaires (EESn)*, N°54

DEK6: sol nu limono-sableux sur marnes (EESn)*, N°57

E.F.: croûte gypseuse affleurante (ESEgy)*, N°58

La numérotation correspond à celle utilisée dans la série des 84 échantillons qui font l'objet de l'étude colorimétrique (voir annexe 3)

* types d'états de surface élémentaires (ESE), définis en 4.2.1.2

Dans le **domaine visible**, les courbes sont toujours monotones croissantes. Trois grands types se distinguent (fig. 35a) :

- a) réflectance basse, courbe faiblement concave,
- b) réflectance élevée, courbe plus ou moins convexe,
- c) réflectance faible à assez élevée, courbe concave, puis convexe.

Cette division en trois grands types est corroborée par les travaux de CONDIT (1970), qui a obtenu des résultats similaires sur une série de 285 échantillons de sols des U.S.A. Par ailleurs l'allure générale des courbes est très semblable à celle décrite par d'autres auteurs même lorsqu'ils ont utilisé des appareillages sensiblement différents (STONER et al., 1980).

Nous verrons plus loin que l'aspect *globalement monotone croissant* est une caractéristique qui a des conséquences importantes du point de vue des relations avec la couleur.

Dans le **domaine infrarouge**, les courbes observées sont plus complexes (fig. 35b). Plusieurs bandes d'absorption apparaissent particulièrement autour des 900, 1450, 1750 et 1950 nm.

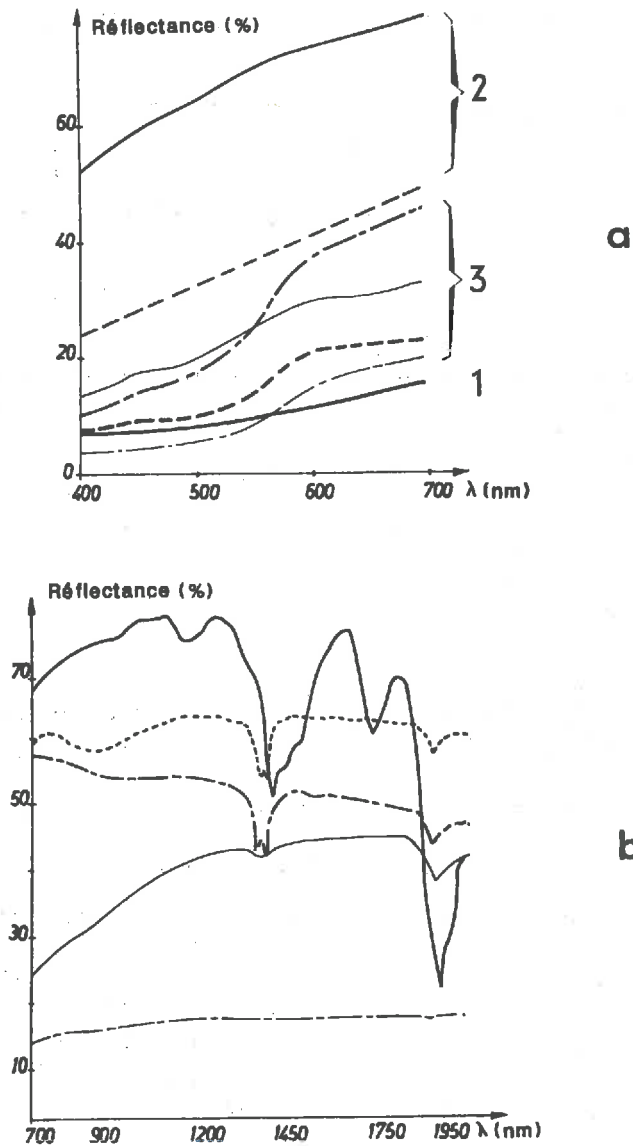


Figure 35. Principaux types de courbes de réflectance spectrale observées sur la série des 84 échantillons de sols étudiée (d'après Courault et al., 1988)

a) domaine visible: plusieurs allures de courbes réparties en trois grands types,
 b) domaine infrarouge: cinq types ont été reconnus.

Contrairement au domaine visible et proche infra-rouge, les propriétés des sols dans l'infrarouge moyen ont été très peu étudiées. Ceci est lié au fait que les développements technologiques dans ce domaine sont récents (instruments de laboratoire, de terrain ou embarqués sur satellites).

L'analyse statistique a mis en évidence 5 grands types de courbes dans notre série, ils correspondent à des groupes d'échantillons qui se distinguent essentiellement par leur composition minéralogique (voir fig. 35b). Ceci nous amène à aborder les relations entre réflectance spectrale et composition des sols.

5.12 Relations avec les constituants

5.1.2.1 Aperçu bibliographique

Les matériaux pédologiques peuvent être considérés comme des assemblages de particules minérales, plus ou moins liées entre elles (souvent par des matières organiques), les vides étant occupés par de l'air et de l'eau. La taille des particules et des agrégats est supérieure aux longueurs d'onde du rayonnement solaire, ce sont donc des milieux diffusants pour ce rayonnement, et nous pourrions utiliser les mesures de réflectance diffuse pour les caractériser. La connaissance des spectres de réflectance des différents constituants est l'étape préliminaire à l'interprétation des spectres de sols.

a) Propriétés spectrales des constituants des sols

L'interaction de la matière avec les radiations électromagnétiques fait intervenir de nombreux phénomènes; pour ce qui concerne l'interaction avec les minéraux, les roches et les sols, les plus importants sont rappelés par WEISSKOPF (1968), HUNT (1980), KAHLE (1984), MULDER (1987) et GUYOT (1989). Nous en retiendrons que les propriétés spectrales de ces matériaux sont dues essentiellement à deux types de phénomènes physiques :

- des *transitions électroniques* qui nécessitent des énergies importantes et interviennent, sous forme de pics assez larges, dans l'ultraviolet (UV) et le visible,
- des *phénomènes vibratoires*, concernant des bandes plus étroites au delà de 2500 nm, mais dont on peut observer des harmoniques jusque vers 1300 nm.

Les spectres de différents minéraux purs à l'état particulaire, et en particulier ceux trouvés en abondance dans les sols, sont disponibles dans la littérature, principalement grâce à la série de publications de HUNT et SALISBURY (1970), HUNT et al. (1971a et b, 1972, 1973). Cette équipe a mesuré au spectrophotomètre les courbes de réflectance de plus de 200 minéraux et 150 roches, sur des échantillons broyés et

Réflectance relative (%)

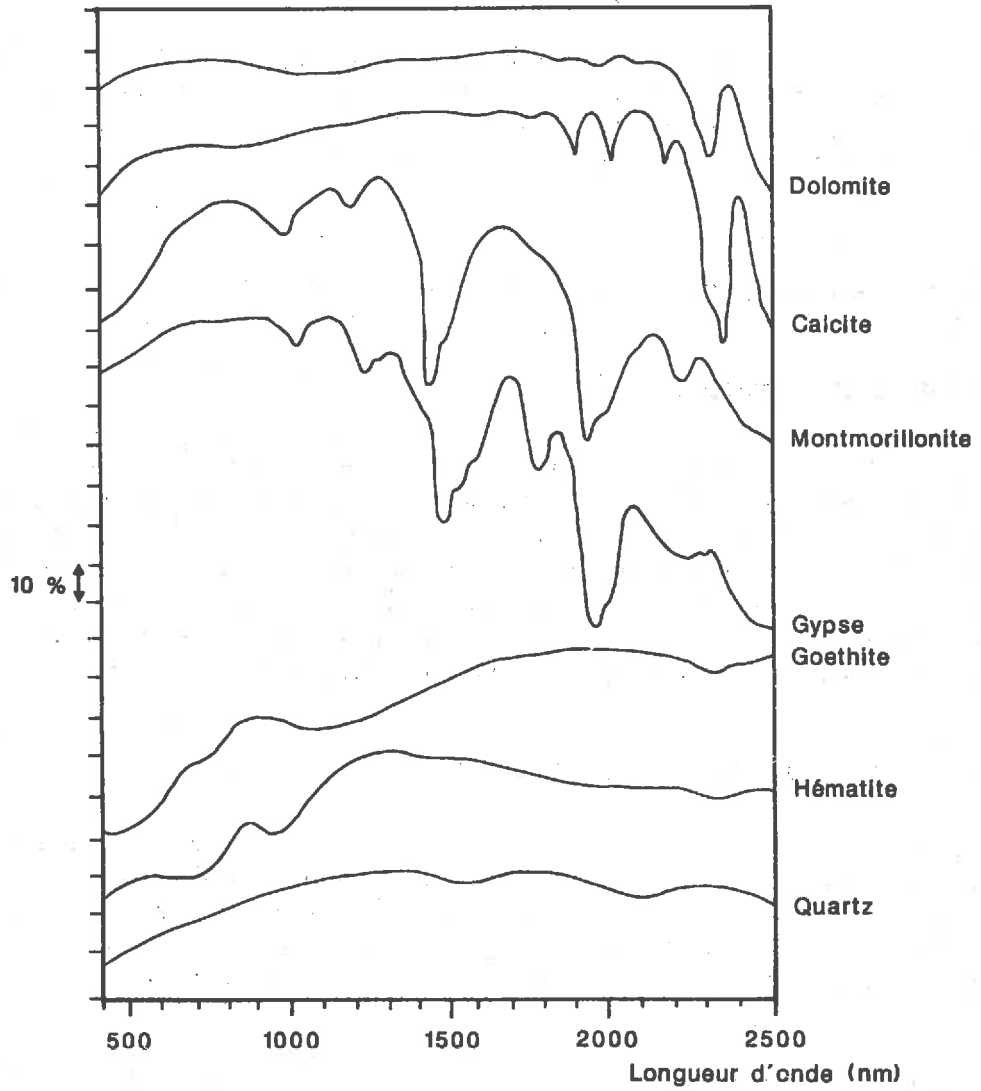


Figure 36. Courbes de réflectance de quelques minéraux fréquents dans les sols (d'après les données de Hunt et Salisbury, 1971, et Hunt et al., 1971)

tamisés à différents calibres. Les mesures ont été faites par comparaison avec la magnésite (MgO), utilisé comme standard de référence (réflectance 100 %), mais actuellement on préfère utiliser le sulfate de baryum (BaSO₄).

Les éléments les plus courants dans les minéraux et les sols, à savoir le silicium, l'oxygène et l'aluminium ne présentent pas de niveaux énergétiques susceptibles de produire des caractéristiques remarquables dans les spectres visible et infrarouge. A l'exception de la silice pure, les minéraux formés à partir de ces éléments présentent pourtant des spectres particuliers. La structure cristalline surimpose ses effets, déplaçant les niveaux de transitions électroniques des ions individuels. Cet effet est très net dans le cas des minéraux contenant du fer et du manganèse. De fait, les bandes d'absorption, observées dans le domaine visible et proche infrarouge des spectres des roches et des sols, sont dues principalement à la présence de *fer, d'eau, de groupements hydroxyles ou de carbonates*.

L'effet des *ions ferriques* se manifeste dans l'ultra-violet et le bleu (transitions électroniques), puis autour de 1000 nm (effet du champ cristallin). C'est particulièrement net dans le cas de la goéthite et de l'hématite, minéraux très souvent présents dans les sols (fig. 36).

Les *groupements hydroxyles* (-OH) ont une bande d'absorption fondamentale à 2770 nm, mais plusieurs harmoniques se manifestent à des longueurs d'onde plus courtes. Dans le cas de l'eau, les bandes harmoniques étroites observées à 1400 et 1900 nm pour l'eau libre, se décalent et s'étalent dans le cas de l'eau adsorbée sur les minéraux argileux, ou de l'eau de constitution du gypse. Les bandes d'absorption caractéristiques des *carbonates* apparaissent principalement au delà de 2000 nm, comme l'illustre bien les cas de la calcite et de la dolomie (fig. 36).

En ce qui concerne les *composés organiques* des sols, ce sont généralement des mélanges complexes de glucides, peptides, lipides, cires, résines, acides fulviques, acides humiques et humines. Ces mélanges complexes sont globalement absorbants dans le visible, d'où leur couleur foncée (FLAIG et al., 1975). Remarquons que dans le cas des sols arides, ces composés organiques sont très peu abondants.

b) Interprétation des spectres de sols

Différents auteurs ont obtenus des **indications qualitatives** par simple comparaison des courbes de réflectance de sols avec celles des composants purs que nous venons de voir (MATHEWS et al., 1973; BAUER et al., 1980; STONER et BAUMGARDNER, 1981; BAUMGARDNER et al., 1985).

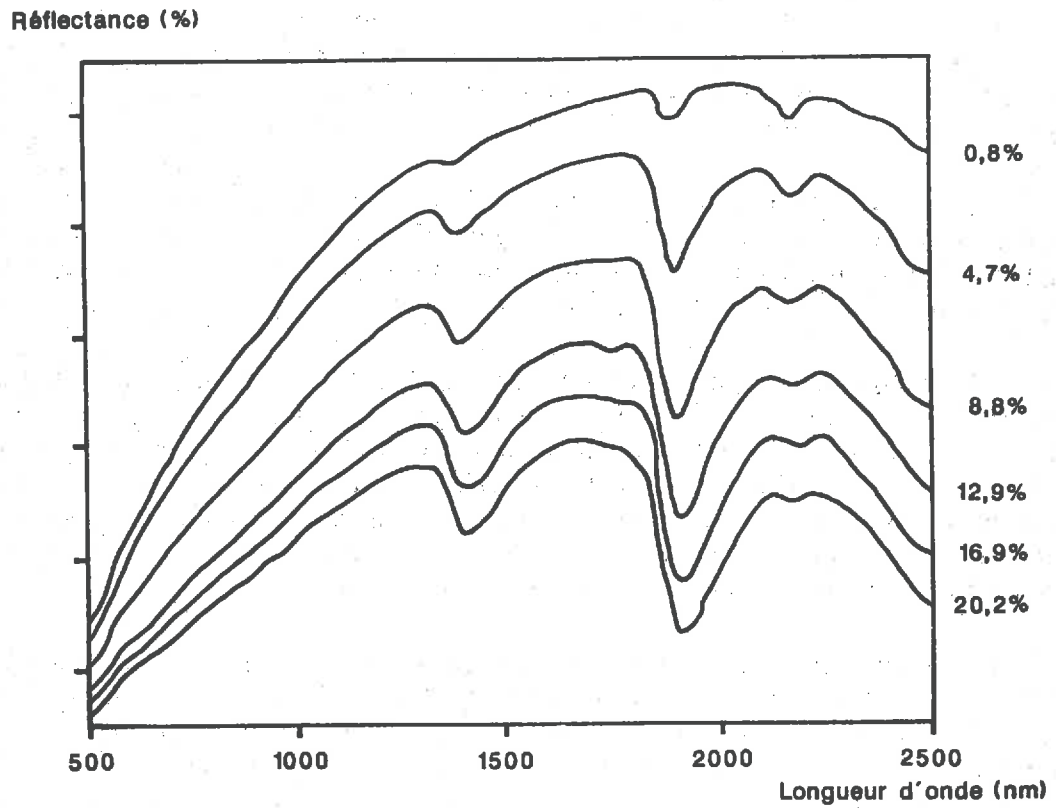


Figure 37. Influence de la teneur en eau sur la réflectance d'un sol limoneux (d'après Bowers et Hanks, 1965)

Ainsi, une nette bande d'absorption dans le bleu, est une forte présomption de présence d'oxydes de fer, alors qu'une réflectance basse à toutes les longueurs d'onde indique la présence de matières organiques.

L'augmentation de la teneur en eau se traduit par une diminution générale de la réflectance à toutes les longueurs d'onde, et l'apparition des bandes d'absorption caractéristiques à 1400 et 1900 nm, comme l'illustre la fig. 37 dans le cas d'un sol limoneux (BOWERS et HANK, 1965).

L'influence de l'humidité sur la réflectance a été souvent étudiée au laboratoire, notamment sur des constituants isolés (kaolinite, par exemple, PROST et al., 1983). En humectant trois échantillons de sol avec de l'eau pure, PLANET (1970) a montré que l'on peut prévoir la réflectance d'un sol humidifié, à partir de la réflectance à l'état sec (mesures faites uniquement à 589 nm). En dehors de ces résultats partiels obtenus au laboratoire, la relation entre teneur en eau et pourcentage d'absorption n'est pas linéaire et varie beaucoup avec le type de sol. Cependant, PETERSEN et al. (1979) et CIERNIEWSKI (1985) ont montré que les teneurs en eau sont plus facilement comparées à la réflectance si elles sont exprimées en potentiel (pF).

D'une façon générale, la mise en évidence de relations quantitatives entre réflectance et composition n'est pas simple. En effet, les sols sont des mélanges complexes de particules de nature, de taille, de formes et d'arrangements très variés, alors que les courbes de composants purs ont été déterminées séparément sur des poudres calibrées. Ainsi, dans la majorité des travaux sur ce thème les auteurs ont recherché des corrélations empiriques entre teneur d'un constituant et propriétés spectrales de certains types de sols.

Des études de cas sur des mélanges artificiels ou des sols particuliers ont été tentées, mais sans donner de résultats extrapolables (GERBERMANN et NEHER, 1979; KRISHNAN et al., 1980). L'étude la plus étendue concerne une série de sols des Etats-Unis. Dans son mémoire de thèse DA COSTA (1980) expose les résultats d'une analyse statistique multivariable entre la réflectance mesurée au laboratoire et des données analytiques classiques (granulométrie, teneur en matières organiques, carbonates, fer, etc..). De tous les essais réalisés il a retenu un certain nombre de régressions multiples significatives. Les possibilités d'utilisation de ces résultats sont minces, car ils ne sont absolument pas interprétés et ne font que décrire des choses déjà connues (influence des oxydes de fer et de la matière organique, par exemple).

Nous verrons dans le paragraphe consacré à la couleur que les recherches sur les relations quantitatives entre cette variable et les teneurs en différents constituants ont été les plus poussées.

5.1.2.2 Le cas des sols étudiés

Aux différents types de courbes observées pour la série des 84 échantillons étudiés correspondent globalement des ensembles de sols qui se distinguent bien par leur composition (fig. 35). Ainsi, dans le *domaine visible* :

- le type 1 (voir 5.2.2.1) correspond aux sols fortement organiques (teneur supérieure à 8 %),
- le type 2 caractérise les sols riches en calcium (carbonates, sulfates) mais pauvres en matière organique et en fer
- le type 3, concavo-convexe est typique des échantillons à oxydes de fer; on reconnaît dans cette forme de la courbe l'influence de l'hématite.

Dans le *domaine infrarouge*, on reconnaît surtout l'influence des minéraux hydratés et des carbonates. Des études statistiques sont en cours pour rechercher des corrélations entre les formes de ces courbes et la composition des sols (COURAULT et GIRARD, 1988).

Quant aux *échantillons de surface des sols de Tunisie* (voir les 4 courbes données en exemple fig. 34), ils sont très pauvres en matières organiques. Les courbes visibles sont donc du type 2 pour les surfaces très calcaires ou gypseuses, et du type 3 pour les autres. Dans ce cas, la pente de la courbe croît avec les teneurs en oxydes de fer, ce qui se traduit au niveau de la couleur.

Sur cette figure on remarque également que les domaines visible et proche infrarouge sont complémentaires. Ainsi, les échantillons BL1 et BL2 qui ont des courbes pratiquement identiques dans le visible, se distinguent très bien au delà de 1600 nm. Inversement, BL1 et DEK6 sont voisins dans l'infrarouge, mais nettement différents dans le visible, ce qui se manifeste par une couleur différente (voir tab. 10). Ce dernier aspect introduit le paragraphe suivant.

5.2 ETUDE DES RELATIONS ENTRE COULEUR ET RÉFLECTANCE

5.2.1 Importance de la couleur

5.2.1.1 Couleur, description et classification des sols

Nous avons vu au cours de la deuxième partie, que la couleur de la surface des sols de la région étudiée est un critère de caractérisation important. D'une façon plus générale, la couleur est une donnée de sol très utilisée et depuis longtemps. Par exemple, de nombreux noms vernaculaires (ou scientifiques qui en sont dérivés) sont en lien avec la couleur.

De fait, la couleur a été retenue comme critère de classement dans de très nombreux systèmes de classification des sols (voir la revue bibliographique de SEGALIN, 1977). Elle est aussi un élément très important de description et de discrimination des sols sur le terrain. Ainsi, à partir d'une analyse statistique détaillée de l'information pédologique, GIRARD M.C. (1983) a montré que sur 15 variables de terrain, suffisantes pour caractériser un volume échantillon, 3 d'entre elles concernent la couleur.

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux problèmes méthodologiques liés à l'appréciation et à la mesure de la couleur des sols, et leur conséquences sur le rôle de ce critère dans les classifications (SHIELDS et al., 1966; KARMANOV, 1970; MELVILLE et ATKINSON, 1985).

5.2.1.2 Couleur et composition des sols

Globalement, les effets des principaux constituants sur la couleur des sols ont été résumés par TAILOR (1982). Des divers travaux publiés sur le sujet on peut retenir les points suivants :

- la présence de matières organiques en quantité notable (plus de 2 %) se traduit par une couleur foncée (clarté Munsell faible), correspondant à une faible réflectance dans toutes les longueurs d'onde (SHIELDS et al., 1968; GIRARD, 1977; LEGER et al., 1979; KRISHNAN et al., 1980).
- des taches de couleur noirâtres (oxydes de manganèse), verdâtres ou bleuâtres (carbonates et sulfates d'hydroxydes ferreux) sont rencontrées dans certains sols, mais rarement à leur surface,

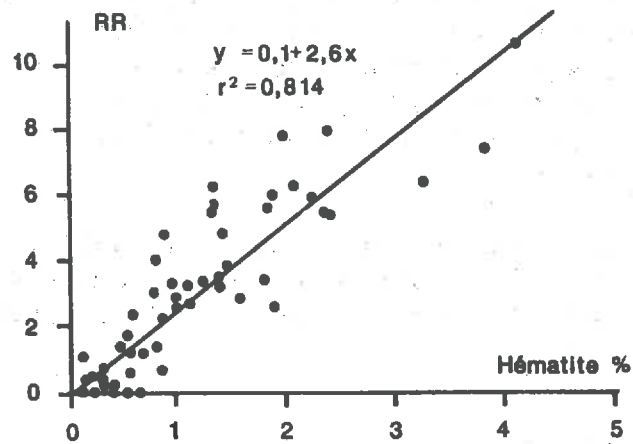


Figure 38. *Corrélation entre l'indice RR et la teneur en hématite d'une série d'échantillons de sols d'Europe (d'après Torrent et al., 1983)*

L'indice RR est calculé à partir de la couleur Munsell appréciée visuellement, suivant la formule : $RR = (10-T).P/C$, où T est la teinte, P, la pureté et C, la clarté.

- les carbonates et aluminosilicates ont une couleur claire, liée à une réflectance élevée dans le domaine visible, qui varie sensiblement avec la taille des particules (LEU, 1977). Cette couleur est souvent masquée par celle des autres composés,
- les différentes formes d'oxydes de fer (voir SCHWERTMANN et TAYLOR, 1977) sont responsables de la couleur des sols *jaunes, orangés et rouges*.

L'influence de la texture sur la couleur et la réflectance a été étudiée sur des mélanges de proportions variées de sable et d'argile par GERBERMANN et NEHER (1979). Ils observent que plus l'échantillon est sableux, plus la couleur est claire.

C'est la recherche de relations entre certaines **couleurs** et la présence des **différentes formes d'oxydes de fer** qui a très nettement suscité le plus grand nombre de travaux. En effet, la mise en évidence de telle relations serait une possibilité très intéressante de diagnostic de terrain.

Dans le domaine ferrallitique, SEGALEN (1969) a montré que la couleur jaune est due à la présence de goethite seule. Par contre, dans les sols rouges il y a toujours une petite quantité de produits ferrugineux amorphes, en plus des produits cristallisés colorés (goethite, hématite, magnétite). Dans des sols podzoliques de la région de Sydney en Australie, DAVEY et al. observent en 1975 des résultats comparables. Depuis ces premiers travaux ont été confirmés par plusieurs auteurs, en particulier KARMANOVA (1981), qui précise que ce sont les produits amorphes déposés sous forme de films à la surface des particules du sol qui ont le pouvoir colorant le plus élevé. ROBERT et al. en ont apporté la preuve expérimentale en 1983, en démontrant que le dépôt de polycations du fer sur les argiles entraîne une nette coloration rouge.

Pour ce qui est de l'**aspect quantitatif**, KARMANOVA signale dans son article de 1981 une relation entre la pureté de la couleur Munsell et la teneur en oxydes de fer observée dans les sols de texture fine à moyenne.

TORRENT et al. (1980, 1983) ont cherché à préciser ce type de relations, en proposant divers *indices de rougeur* (redness rating) formulés empiriquement sur la base des données Munsell ou des coefficients CIE (voir plus loin). Cette équipe a mis en évidence des corrélations significatives entre ces indices et la teneur en hématite de différents échantillons de sols du Brésil et d'Europe (fig. 38). KEMP (1985) a également appliqué cette méthode à des paléosols d'Angleterre. Ces corrélations, qui ne sont observées que pour des échantillons non calcaires très pauvres en matières organiques, doivent être calculées expérimentalement pour chaque type de sol. Elles ne sont vérifiées que dans la gamme 0-10 % de teneur en hématite.

L'approche la plus récente et la plus convaincante est celle de BARRON et TORRENT (1986), seule étude de ce type à recourir à la colorimétrie. En effet, pour préciser la signification des indices empiriques précédents, ils se sont appuyés sur des mesures spectrophotométriques et ont élaboré un modèle de l'effet colorant de l'hématite en appliquant la théorie de mélange des pigments de KUBELKA-MUNK (1931). Une gamme étalon a été réalisée à partir de mélanges de sol déferrifié et d'hématite synthétique pure. Cet étalonnage a permis d'estimer, avec une précision satisfaisante, la teneur en oxydes de fer d'une série de 98 échantillons de sols à teneur en matière organique inférieure à 2 %.

Enfin, l'utilisation de mesures spectroscopiques très fines dans le domaine visible permet, par le calcul des courbes dérivées secondes, de distinguer dans certains cas les teneurs en hématite et en goethite (KOSMAS et al., 1984).

Ainsi, grâce à une approche plus rigoureuse, on semble actuellement s'orienter vers une meilleure compréhension des relations entre couleurs et composition des sols. Dans certains cas précis, cette relation a même pu être explicitée en utilisant des concepts colorimétriques.

5.2.1.3 Couleur et télédétection des sols

L'influence de la couleur des sols sur les mesures obtenues par télédétection est l'aspect qui a motivé nos recherches dans le domaine de la colorimétrie appliquée. Ce sujet a fait l'objet de travaux récents, mais pas toujours concordants. Ainsi, l'augmentation du taux de matière organique ou d'humidité provoque une diminution de la réflectance dans l'ensemble des canaux visibles. Dans les deux cas cela se traduit par un assombrissement de la couleur: la clarté Munsell diminue. Inversement, celle-ci augmente lorsque la teneur en calcaire croît (GIRARD, 1977). Divers travaux concernent les relations entre couleur Munsell et réflectance des sols dans les bandes spectrales des satellites (voir 6.1), particulièrement MSS4 (500 à 600 nm) et MSS5 (600 à 700 nm).

DA COSTA (1979) dans son étude statistique systématique d'une série de données de 563 échantillons de sol a observé une corrélation multiple significative entre la *pureté* et la réflectance dans la bande MSS4 (avec un terme négatif) et MSS5 (avec un terme positif). Par contre, dans une étude des paramètres physiques détectables par Landsat MSS, SALMON-DREXLER (1977) souligne l'intérêt des rapports de canaux MSS4/MSS5 pour distinguer les sols d'après leur *teinte*, alors que la somme des deux est liée à la *clarté*. HORWATH et al. (1983) quant à eux limitent le rôle de la couleur à un *indice de brillance* mesuré sur les planches Munsell et observent que cet indice est une des variables importantes expliquant les données radiométriques Landsat enregistrées sur les parcours de l'Arizona.

Dans le Sud Tunisien, autre région aride, les données des canaux MSS4 et 5 ont permis de distinguer différents types de surfaces de sol d'après leur rugosité liée à la *brillance* de l'image (MSS4+MSS5) et d'après la pureté de leur couleur, corrélée avec le rapport MSS5/MSS4 (ESCADAFAL, 1984; ESCADAFAL et POUGET, 1986). Enfin, remarquons que HUETE et al. ont souligné dès 1984 que la couleur des sols a une influence sensible sur la réflectance des peuplements végétaux peu denses, et qu'il faut en tenir compte dans le calcul des indices de végétation en milieu aride (voir parag. 6.3.3.1).

L'influence de la couleur a donc été mise en évidence dans toutes les études concernant la réflectance des sols dans le domaine visible, mais sans qu'une loi générale puisse être dégagée de ces travaux.

Dans cette perspective, nous avons entrepris une étude détaillée visant à préciser la *nature physique des relations entre la réflectance spectrale et la couleur des sols*, mesurée au laboratoire ou appréciée sur le terrain. La couleur étant une sensation visuelle, par définition, cette partie de notre travail ne concerne donc que le domaine visible du spectre (380-770 nm).

5.2.2 Notions de colorimétrie utilisées

Chaque individu a son propre référentiel de couleurs et les termes de rouge, ocre ou brun foncé peuvent recouvrir des réalités assez différentes suivant les observateurs, sans parler des nuances que l'on peut vouloir préciser. Pourtant l'oeil humain est un instrument extraordinaire capable de couvrir une très grande gamme de niveaux de luminance, variant d'un facteur 1 à plusieurs millions (KOWALISKI, 1978) et de distinguer, suivant les spécialistes, de 100 000 à 10 millions de nuances de couleurs. Mais ces aptitudes étonnantes ne doivent pas nous faire oublier que la vision est un phénomène psycho-physique fortement dépendant du contexte et des individus.

L'objet de la *colorimétrie* est précisément d'établir les relations entre perceptions visuelles et caractéristiques physiques des objets et de la lumière qui les éclaire, en spécifiant les conventions et conditions d'application. Plusieurs traités y sont consacrés (JUDD et WYSZECKI, 1975; KOWALISKI, 1978; WYSZECKI et STILES, 1982), nous n'aborderons ici que quelques points essentiels à la discussion.

5.2.2.1 Le système trichromatique

Le système trichromatique est basé sur le fait qu'une sensation colorée quelconque peut être reproduite par un mélange de trois couleurs primaires: le rouge, le vert et le bleu. Cette propriété de la vision humaine a de très nombreuses applications. La synthèse additive des couleurs est notamment à la base du fonctionnement des écrans

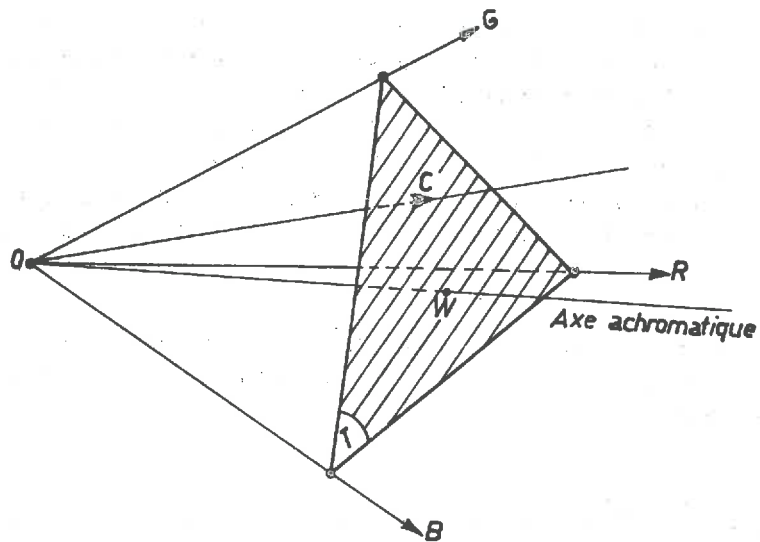


Figure 39. Représentation d'une couleur C dans l'espace RGB, défini par la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E., 1931)

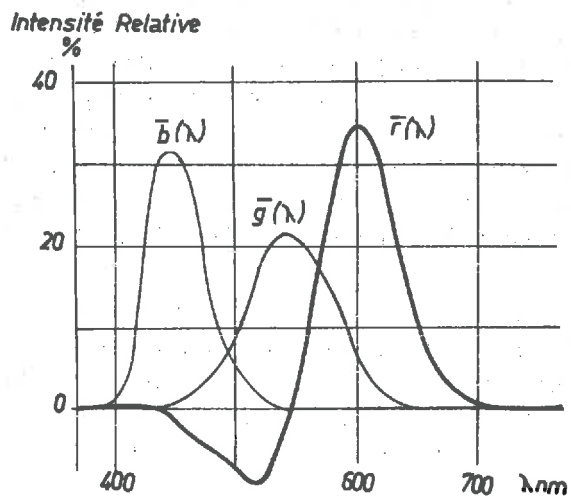


Figure 40. Courbes de reproduction des couleurs monochromatiques par mélange de rouge de vert et de bleu (fonctions de mélange r, g, b pour l'observateur de référence, C.I.E., 1931)

de visualisation (voir la planche 9 au chapitre suivant). La Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E., 1931) a normalisé ce système Rouge, Vert, Bleu (Red, Green, Blue) en adoptant les longueurs d'ondes suivantes :

$$\lambda (R) = 700 \text{ nm}$$

$$\lambda (G) = 546 \text{ nm}$$

$$\lambda (B) = 436 \text{ nm}$$

Elles ont été choisies d'après les résultats d'essais empiriques montrant que c'est ce jeu qui permet de reproduire la gamme la plus étendue de couleurs. Dans ce système une couleur quelconque peut être représentée par un vecteur C de coordonnées r, g, b dans le repère R, G, B (voir fig. 39) :

$$\vec{C} = r \cdot \vec{R} + g \cdot \vec{G} + b \cdot \vec{B} \quad (I)$$

Les unités sont choisies de telles sorte que l'on obtienne la couleur blanche lorsque $r = g = b = 1$. L'axe médian correspond alors à l'axe des gris (du noir au blanc), c'est l'axe achromatique. Les courbes de sensations colorées d'un observateur moyen, ou fonctions de mélange, sont basées sur des séries de mesures réalisées au colorimètre avec un angle de vision compris entre 1° et 4° . Elles définissent les caractéristiques de l'observateur de référence CIE-1931 (KOWALISKI, 1978).

Elles expriment les pourcentages de rouge, vert et bleu à mélanger pour obtenir la sensation correspondant à chacune des radiations monochromatiques du spectre visible. On y voit clairement apparaître un terme r négatif, avec un minimum autour de 510 nm (fig. 40). L'existence des courbes de sensations colorées constitue le fondement même de la colorimétrie et a les conséquences importantes suivantes.

5.2.2.2 Calcul de la couleur d'un objet

Les courbes que nous venons de voir permettent de calculer les composantes R, G, B d'un objet théorique à pouvoir de réflexion monochromatique. Comme \vec{C} est un vecteur, les lois d'additivité sont applicables, et on peut calculer ces mêmes composantes pour un objet réel de courbe de réflectance quelconque. Celle-ci est alors considérée comme étant la somme des valeurs des réflectances monochromatiques élémentaires sur l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible.

La couleur d'un objet se calcule donc à partir de sa courbe de réflectance spectrale et de la composition de la lumière qui l'éclaire.

C'est ce qu'expriment les équations suivantes :

$$R = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} C(\lambda) \cdot H(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} C(\lambda) \cdot H(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad (\text{II})$$

$$B = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} C(\lambda) \cdot H(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

$C(\lambda)$: réflectance spectrale

$H(\lambda)$: répartition spectrale d'énergie de la source lumineuse

Ainsi, par intégration des trois fonctions de mélange ($\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$) pondérées par la courbe de réflectance d'un objet, il est possible de calculer la sensation colorée qu'il produit, sous un éclairage donné. Pour préciser ce dernier point, et normaliser les conditions d'observation, les courbes de répartition spectrale de l'énergie de différents types sources lumineuses ont été définies par la C. I. E. Ce sont les illuminants standards, qui comprennent notamment pour la lumière du jour le type C, défini en 1931, et le type D65, recommandé plus récemment. Les tables utilisées dans les calculs colorimétriques font référence à ces standards (WYSZECKI et STILES, 1982). En résumé, *un objet de propriétés spectrales données, éclairé par une lumière de composition donnée, apparaît à un observateur moyen sous une couleur précise et une seule, que l'on peut déterminer par calcul.* Ceci est bien entendu applicable aux sols.

5.2.2.3 Le métamérisme.

Ce terme désigne le phénomène par lequel des objets de *propriétés spectrales différentes* peuvent produire la *même sensation colorée*.

Par exemple, toutes conditions étant égales par ailleurs, un objet fortement réfléchissant dans le rouge et dans le vert paraîtra jaune, tout comme un objet réfléchissant dans les longueurs d'onde des jaunes monochromatiques. Cette caractéristique de la vision humaine est très exploitée pour la reproduction des couleurs, notamment dans les techniques d'impression, photographiques, ou de télévision.

Suivant ce phénomène on comprend donc que la relation entre réflectance et couleur n'est pas bijective: **il n'est pas possible, en général, de prévoir la courbe de réflectance d'un objet d'après sa couleur.** En utilisant les équations de la colorimétrie, on peut définir de façon précise les conditions du métamérisme: pour que 2 objets apparaissent de la même couleur, leur courbes de réflectance doivent être telles que les équations (II) satisfassent les relations :

$$R = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} C1(\lambda) \cdot H1(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} C2(\lambda) \cdot H2(\lambda) \cdot \bar{r}'(\lambda) d\lambda \quad (\text{III})$$

et suivant le même modèle pour G et B.

Ce système d'équations est assez complexe à résoudre et les conditions du métamérisme font encore actuellement l'objet de recherches théoriques et appliquées (Ch. GOILLOT, comm. orale, 1987). Sur le plan des conséquences pratiques de ce phénomène, il est important de noter que deux couleurs ne sont généralement métamères que sous un éclairage $H(\lambda)$ donné. Dans ce cas le système d'équations (III) se simplifie, le seul terme différent entre les deux membres étant alors la réflectance spectrale $C(\lambda)$.

L'illustration la plus intéressante pour le sujet qui nous préoccupe est le cas des échantillons de couleur des planches Munsell. Ils sont composés à partir de mélanges de pigments reproduisant une sensation colorée. La courbe de réflectance de l'échantillon Munsell 10 YR 6/6 (brun jaunâtre) par exemple, est nettement différente de celle d'un sol qui paraît de cette couleur à la lumière du jour (fig. 41). Ces deux courbes sont métamères sous cet éclairage, mais elles ne le sont probablement pas sous un éclairage différent. Ainsi, la notation de la couleur d'un échantillon de sol obtenue par comparaison avec les planches Munsell sous un éclairage artificiel, à tube fluorescents, en particulier, peut donner des résultats sensiblement différents de ceux obtenus sur le terrain.

Suivant la pureté de la couleur il existe un nombre plus ou moins grand de métamères possibles. Dans la gamme des couleurs des sols, qui sont relativement peu saturées, on peut prévoir un degré de métamérisme élevé. Des méthodes de calcul et de simulation très élaborées ont été développées, permettant notamment de prévoir le

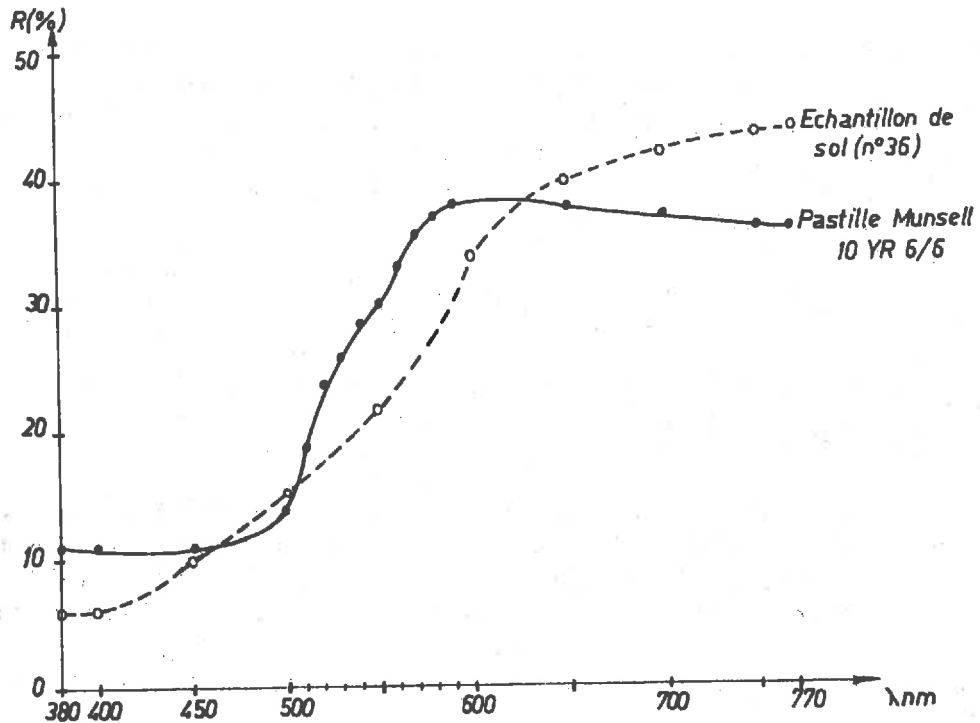


Figure 41. Illustration du métamérisme : comparaison de la courbe de réflectance d'une pastille colorée d'une planche Munsell avec celle d'un échantillon paraissant de la même couleur sous un éclairage de type lumière du jour