

ORGANISATION DES NATIONS UNIES
POUR L'EDUCATION, LA SCIENCE ET LA CULTURE

PROJET MAJEUR RELATIF AUX RECHERCHES SCIENTIFIQUES
SUR LES TERRES ARIDES

Colloque général sur les problèmes de la zone aride

Paris, 11-18 mai 1960

LES SOLS DE LA ZONE ARIDE

ETUDE DE LEUR FORMATION, DE LEURS CARACTERES,
DE LEUR UTILISATION ET DE LEUR CONSERVATION

par

G. Aubert

Membre de l'Académie d'agriculture
Chef du service des sols de l'ORSTOM

La zone aride est caractérisée à la fois par son climat toujours peu pluvieux, et parfois très sec, et très irrégulier, et par sa végétation herbacée ou frutescente, rarement arborée, très irrégulièrement répartie, et constituant un couvert excessivement lâche.

Supportant des conditions aussi sévères, ses sols présentent un certain nombre de caractères constants : évolution lente, profondeur souvent réduite, matière organique fortement évoluée, peu abondante et superficielle ou un peu plus abondante et répartie dans l'ensemble du profil ; structure faiblement définie en général ; éléments minéraux assez peu altérés ; colloïdes argileux stables ; éléments solubles concentrés en surface ou partiellement lessivés et accumulés, à un niveau ou à un autre du profil, jusqu'à donner naissance à des nodules ou à des croûtes calcaires, gypseuses ou salines ; fréquence, au moins dans les sols des zones semi-arides, des phénomènes d'hydromorphie. Très souvent calcaires, ces sols sont aussi fréquemment salés.

Leur utilisation présente également des caractères particuliers : très extensive, elle a comme base un élevage très lâche et irrégulier ou la culture, très aléatoire, de plantes spécialement adaptées ; très intensive, elle ne peut être fondée que sur l'un ou l'autre des divers types d'irrigation du sol ou d'utilisation de l'humidité de décrue après son inondation.

Leur conservation, contre l'érosion éolienne et la dégradation par surpâturage, repose sur les principes généraux habituels, mais elle est rendue plus difficile par les conditions climatiques extrêmes et par le manque trop général de couverture du sol, et la quasi-impossibilité de la reconstituer.

Aussi, la formation et la classification des sols de la zone aride, leur utilisation et leur conservation ont-elles été, depuis longtemps, l'objet de recherches et de travaux importants. Tous les pays qui comportent de telles zones ont, plus ou moins, poussé ces études, soit quant à leur prospection : Tchad, Australie, Indes,

O. R. S. I. O. M.

Iran, Chili, souvent d'ailleurs avec l'aide d'équipes pédologiques dépendant d'organismes internationaux, FAO en particulier ; soit quant à leur utilisation : Soudan et Republic of the Sudan, Afrique du Sud, Algérie, Tunisie, Israël, République arabe unie, etc. ; soit quant à leur protection contre l'érosion et la dégradation : Maroc, Pakistan, Etats-Unis, Mexique, etc.

Il faut cependant reconnaître que certains pays ont pu donner un essor plus remarquable encore à ces recherches dans des centres particulièrement bien outillés et actifs, comme, pour n'en citer que quelques-uns : Etats-Unis d'Amérique avec leur centre de recherches de Riverside et les diverses universités de Californie, de l'Arizona, du New-Mexico, du Texas, etc. ; Union des républiques soviétiques socialistes, avec ses grands centres et laboratoires d'étude des sols et leurs équipes de prospecteurs ; France avec les services de l'hydraulique d'Algérie et les équipes pédologiques et laboratoires de l'ORSTOM ; Israël avec l'Institut de la zone aride à Beersheba dans le Negev ; Australie avec les centres de recherches et les équipes de prospecteurs du CSIRO.

Dans d'autres pays : Egypte, Iran, Indes, Pakistan, les centres et organismes de recherches sur les sols sont plus récents ; les études sont moins avancées ; elles n'en sont pas moins prometteuses et les résultats, déjà obtenus, souvent importants.

LES SOLS DE LA ZONE ARIDE - FORMATION - CLASSIFICATION

La zone aride elle-même peut être, dans son ensemble, subdivisée en zone désertique, zone aride proprement dite et zone sub-aride, en fonction des conditions climatiques et, partant, des caractères de la végétation. A chacune d'elles correspondent des sols typiques : sols des déserts, sols subdésertiques et sierozems, sols bruns sub-arides. Ils peuvent exister aussi dans des zones climatiquement un peu différentes ; il peut, dans chacune, exister d'autres sols ; ceux-là, cependant, sont particulièrement caractéristiques de chacune de ces trois zones.

1. Zone désertique

Les conditions climatiques sont extrêmes et les sols y sont, en fait, des sols minéraux bruts, très peu évolués. Les processus chimiques d'altération des roches et des minéraux y sont très peu développés et ceux, physiques, de désagrégation sont, au contraire, dominants. Les matériaux originels ainsi formés ne sont cependant pas immuables, mais ils subissent essentiellement des actions mécaniques : brassage par le vent, en particulier.

Aussi a-t-on, souvent, classé ces sols (les pédologues américains les regardent comme des "roches" et non comme des "sols") en fonction de l'effet de ces processus, en sols d'ablation, sols d'apport et sols sans remise en mouvement. Ainsi en est-il dans les classifications pédologiques proposées par J. Durand, par N. le Houerou ou par nous-mêmes.

(a) Les sols d'ablation sont caractérisés par leur appauvrissement en éléments fins entraînés par le vent. Ce sont les "regs", recouverts de sables grossiers, cailloux ou pierres, plus ou moins éolisés et, souvent, enrobés d'une patine appelée "verniss du désert", encore qu'elle se forme moins facilement en milieu désertique qu'en milieu seulement aride, un peu plus humide, au moins temporairement.

On distingue souvent : les regs autochtones dont les éléments proviennent de la décomposition des roches sous-jacentes calcaires, grès, roches éruptives, etc. et les regs allotchtones dont le matériau originel est une alluvion, souvent encore susceptible, les années de grande crue, de recevoir des apports nouveaux.

Près de Figuig (Algérie) le reg a été décrit ainsi par J. Durand :

- 0 - 15 cm : limon brun-rougeâtre, très caillouteux (surtout juste en surface), sans structure, très friable.
- 15 - 40 cm : limon brun-rougeâtre, sableux, à structure granuleuse, friable avec quelques nodules calcaires farineux, çà et là.
- en-dessous : même limon sableux, plus riche en granules calcaires plus gros et plus durs, restes d'un ancien sol.

La surface, plus ou moins sablo-limoneuse, du reg est souvent enrichie en sels et en calcaire ou en gypse, formant ainsi une pellicule un peu durcie.

Au Sahara (Mauritanie, par exemple), le reg, peu épais, repose fréquemment sur un ancien sol de climat plus humide (sierozem ou sol brun-rouge steppique par exemple).

(b) Dans les sols d'apport, le vent a, au contraire, provoqué l'accumulation des éléments sableux (surtout sables moyens et sables fins) en certains points.

D'après l'importance de l'accumulation et sa forme, on peut distinguer (N. le Houerou, J. Durand) :

- les voiles et placages étendus, de forme irrégulière et peu épais en général ;
- les micro-dunes de quelques décimètres seulement, formés au long des végétaux, des pierres, etc. et toujours allongées dans le sens du vent ;
- les nebkhas ou micro-dunes, fixées par un arbuste ou une touffe végétale, et dont la partie inférieure est, souvent, non pas apportée par le vent mais découpée par l'érosion éolienne dans le substratum friable ;
- les barkhanes ou dunes mobiles, en forme de croissant, hautes, en général, de deux ou trois mètres. Placées côte à côte en grand nombre, elles peuvent couvrir des surfaces étendues ;
- les cordons dunaires ou ergs, massifs sableux beaucoup plus importants à la fois par leur hauteur et par leur surface. Ils se forment parfois le long de crêtes rocheuses peu élevées ou de saillies dures, ou le long d'oueds.

(c) Les sols non soumis à l'action éolienne ou ne comportant pas de remise en mouvement d'au moins certains de leurs constituants sont formés de gros blocs de roches éclatés sous l'influence des variations de température et d'humidité, mais restés en place, côte à côte, d'où le nom de "sols en chaussée" qui leur a parfois été donné. Ils ne représentent qu'un type de sols squelettiques. D'une façon générale, dans ces derniers, les débris des roches prennent, au contraire, les positions les plus variées.

Parmi ces sols peuvent être rangés ceux qui constituent les surfaces des Hammadas, en même temps que ceux qui y prennent naissance, par morcellement plus fin de la roche, dans les fentes de ces plateaux.

(d) Les sols squelettiques proprement dits sont, aussi, très abondants dans les zones arides ou semi-arides, soit sur certains plateaux constitués de roches dures et dont le sol, qui ne peut s'approfondir que très difficilement, est, au contraire, sans cesse décapé par le vent ; soit sur des collines ou montagnes et des terrains en pente.

L'habitude prédomine très généralement, maintenant, d'y différencier les lithosols dont la roche sous-jacente n'est pas friable ni pratiquement pénétrable par les racines des végétaux : grès dur, granit, etc. et les régosols dont la roche est, au contraire, friable : loess du sud tunisien, arène granitique, grès friable, etc.

En zone aride et surtout en zone semi-aride, les sols squelettiques, aussi appelés "sols bruts d'érosion" peuvent être assez riches en matière organique et débris végétaux, en surface, sur quelques centimètres. Ils tendent alors à passer aux Rankers que l'on qualifie de lithosoliques ou régosoliques suivant les cas.

(e) Dans ces zones désertiques s'observent également des croûtes de sels solubles qui peuvent être actuelles ou sub-actuelles, formées aux dépens de nappes phréatiques proches de la surface et très minéralisées, ou par accumulation d'éléments salins dans quelques zones basses, lors des très rares orages (Chotts, Sebchas du sud de l'Afrique du Nord ou de l'Ouest Mauritanien, croûtes salées de l'Asie centrale, de l'ouest de la Chine, d'Iran (V. Kovda)). Des croûtes calcaires ou gypseuses s'y trouvent aussi, mais elles ne sont que des paléosols.

II. Zone aride

Dans cette zone, la pluviométrie est plus forte et moins irrégulière que dans la zone désertique. La moyenne annuelle prend une signification. Elle varie de 100 mm à environ 250.

Les sols y sont un peu plus évolués, surtout les sierozems. Pendant la période sèche très prolongée que ces sols supportent, ils sont pratiquement arrêtés dans leur évolution aussi bien minérale qu'organique. Elle ne se produit donc que quelques mois par an. Ils restent ainsi, relativement, jeunes.

Les sols de cette zone ne sont jamais très riches en matière organique. On les divise, cependant, d'après leur teneur en cet élément, et l'intensité de leur évolution, en deux groupes : groupe subdésertique et sierozems.

(a) Groupe subdésertique. Les sols de ce groupe sont dénommés sols gris et rouges subdésertiques dans la classification française - parfois confondus à tort avec les sérözems (N. le Houerou) ou non distingués des sérözems (W.L. Kubiena, Ph. Duchaufour) - sols gris-brun désertiques par les auteurs russes (S.S. Neustrev, Mme E.V. Lobova, etc.) ou sols gris et rouges désertiques par les pédologues des USA (C. Kellogg, J. Thorp, R. Simonson) ou d'Australie (C.G. Stephens).

E.V. Lobova y distingue les horizons suivants :

- 0 - 5 cm : croûte argilo-limoneuse, compacte, poreuse dans sa partie superficielle (0-2 cm) et lamellaire en dessous (3-5 cm) ;
- 5 ou 10 - 40 cm : horizon argileux compact et de couleur rouge faible ;
- 40 - 50 cm : horizon gypsifère (pseudomycelium).

Le profil suivant, observé à l'est de Palmyre (Syrie), a été décrit par A. Muir comme sol brun désertique :

- 0 - 5 cm : croûte fine, de limon calcaire brun clair à gris, structure lamellaire mal définie ;
- 5 - 22 cm : horizon brun clair de limon calcaire, structure nuciforme assez ferme ; quelques petits amas de calcaire ;
- 22 - 80 cm : limon calcaire brun clair, un peu compact, structure nuciforme faible, plus riche en gypse à sa base ;
- en-dessous : le calcaire.

Sauf sur roche sédimentaire compacte, ces sols ont toujours une texture à dominance sableuse.

A côté de ces sols gris sub-désertiques, d'autres, dans des régions tout aussi arides, sont plus rouges dès la surface. Celle-ci peut, aussi, être plus ou moins cimentée par le calcaire ou le gypse. Ailleurs, comme dans les sols de la série de Reeves aux USA, c'est un horizon subsuperficiel qui est, ainsi, durice. Dans les séries de Mohave, Tucson ou Verhalen, aussi aux USA, la compacité de l'un des horizons est due à une forte teneur en argile. Ces sols rouges subdésertiques ont été reconnus, en particulier, au Chili (C.D. Vial, R. Roberts).

Dans la plupart des cas, cependant, la différenciation des horizons de ces sols gris ou rouges subdésertiques est assez peu accentuée, ne comportant qu'un peu de matière organique dans les premiers centimètres et un faible durcissement en surface (Mauritanie).

La couleur rouge de certains d'entre eux a été attribuée à leur formation sous un climat caractérisé par la température élevée de la période où tombent les rares pluies. Certains auteurs (R. Maignien) ont pu montrer qu'elle était surtout développée dans les sols sur matériaux très perméables et acides. Dans d'autres cas, enfin, ce caractère, d'abord attribué à l'effet des conditions actuelles d'évolution (climat, roche-mère) est apparu finalement comme la trace d'un climat passé un peu plus humide (Sud Mauritanie).

La position de ce groupe dans la classification générale a été souvent discutée. Pour les uns, il ne s'agit que du chaînon extrême de l'ensemble des sols steppiques (G.W. Robinson, J.S. Joffe, C.F. Marbutt, C.G. Stephens, S.S. Neustruev, E.V. Lobova); pour d'autres (G. Smith et USDA Soil Survey, Ph. Duchaufour et nous-mêmes), il doit être classé parmi les sols peu évolués (classification pédogénétique française) ou parmi les sols à profil peu différencié (classification pédomorphologique américaine)*.

(b) Groupe des siérozems. Ce sont des sols évolués, à profil nettement développé, parfois jusqu'à 1,50 m ou 2 m, à teneur encore faible en matière organique, bien humidifiée et assez régulièrement répartie dans l'ensemble du profil. Ils sont généralement bien pourvus en calcaire, et celui-ci est relativement constant dans l'ensemble du sol, ou faiblement lessivé en surface. Certains auteurs (E.V. Lobova,

* Dans la communication présentée au Congrès international de Paris en 1956 - G. Aubert et Ph. Duchaufour - ce groupe avait été placé dans la classe des sols minéraux bruts ; actuellement, nous pensons plus juste de le mettre dans celle des sols peu évolués.

A.N. Rozanov) considèrent que cet entraînement partiel du calcaire, de la surface vers une certaine profondeur, est tout à fait caractéristique de ce groupe ; d'autres attachent plus d'importance, au contraire, à son faible lessivage, ou même à sa quasi-constance.

Ils sont fréquemment associés avec des sols salés et des sols à croûtes gypseuses, mais, dans les sierozems, l'accumulation des sels solubles et du gypse est surtout nette en profondeur (parfois 1,50 m) plutôt qu'en surface.

Le processus d'argilisation* y est encore peu marqué et les éléments argileux y sont stables.

Leur structure est, en général, polyédrique fine ou nuciforme, sauf tout à fait en surface où elle tend à être lamellaire.

Schématiquement, un sierozem formé sur un limon calcaire présente le profil suivant :

- 0 à 1 ou 3 cm ... : horizon gris limoneux à limono-argileux à structure lamellaire, calcaire ;
- 2 à 25 ou 30 cm .. : horizon gris plus foncé surtout en surface puis de couleur plus claire, en profondeur ; limono-poreux ; structure nuciforme ; calcaire ;
- 30 cm à 1 m : horizon gris clair, limoneux, calcaire ; structure peu développée à tendance polyédrique ;
- en-dessous : la roche-mère, limon calcaire, dans la partie haute duquel on observe, souvent, une accumulation de gypse.

Lorsque le sol est plus ou moins lessivé en calcaire en surface, l'accumulation de cet élément se fait en général à assez faible profondeur (30-50 cm). Dans celui de la série de Portneuf (Idaho - USA) un horizon très calcaire existe à 35 cm alors que les horizons supérieurs sont peu calcaires. C'est là un des cas extrêmes pour des sols de ce groupe.

Dans la formation des sierozems comme dans celle des sols gris subdésertiques, l'influence des facteurs physiques est encore très forte ; les facteurs chimiques et biologiques n'interviennent toujours qu'assez faiblement.

Ces sols sont généralement classés auprès de ceux des steppes plus humides. Certains auteurs cependant les rangent avec ceux dont le profil reste peu différencié.

A l'intérieur du groupe, les subdivisions proposées sont très variées. Certains auteurs les différencient seulement en fonction de la répartition du calcaire dans le profil ; d'autres y séparent des sous-groupes d'après l'existence et le développement du processus d'hydromorphie ; pour d'autres encore, c'est l'ensemble des processus secondaires d'évolution qui est pris en considération, déterminant les 4 sous-groupes suivants :

* Ainsi est désigné le processus de formation préférentielle d'argile dans certains horizons du sol par hydrolyse plus poussée des minéraux par suite, le plus souvent, d'une humidité plus prolongée.

- Sierozems gris ou sierozems typiques ;
- Sierozems rouges ;
- Sierozems tropicaux ;
- Sierozems hydromorphes, parfois dénommés sierozems de prairie par suite du développement qu'y prend la végétation herbacée, mais pendant quelques semaines seulement chaque année.

Les caractères imprimés à ces sols par les processus pédogénétiques eux-mêmes étant, en fait, assez peu accentués, leur division en sous-groupes importe peu, et la définition, dans chaque région, de familles et de séries fondée sur la nature pétrographique de leur roche-mère, leur profondeur, les détails de leur morphologie superficielle, devient l'élément essentiel de leur étude.

En Afrique du Nord et dans certains pays du Moyen-Orient (Syrie par exemple), ils se sont souvent développés sur des limons récents, peu épais, reposant sur les restes d'anciens sols également limoneux. Les caractères de ces paléosols ne sont pas sans influence sur l'évolution actuelle du sol total.

Ainsi en est-il près de Marrakech (Maroc) où, dans la plaine du Haouz, un sierozem à profil complexe évolue sur un limon gris récent de 30 cm d'épaisseur reposant sur un limon rouge plus ancien (J. Concaret et Ph. Mahler) :

- 0 - 1 cm : horizon gris brun clair, faiblement humifère, argilo-limoneux à structure lamellaire, assez compact (trace d'alcalisation), calcaire ;
- 30 - 50 cm : horizon brun rouge assez clair, argilo-finement sableux, nuciforme, assez compact, calcaire ;
- 50 - 100 cm : horizon brun rouge clair, de même structure, mais un peu plus calcaire et présentant une structure polyédrique faible ;
- au-dessous de 1 m : le limon rouge ancien, un peu calcaire, plus ou moins structuré.

Les études essentielles sur ce groupe de sols restent celles des auteurs russes (A.N. Rozanov et S.S. Neustraev, en particulier).

Dans cette zone aride se trouvent aussi d'autres sols : sols à croûte gypseuse, sol à croûte calcaire, sols salés et sols à alcalis, sols jeunes peu évolués, sols squelettiques, etc.

III. Zone sub-aride

La pluviométrie toujours faible, de l'ordre de 250 à 350 mm par an, très irrégulièrement répartie au cours de l'année, est très irrégulière aussi d'une année sur l'autre. La végétation est celle d'une steppe ou d'une pseudo-steppe, assez lâche, encore, le plus souvent.

Les sols typiques de cette zone, ou sols bruns steppiques ont, en surface, une teneur en matière organique généralement voisine de 2 à 3 % qui ne diminue que progressivement en profondeur - d'où le qualificatif de "iso-humiques" qui leur est parfois donné ; le calcaire, s'il y existe, est toujours assez lessivé dans les horizons supérieurs et s'accumule à moyenne profondeur. Le gypse et les sels solubles s'y concentrent dans les horizons inférieurs (souvent vers 1 m.).

Près de Fort-Collins (Colorado) un sol de ce groupe présente le profil suivant :

- 0 - 12 cm : horizon gris brun, finement sableux, un peu calcaire, structure mal définie, assez lâche ;
- 12 - 35 cm : horizon brun plus clair, limono finement sableux, plus compact, un peu calcaire ;
- 35 - 75 cm : horizon brun clair, limono-sableux, calcaire (horizon d'accumulation), passant progressivement au limon loessique sableux.

Un tel profil est très voisin, à la teneur en calcaire près, de celui formé sur les sables dans la région de Saint-Louis du Sénégal, ou dans certaines zones de bordure du Lac Tchad et correspond à ceux décrits par W.L. Kubiena comme caractéristique des Burozems ou par les auteurs russes comme sols bruns semi-désertiques.

Sauf sur sable et limon sableux, ils comportent souvent un horizon de surface ou de faible profondeur à structure lamellaire nettement développée. Le reste du sol a, généralement, une structure nuciforme à polyédrique fine ou moyenne. Formés sur matériau plus argileux, argile plus ou moins sableuse ou limon argileux, ils sont beaucoup plus compacts et leur structure devient souvent prismatique en profondeur. Lorsque ce phénomène est très développé, on passe à des sols bruns hydromorphes, appelés parfois sols bruns tirsifiés, voisins des "sols bruns à texture lcurde" (J.A. Prescott). Dans d'autres cas, la tendance à l'hydromorphie se révèle à la fois par la structure plus compacte (qui en est, en même temps, l'une des causes), et par l'apparition de tâches ferrugineuses à la base du profil comme dans le sol brun, particulièrement profond, de la région de Louga au Sénégal, décrit par R. Maignien ; dans une zone non dégradée par la culture mais fortement pâturée, dont la pente ne dépasse 2 %, sous une pseudo-steppe à bois armé à Acacia tortilis et A. seyal et sous un tapis de Schoenfeldia gracilis, la succession des horizons est la suivante :

- 0 à 38 cm : horizon brun, relativement riche en matière organique ; texture sableuse faiblement argileuse ; structure à tendance grumelleuse grossière, assez mal développée ; sur les deux premiers cas, aspect feuilleté créé par une érosion en nappe ; cohésion moyenne ; quelques pores tubulaires ; quelques petites taches et granules calcaires ; la masse n'est pas calcaire ; nombreuses racines de graminées ; quelques grandes fentes de retrait, peu prononcées, sur 40 cm environ.
- 38 à 105 cm : horizon brun clair ; à texture sablo-argileuse, plus compacte que ci-dessus ; structure nuciforme grossière ; cohésion forte ; nombreux petites taches et granules calcaires qui deviennent plus durs et plus gros vers le bas de l'horizon en formant de petits nodules dont le diamètre peut atteindre 1 cm ; quelques traînées de couleur rouge sang.
- 100 à 125 cm : horizon encore plus clair ; à texture plus argileuse et plus compacte que l'horizon supérieur ; également plus de nodules calcaires avec, dans la masse, de nombreuses traînées plus ou moins diffuses, ferrugineuses, de couleur rouille à rouge.
- 125 à 145 cm : horizon brun très clair, très calcaire ; très argileux, compact, créant un véritable niveau imperméable ; les racines pénètrent jusqu'à cet horizon. Nombreux nodules calcaires qui se développent jusque dans la roche-mère.

145 à plus de 200 cm : marne fortement calcaire où le carbonate a tendance à se concentrer en nodules.

Les sols bruns steppiques sont surtout développés dans les zones sub-arides à climat continental à hiver froid. En région plus chaude pendant la période humide de l'année, les sols, homologues des précédents quant aux conditions générales de milieu, ont une couleur plus rouge. Il leur est généralement donné le nom de sols brun-rouge. Tel est, par exemple, celui de la série de Mac Neal dans l'Arizona, au sud des USA :

- 0 - 7 cm : horizon gris châtain, sablo-limoneux, structure grumelleuse à tendance lamellaire, traces de calcaire.
- 7 - 35 cm : horizon plus rouge et de teinte moins foncée, limono-sableux, à structure nuciforme, traces de calcaire.
- 35 - 60 cm : horizon gris brun-rouge assez clair, limono-sableux, comportant de petits amas de calcaire friable.
- 60 - 110 cm : horizon gris-brun, sablo-limoneux, à nodules calcaires assez durcis.
- en-dessous : la roche-mère, sable gris, calcaire.

Plusieurs problèmes se posent à propos de ces sols bruns des steppes sub-arides, pour lesquels diverses solutions sont proposées par les auteurs.

Pour les uns - en particulier, pédologues russes et français - utilisant des classifications à base pédogénétique, la présence ou l'absence de calcaire dans la roche-mère ou le matériau originel et le sol n'est pas un élément caractéristique du groupe. Pour les autres, pédologues américains par exemple, dont les classifications pédologiques sont de type morphologique, deux groupes différents doivent être considérés : sols bruns steppiques, à roche-mère calcaire, et sols bruns non calcaires ("Non Calcic Brown Soils"), appelés parfois sols de Shantung (J. Thorp). Ce dernier groupe comporte d'ailleurs à côté des sols de zones sub-arides des sols de climat beaucoup plus humide. Dans leur étude sur les sols d'Angola, les pédologues portugais (J.V. Botelho de Gorta et al.) ont repris ce terme mais en l'appliquant surtout à des sols de climat semi-humide.

Plus difficile à résoudre est le problème des sols bruns des steppes tropicales et subtropicales sub-arides, soulevé par des pédologues de Russie (N. Rozanov, Guerassimov) ou d'Afrique tropicale (R. Maignien) ou méditerranéenne (J. Boulaine).

En effet, les sols des steppes sub-arides des régions tropicales sont semblables, à bien des points de vue, à ceux des steppes continentales froides correspondantes, mais en diffèrent par certains caractères : leur profondeur est analogue, parfois plus grande ; leur structure est, en général, de même type en fonction des horizons ; le mode de répartition de la matière organique y est analogue, mais leur teneur en cet élément est nettement plus faible ; le lessivage du calcaire s'y fait également, mais il est souvent un peu moins poussé ; enfin, la différenciation texturale des horizons, due à une formation préférentielle d'argile dans ceux de profondeur par suite de leur humidification plus prolongée, y est bien plus accusée.

Doit-on, en conséquence, rassembler tous ces sols des steppes arides et sub-arides tropicales et subtropicales en un groupe particulier, pour lequel a été proposé le nom de sols gris-marron ? Doit-on les classer en deux groupes, celui des sols arides des steppes méditerranéennes, celui des sols arides des pseudo-steppes

tropicales ? Doit-on, comme nous l'avons suggéré, en faire simplement un sous-groupe de chaque groupe steppique, en particulier dans le cas des sols bruns steppiques ? La même difficulté se retrouve, en effet, à propos du groupe châtain, et nous avons déjà signalé qu'il en était de même, quoiqu'à un moindre degré, pour les sierozems.

Comme nous l'avons également indiqué ci-dessus, les sols bruns de ces steppes sub-arides peuvent aussi subir des processus d'hydromorphie, soit par développement d'horizons compacts à structure grossière, phénomène souvent appelé tirsification, soit par individualisation des oxydes de fer et séparation des composés ferreux et des composés ferriques, ceux-ci apparaissant dans le profil sous forme de taches ou gleyification. D'autres processus secondaires peuvent également s'y développer : formation d'un encroûtement calcaire plus ou moins durci, enrichissement de certains horizons en sels solubles, enrichissement du complexe absorbant de l'horizon, surtout de surface, en cations alcalins et dégradation de la structure, etc.

Ces processus ont souvent été utilisés dans les classifications pédogénétiques comme éléments de base pour définir des sous-groupes dans l'ensemble de ces sols bruns des steppes sub-arides ou semi-désertiques (au sens des pédologues russes).

Nous utilisons actuellement les suivants :

- sous-groupe des sols bruns steppiques typiques,
- " " des sols brun-rouges,
- " " des sols bruns tropicaux,
- " " des sols bruns encroûtés,
- " " des sols bruns à pseudogley
- " " des sols bruns salés
- " " des sols bruns à alcali ou solonetziques.

Dans la zone sub-aride, s'observent aussi, par places, des sols analogues aux sols bruns précédents, mais un peu plus riches en matière organique, et, partant, plus foncés, en même temps que plus lessivés, en surface, de leur calcaire et à structure plus accusée. Ces sols châtain sont cependant caractéristiques de steppes de zones moins arides, à climat semi-humide, aussi ne les étudierons-nous pas dans ce rapport.

Parmi les sols des zones arides, à côté de ceux qui, évolués et suffisamment drainés, expriment par leurs caractères une influence dominante des conditions de pédoclimat et de végétation, sols autrefois appelés "zonaux", il en est dont l'évolution dépend fondamentalement d'autres facteurs, en particulier des conditions physico-chimiques du milieu lui-même : richesse en sels solubles, de sodium, magnésium, calcium ou drainage plus ou moins ralenti.

Les sols sont classés comme sols salés dès que leur teneur en sels solubles atteint de 2 o/oo en sol sableux à 4 o/oo en sol argileux ou que la conductivité de l'extrait de la pâte saturée dépasse 4 micromhos par cm.

Ces sols ont été très étudiés depuis de nombreuses décades, à la fois parce qu'ils présentent des caractères superficiels très frappants : efflorescences grises ou blanches dites "salant blanc", dues aux chlorures et sulfates de sodium, magnésium, calcium ; taches noires de "salant noir" dues à la remontée en surface de

matière humique dissoute par la solution du sol enrichie en carbonate de sodium ; humidité persistante des sols à chlorure de calcium ; structure de l'horizon superficiel des sols très salés à alcalis finement poudreux en saison sèche et devenant fluide en saison des pluies ; structure diffuse des sols à alcalis, due à l'enrichissement de leur complexe absorbant en sodium et, en certains cas, en magnésium ; et parce qu'ils constituent des milieux défavorables à la croissance des végétaux (végétation halo-phytique caractéristique) et au développement des cultures dont la sensibilité est très variable d'une espèce à l'autre.

Les sols de cette classe sont présentés en détail dans le rapport de H.E. Haynard et L. Bernstein qui doit être discuté après celui-ci.

Nous avons déjà signalé que dans les sierozems et, plus encore, dans les sols bruns, certains éléments, sulfate et carbonate de calcium, ne se maintiennent pas également répartis dans l'ensemble du profil mais s'accumulent en profondeur sous forme de granules, nodules plus ou moins durcis, filaments, pseudo-mycéliums et amas friables. Parfois, cette accumulation est poussée jusqu'à la formation d'un horizon où le gypse ou le calcaire deviennent l'élément dominant : sols encroûtés et sols à croûte calcaire ou gypseuse.

Il n'est pas rare d'ailleurs d'observer deux horizons d'accumulation, l'un de gypse en profondeur, l'autre de calcaire à moyenne profondeur (Sud Marocain, Sud Tunisien, Iran).

Ces processus et horizons d'accumulation ont été étudiés par de nombreux pédologues, en particulier d'Afrique du Nord, tels que J. Durand en Algérie, M. Gigout au Maroc, E.H. Vel Villar et nous-mêmes.

Sur de grandes surfaces des pays arides (piedmonts des collines et plateaux du Tell, Hauts-Plateaux d'Algérie, certains points de Syrie, sous-ouest du Centre australien, sud du New-Mexico, de l'Arizona, de la Californie, zone septentrionale du Mexique, Uzbechistan, Chine centrale, etc.) le sol apparaît partiellement constitué ou couvert d'horizons calcaires durcis. Très souvent, il s'agit de formations anciennes que de nouveaux dépôts éoliens, alluviaux ou colluviaux sont venus enterrer.

Ces croûtes ou carapaces, presque toujours composées, en surface, d'un horizon durci, lité ou nodulaire, faisant suite à un banc encore dur mais plus homogène, puis d'une masse friable et d'un horizon inférieur à simples amas calcaires, sont d'origines très diverses.

Certaines sont, seulement, des dépôts de lacs, de marécages, de nappes phréatiques, dans des zones déprimées ou en bordure de bas plateaux. Elles sont alors très liées aux conditions géographiques et géomorphologiques générales (V. Kovda, E.H. del Villar) ; d'autres sont des dépôts de sources (G. Gaucher) ; d'autres, encore, sont dues à des phénomènes de ruissellement superficiel (J. Durand) ; ces deux derniers processus n'ont d'ailleurs pu donner naissance qu'à la partie durcie de la croûte, déposée, dans ce cas, à la surface de sédiments calcaires récents.

Certaines peuvent n'être que le résultat de phénomènes d'évaporation superficielle à la surface de bancs calcaires friables. Dans d'autres encore, le processus de lessivage paraît être, presque seul, responsable de leur formation (H. Roseau, L. Yankovitch).

Nous pensons que beaucoup de ces croûtes, friables dans leur masse et durcies en surface, sont dues à un double processus, très longtemps prolongé, de lessivage des horizons de surface d'un sol généralement steppique et de remontée capillaire aux dépens de nappes temporaires, ou plus exactement de zones d'engorgement constituées, en profondeur, par des venues latérales d'eaux ou par la pénétration en profondeur d'eaux de pluie lors des périodes très pluvieuses qui se produisent si irrégulièrement en ces régions.

Ces deux processus, activés d'ailleurs par l'effet du système racinaire de la végétation, peuvent, siècle après siècle, donner naissance aux bancs calcaires friables prolongés à leur base par les horizons riches en amas calcaires si souvent observés.

Le durcissement superficiel, si caractéristique de ces croûtes, et que nous avons toujours observé comme intimement lié à la masse friable, ne paraît alors dû qu'à une action secondaire d'humidification temporaire de la partie supérieure de cette masse et au redépôt par évaporation des éléments calcaires. Il a été signalé que des algues incrustantes pouvaient intervenir également dans ce phénomène.

Quoi qu'il en soit du mode exact de formation de ces croûtes calcaires, il a été nettement démontré, dans certaines régions comme l'Afrique du Nord, par les géologues et les géographes (P. Raynal, G. Choubert au Maroc) que ces croûtes ne sont que rarement - d'aucuns disent même "jamais" - actuelles et qu'elles se sont surtout constituées à certaines périodes fini-pluviales du quaternaire : villafranchien, soltanien, tensiftien. Des archéologues (P. Cintas en Tunisie) ont pu montrer, en sens inverse, l'âge récent de certaines d'entre elles.

Cependant, il n'en est pas moins net que, mises à part quelques croûtes calcaires très anciennes, et dont la position n'est plus en liaison avec les facteurs géographiques actuels, la plupart d'entre elles sont surtout associées aux sols bruns arides ou à des sols de régions sub-humides, plus rarement aux sols gris sub-désertiques ou même aux sierozems.

A ces deux derniers groupes sont surtout associées des croûtes gypseuses. Les processus pédologiques proprement dits paraissent moins essentiels dans leur formation qui est plutôt due à des dépôts de nappes phréatiques ou à des remises en mouvement et des évaporations à la surface de sédiments lagunaires anciens datant, souvent, de diverses périodes du quaternaire.

La place de ces formations, croûtes calcaires et croûtes gypseuses, dans la classification prête à de nombreuses discussions.

Lorsqu'elles apparaissent en surface ou très près de la surface, elles peuvent être classées avec les sols squelettiques ou les sols sub-squelettiques, rarement avec les rankers, les horizons superficiels n'y étant pas assez humifères.

Elles peuvent également être classées comme paléosols dans une catégorie (étage, classe, etc.) particulière (J. Durand, N. le Houerou). Elles peuvent aussi constituer une sous-classe de la classe calcimorphe.

Lorsque des horizons superficiels suffisamment développés existent au-dessus des croûtes, plusieurs cas peuvent se présenter qui doivent être différenciés dans une classification pédogénétique :

- la croûte calcaire peut être ancienne et les horizons supérieurs ont été déposés par-dessus ; le sol est alors classé en fonction de leur type d'évolution, la croûte n'intervenant que pour définir la famille (nature de la roche-mère) ou la série (détails du profil) du sol ;

- la croûte peut être ancienne et les horizons supérieurs peu épais se sont constitués à ses dépens. Elle est alors la roche-mère et le sol est classé d'après le type d'évolution de l'horizon qui en dépend (souvent sol rendziniforme) ;

- la croûte est actuelle ou sub-actuelle, liée génétiquement aux horizons supérieurs. Le sol peut être classé alors, suivant les cas, comme sous-groupe encroûté à l'extrême du profil steppique sus-jacent, ou comme sol hydromorphe à croûte de nappe.

Les sols hydromorphes, dont l'évolution est dominée par la présence d'un excès d'eau dû à la remontée d'une nappe phréatique à travers le profil, à un engorgement temporaire de certains horizons ou à un recouvrement de la surface du sol par des eaux d'inondation, ne sont pas très répandus en zone aride. Ils y existent cependant.

Les processus d'hydromorphie peuvent influencer, en particulier, sur l'évolution de la matière organique. Elle peut être très ralentie ; il se forme alors des sols tourbeux ou semi-tourbeux. Ils n'existent pas, ou très rarement, en zone aride ; parfois, ils n'y sont que des paléosols (Sud Tunisien). Par contre, l'on peut y observer, quoique assez peu souvent, des sols foncés des régions tropicales et subtropicales (sols noirs tropicaux), caractérisés par une matière organique bien évoluée mais relativement très foncée et une structure très large dès la surface ou à moyenne profondeur. Ils ne se développent, dans cette zone, qu'en des points bas où s'accumulent les eaux de pluie ou les eaux d'inondation des rivières voisines.

Ainsi en est-il pour certains profils des plaines du sud-est du centre de l'Australie (B.E. Butler), de la Vallée du Niger au Soudan (B. Dabin), de la région du Lac Tchad (J. Pias), du Nil dans la Gezira du Sudan (H. Greene, T.N. Jewitt) ou de la plaine du Haouz au Maroc (J. Concaret et Ph. Mahler).

Il est d'ailleurs souvent difficile de préciser ce qui, dans l'évolution de tels sols, est dû à l'action du climat actuel (pluviométrie souvent de 250 à 400 mm par an en moyenne) ou à celle de climats passés un peu plus humide (H. Franz). En effet, dans des régions tropicales, juste à la limite de ces zones arides, sous des climats comportant une pluviométrie de 600 à 700 mm seulement, ce type de sol peut se développer beaucoup plus largement. En zone aride, ces sols foncés ne paraissent présenter d'horizon grumeleux superficiel, comme il est fréquent en certains pays au moins un peu plus pluvieux (d'où les noms de "grumosols" ou de "self mulching soils" qui leur sont parfois donnés) que sur quelques centimètres au maximum.

L'une des raisons du faible développement de ce type de sols dans la zone aride est justement la pauvreté en matière organique qu'y présentent l'ensemble des formations pédologiques. Ce caractère ne limite pas, par contre, le développement des divers types de sols à gley ou à pseudo-gley.

Ils occupent de grandes étendues dans les aires d'inondation des différents fleuves et rivières des zones arides : Moyen-Nil, Niger, Logone en Afrique tropicale ; Moulouya, Cheliff, Medjerda, Bas-Nil en Afrique du Nord ; et de même dans les autres continents.

Leur profil est très simple. Leur matériau originel est, le plus souvent, une alluvion limono-argileuse ou argileuse, par exemple, et dès leur surface, jusqu'à une certaine profondeur, se trouvent des taches ocre-rouille d'oxyde de fer, généralement en traînées le long des traces de racines d'herbes, ou des fentes de dessiccation, ou en enrobage de cailloux ou d'éléments grossiers ; quelques taches gris-clair ou gris violacé, correspondant à des composés réduits du fer ou du manganèse, s'y observent, aussi, très fréquemment. En surface, le sol est très pauvre en matière organique et sa structure est souvent lamellaire, rarement squameuse ; plus en profondeur, elle devient polyédrique puis s'estompe et le sol passe peu à peu à sa roche-mère, l'alluvion. Dans de nombreux cas apparaissent, à la surface, des craquelures de dessiccation, en réseau polygonal, assez régulièrement hexagonal, correspondant à de grandes fentes déterminant en profondeur une structure prismatique.

Des caractères analogues peuvent se développer dans des sols qui s'engorgent d'eau en profondeur. Les éléments typiques du "pseudo-gley" ne s'observent alors plus en surface mais en profondeur. Ces sols à "pseudo-gley" de profondeur des vallées des zones arides présentent souvent un profil complexe, dû à des variations dans l'alluvionnement qui a déterminé leur roche-mère : couche sableuse au-dessus d'un niveau argileux par exemple. Ils s'étendent alors au-delà des limites d'inondation fluviale ou de bas-fonds où se concentrent les sols à pseudo-gley de surface ; ils peuvent exister, en particulier, sur certains bas-plateaux ou terrasses anciennes.

Tous ces sols hydromorphes sont, dans de nombreuses classifications (russe, américaine, belge, australienne, anglaise utilisée au Kenya) placés comme sous-groupes dans les divers groupes auxquels ils peuvent se rattacher. Dans le cas des "sols foncés", ils constituent un groupe à part.

Dans la classification française utilisée dans les pays tropicaux, leur ensemble forme une classe séparée, subdivisée en sous-classes et en groupes suivant la profondeur et l'épaisseur des horizons soumis à l'action de ces processus, leur durée et, le cas échéant, le sens des mouvements de la nappe phréatique.

Si les sols précédemment décrits sont liés à certaines sous-zones climatiques de la zone aride ou, comme les sols salés, sols à croûte et sols hydromorphes, aux régions les plus humides - humidité de pluie ou humidité d'inondation - de la zone aride, par contre, les sols jeunes, peu évolués et les sols squelettiques peuvent s'y observer en toute région sinon en tout point.

Ils n'y présentent pas de caractère particulier par rapport à ceux qu'ils possèdent en d'autres zones climatiques.

Les sols squelettiques y prennent facilement naissance sous l'action de l'érosion éolienne ou - dès qu'elle peut jouer - de l'érosion hydrique, parce que la végétation, même quand elle s'y développe, est trop réduite pour les protéger efficacement. Leur classification prévoit d'abord leur division en lithosols et régosols ; elle se poursuit, ensuite, en fonction de certains caractères pétrographiques des roches qui les constituent : résistance à l'altération et à l'érosion, perméabilité, richesse en bases, réaction ...

Les sols jeunes, peu évolués, s'observent assez souvent dans cette zone. En effet, les fleuves et rivières ayant un débit très irrégulier et venant de zones beaucoup plus humides, débordent fréquemment et constituent ainsi, dans leurs plaines basses, des dépôts alluviaux souvent épais et souvent, aussi, doués d'un potentiel élevé de fertilité. Ils sont, généralement, classés en fonction de leur texture et de leur perméabilité.

A côté des sols jeunes d'origine alluviale, il en existe d'autres peu évolués aussi, d'origine colluviale. Ils ne paraissent, cependant, pas très étendus en zone aride. Il en est, aussi, d'éoliens dont les caractères sont très semblables à ceux des sols désertiques d'apport. Signalons cependant la grande extension qu'y prennent souvent les loess, comme, par exemple, dans le Negev en Israël (S. Ravikovich). Il peut parfois s'en trouver, aussi, d'origine marine, sur des dépôts laissés par la mer en bordure des côtes. Ils sont, alors, riches en sels solubles, chlorure de sodium surtout.

Ces sols jeunes ont été très prospectés et décrits dans les régions arides du Moyen-Orient et de l'Asie du Sud-Ouest : Egypte, Syrie, Jordanie, Iran, Irak, Pakistan, Arabie saoudite, en particulier par les équipes pédologiques de la FAO (W. Sparwasser, B.G. West, F. Moormann, D.M. Currie, W.J. Van Liere, H. Finielz, etc.) sous la direction de L. Bramao.

GÉOMORPHOLOGIE ET PALEOSOLS EN ZONE ARIDE

Comme dans toute région, le facteur géomorphologique est d'une grande importance dans l'évolution des sols. Sauf en zone désertique, la masse d'eau de pluie qui atteint le sol, tout en restant toujours faible au total, est cependant suffisamment concentrée dans le temps, résultat de gros orages ou de tornades, pour ne pouvoir, le plus souvent, que difficilement pénétrer dans le sol et drainer à travers. Aussi, la position à la fois topographique et géomorphologique de chaque sol règle-t-elle sa susceptibilité à l'érosion, en même temps que sa vitesse d'évolution et, dans certains cas, la possibilité pour les processus d'hydromorphie de s'y développer. Sols jeunes, sols squelettiques et sols érodés, sols hydromorphes en sont, ainsi, étroitement dépendants.

Il en est de même pour les sols salés, sous leurs diverses formes : sols salins, sols à alcali peu salés ou sols très salés à alcali, croûte saline, etc.

Cette influence des conditions géomorphologiques sur le développement des sols salés et sur la composition des accumulations salines a été très spécialement étudiée par les pédologues russes (V. Kovda). C'est ainsi que sur un "continent idéal" en zone aride viennent s'accumuler, dans les bas-fonds et les dépressions, les chlorures de calcium, de magnésium et sodium ; puis, en auréoles tout autour, sur les premiers replats, homologues des diverses terrasses, les sulfates des mêmes éléments ; et, plus haut encore, en bordure des plateaux, les carbonates, surtout de calcium. Cette répartition s'observe, presque régulière, dans les zones arides de l'Iran central en Sibérie occidentale, dans la dépression de Touran au Turkestan.

En diverses parties du monde, les zones arides correspondent à de grandes dépressions et basses plaines aux pieds de chaînes de montagnes. Elles sont alors constituées par des dépôts de piedmont et cônes de déjection, et par les terrasses anciennes, récentes et actuelles ou de bas niveaux, des rivières qui en descendent.

Sur ces dernières terrasses les sols salins et à alcalis - solontchaks surtout - ont tendance à se former très facilement ; sur les terrasses moyennes, ils peuvent aussi prendre naissance, mais de façon moins régulière, et les solonetz peuvent s'y constituer, quoique peu étendus en général. Ils s'observent plus rarement sur les terrasses hautes et sur les cônes de déjection.

L'influence de la position topographique et des conditions géomorphologiques peut encore se faire sentir autrement sur les caractères des sols des zones arides.

En effet, l'énergie pédogénétique du climat actuel y est faible. Les caractères hérités de conditions climatiques anciennes ont donc plus de chance de se maintenir ; le climat actuel ne peut que difficilement les effacer, sauf certains caractères de répartition ou de qualité de la matière organique, ou, à un moindre degré, certains types de structure. L'ancienne répartition d'éléments solubles, calcaire, gypse, sels alcalins, peut aussi se modifier en fonction des conditions actuelles de pluviométrie et d'évaporation. Elle ne le peut, cependant, que lentement et partiellement. D'autres caractères, peut-être la répartition générale des structures, celle des textures, la présence de fer ou autres éléments libérés ou d'éléments colloïdaux provenant de l'altération des minéraux primitifs, etc. se maintiennent sous le climat actuel tels qu'ils ont été définis dans les périodes anciennes. De nombreux exemples pourraient en être donnés, tirés des travaux de B.E. Butler sur les formations de Parna en Australie, ou de R.W. Jessup sur le sud-est de l'Australie centrale, de A.I. Perelman et de V. Kovda en Asie centrale, de W.J. Van Liere en Syrie, de C.F. Hemming et C.G. Trapnell au Kenya, ou de certains pédologues du "USDA Soil Survey" dans le New-Mexico.

Un fait qui confère encore plus d'importance à cette prise en considération des sols anciens est que, comme l'a si bien exprimé M. Raynal au Maroc, depuis plusieurs dizaines de millénaires l'énergie pédogénétique du climat n'a probablement jamais été aussi faible en certaines régions, telle l'Afrique du Nord. Depuis plusieurs millénaires, le climat, tout en subissant des fluctuations, est resté axé autour d'un même type général mais son énergie pédogénétique va, finalement, en diminuant. Aussi sans aller jusqu'à prétendre que seuls les climats passés ont joué dans l'évolution des sols en Algérie et au Maroc, et que le climat actuel n'y a pas d'influence pédogénétique (G. Gaucher), nous devons reconnaître que les premiers ont laissé, dans de nombreux sols de ces deux pays, des caractères distinctifs, une marque que le climat actuel ne peut faire disparaître.

Il en est de même en Tunisie ; peut-être aussi en Australie, d'après les travaux de B.E. Butler.

PROSPECTION ET CARTOGRAPHIE DES SOLS DE LA ZONE ARIDE

Ces sols furent prospectés et étudiés d'abord en Russie, puis aux Etats-Unis. Vinrent ensuite les recherches faites en Australie, puis en Afrique du Nord, aux Indes, au Moyen-Orient, en Afrique tropicale et enfin en Amérique du Sud.

Mises à part l'Amérique du Nord, l'Australie, la Russie et l'Asie centrale (Chine en particulier et Sibérie) ainsi que la plus grande partie de l'Afrique, c'est surtout les équipes pédologiques de certains organismes internationaux comme la FAO qui ont entrepris, avec l'aide des services gouvernementaux des divers pays, la prospection et la cartographie des zones arides du monde.

Nous regrettons de n'avoir qu'une connaissance très réduite des efforts considérables faits dans ce sens par les pédologues d'URSS. La tenue du Colloque Unesco nous permettra certainement de combler, au moins partiellement, cette lacune.

Pour les autres territoires, non africains, nous avons reçu d'amples renseignements de L. Bramao, B.E. Butler, H. Greene, C.E. Kellogg et ses collaborateurs, C. Diaz Viale. Nous leur en exprimons notre très vive gratitude.

En Afrique du Nord la zone aride s'étend non seulement en bordure du Sahara mais aussi au nord de l'Atlas et sur les Hauts-Plateaux. Dans cette dernière région, sols

bruns et sols à croûte calcaire, fossiles le plus souvent, alternent avec des sols alluviaux récents, parfois hydrimorphes au milieu desquels se trouvent des sols salés, sols salins et sols salés à alcalis (solontchaks) ; ces derniers s'observent plus en Algérie et en Tunisie qu'au Maroc. Au sud de l'Atlas et en bordure du désert, les mêmes types de sols se retrouvent, mais les sols salés sont alors très abondants et comprennent aussi les sols à croûte salée des bordures de choots ; les sols à croûte gypseuse s'y développent très largement. En Algérie et en Tunisie, la carte pédologique générale a été dressée au 1/1.000.000 en fonction des grands groupes de sols. Au Maroc c'est une carte d'association des sols qui a été publiée. Dans tous les pays d'Afrique du Nord, des études, prospections et cartes de détail ont été réalisées dans de nombreux secteurs de mise en valeur, surtout en vue de l'irrigation des terres, parfois aussi pour leur défense contre l'érosion, par divers services : hydraulique d'Algérie et de Tunisie, Génie rural du Maroc, Institut du désert en Egypte (G. Bryssine, J. Concaret, Ph. Malher au Maroc ; J. Boulaine, J. Durand, G. Gaucher en Algérie ; P. Dessus, P. Sabathe, P. Roederer en Tunisie ; en Egypte, M. El Gabaly et ses collaborateurs de l'Institut du désert ; ainsi que W.E. Bowser de la FAO).

En Afrique au sud du Sahara, la carte au 1/5.000.000 a été dressée, à la demande du Conseil scientifique africain, sous l'impulsion du Service pédologique interafricain et de son directeur, J. d'Hoore.

Les sols bruns, sierozems et sols gris sub-désertiques n'y ont pas été distingués les uns des autres. Ils y couvrent de grandes étendues mais n'y sont que rarement calcaires. Les sols à croûte gypseuse ou calcaire y sont très fréquents. Les sols salés eux-mêmes y sont assez restreints : Sud Mauritanie et Nord-Ouest du Sénégal, zone du Lac Tchad, quelques points de la Vallée du Nil.

Par contre, les sols foncés (tirs etc.) et les divers types de sols hydro-morphes y sont très largement représentés dans les principales vallées où, d'ailleurs, les travaux de prospection ont été très actifs : Vallée du Sénégal (J. Maynard), Vallée du Niger (B. Dabin, H. Erhart et nous-mêmes), Vallée du Logone-Chari et bord du Tchad (J. Pias, N. Leneuf), Moyenne Vallée du Nil et Gezira du Sudan (H. Greene, T.N. Jewitt, G.A. Worrall), Vallée du Pangani au Tanganyka (T.W.G. Dames). En Angola les sols bruns et brun-rouge, calcaires ou non calcaires, ont été décrits par J. Botelho da Costa, A.L. Azevedo et D.H. Godinho Gouveia. En Afrique du Sud, ils l'ont été en particulier par M. Van der Merwe. Des études de détail y sont poursuivies, depuis quelques années, sous l'impulsion du très actif "South African Regional Committee for Conservation and Utilization of Soils".

En Europe, l'extension de la zone aride est assez réduite sauf en Russie. Elle a été très étudiée dans ce dernier pays par de nombreux pédologues dont, malheureusement, seules quelques publications générales nous sont connues, à cause de notre ignorance de la langue russe.

Pour le reste de l'Europe, les travaux de W.L. Kubiena nous donnent une idée assez précise de l'importance et des caractères des sols bruns, sierozems et sols salés en Europe centrale et orientale ou en Espagne et Portugal. Dans ces deux derniers pays, ils ont été précédemment étudiés par E.H. del Villar et par L. Bramao, celui-ci ayant d'ailleurs dressé la carte des sols de son pays. Dans les autres (Roumanie, Hongrie, etc.) ils l'avaient été par des pédologues aujourd'hui disparus : A. Stebutt, Von Sigmond, etc.

Ils existent également en Italie et, davantage, en Grèce, mais ils y sont le plus souvent très tronqués par l'érosion. En Turquie, ils ne sont que peu répandus sauf dans la partie asiatique du pays.

En Turquie d'Asie les sols bruns occupent la plus grande étendue dans le plateau d'Anatolie. Les sols brun-rouge s'y développent dans la partie sud orientale et les sierozems les bordent. Les solontchaks sont abondants surtout dans certaines plaines telles que celles du Lac Tuz (H. Oakes).

Dans tout le Moyen-Orient les sols arides prennent une grande extension. En dehors des études qui leur ont été consacrées par A. Reifenberg en Palestine et en Syrie, et, dans ce dernier pays, par A. Muir, nous connaissons surtout ces sols par les prospections des pédologues de la FAO, activement dirigés par L. Bramao, W.W. Sparwasser et T.H. Day, M.L. Dewan en Iran où, en dehors d'études générales ou de détail mais très localisées, l'Azerbaïdjan et le Khuzistan sont deux provinces des plus complètement étudiées. B.G. West et P. Buringh en Irak, où les problèmes de salinité des sols ont une grande importance et ont été étudiés, en particulier dans les régions de très ancienne irrigation, par R. Smith et V.C. Robertson ; W.J. Van Liere en Syrie, où de nombreux paléosols très peu transformés par le climat actuel et exprimant dans leurs caractères l'empreinte essentielle des climats passés, occupent de grandes étendues ; F. Moormann dans l'est de la Jordanie ; H. Finielz en Arabie saoudite, etc.

Quelques autres pédologues, appartenant aux divers pays ou venant de l'étranger, y ont prospecté certaines régions ou étudié quelques types de sols particuliers ; en Iran, J. Famoori dans la plaine de Téhéran, P.H. Beckett dans le sud où les sols brun-rouge sont abondants, P. Verot dans les provinces de la Caspienne orientale ; en Irak central, S.A. Harris qui a porté essentiellement son attention sur les sols foncés à mauvaise structure et à microrelief "gilgai".

Aux Indes, la plupart des études ont porté sur les sols salés (S.P. Raychandhuri, A. Sankaram, R.D. Tripathi, N.M. Ningade, J.K. Basu, R.R. Agarwal, etc.). Certaines, cependant, envisagent l'ensemble des zones arides du nord-est du pays (S.P. Raychaudhuri).

Les sols arides du Pakistan occidental sont, peut-être, moins bien connus, malgré les travaux de W.E. Bowser et de D.M. Currie, tous deux de la FAO, et ceux de pédologues pakistanais tels que Mohammed Rafique, A.G. Ashgar, etc.

Pour ce qui est des sols des zones arides de Chine, Sibérie et Asie centrale, la plupart des publications qui leur ont été consacrées nous échappent par suite de notre méconnaissance des langues utilisées dans ces divers pays ou de la langue russe.

En Amérique du Nord la zone aride couvre de très vastes surfaces au Mexique et aux Etats-Unis. Rien que dans ce dernier pays, elle occupe environ 270 millions d'hectares sur lesquels près de 50 millions ont été prospectés et cartographiés à une échelle suffisamment détaillée, le tout entrant, bien entendu, dans la carte générale des sols des Etats-Unis. (C.F. Marbut, Ch.E. Kellogg). Sols bruns et brun-rouge, sierozems, sols gris subdésertiques, appelés "Desert Soils", sols foncés qui y portent le nom de Grumosols, y ont tous fait l'objet d'études géographiques ou pédologiques particulièrement poussées. Parmi les très nombreux pédologues ayant prospecté et étudié ces sols, nous citerons : Ch.E. Kellogg, W. Johnson, G. Harper,

H. Oakes, J. Thorp, etc. Quant aux sols salés, il y a peu de régions au monde, sinon en URSS, où ils aient été autant étudiés (L. Richards et ses collaborateurs du "Salinity Laboratory de Riverside"). Les problèmes géomorphologiques et ceux relatifs à l'âge de chaque sol y font l'objet de travaux actuellement en cours, et menés avec le maximum de moyens.

En Amérique du Sud et Centrale, pédologues des USA et pédologues de la FAO collaborent activement avec ceux des pays eux-mêmes.

Au Brésil, la région aride du nord-est a été l'objet de nombreuses prospections dans son ensemble (D.L. Bramao), ou en certaines zones particulièrement intéressantes pour l'irrigation, comme la vallée du San Francisco, la région de Barreiras dans la province de Bahia (D.L. Bramao et G.A. Black) et la plus grande partie de l'Etat de Pernambuc. Au Chili, la publication de R. Roberts porte sur l'ensemble du pays et décrit les sols arides qui y ont une si grande extension et dont certains secteurs ont été étudiés en détail par d'autres pédologues (Vallée de Lluta et de l'Huasco). Il en est de même de celle de C. Frei pour l'Equateur. Quelques prospections de reconnaissance ont également été réalisées en Bolivie.

En Australie, les prospections ont été très poussées par le Service de conservation des sols du Ministère de l'agriculture et, plus encore, par les divers services de la "Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization". Une vue d'ensemble des sols des zones arides de ce pays a été donnée, il y a près de 20 ans, par J.A. Prescott qui en a dressé la carte. La corrélation entre ces sols et ceux d'Amérique a été effectuée par G.C. Stephens et les descriptions et photos qu'il en a données dans son excellent "Manuel" en permettent une reconnaissance aisée.

Sols gris subdésertiques et sols bruns sub-arides y sont nettement différenciés ainsi que de typiques sols des déserts. Les "sols foncés" à microrelief "gilgai" y sont très largement représentés, le plus souvent sous des climats sub-humides, parfois en climat aride.

Les sols salés y existent également mais, souvent, leur présence est due à l'apport par les vents de sels provenant des embruns marins ; aussi, y sont-ils moins liés au climat aride qu'en la plupart des autres pays.

L'étude des paléosols y a été très poussée, d'autant qu'en surface des zones arides de ce pays n'apparaissent pas seulement des sols anciens de type climatique sub-humide : sols rouges décalcifiés ou sols châtaîns dans la zone des sols bruns, etc. comme en Afrique du Nord, mais aussi certains éléments résiduels de sols latéritiques, y compris, parfois, de véritables cuirasses démantelées (R.W. Jessup).

Par ailleurs, de nombreuses études de détail y ont été consacrées aux divers secteurs d'irrigation, en particulier dans les New South Wales (A. Howard, T.J. Marshall, H.K. Northcote, R. Smith, J.K. Taylor, F. Penman, G.D. Hubble, etc.).

Dans la prospection des sols des zones arides, deux cas sont à considérer. Assez fréquemment l'étude en est réalisée en vue d'y promouvoir une irrigation. Seules, alors, prospection et cartographie de détail sont utilisables, à des échelles telles que le 1/20.000 et au-delà. Les classifications employées tiennent, d'ailleurs, très largement compte du but recherché et, partant, des propriétés physiques des sols, de la topographie et du microrelief. La prospection se fait

suivant les méthodes les plus habituelles. Dans d'autres cas, il ne s'agit que d'une reconnaissance générale de la zone afin d'en déterminer les portions qui méritent et nécessiteront une étude plus précise en vue de leur mise en valeur ; la prospection et la cartographie se font alors, souvent, au 1/100,000e ou au 1/200,000e (Tchad). Dans ce cas, un premier travail consiste en une étude détaillée des photos aériennes (P. Buringh, T.D. Waterhead). Il est indispensable, ensuite, d'effectuer les prospections par équipes complexes de pédologues accompagnés de géologues et hydrogéologues (Hunting c), d'hydrologues (Orstom au Tchad), de botanistes (Services hydrauliques en Algérie et en Tunisie) ou de l'ensemble : hydrogéologues, écologistes, phytogéographes, agronomes, géographes, etc. L'exemple le plus remarquable de la mise en application de cette méthode de "prospection coordonnée" est celui des équipes du "Land Reconnaissance Survey Department" du CSIRO mis au point par C.S. Christian. C'est ainsi qu'a été menée, sous les auspices de l'Unesco, l'étude de la vallée d'Isplingi au Pakistan, par les services météorologistes, géologues, de conservation des sols et de recherches forestières du pays.

Les services de prospection des USA opèrent, aussi, de cette manière.

Ces diverses méthodes de travail ont été analysées par H. Greene dans le chapitre, consacré aux sols, du "Guide des travaux de recherche sur la mise en valeur des régions arides" publié par l'Unesco en 1957.

CARACTERES DES SOLS DE LA ZONE ARIDE

Comme indiqué précédemment, nous n'envisagerons pas les sols salés dont l'étude est faite dans un autre rapport.

Les caractères et propriétés des sols jeunes, peu évolués et des sols squelettiques dépendent essentiellement, des points de vue physique et chimique, de la nature de leur roche-mère. Du point de vue biologique, elle intervient aussi très largement, mais un fait essentiel est la faiblesse et l'irrégularité des pluies et leur caractère concentré dans le temps. Le sol ne reste humide que peu de temps et son évolution biologique est donc très limitée chaque année.

Il en est de même dans le cas des sols évolués, en particulier sierozems et sols bruns qui n'évoluent que quelques mois chaque année. Malgré cette limitation quantitative à leur développement biologique, ils possèdent une matière organique toujours bien évoluée ; son rapport C/N est voisin de 10 et même, souvent, légèrement en-dessous ; il varie entre 8 et 12 en général. D'après les travaux des pédologues russes, il serait de 8-9 dans les sols bruns et de 8 à 12 dans les sierozems, les teneurs en matière organique variant alors de 3 à 1 %. Cette teneur est plus basse dans ceux qui évoluent sous un climat dont la période de pluie correspond à une température assez élevée (sierozems et sols bruns des régions tropicales et subtropicales). Elle est alors de 0,5 à 1 % dans les sierozems et de 0,8 à 1,5 %, rarement 2 % dans les sols bruns.

Cette matière organique a un rapport acides fulviques/acides humiques voisin de 1 dans les sierozems et inférieur à 2 dans les sols bruns (E.V. Lobova).

La richesse organique des divers horizons du sol ne diminue que progressivement à travers le profil comme dans tous les sols où elle est essentiellement constituée aux dépens des débris du système racinaire d'une végétation herbacée.

Le rapport humus/matière organique total augmente avec la profondeur. Il peut atteindre 30 %, surtout en sols bruns hydromorphes où les composés humiques formés sont particulièrement stables. Leurs rapports C/N croissent alors très sensiblement mais, même dans ces sols, ils présentent une valeur plus faible en profondeur qu'en surface.

Les sols bruns et sierozems peuvent être de textures variées, mais principalement limoneuse ou sableuse par suite de la lente altération qu'y subissent les minéraux primitifs. Formés sur des argiles sédimentaires - par exemple sur des alluvions argileuses, comme dans la Vallée du Niger au Soudan - ils tendent à devenir hydromorphes. Très fréquemment, surtout dans les zones tropicales ou subtropicales à hiver - ou hivernage - assez chaud, on observe dans le profil de ces sols évolués sous climat aride des horizons plus argileux en profondeur qu'en surface. Cette différence peut être due à une humidité plus prolongée des horizons profonds et, partant, à une formation plus forte d'argile par hydrolyse des minéraux préexistants. Ce processus peu développé dans les sierozems prend plus d'importance dans les sols bruns.

La répartition du calcaire et des sels solubles dans ces divers sols des régions arides est également très caractéristique.

Les sels solubles y sont généralement lessivés, mais ils peuvent s'accumuler en surface, soit à certaines périodes en sols limoneux, soit à tout moment en sol argileux ; ces derniers, de type d'ailleurs assez particulier, sols bruns hydromorphes, passent souvent aux sols salés ou à alcalis.

Le gypse est généralement entraîné nettement en profondeur ; il peut cependant donner naissance, près de la surface, à des croûtes dures qui se développent, surtout, en liaison avec les sols gris sub-désertiques.

Quant au calcaire il tend, lui aussi, à être lessivé, mais moins profondément. En sols bruns, l'appauvrissement de l'horizon supérieur est très net ; il l'est moins dans les sierozems où la teneur des horizons en calcaire est beaucoup plus constante.

La structure des sierozems est, en général, faiblement définie ; sa tendance est d'être nuciforme à polyédrique. Les sols bruns présentent, au contraire, souvent une structure superficielle de type lamellaire, les horizons sous-jacents étant nuciformes puis polyédriques en profondeur. Hydromorphes, ils prennent une structure prismatique au moins en profondeur.

Leur complexe absorbant est saturé, en général, par le calcium. Parfois, la teneur en sodium devient excessive, comme dans le cas des sols bruns à alcali. Leur réaction est normalement basique, pH près de 8 ou juste au-dessus de 7 suivant qu'il s'agit d'un sol brun ou sierozem sur roche-mère calcaire ou non. Dans certains cas, ils peuvent cependant être acides. Leur roche-mère l'est, alors, davantage que les horizons pédologiques proprement dits.

Les sols foncés sont très argileux et ont dans cette zone des teneurs en matière organique faibles : 0,5 à 1 %. Leur rapport C/N est généralement compris entre 12 et 14. Cette matière organique est bien humifiée et riche en acides fulviques ; les corps humiques y paraissent énergiquement liés à l'argile. Leur réaction est nettement basique et leur complexe absorbant souvent riche en magnésium. Alors que dans les

sols précédents l'illite paraissait être, en général, le minéral argileux dominant, dans les sols foncés les argiles sont à base de montmorillonite.

Les sols gris sub-désertiques sont le plus souvent sableux à sablo-limoneux. La désagrégation joue en effet un rôle actif dans leur formation, alors que l'altération chimique y est réduite par suite de la courte période pendant laquelle ils se maintiennent humides ; période qui, dans beaucoup de ces sols, correspond, d'ailleurs, à la saison froide.

Leur matière organique, de 0,3 à 0,5 ou 0,7 %, est bien humifiée ($C/N < 10$) et assez riche en acides fulviques.

Ils comportent fréquemment un encroûtement gypseux à faible profondeur ou une pellicule salée durcie, à leur surface. Leur structure est, en général, mal définie. Ils possèdent souvent un horizon lamellaire, subsuperficiel, de quelques centimètres.

Quant aux sols des déserts ils sont, en fait, réduits à leur roche-mère souvent remaniée par des actions mécaniques. Les travaux de nombreux biologistes depuis ceux, anciens, de Ch. Killian et Feher, ont montré cependant qu'ils ne sont pas abiotiques.

UTILISATION ET CONSERVATION DES SOLS DE LA ZONE ARIDE

Si la description et l'étude des propriétés générales des sols de la zone aride, de leur formation et de leur classification correspondent à des travaux de recherches fondamentales, si leur prospection et leur cartographie peuvent, suivant les cas, être considérées comme travaux de recherche fondamentale ou de recherche appliquée, par contre leur utilisation et leur conservation nécessitent surtout des études appliquées.

Aussi serons-nous beaucoup plus brefs sur ces deux points dont la considération relève plutôt d'organismes tels que la FAO que de l'Unesco même.

Par suite de la faible pluviométrie, en même temps que de la faible résistance des sols aux modifications que l'on peut leur imposer, leur utilisation doit, ou bien être très extensive - elle peut alors être générale - ; ou bien être intensive, elle doit, alors, être concentrée.

La culture extensive peut être effectuée sur les sols bruns. Elle nécessite un choix des sols et une adaptation des cultures et des méthodes.

Les sols à utiliser dans ce cas sont, soit ceux des pentes, mais à condition de les terrasser au moins grossièrement pour arrêter le ruissellement et concentrer les eaux, soit ceux des zones planes, mais perméables et, si possible, sableux. Perméables, ils permettent une bonne pénétration de l'eau de pluie en profondeur d'où elle s'évapore moins directement ; de texture sableuse, ils atteignent et dépassent plus rapidement, dès les premières pluies, leur taux d'humidité au point de flétrissement, et la période de croissance des cultures y est, ainsi, prolongée.

C'est pourquoi, en zone aride d'Afrique, les populations locales ont l'habitude de n'utiliser en culture sèche que les sols sableux.

Un sol dont le profil comporte, en-dessous de quelques décimètres (au moins 50 cm) d'horizon sableux, un niveau plus compact ou durci paraît ainsi particulièrement valable.

Les cultures peuvent, ou bien être annuelles à cycle évolutif très court : céréales telles que le millet, légumes et plantes vivrières, ou pérennes : cultures arborées telles que l'amandier et l'olivier.

De même que, en pareil cas, l'on sème très peu dense, de même l'on ne plante, alors, qu'en maintenant des distances importantes entre les arbres. Ainsi, au sud de Sfax, en Tunisie, les oliviers sont-ils placés à 24 mètres les uns des autres ; plus au nord, ils sont rapprochés à 15 et 12 mètres.

Cette mise en culture des steppes arides nécessite la destruction très soignée de la végétation actuelle, concurrente des cultures pour l'eau ; mais elle reprend lentement et, parfois, difficilement à la suite de la disparition ou de l'arrêt de la culture. L'érosion éolienne peut, alors, s'installer et ce, d'autant plus dangereusement qu'il s'agit de sols plus légers.

Ce grand développement de l'érosion éolienne s'est également manifesté chaque fois qu'il a été essayé d'appliquer à ces sols les méthodes de jachère nue, alternative qui donne d'excellents résultats dans des zones un peu plus humides (Tunisie).

Au cours de la mise en culture, se produit une destruction de la matière organique et une dégradation de la structure du sol, qui devient ainsi moins "tamponné" contre les variations et les insuffisances temporaires de la pluviométrie.

L'amélioration de ces méthodes de culture extensive des zones arides nous paraît reposer davantage sur l'obtention de nouvelles variétés de plantes cultivées, mieux adaptées à la sécheresse, que sur la mise au point de nouvelles pratiques culturales, qui ne sont utilisables que si elles ne modifient le sol qu'aussi peu que possible.

Par contre, le choix du sol reste, dans ce cas, un élément fondamental du problème, et il serait alors, utile de mieux connaître l'influence qu'il peut avoir sur les condensations occultes dont le rôle est si important dans le développement de la végétation et des cultures dans ces pays arides.

L'élevage extensif est, aussi, une des méthodes habituelles d'utilisation des pays arides. Il ne peut prospérer que dans les zones où la pluviométrie dépasse 100 à 125 mm (150 mm estime-t-on aux USA). Il est alors indispensable de veiller à ne pas risquer une surcharge des terres en bétail, ce qui provoquerait une dégradation de la végétation d'où un départ de l'érosion, ni une concentration excessive des animaux en certains points, ce qui aurait le même résultat. Les zones de sols bruns et même de sierozems se prêtent bien à cette exploitation, de même que certaines vallées aux sols jeunes. Sur les sols subdésertiques la végétation est, en général, trop faible. La flore naturelle de ces régions, à base de graminées, surtout quand il s'agit de celle qui couvre les sols bruns, est bien adaptée à cette utilisation. Une des améliorations réalisables consiste en l'introduction d'espèces nouvelles ou en l'extension d'espèces existantes mais trop peu développées ; légumineuses, fixatrices d'azote par exemple. L'enrichissement peut être réalisé, de façon assez massive et concentrée, sur de petites surfaces, lignes jumelées ou carrés. Ce pâturage en zone aride ne doit se faire qu'après aménagement des parcours et seulement aux périodes où la végétation est suffisamment développée et résistante.

Pour subvenir aux besoins du bétail pendant les périodes les plus sèches, le recours, au moins partiel, à l'ensilage est utilisé dans bien des pays. Dans certains, où cela n'était pas appliqué jusqu'à alors, comme au Soudan, cette méthode se développe.

Quant à l'aménagement des zones de parcours, cela revient surtout à la mise en place de nombreux points d'eau : puits, forages ou mares, à leur aménagement matériel et à leur mise en service rationnelle en évitant les surcharges d'animaux, en instaurant une rotation des terrains utilisés aux alentours, en réglementant l'arrivée des bêtes à l'abreuvoir, etc.

De la bonne utilisation des ressources en eau dépend l'avenir du troupeau et du pâturage lui-même.

L'utilisation agricole des zones arides n'est pas toujours et partout extensive suivant l'un des deux modes indiqués ci-dessus. Elle peut être intensive, à la condition de pouvoir maintenir dans le sol, ou de pouvoir lui apporter, de l'eau en supplément pendant la période sèche.

La culture de décrue peut être réalisée pour des récoltes très diverses comme les céréales (sorgho, maïs) le tabac, le coton, les légumes et cultures vivrières. Elle ne peut l'être que sur des terres profondes et argileuses à limono-argileuses, dont la différence entre leur humidité au point de saturation et celle au point de flétrissement (quantité d'eau utile) est assez élevée. Comme l'a montré J. Maynard dans ses études sur la Vallée du Sénégal et son aménagement, l'une des principales difficultés de ce mode de mise en valeur est d'ordre climatique, les cultures étant alors souvent désaisonnées par rapport à leur cycle végétatif habituel.

Par ailleurs, cette méthode n'est applicable, en chaque pays, que sur des surfaces restreintes, là où l'inondation par les rivières joue régulièrement, et la culture reste soumise à toutes ses variations et à ses aléas. C'est la date d'arrivée et de retrait des eaux qui paraît être le facteur essentiel de la récolte, plus que la durée de la submersion (J. Maynard).

Malgré toutes ses insuffisances et ses difficultés, ce système de mise en valeur est très répandu à la surface du globe, les fleuves et rivières des zones arides étant fréquemment sujets à des débordements et provoquant, comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, de vastes inondations qui permettent ces cultures de décrue. Elles sont aussi réalisées sur leurs berges, lors de la baisse de leur débit.

Chaque fois que la mise en irrigation est possible, grâce à la présence de l'eau nécessaire, de bonne qualité, de terres bien adaptées, des hommes pour réaliser les cultures et des moyens financiers, de personnel et de matériel indispensables pour construire le barrage et mettre en place les aménagements du périmètre à utiliser, c'est la méthode qui permet d'obtenir la masse la plus importante de produits sur une surface donnée en zone aride.

Les qualités que l'on doit rechercher pour des terres à irriguer dépendent de celles des eaux à utiliser et des quantités disponibles. Des terres sableuses nécessitent des débits très importants mais peuvent recevoir des eaux très minéralisées, comme celles utilisées dans le Sud Tunisien, qui dépassent 5 gr. de résidu sec par litre. En sens inverse, les masses d'eau nécessaires sont plus réduites sur des terres lourdes, mais elles doivent être de bonne qualité, et leur drainage, en général naturellement insuffisant, doit, alors, être artificiellement amélioré. Là, se trouve l'une des limites pratiques de la mise en valeur des terres lourdes des zones arides.

Le problème de l'utilisation des eaux salées et de l'accumulation des sels dans les sols sera traité dans un autre rapport.

En dehors de son enrichissement possible en sels solubles un sol subit d'autres transformations par suite des irrigations. Elles sont assez mal connues sur le plan biologique. L'association microbienne en est, certainement, profondément modifiée ; au minimum, son activité devient plus forte par suite de l'augmentation des périodes où le sol est maintenu humide.

Si l'irrigation est bien faite, la texture du sol n'est pratiquement pas modifiée. Par contre, sa teneur en matière organique peut l'être très nettement. Elle tend à diminuer par suite d'une vie microbienne accrue, mais cet effet est contrebalancé par l'apport au sol de résidus de récolte qui peuvent être très abondants et dépasser, de beaucoup, la masse de débris végétaux laissés au sol, chaque année, par la végétation naturelle.

Normalement, l'irrigation, même avec de l'eau douce, tend aussi à détériorer la structure du sol ; en surface elle la transforme en une structure lamellaire ou, parfois, squameuse par suite du maintien plus ou moins prolongé d'eau stagnante ; en profondeur, elle la rend plus massive ; parfois, apparaît le type de structure "en plaquettes" dont les agrégats larges, aux faces supérieures et inférieures obliques et plus ou moins couchoïdales sont comme lissés. Dans d'autres cas, au contraire, il arrive que, grâce à un travail bien adapté du sol, à une activité microbienne plus intense et aussi à la masse beaucoup plus importante de matière organique fraîche transformée, la structure des horizons superficiels s'améliore, devenant mieux marquée, plus stable et grumeleuse ou nuciforme. Dans ce cas, l'ensemble des propriétés physiques du sol s'améliore. C'est ainsi qu'à l'Office du Niger, au Soudan, la perméabilité d'un sol a passé de $3,8 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-5}$ après 4 ans de culture irriguée et celle d'un autre de $3,7 \cdot 10^{-6}$ à $5 \cdot 10^{-6}$, alors que la teneur en matière organique, dans ces deux cas, restait pratiquement constante (B. Dabin).

L'irrigation, par contre, tend toujours à acidifier le sol, à moins que des précautions particulières soient prises pour l'éviter. Ainsi, dans les deux cas précédents, les pH mesurés à la même période biologique annuelle sont passés de 5,5 à 4,1 et de 6,3 à 5,3. Cette variation correspond à un appauvrissement en bases échangeables. Le calcium est particulièrement entraîné, le magnésium souvent aussi, alors que le potassium reste mieux fixé.

La conservation du sol comporte d'abord le maintien de sa fertilité et, par conséquent, l'établissement d'une rotation des cultures en même temps que la lutte contre les défauts signalés ci-dessus. Enfouissement de matière organique (fumier, engrais verts, débris et résidus de récolte), apport d'amendements calciques et d'engrais pour compenser les entraînements par l'eau aussi bien que les exportations par les récoltes, travail poussé et adapté du sol, sont ainsi nécessaires. C'est tout un équilibre nouveau de vie et d'évolution du sol qu'il faut établir.

Dans le cas de la culture extensive, le maintien de la fertilité réside surtout dans l'établissement d'une rotation des cultures. Souvent, comme en Australie, elle ne comporte qu'un an de culture proprement dite et 3 ans de jachère. Celle-ci peut être naturelle ou améliorée. Il est, en particulier, très utile d'effectuer l'enrichissement de la végétation en légumineuses fixatrices d'azote, telle que Swainsonia Swainsonioides. En culture pure ou en mélange avec des graminées, cette plante, dans les dures conditions climatiques où elle se trouve, peut fixer, par le moyen de ses nodosités plus de 25 kg d'azote par hectare et par an. Le problème de la teneur du

sol en azote reste l'un des plus importants à résoudre dans ces régions (N.C.W. Beadle). Seule, la fixation symbiotique par les légumineuses peut permettre d'y parvenir.

Dans le système d'élevage extensif, c'est l'adaptation de la charge du terrain en bétail qui devient l'élément essentiel de maintien de la fertilité. Une surcharge des terres provoque une diminution de la couverture végétale et, partant, l'apparition des phénomènes d'érosion. En zone de terres très sableuses sur une certaine profondeur, il s'ensuit la formation de microdunes, puis de vraies barkhanes ; en terres sableuses en surface, puis argileuses, ou, au moins, plus compactes en profondeur, risquent d'apparaître, ainsi, par érosion éolienne, des taches lissées, durcies, point de départ, ultérieurement, d'une forte érosion hydrique si le sol est en pente. Ces taches d'érosion sont assez fréquentes en certaines zones arides d'Australie, par exemple.

Il ne suffit pas de maintenir la fertilité de ce qui existe comme sol. Il faut aussi prévenir sa destruction mécanique par l'érosion qu'elle soit éolienne ou, le cas échéant, hydrique.

La lutte contre l'érosion éolienne revêt deux aspects : ralentissement du vent ; protection du sol.

L'utilisation de rideaux brise-vents est la forme la plus spectaculaire et la plus habituelle de cette lutte contre l'action destructrice du vent. Ce problème a été discuté en détail lors du colloque "Erosion et conservation du sol en zone aride" tenu à Karachi en 1957 sous les auspices de l'Unesco (Projet majeur de la zone aride) et du Comité FAO du Gouvernement pakistanais.

Pour les constituer, il est indispensable d'utiliser des arbres à croissance rapide adaptés au climat aride et au type de sol, en même temps que de les disposer en plusieurs lignes contiguës, en fonction de leurs possibilités de développement en hauteur.

En climat aride de type tempéré, on peut choisir : Pinus halepensis, Fraxinus excelsior, Elaeagnus angustifolia, Daphne oleoides, Caragana ambigua : en climat aride tropical : Acacia modesta, Dalbergia Sisso, Tamarix dioica, T. articulata, Salvadora sp., Capparis aphylla, Prosopis juliflora, P. spicidera. On doit toujours être prudent lors de l'introduction d'espèces nouvelles dans des cas analogues car certaines peuvent prendre, dans leur nouveau biotope, un développement excessif et devenir, ultérieurement, très gênantes. Tel peut être le cas, par exemple, de certains Prosopis. En milieu salé, divers eucalyptus, tels E. comphocephala, E. cornuta, peuvent se développer suffisamment et être utilisés.

Pour la récupération d'une zone dunaire, la mise en place de simples brise-vent est insuffisante. La réoccupation du sol lui-même par la végétation de protection est indispensable. Cela a pu être réalisé, au Maroc, avec surtout des Eucalyptus ; au Sénégal, avec des Casuarina equisetifolia ; au Pakistan (zone de Mastung) avec, surtout, des herbes et des arbustes : Ammophila arenaria, Artemisia monosperma, Calligonum polygonoides, Phragmites Karka, Tamarix sp., Citrullus colocynthis.

En zone très sableuse, sous climat tropical aride Euphorbia balsamifera peut être utilisé très efficacement pour faire des haies contre l'avancée des sables, ou pour constituer la base de rideaux brise-vent.

En zone sub-aride de climat tropical un arbre est particulièrement efficace : la Faidherbia albida. Défeuillé en saison des pluies, il a, au contraire, en saison sèche, un feuillage qui lui permet de ralentir la violence du vent. Aussi n'est-il pas tellement employé, vu sa forme même, dans les rideaux brise-vent, mais plutôt disséminé, par 30 ou 40 pieds à l'hectare, à travers les champs, dont ses débris (feuilles, brindilles, etc.) enrichissent le sol en humus et en azote (S. Bouyer, Gaudefroy de Mombyne).

Il faut reconnaître cependant que, sans être simple, le problème que pose le développement de ces plantes est soluble dès que l'aridité du climat n'est pas complète (pluviométrie annuelle d'au moins 100 à 150 mm), mais qu'il devient beaucoup plus difficile lorsque la pluviométrie est plus faible. Il peut suffire quelquefois d'une humidification artificielle, par irrigation, très réduite, pendant la première année après la mise en place ou le semis, pour assurer l'installation de ces plantes.

Dans les secteurs d'irrigation, les brise-vent ou les haies contre le sable peuvent toujours être arrosés. Ils ont l'inconvénient d'occuper, par eux-mêmes ou leurs racines, une surface importante qui devrait pouvoir porter des cultures.

En périmètre de culture sèche cet inconvénient est relativement moins grave par suite d'une intensivité bien moindre du système cultural, mais l'assèchement du sol par le système racinaire de ces brise-vent est tel que, jusqu'à une distance non négligeable, la végétation naturelle herbacée en est très réduite. Elle peut même disparaître. L'on voit alors l'érosion éolienne attaquer le sol le long des brise-vent, plus que n'importe où ailleurs, dès que le vent ne reste pas toute l'année parfaitement perpendiculaire à la ligne d'arbres (certains points du pays Androy, au sud de Madagascar, par exemple). Les cultures, elles aussi, peuvent être, pratiquement, rendues impossibles par assèchement du sol le long des brise-vent.

Une autre méthode de lutte contre l'érosion éolienne consiste à ne pas laisser le sol complètement nu. C'est ainsi qu'en région de culture intensive ou extensive, il est très efficace de maintenir en place les chaumes des céréales, après avoir récolté les épis. On peut les laisser debout ou les courber de façon à les coucher sur le sol (méthode utilisée en Afrique occidentale par diverses populations). On peut aussi les enfouir à demi dans le sol par un déchaumage grossier.

En zone aride, le vent est, de beaucoup, l'agent d'érosion le plus actif. L'eau de ruissellement peut, cependant, elle aussi, provoquer un arrachement puis un entraînement du sol, même dans ces régions, au moins lorsque la pluviométrie annuelle dépasse 100 à 150 mm. La pluie tombe, en effet, sous la forme de quelques tornades ou orages très violents ; parfois plus de 50 ou 70 mm en 12 heures (S. Hills).

La protection du sol contre ce type d'érosion y est très difficile. Chaque "structure" mise en place doit, en effet, pouvoir résister à un ruissellement momentané très violent mais rarement renouvelé au cours de l'année. Par ailleurs, ces travaux de conservation ne deviennent nécessaires que dans des systèmes de culture extensive ou d'élevage extensif, la culture intensive n'étant réalisée que par irrigation, donc en terres aplanies. Il n'est donc possible de les concevoir que sous une forme peu coûteuse et il faut bien reconnaître que, dans ces conditions climatiques, les méthodes les plus simples de défense des sols, disposition des cultures en bandes de niveau alternées, par exemple, sont assez peu efficaces en culture sèche par suite de la faible densité de la couverture végétale. Les seules possibilités pratiques sont la réalisation de terrasses de divers types, en particulier terrasses

à large base, et la culture en billons cloisonnés. Ce dernier système est, cependant, plutôt adapté aux climats tropicaux subhumides qu'au climat aride.

La conservation du sol n'est pas seule nécessaire ; celle de l'eau l'est tout autant. Les méthodes indiquées ci-dessus y concourent. Il est aussi possible de disposer sur les pentes des digues qui la retiennent et la guident jusqu'en des "mares réservoirs" suffisamment creusés pour réduire proportionnellement les pertes par évaporation. Leurs abords doivent être aménagés, compactés, recouverts ou pavés pour y supprimer l'infiltration. En d'autres cas, on cherche au contraire à accroître l'infiltration des eaux de pluie ou des eaux d'inondation de façon à recharger les nappes phréatiques qui sont utilisées plus loin par puits et forages (Maroc, Sud Tunisien). Une amélioration très sensible apportée aux systèmes de conservation des sols et de l'eau est la pratique, qui tend à se répandre même en zone aride (USA - Californie - URSS etc.), de concevoir cette opération, non plus de petites surfaces, mais sur des bassins versants tout entiers. Il en a été ainsi aménagé sur plus de 1 million d'hectares aux USA.

Une méthode employée par les Romains - on en retrouve les traces en Palestine - visait, au contraire, à réduire la conservation du sol des pentes, mais en permettait, en fait, l'utilisation la plus efficace : elle consistait à rassembler en petits tas la terre des pentes, trop peu profonde pour y être cultivée, de façon à faciliter son entraînement par l'eau de ruissellement, et à réaliser son arrêt et son maintien, ainsi que celui de l'eau, en bas de pente et dans les vallons, où les cultures étaient établies. Elle n'a guère été reprise actuellement, à notre connaissance.

CONCLUSIONS

Au terme de ce long exposé au cours duquel, chapitre après chapitre, nous avons pu mettre en évidence les sujets actuels de discussion et nos ignorances sur les sols des zones arides, il nous semble nécessaire d'essayer de réunir tous ces points pour en dégager les voies dans lesquelles les travaux de recherches nous paraissent les plus nécessaires.

Si, dans de très nombreux pays, une première carte pédologique de reconnaissance a pu être esquissée donnant la répartition des principaux groupes de sols de la zone aride, il n'en reste pas moins que les surfaces qui en ont été prospectées et cartographiées suffisamment en détail pour en connaître les possibilités d'utilisation, sont encore relativement réduites. Les observations de terrain et les très nombreuses analyses et déterminations qui seront nécessaires pour y parvenir amèneront peut-être à individualiser de nouveaux types pédologiques encore inconnus actuellement. Même dans les secteurs déjà cartographiés en détail, bien des études sont encore cependant nécessaires.

Les résultats ainsi obtenus peuvent nous amener à modifier certains points de vue exprimés dans les diverses classifications de sols, telles que nous les utilisons maintenant. Cette incessante mise au point des systèmes de classification ne correspond, d'ailleurs, pas seulement à un effort scientifique vers une expression toujours plus rationnelle de la réalité, mais aussi à une possibilité, chaque fois accrue, de procéder de pays à d'autres à des comparaisons et à des extrapolations efficaces.

Surtout dans les zones arides, des recherches sur la classification des sols n'ont de valeur que dans la mesure où il est possible de distinguer les sols d'âges différents. Les études géomorphologiques dans les principales régions de cette zone

et celles concernant les caractères qu'y ont possédés les divers milieux aux différentes époques du quaternaire sont ainsi indispensables, car elles seules permettent de comprendre l'existence, la nature et la répartition des paléosols observés.

A la base de ces études générales, s'en trouvent d'autres, plus spécialisées dans leur objet, sur la formation, les caractères, la conservation et l'utilisation de ces sols.

La pédogénèse dans de telles conditions climatiques, successions de périodes de forte humidité et de sécheresse extrême, est mal élucidée encore. Il semble bien, en effet, que la plupart de ces sols, même évolués, des zones arides, soient relativement jeunes ; il n'empêche que, seule, la formation préférentielle d'argile en certains horizons, caractère d'évolution assez accentuée, peut expliquer beaucoup de profils que nous observons, en particulier en zone aride tropicale ou subtropicale. Au cours de l'altération des minéraux, processus fondamental de tous ces phénomènes, des éléments sont libérés qui peuvent servir d'aliments à la végétation naturelle et aux cultures. De ce point de vue aussi, des études fondamentales sont nécessaires pour nous permettre de mieux comprendre cette transformation et de mieux l'utiliser.

Parmi les "revues de recherches" que l'Unesco doit faire paraître incessamment, il en est une qui porte sur le problème de la matière organique dans les sols de la zone aride. En fait, nous savons très peu de choses sur l'activité microbienne des sols soumis à de tels extrêmes climatiques. Quelle influence peut avoir, sur leur évolution biologique, le renouvellement, chaque année, de ces périodes de sécheresse extrême et prolongée ? Quel peut même être leur effet sur les propriétés physico-chimiques des produits de décomposition des débris organiques du sol et sur leur résistance à une évolution ultérieure. De quels êtres est composée leur faune ? Quel rôle jouent-ils ? Autant de questions auxquelles nous ne pouvons pas donner de réponses, ou très partielles seulement.

Déjà, sous ces climats, peuvent s'observer des sols foncés. Leur matière organique paraît être l'un de leurs éléments les plus typiques. Nous n'en connaissons ni les caractères essentiels, ni le rôle effectif.

Dans les sols de la zone aride, l'humus ne se trouve généralement qu'en quantité très faible. Joue-t-il quand même dans leur fertilité le rôle qu'on lui attribue souvent ? Quel effet peut-il encore avoir sur leurs propriétés physicochimiques ? Sur leur structure ?

Les sols de cette zone présentent une structure souvent peu nette, mais, lorsqu'elle est bien définie, elle appartient surtout à certains types : lamellaire, nuciforme, polyédrique, prismatique, en plaquettes. Quelles en sont les causes, en particulier dans le cas de ces sols foncés ?

Certains sols de la zone aride possèdent des horizons soit durcis, soit très compacts, dont la structure ne paraît, cependant, pas particulièrement définie. Quels peuvent être les corps responsables de ce durcissement, de cette compacité ? Nous ne le savons pas.

Dans les conditions de la zone aride, les profils hydriques et thermiques des sols doivent présenter des caractères assez particuliers. Trop peu d'études leur ont été consacrées jusqu'à présent. Il s'agit pourtant là d'éléments de grande importance dans l'évolution de ces sols. Les particularités probables de leurs profils hydriques

sont invoquées pour expliquer certains faits, comme la présence d'horizons plus argileux que ceux qui se trouvent en-dessous et au-dessus (processus d'argilisation). En fait, nous ne savons même pas quelle peut être, en fonction du régime des pluies et des caractères du milieu, la profondeur de ces profils hydriques.

L'un des processus importants qui interviennent au "sommet" du profil hydrique de ces sols des zones arides, est la pénétration d'eau dans le sol par suite de condensations occultes. Jusqu'à quel point pouvons-nous les accroître, en particulier par un système cultural bien adapté ? Dans quelle mesure la structure superficielle du sol intervient-elle ?

Il n'est pas certain que de nouvelles recherches fondamentales, après celles de S. Chepill, puissent permettre un approfondissement sérieux de nos connaissances sur l'érosion éolienne ; par contre, il devrait en être mené sur les premiers stades de l'érosion hydrique qui, nous l'avons indiqué plus haut, peut être dangereuse, même dans cette zone. Le détachement par l'eau des éléments des agrégats du sol dépend du jeu de nombreux facteurs ; action très diversifiée de l'eau et, en sens inverse, forces assurant la stabilité des agrégats et l'immobilité des éléments. Nous ne connaissons que très partiellement les règles de ce "jeu" et, en particulier, le rôle qu'y peuvent tenir les éléments vivants de ces sols et les divers produits de la décomposition qu'y subissent les débris et résidus organiques. Nous n'en savons pas plus, semble-t-il, sur les processus fondamentaux qui interviennent dans le démarrage des rigoles d'érosion et les raisons de leur creusement en un point plutôt qu'en un autre. Quelle peut être l'influence de l'action préférentielle des gouttes d'eau en leurs points de chute ?

Si les recherches fondamentales à entreprendre sur les sols des zones arides sont nombreuses et diverses, quoique surtout centrées autour de leurs caractères physiques et du devenir de leur matière organique, celles de type appliqué ne le sont pas moins.

Nous n'en citerons que quelques-unes parmi les plus urgentes : modification de la matière organique des sols des zones arides, lors de leur culture sèche ou de leur culture irriguée ; évolution possible des engrais verts ; facteurs influençant la nudation des racines de légumineuses ; types d'engrais azotés adaptés à ces sols et à ces conditions climatiques ; forme des obstacles terrassés susceptibles de limiter l'érosion hydrique, en fonction de ses conditions si particulières d'apparition et de développement et de la nécessité de se contenter de travaux très simples ; possibilité d'utiliser la méthode des billons cloisonnés ; profils hydrique et thermique des billons de labour, etc.

De ces si nombreux sujets de recherche, beaucoup sont déjà en cours d'étude dans divers pays tels que USA, URSS, etc. ; d'autres font l'objet de projets mis au point et menés par des organismes internationaux. Nous ne pouvons, en terminant, que formuler le souhait que ces recherches pédologiques puissent se développer dans toute la zone aride, tant sous l'impulsion des services privés ou nationaux que sous celle des organisations régionales, telles que les comités, bureaux et services inter-africains (BIS - SPI) de la CCTA ou internationales, en particulier FAO en ce qui concerne les prospections de détail et les recherches appliquées, Unesco pour les prospections générales et de reconnaissance et les recherches fondamentales.