

TRANSFORMATIONS DES SOLS DE LA ZONE ARIDE SOUS L'INFLUENCE DES IRRIGATIONS

par Prof. G. Aubert, Paris

Messieurs,

Je dois vous parler très rapidement d'un sujet considérable qui pourrait se subdiviser en une série de conférences les unes après les autres : celui de la transformation des sols, et plus particulièrement des sols de la zone aride d'Afrique, sous l'influence des irrigations.

Vous me pardonnerez si je laisse un peu de côté certaines des questions que ce sujet soulève. Il en est, en effet, qui ont déjà été étudiées depuis longtemps et par de nombreux auteurs et je pense que, au moins pour la plupart, vous les connaissez. Je ne ferai, par conséquent, pour certains points, que rappeler très rapidement et très schématiquement, ce qu'il en est ; en particulier pour ce qui est des divers types de sols ou pour ce qui est des problèmes du seul et de l'irrigation.

Par contre il en est d'autres qui sont peut-être moins connues et sur lesquelles j'aimerais pouvoir vous apporter non pas tellement les résultats de mes recherches, mais plutôt ceux des recherches de mes assistants ou bien, si vous le permettez, de ce que l'on peut trouver dans la littérature récente.

Pour mieux saisir l'ensemble du problème je prendrai les exemples le plus souvent en Afrique mais aussi en Amérique ou en Asie ou même en certaines régions d'Europe.

Quels sont les types de sols des zones arides et plus particulièrement de celles d'Afrique ?

Le sujet a déjà été étudié un certain nombre de fois et ceux qui s'intéresseraient aux détails de cette question pourront se reporter aux discussions qu'elle a suscitées lors d'un colloque de l'UNESCO au mois de mai 1960 à Paris : Colloque général sur la zone aride.

Je rappellerai donc simplement que ces sols, quels qu'ils soient, présentent, par suite des conditions de climat dans lesquelles ils évoluent, un certain nombre de caractères communs. Ils ont une évolution lente ou plus exactement une évolution concentrée et limitée à quelques semaines, ou quelques mois chaque année ; le reste de temps, le sol, trop sec, ne se transforme plus. La profondeur de tels sols est, par conséquent, le plus souvent, réduite ; leur teneur en matière organique, par suite des conditions mêmes de végétation sous lesquelles ils évoluent est, en général, assez faible. Mais cette matière organique est bien évoluée et elle est étroitement liée à la matière minérale. En outre, dans beaucoup de cas,

elle est très bien répartie à travers tout l'ensemble du profil. Les colloïdes argileux de ces sols sont en général très stables et relativement peu évolués. Quant aux éléments solubles, ils y sont souvent en quantités importantes : sels de sodium ou de calcium concentrés dans certains cas à la surface, d'autres fois, au contraire, accumulés en profondeur. Ce sont, en général, des sols calcaires et très souvent, des sols salés.

Parmi les principaux ensembles de sols que nous pouvons étudier et observer dans ces régions arides d'Afrique, se trouvent d'abord les Sols Steppiques. Ils évoluent sous une végétation où les graminées dominent. Leur matière organique bien répartie à travers tout le profil est très évoluée. Dans la classe steppique ou isohumique les divers types de sols se séparent les uns des autres, à la fois par leur richesse organique et par le mode de répartition du calcaire dans leur profil.

Les Chernozems, si largement répandus en certaines zones d'Asie ou même d'Europe centrale, n'ont jamais été observés en Afrique. Par contre les Sols Châtains s'y trouvent, surtout au Nord du Sahara ; par exemple sur le limon rouge calcaire de la plaine des Beni Moussa au Maroc. Assez riches encore en matière organique, toujours bien répartie dans le profil, ils présentent une accumulation de calcaire, sous forme de nodules, en profondeur. Les Sols Bruns sont un peu moins riches en matière organique, moins profonds, avec accumulation du calcaire plus en surface. Ils s'observent en Afrique du Nord, au Mali, au Sénégal, au Tchad etc..

Les Sierozems sont des sols steppiques dont la teneur en calcaire reste à peu près constante tout au long du profil. Leur teneur en matière organique est faible. Leur évolution est déjà beaucoup moins poussée, mais alors que le Sol Châtain se forme sous une pluviométrie annuelle de l'ordre de 400 mm, le Sierozem se trouve dans les zones à 150-250 mm de pluie.

L'accumulation du calcaire en profondeur dans les Sols Bruns et les Sols Châtains peut donner naissance à des encroûtements ou même à de véritables croûtes calcaires. Certaines sont encore en formation ou subactuelles ; d'autres au contraire sont fossiles comme dans la vallée du Sousse, au Maroc. Dans ces sols de steppes peuvent se produire des processus d'hydromorphie, aussi en profondeur ou au contraire en surface, provoquant alors une transformation de leur structure. Quand ces sols ne sont pas trop hydromorphes ou pas trop fortement encroûtés, ils peuvent supporter de belles cultures irriguées comme en de nombreuses régions du Maroc ou dans la Vallée du Niger dans l'Etat du Mali. Dans les zones arides, les Sols Hydromorphes sont très fréquents. L'engorgement par l'eau peut affecter l'ensemble du profil ou surtout l'horizon superficiel. La structure du sol devient alors très large, très grossière, de type prismatique à polyédrique soit dès la surface soit au contraire à une certaine profondeur en dessous d'un horizon de surface, de peut-être 20 à 30 cm, grumeleux, parfois même grenu, comme dans les terres noires de l'Est d'Australie. Ces sols, surtout les

seconds, peuvent être cultivés, comme on en trouve des exemples au Congo (Léopoldville) où ils supportent des cultures de coton.

D'autres fois au lieu d'être essentiellement en surface, dûe aux inondations de fleuves comme le Niger, le Sénégal, le Logone, le Nil, l'hydromorphie peut se développer surtout en profondeur. Il s'agit alors des sols à concrétions ferrugineuses ou manganiques ou des sols à nodules calcaires. Il peut même se former de véritables sols à carapace et cuirasse ferrugineuse ou manganique dans un cas, ou à croûte calcaire ou gypseuse dans l'autre. Seuls certains de ces sols où les éléments durcis ne sont pas en trop grande abondance ou sont assez en profondeur peuvent être utilisés.

Dans les zones arides d'Afrique se trouvent aussi, très fréquemment, des sols très riches en sels – sels solubles – concentrés en surface ou en profondeur suivant les cas, mais surtout en surface : Sols Salés ; ou dont le complexe absorbant est très largement saturé en sodium, parfois en magnésium : Sols à alcalis. L'ensemble de ces sols constitue la classe halomorphe mais ils sont très divers, même morphologiquement. Certains Sols Solés dits « Sols Salins » sont très peu différenciés, l'accumulation des sels n'y ayant provoqué d'autre transformation que l'apparition d'efflorescence cristallines leur surface et de filaments salins, à certains niveaux de leur profil. D'autres au contraire, « Sols Salés à alcali », présentent en surface un horizon très caractéristique, farineux en saison sèche, fluide dès qu'il pleut et toujours extrêmement salé. L'ensemble de ces divers types constitue la catégorie des « Solontchaks » de la classification russe.

Les sels accumulés par évaporation à leur surface peuvent former de véritables croûtes (par exemple en bordure de chotts du Sud Tunisien) ou seulement des efflorescentes : blanches ou grises, elles sont constituées essentiellement de chlorures et sulfates de sodium et magnésium, parfois de calcium (roses des sables) comme sur de grandes étendues de la vallée du Chélif en Algérie ou dans le Sud-Tunisien ; noires, elles correspondent à des taches d'humus desséché après dissolution grâce à la présence de carbonate de soude dans la solution du sol, comme dans certains des Ouadis ou bras des marécages de bordure du Lac Tchad.

Parfois sur une coupe de ces sols salés apparaissent des taches d'un rouge vermillon intense ; c'est la couleur particulière que peuvent présenter les hydroxydes de fer en milieu salé.

Dans certains sols à alcalis, en particulier en zone semi-aride, le sol ne comporte une certaine accumulation de sels solubles qu'en profondeur, mais en surface ses horizons sont riches en sodium échangeable dans leur complexe absorbant. Ils possèdent alors une structure diffuse, très instable, qui provoque rapidement, à la moindre pluie, une érosion en nappe ravinante, tout à fait caractéristique, comme cela peut se voir dans le Centre Tunisien ou au Maroc, dans la région du Haouz de Marrakech.

Tous les sols que nous venons d'évoquer ont assez largement subi l'influence du climat, de leur végétation, des êtres vivants qui s'y développent, et le cas échéant, de la nappe phréatique et des éléments qu'elle apporte en solution. Ce sont des sols évolués.

D'autres sols de zones arides sont très jeunes, très peu évolués. Le plus souvent ils sont formés sur des colluvions ou des alluvions récentes et leur profil montre encore avec netteté la succession des dépôts qui leur ont donné naissance et leur diversité. Du point de vue agronomique, ils peuvent être très valables. Ils ont cependant le défaut d'être peu structurés, ce qui gêne la pénétration de l'eau ou des racines et par conséquent leur utilisation sous irrigation (Vallée du Fahrer au Maroc).

Dans d'autres cas, comme lors de l'assèchement de certains marécages, tels les Merdjas côtières du Maroc, le sol est encore moins évolué ; très jeune, c'est presque un « présol ». Il vaut mieux le laisser se recouvrir par la végétation naturelle ou par la prairie avant de le cultiver, en rizière par exemple.

Les caractères des divers sols que nous venons d'énumérer sont, pour une large part, dus à leur formation sous climat aride. Les irriguer modifie donc complètement les conditions de leur évolution, et peut provoquer diverses transformations.

Ces sols des régions arides sont relativement riches en matière organique par rapport à la végétation qu'ils supportent. C'est dû à la fois à la sécheresse qui y limite la vie microbienne et par conséquent les possibilités de décomposition de cette matière organique, et à leur richesse en calcium qui permet la formation d'un humus calcique, infiniment plus résistant que les autres types d'humus bien évolué. L'irrigation prolonge la période d'humidité du sol et provoque un entraînement du calcium des horizons supérieurs vers la profondeur. Elle peut donc amener une destruction de la matière organique. Mais en même temps elle permet un plus grand développement de la végétation. Sous végétation naturelle cette baisse de matière organique sera donc limitée par l'apport d'une plus grande masse d'éléments végétaux sur le sol et dans le sol.

On peut même obtenir, parfois, non une diminution mais une augmentation de la teneur en matière organique du sol sans cependant atteindre celle que ferait prévoir la formule de Jenny. Par contre, en pratique, sous culture, on observe le plus souvent une diminution de cette teneur en matière organique. Elle a été notée par exemple en Russie, dans la région de Rostow où en 18 ans elle a baissé de 12 %. Aux Etats-Unis, un sol très riche en matière organique, intermédiaire entre les sols de steppes et les Brunizems, a perdu, après 10 années d'irrigation, 40 % de sa teneur en cet élément. Dans la Gezira du Sudan, certains résultats, donnés par Jones, montrent un certain appauvrissement organique du sol par suite de sa mise en irrigation.

La richesse en matière organique de ces sols étant l'un des facteurs essentiels de leur fertilité, il faut, en pratique, la maintenir autant que possible, malgré leur

leur mise en irrigation. Cela s'obtient par des apports de fumier ou par l'enfouissement d'engrais verts ou l'utilisation de plantes de couverture ou de prairies temporaires. Aux Etats-Unis, en Californie, on est arrivé, par les apports réguliers de fumier, en faibles doses d'ailleurs, à améliorer très sensiblement la teneur en matière organique du sol puisque en 18 ans elle a plus que doublé. Ailleurs, l'utilisation, non de fumier mais de fortes doses d'engrais, et en particulier de sulfate d'ammoniaque, en a provoqué une augmentation de 20 à 25 % tout en modifiant certains de ses caractères (élévation du rapport C/N). En Afrique, à l'Office du Niger, une augmentation de 15 à 20 % environ de la teneur en matière organique a pu être obtenue dans certaines terres par une simple culture irriguée bien conduite, avec jachère, mais sans apport de fumier ni utilisation d'engrais verts.

C'est surtout à partir d'un sol pauvre en matière organique évoluant sous un type de végétation très lâche, comme certaines steppes à halophytes que la culture irriguée peut, sans apport particulier de matière organique, permettre son enrichissement en cet élément. En Arizona, dans des sols rouges subdésertiques, après quelques années d'irrigation, elle s'était accrue de 50 p. 100.

L'irrigation peut aussi provoquer la migration de certains éléments, comme cela s'observe naturellement dans les sols de régions plus humides. Une irrigation de 10.000 m³ par hectare correspond à un accroissement de pluviométrie de 1 m. Dans certains cas, l'irrigation paraît avoir même provoqué une migration d'argile dans le profil du sol. En fait, le plus souvent, le phénomène observé peut s'expliquer par un apport d'argile par l'eau d'irrigation, argile qui vient s'accumuler en profondeur, comme cela a été observé en Utah, ou bien par une légère érosion en pannes entraînant l'argile de l'horizon supérieur, comme cela a été noté en Russie.

Une autre modification du profil du sol par suite de l'irrigation, concerne la répartition du fer. On observe souvent dans les horizons profonds des sols irrigués une accumulation d'hydroxydes de fer sous forme de concrétions. Mais dans la plupart des cas il ne s'agit pas d'un entraînement d'un horizon dans un autre, mais simplement d'une translocation du fer d'un point à un autre à l'intérieur d'un même horizon (horizon profond) dont les conditions d'oxydo-réduction sont transformées par l'irrigation, surtout si elle est réalisée sans drainage suffisant ou sous un climat déjà assez humide comme c'est parfois le cas en riziculture.

L'idée a également été émise que l'irrigation pourrait déclencher la latéritisation ou ferrallitisation du sol. Malgré le cas particulier signalé par *Wattkin* dans le Sud des Etats-Unis où 18 à 20 années d'irrigation en auraient provoqué l'apparition, il ne semble pas que cela puisse se produire pratiquement tant cette modification devrait être lente. Nos études sur les sols irrigués de l'Office du Niger au Mali n'ont pas permis de mettre en évidence une telle transformation. Un phénomène beaucoup plus net et admis par tous les auteurs, est la modi-

fication de la répartition du calcaire dans le sol à la suite de l'irrigation. Si l'eau d'irrigation est très pauvre en sels de calcium ainsi qu'en carbonates et bicarbonates, il se produit un entraînement du calcaire en profondeur, comme cela a été observé dans le New Mexico par exemple, ou en Russie. Au contraire, si l'eau est riche en sels de calcium et en même temps en bicarbonate, il se précipite alors du carbonate de calcium dans les horizons supérieurs qui s'enrichissent ainsi en calcium.

L'irrigation peut provoquer une modification du sol par suite des éléments qu'elle contient. Dans bien des cas l'eau d'irrigation apporte des matériaux solides, des «limons». D'après la bibliographie, cet apport est assez faible dans la Vallée du Nil, de l'ordre de 1 cm en dix ans, ce qui correspond à environ 15 tonnes de matière solide apportées annuellement par hectare. Au Turkestan, dans la zone de l'Amou Daria, cet apport est de 36 tonnes par hectare et par an et dans l'Arizona on note jusqu'à 450 tonnes par hectares et par an. Ces «limons» sont souvent riches en éléments fertilisants. Ainsi ceux de l'Amou Daria apportent chaque année, de 800 à 1000 kilos de potasse totale par hectare, 50 kg d'acide phosphorique et plusieurs tonnes de chaux. Ces irrigations se faisant en général dans des régions chaudes et les matériaux apportés restent humides assez longtemps, il peut y avoir passage de la forme totale peu utilisable par les plantes à une forme plus assimilable. Cet apport d'éléments solides peut ainsi être suffisamment important, au moins dans certains cas, pour influencer sur la fertilité du sol. L'eau d'irrigation apporte aussi, dans bien des cas, des éléments en solution. Certains sels de potasse, acide phosphorique, composés nitriques, sont des éléments fort utiles pour les cultures et viennent enrichir le sol. Ils ne sont, le plus souvent, cependant qu'en quantités très réduites. Par contre les éléments apportés en quantités importantes par les eaux d'irrigation sont surtout les sels de sodium, de calcium ou de magnésium sous forme de carbonate et bicarbonate de calcium, de sulfate, de calcium et surtout de chlorure ou de sulfate de sodium ou de magnésium. Même dans une eau d'irrigation considérée comme pratiquement pure ou douce, la teneur totale en sel peut être de l'ordre de quelques décigrammes par litre. L'apport de dix mille m³ par hectare et par an comme cela peut être fait pour certaines cultures, correspond en fait à un apport de quelques tonnes de sel déposées sur le sol chaque année sur chaque hectare. Il est bien certain que le problème essentiel est alors celui de drainage pour que cette masse saline ne risque pas de se maintenir et de se concentrer dans le sol. Si la circulation de l'eau est suffisamment établie, il n'en est pas moins nécessaire que sa teneur en sels totaux ne soit pas excessive ce que les cultures ne supporteraient pas (excès de pression osmotique) non plus que sa richesse relative en sodium – ou parfois en magnésium – éléments qui seraient alors adsorbés par le complexe colloïdal du sol, dont la structure se dégraderait.

Ces phénomènes ont été étudiés de façon très précise et détaillée aux Laboratoires de Riverside (USA) par le Dr. *Richards* dont le traité sur «les sols

salés et les sols à alcali» est devenu classique au même titre que celui du Prof. V. Kovda en URSS ou à celui du Dr. J. Durand en Algérie, sur les sols irrigables et le choix des eaux pour l'irrigation.

Si certains corps comme le sodium sont particulièrement toxiques pour le sol, d'autres le sont, très particulièrement, pour les plantes : borates, fluorures, bicarbonates.

L'eau d'irrigation n'intervient pas seulement par les éléments qu'elle apporte mais aussi par elle-même. Venant augmenter la masse d'eau de la nappe phréatique elle peut en provoquer le relèvement si son écoulement et son drainage sont insuffisants. Le problème est d'ailleurs d'autant plus grave que c'est souvent en aval de la zone d'irrigation que cette remontée de nappe se produit, avec tous les inconvénients qu'elle peut comporter, tels que salure ou imperméabilisation du sol.

L'eau d'irrigation peut agir directement sur les propriétés du sol : et d'abord sur ses propriétés physiques. Elle a tendance, dans beaucoup de cas, à diminuer la perméabilité et la porosité du sol. C'est ainsi que dans le Midi de la France des irrigations commencées depuis longtemps ont provoqué la baisse de la perméabilité du sol d'une parcelle déterminée de 8,9 en 1925 à 4,4 en 1939, à 2,1 en 1945, et à 1,6 en 1960. Sa richesse en argile n'atteint cependant que 12 %. De même, dans la Vallée du Sénégal où la culture se fait non par irrigation mais par utilisation de l'eau ayant énitria dans le sol lors d'inondations, ce qui revient pratiquement au même pour l'évolution du sol, on voit aussi la perméabilité diminuer, la valeur du coefficient logarithme K étant passé de 1,2 ou 1,5 sans submersion à 0,8 avec submersion. De même encore, dans les Sols de l'Office du Niger au Mali, nous avons vu la perméabilité passer dans certains sols de 1 à 0,8. 10^{-6} en trois années d'irrigation, et, ailleurs, de $3 \cdot 10^{-5}$ à 2,4. Une telle baisse de perméabilité, si faible soit-elle, mais aux dépens de sols peu perméables par eux-mêmes, au départ, peut être très néfaste quant au rendement des cultures. Dans certains cas au contraire, dans des sols mal pourvus en matière organique au départ, une culture irriguée bien soignée peut provoquer une amélioration de la perméabilité et de la porosité du sol grâce au développement de vie microbienne et à la mise en évolution de plus de matière végétale et par conséquent de matière organique. Ainsi, dans certaines terres de l'Office du Niger, le coefficient de perméabilité avait à peu près doublé au bout de 10 années d'irrigation.

La structure du sol est, le plus souvent, modifiée par l'irrigation. En surface elle tend à devenir plus lamellaire ; en profondeur elle prend le type « en plaquettes », structure cubique aplatie aux faces inférieures et supérieures gauchies et conchoïdales, en même temps que lissées et striées. On peut observer une telle transformation dans certaines zones du Maroc où l'irrigation se fait depuis de nombreuses années. Souvent aussi la structure du sol tend à devenir plus large, caractère très fréquent des sols hydromorphes.

Cette modification de la structure a été récemment étudiée en détail et chiffrée par *Maynard* et *Combeau* dans la Vallée du Sénégal et l'indice d'instabilité (indice de Hénin) qui correspond à une structure d'autant meilleure qu'il est plus faible, est passé de 3,4 sans submersion à 5,2 au bout d'une dizaine d'années de culture avec submersion.

Les propriétés chimiques et physico-chimiques des sols subissent aussi l'influence des irrigations. Leur réaction tend généralement à baisser si l'eau d'irrigation est suffisamment pauvre en sel. A l'Office du Niger, où l'eau utilisée pour l'irrigation est extraordinairement peu minéralisée, on a pu noter une acidification du sol après quinze années d'irrigation, de pH 5,7 à pH 4,5 en surface et de 6,1 à 4,8 en profondeur. Par contre lorsque la teneur en sel de l'eau est relativement élevée on peut observer le phénomène inverse : accumulations de sels sodiques dans les horizons superficiels et remontée du pH. A Riverside, aux Etats-Unis, le pH est ainsi passé de 6,8 en 1918, à 7,6 en 1927 et à 8,0 en 1955. Il est même des cas comme au Tchad où le pH est remonté en quelques années de 6 à 9. Ces variations de la réaction du sol sont dues à des modifications du complexe absorbant ou plus précisément de son état de saturation. Si le drainage du sol n'est pas suffisamment assuré on y observe aussi, fréquemment, une modification des conditions d'oxydo-réduction, au bout de quelques années, avec apparition de corps réduits, sulfures par exemple, sous forme de tâches noires à faible profondeur. Cela s'est produit dans certaines rizières sur sols très lourds de la vallée du Chélif en Algérie ou du Gharb au Maroc. Le riz est alors atteint d'une maladie physiologique.

Une dernière modification doit enfin être signalée. Elle porte sur la quantité que contient le sol d'éléments à la disposition des cultures et de la végétation. L'irrigation en étendant la période de l'année pendant laquelle le sol reste humide peut prolonger les processus de décomposition des minéraux qu'il contient et qui constituent sa réserve en éléments fertilisants, accroissant ainsi la proportion qui s'en trouve sous forme assimilable. Cela a été observé très fréquemment pour le potassium, mais aussi, par exemple aux Etats-Unis, en Arizona et au New Mexico, pour l'acide phosphorique.

De cette longue énumération des problèmes – dont la plupart n'ont été qu'ébauchés – que pose sur le plan pédologique ou agronomique, l'irrigation ou, d'une façon plus générale l'apport d'eau supplémentaire par rapport à la pluviométrie, ne faut-il pas surtout retenir qu'une telle pratique modifie complètement le mode d'évolution du sol. En tant qu'agronome ou en tant que cultivateur de ce sol nous devons essayer de diriger cette nouvelle évolution de façon à ce qu'elle soit plus favorable à l'obtention des rendements agricoles maximums possibles, mais en même temps, à la conservation ou à l'amélioration de son niveau de fertilité.

Sonderdruck aus

Wasserwirtschaft in Afrika

TRANSFORMATIONS DES SOLS DE LA ZONE ARIDE
SOUS L'INFLUENCE DES IRRIGATIONS

par Prof. G. Aubert, Paris

O. R. S. T. O. M.

11 AOUT 1970

Collection de Référence

n° 14266

Verlag Deutscher Wirtschaft,
GmbH, Köln, 1963