

**L'HYDROMORPHIE DANS LES SOLS
L'ASPECT PÉDOGÉNÉTIQUE EN RÉGIONS TROPICALES**

LA HIDROMORFÍA EN LOS SUELOS

J.F. VIZIER

RÉSUMÉ

Les études réalisées sur l'hydromorphie dans les sols, ont pour but de connaître les conditions particulières de formation, d'évolution et d'utilisation des sols présentant une saturation par l'eau. Elles ont donc un aspect pédogénétique et agronomique. L'aspect pédogénétique qui est présenté dans cette communication, met l'accent sur certaines transformations de l'organisation ou de la nature des constituants du sol et sur des modifications de son fonctionnement, déterminées par la saturation par l'eau.

Des exemples pris en régions tropicales, dans des sols inondables de la cuvette tchadienne ou de bas-fonds aménagés du Moyen Ouest malgache, permettent d'envisager successivement : les variations de l'espace poral, l'évolution et la composition particulière de la fraction organique et la redistribution du fer. Les études sont basées sur la comparaison de sols subissant diversement un excès d'eau ou sur le suivi de variations de certains paramètres (humidité, densité apparente, E_h , pH, teneurs en fer réduit ...), composantes du fonctionnement actuel de ces sols.

Les enseignements tirés des exemples présentés, sont les suivants. Les transformations ou modifications enregistrées sont importantes et se produisent rapidement. A ces transformations liées entre elles par des relations complexes, correspondent des caractères propres aux sols évoluant sous l'effet

d'un excès d'eau. Mais ces caractères ont souvent une valeur diagnostique limitée en raison de leur manque de stabilité ou de spécificité. Même la répartition particulière du fer qui constitue pourtant dans les sols acides l'expression la plus visible de l'hydromorphie, n'est pas toujours un indicateur précis du type de saturation subi par le sol.

RESUMEN

Objetos y objetivos de los estudios realizados sobre la hidromorfía en los suelos : Formación - Evolución - Utilización de los suelos con condiciones hídricas particulares debidas a un exceso de agua que produce una saturación más o menos durable en una parte del suelo o en su totalidad.

La importancia del desarrollo de ciertos procesos pedogenéticos de tipo diferente se manifiesta en ejemplos tomados en las regiones tropicales.

Esos procesos intervienen simultáneamente en los suelos e interfieren entre sí para determinar unas transformaciones relativas a :

- la organización de los constituyentes del medio (variaciones del espacio poral, redistribución de ciertos constituyentes y particularmente del hierro) ;

- la naturaleza de los constituyentes orgánicos y minerales ;

- el funcionamiento del medio (hidrodinámico, "ambiance physico-chimique").

Las lecciones sacadas de esos estudios conciernen :

- al aspecto metodológico (interés de los estudios comparados de los suelos que están sometidos de manera diferente a un exceso de agua, y de los estudios de dinámica actual in situ o experimentales) ;

- al valor diagnóstico de los caracteres observados y de los parámetros medidos (transformaciones cíclicas más o menos irreversibles caracteres fugaces o durables) ;

- a la rapidez de las transformaciones que se deben tener en cuenta en cualquier operación tendiendo a modificar las condiciones hídricas (instalaciones hidroagrícolas).

1 - OBJETS ET BUTS DES ETUDES REALISEES SUR L'HYDROMORPHIE DANS LES SOLS.

Les études réalisées sur l'hydromorphie se rapportent à des sols présentant des conditions hydriques particulières, dues à un excès d'eau. L'excès d'eau provoque une saturation, si tout l'espace poral accessible est occupé par l'eau. Cette saturation peut être plus ou moins prolongée et affecter une partie ou la totalité du sol.

L'excès d'eau a des origines et des causes variées. Il peut être dû :

- simplement aux précipitations, dans des sols à drainage déficient;
- aux précipitations auxquelles s'ajoutent des apports extérieurs, en surface (par ruissellement, inondation) ou en profondeur (par remontée d'une nappe);
- à des actions anthropiques (aménagement hydro-agricoles avec applanissement, mise en terrasses, irrigation ...).

Des sols présentant une saturation par l'eau, sont observés sous toutes les latitudes. Ils peuvent couvrir d'importantes superficies dans certaines régions.

Les études réalisées sur l'hydromorphie, ont pour but de connaître les conditions particulières de formation, d'évolution et d'utilisation des sols présentant une saturation par l'eau. Elles ont donc un aspect pédogénétique et agronomique.

Du point de vue pédogénétique, il y a hydromorphie, lorsque des caractères attribuables à la saturation sont nettement observables dans le sol. Du fait de la saturation en effet, certains processus de formation et d'évolution des sols vont déterminer des transformations importantes de l'organisation ou de la nature des constituants du milieu et des modifications de son fonctionnement.

Du point de vue agronomique, il y a hydromorphie, lorsque la saturation du sol par l'eau est suffisamment longue pour gêner le développement végétatif de la plupart des cultures et empêcher le déroulement normal des façons culturales.

Parce qu'orientée vers une connaissance des sols permettant leur meilleure utilisation, cette note, sans ignorer l'aspect agronomique, s'attachera plutôt à présenter l'aspect pédogénétique de l'hydromorphie dans les sols.

2 - LES PROCESSUS PEDOGENETIQUES PARTICULIERS AUX SOLS EVOLUANT SOUS L'EFFET D'UN EXCES D'EAU

La saturation par l'eau favorise certains processus de nature mécanique, physico-chimique ou biologique intervenant dans la formation et l'évolution des sols. Des exemples pris en régions tropicales, vont permettre de montrer l'importance de ces processus et les conséquences qui en résultent pour le sol.

2.1 - PROCESSUS DE NATURE MECANIQUE - VARIATIONS DE L'ESPACE PORAL.

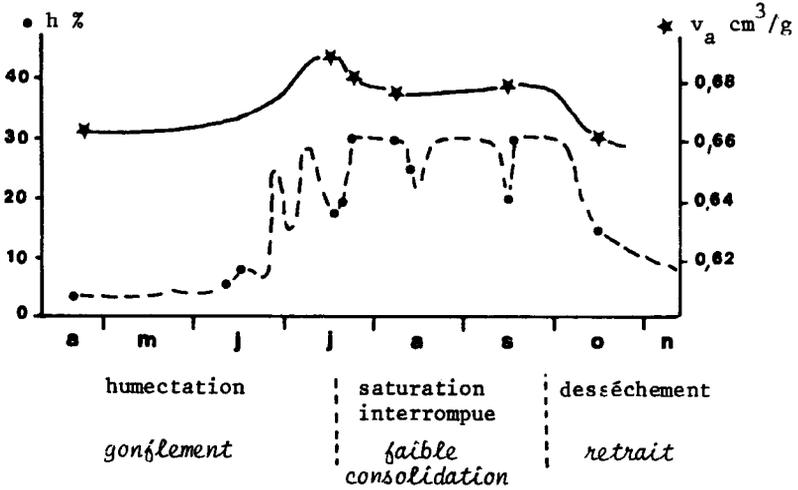
La porosité d'un sol peut varier suivant sa teneur en eau, du fait de l'existence possible d'interaction entre l'eau et la phase solide. Ces variations se produisent dans des sens différents, lors des périodes d'humectation, de saturation ou de dessèchement; elles peuvent être calculées par exemple, à partir de mesures du volume massique apparent, réalisées lors de ces différentes périodes dans les sols en place (*).

Les résultats de telles mesures sont présentés en exemple, pour deux horizons d'un sol inondable de la cuvette tchadienne (Cf. figure 1). Ces horizons diffèrent peu par leur teneur en argile (31-37% de kaolinite, montmorillonite et des traces d'illite), mais beaucoup par leur porosité et leur mode de saturation. Dans cette région où le climat est marqué par l'alternance d'une saison humide et d'une saison sèche, le premier horizon, poreux (10-30 cm, P=41%) n'est saturé pendant la saison humide, que pendant de courtes périodes entrecoupées de dessèchements partiels. Le deuxième horizon, peu poreux (30-60 cm, P=32%) est saturé de façon continue pendant 3 à 4 mois, suivant les années.

Dans l'horizon peu poreux, l'humectation s'accompagne d'un gonflement (augmentation du volume massique apparent) et de la disparition de toute structure visible. Pendant la période de saturation continue qui suit, on observe une consolidation (lente mais importante diminution du volume massique apparent) et une prise en masse. Enfin, une légère reprise du gonflement au début du dessèchement, précède un retrait et la réapparition d'une structure prismatique. Dans l'horizon poreux, le gonflement est moins important que dans le cas précédent, pendant la période d'humectation. La saturation est discontinue et la consolidation limitée. Un léger retrait est observé lors du dessèchement de l'horizon.

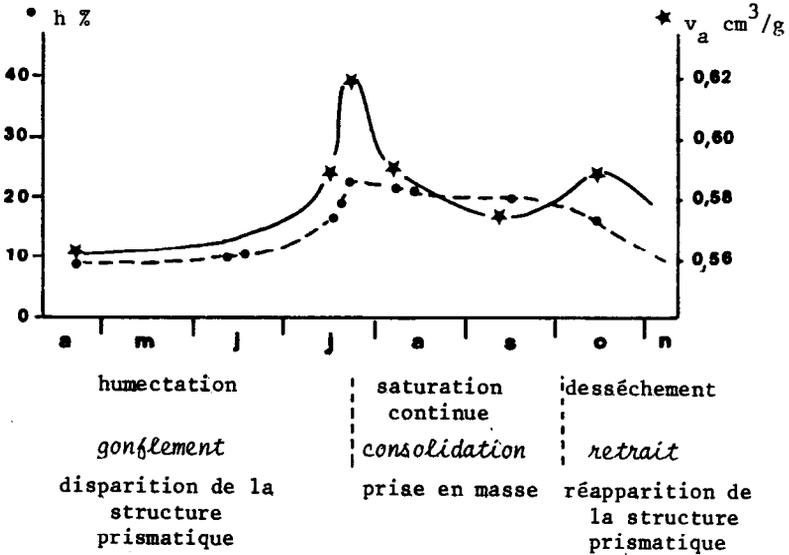
(*) volume de sol prélevé *in situ* divisé par son poids de terre séchée à 105°C

HORIZON POREUX (10-30 cm)



faibles variations de l'espace poral, ne modifiant pas les possibilités de circulation des fluides dans le sol

HORIZON PEU POREUX (30-60 cm)



fortes variations de l'espace poral, influençant les possibilités de circulation des fluides dans le sol.

Fig. 1 : Variations du volume massique apparent, dans des horizons poreux ou peu poreux, en fonction des cycles de saturation - dessèchement.

Fig. 1 : Variaciones de la densidad aparente en los horizontes porosos o poco porosos en relación con los ciclos de saturación - desecación.

Si les processus de gonflement et de retrait ne sont pas spécifiques des sols subissant un excès d'eau, la consolidation par contre, ne se produit que très lentement, le sol étant saturé. La consolidation apparaît comme étant un processus de nature mécanique, dû à la dislocation des agrégats aux fortes teneurs en eau et à la pression exercée par la couche de terre située entre la surface du sol et l'horizon considéré.

Les variations cycliques de la porosité, correspondent à des transformations de l'espace poral, donc de l'organisation des constituants du sol. Ces transformations modifient le fonctionnement du milieu, en limitant (disparition de toute structure apparente, prise en masse) ou en favorisant et orientant (réapparition de fentes de retrait) la circulation des fluides dans le sol.

Les augmentations ou diminutions de la porosité observées de façon cyclique, ne sont pas entièrement réversibles. Aussi, les importantes variations saisonnières et, par conséquent, temporaires de l'espace poral, conduisent peu à peu à une lente mais durable augmentation naturelle de la compacité.

2.2 - PROCESSUS DE NATURE PHYSICO-CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE - EVOLUTION PARTICULIERE DE LA FRACTION ORGANIQUE.

L'occupation de tout l'espace poral accessible par l'eau (saturation), limite les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Il en résulte le plus souvent un déficit en oxygène dans le milieu. L'évolution de la fraction organique, due surtout à des processus de nature biologique, est alors liée au développement de l'activité de micro-organismes anaérobies. Cette évolution, par rapport à celle des sols bien aérés, est marquée par une limitation de la décomposition de la matière organique fraîche et de l'humification.

L'évolution de la fraction organique dépend de nombreux facteurs autres que l'humidité du sol et son aération. Les conséquences de la saturation par l'eau apparaissent cependant nettement en comparant les fractions organiques de sols proches par certains de leurs caractères (pH acide), la végétation qui les couvre et le climat sous lequel ils évoluent actuellement. Les résultats présentés dans le tableau I, se rapportent à des exemples pris :

- dans la cuvette tchadienne, sur une toposéquence comportant des sols inondables, plus ou moins longuement saturés suivant leur position topographique;

————— durée de saturation croissante —————>			
	jamais saturé	saturation temporaire	saturation permanente
sols de la cuvette tchadienne	végétation herbacée, graminées. pH 6,2	végétation herbacée, graminées, cypéracées. pH 5,6	
sols de bas-fonds malgaches	végétation herbacée, graminées. pH 5,6	cultures riz pH 5,5	végétation herbacée, cypéracées. pH 4,5
quantité de matière organique	quantité de matière organique croissante —————>		accumulation de matière organique
degré d'évolution de la matière organique	matière organique bien évoluée C/N inférieur à 15 taux d'extraction des matières humifiées compris entre 28 et 36 %		matière organique peu évoluée C/N > 18 taux d'extraction des matières humifiées faible < 10%
composition de la fraction humifiée	substances humifiées fortement polymérisées dominantes	substances humifiées peu polymérisées tendant à devenir dominantes	

Tableau I : Comparaison des caractéristiques de la fraction organique de sols des régions tropicales à saisons contrastées.

- régions chaudes, températures élevées, pas de moyennes mensuelles inférieures à 20°C;
- régime tropical à contraste saisonnier accentué, alternance de saison humide (6 à 7 mois) et sèche (5 à 6 mois).

- dans des bas-fonds de la Région du Moyen Ouest à Madagascar où, par suite d'aménagements hydro-agricoles, on peut observer des sols jamais, temporairement ou constamment saturés.

On observe une croissance des quantités de matière organique dans les sols, quand la durée de saturation augmente. Le rapport C/N et le taux d'extraction des matières humifiées ne sont pas très différents dans les sols jamais ou temporairement saturés; dans ces derniers cependant, les substances humifiées faiblement polymérisées à pouvoir réducteur et complexant plus élevé, sont relativement plus abondantes (augmentation du rapport acides fulviques/acides humiques). Dans les sols saturés en permanence, le rapport C/N est beaucoup plus grand et le taux d'extraction des matières humifiées plus faible, que dans les autres sols.

La saturation du sol par l'eau influence l'évolution de sa fraction organique; cela se traduit par des quantité et qualité de matières organiques différentes, suivant la durée de la saturation. Cette évolution particulière contribue à modifier l'organisation des constituants du sol (augmentation de la fraction organique par rapport à la fraction minérale) et leur nature (produits humifiés peu polymérisés). La formation de substances organiques à fort pouvoir réducteur et complexant, peut favoriser la mobilisation de certains constituants minéraux, agissant ainsi sur le fonctionnement du sol.

Accumulation de substances organiques, formation de produits humifiés peu polymérisés, caractérisent la fraction organique des sols subissant un excès d'eau. Mais il faut noter que ces caractères peuvent évoluer très rapidement (en quelques années), dès qu'un changement de durée de saturation intervient.

2.3 - PROCESSUS DE NATURE PHYSICO-CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE INTERVENANT SUR LA FRACTION MINERALE DES SOLS.

Dans les sols saturés d'eau, l'oxydation des matières organiques, du fait du déficit en oxygène, s'accompagne de la réduction de substances minérales : nitrates, composés manganiques, ferriques... Ces processus d'oxydo-réduction sont de nature physico-chimique ou biologique.

Une des conséquences de ces processus est la redistribution du fer; elle est due à la réduction et la mobilisation de cet élément. Dans les

sols subissant un excès d'eau, la redistribution du fer modifie l'organisation des constituants et se manifeste par des traits pédologiques qui constituent souvent l'expression la plus visible de l'hydromorphie. En outre, il semble que les processus de réduction et de mobilisation provoquent, en raison du rôle de ciment que jouent les oxyhydroxydes de fer, une déstabilisation de la structure et une baisse de la perméabilité pouvant modifier le fonctionnement du sol.

Dans les régions tropicales à saisons contrastées (cuvette tchadienne, bas-fonds de Madagascar), des différences notables dans la répartition du fer, ont été observées dans des sols diversement affectés par la saturation. Des études de leur dynamique actuelle ont été réalisées *in situ* et sur des modèles expérimentaux. Ces études mettent en évidence des variations de l'état d'oxydo-réduction du sol en fonction de la durée et du mode de saturation et d'importants transferts de matière (migration de fer, de matière organique), liés ou non aux mouvements de l'eau pouvant exister dans le sol saturé.

La réduction et la mobilisation du fer déterminent d'importantes et rapides transformations de l'organisation des constituants ; ces transformations résultent d'une dynamique assez complexe, en raison du grand nombre de facteurs qui interviennent simultanément et interfèrent entre eux.

La réduction du fer, processus physico-chimique ou biologique, est favorisée par la permanence des températures élevées existant dans ces régions chaudes. Elle dépend de la durée de la saturation, mais aussi de la continuité ou de la discontinuité de cette saturation et des possibilités de renouvellement de l'eau saturant la terre, suivant que le milieu est poreux ou peu poreux. La réoxydation du fer réduit intervenant pendant une interruption de saturation, est rapide si la période de saturation précédant l'interruption est de courte durée; elle est plus lente dans le cas contraire. La réduction est limitée par le renouvellement de l'eau saturant la terre, dans le cas de milieux peu pourvus en substances organiques. La réduction du fer est favorisée par certains caractères intrinsèques du sol : quantité et qualité de la fraction organique (matière organique bien évoluée, produits humifiés faiblement polymérisés), un pH acide

La réduction du fer favorise sa mobilisation. On observe des migrations de fer liées à la circulation de l'eau dans le sol saturé. Facilité par la porosité du milieu, ce type de migration est complexe car le fer ferreux est concerné par deux processus antagonistes : l'un, de mobilisation croissant avec le développement de la réduction et l'autre, d'immobilisation progressive partielle, dû à la formation de produits peu mobiles ou à l'adsorption du fer ferreux. On observe aussi des migrations de fer indépendantes des mouvements de l'eau, mais fonction de gradients de potentiels d'oxydo-réduction ou de concentrations en substances réduites, générés, dans les sols saturés par l'eau, par l'hétérogénéité de la répartition des constituants.

Dans les sols acides des régions tropicales, ces transferts de matière et plus particulièrement de fer, déterminent deux types de différenciation qui peuvent être rattachés aux concepts de gley et de pseudogley. Caractérisés par une ségrégation du fer, ils se distinguent d'une part, par la localisation de taches de couleur, la présence de nodules, de concrétions et d'autre part, par la permanence ou la fugacité de ces traits pédologiques. Ces deux types de différenciation résultent d'évolutions sensiblement différentes. L'une, dominée par les processus de mobilisation du fer maintient, dans le cas du gley, une certaine homogénéité de la répartition du fer. Les immobilisations, formant des taches observées en saison sèche au contact des vides, sont fugaces et disparaissent en saison humide lors des périodes de saturation. L'autre évolution, dans le cas du pseudogley, est dominée par les processus d'immobilisation. L'effet cumulé des immobilisations à l'intérieur des agrégats, accroît l'hétérogénéité de la répartition du fer. Il conduit à la formation d'accumulations durables, sous formes de taches, nodules ou concrétions, visibles en toutes saisons, quel que soit l'état hydrique du sol.

Un caractère diagnostique a souvent été attribué à ces différenciations, par l'établissement de relations existant entre la morphologie, la durée et la nature de la saturation du sol par l'eau. L'étude dynamique réalisée sur les sols des régions tropicales, a montré la complexité de telles relations. Les facteurs intervenant sur la dynamique du fer et les conséquences de cette dynamique sur la différenciation des sols, sont récapitulés dans le tableau II. Il apparaît qu'il est plus facile de relier un type de morphologie à un ensemble de processus intervenant dans la dynamique du fer, qu'à un des facteurs agissant sur cette dynamique, la durée de saturation par exemple. Le fait

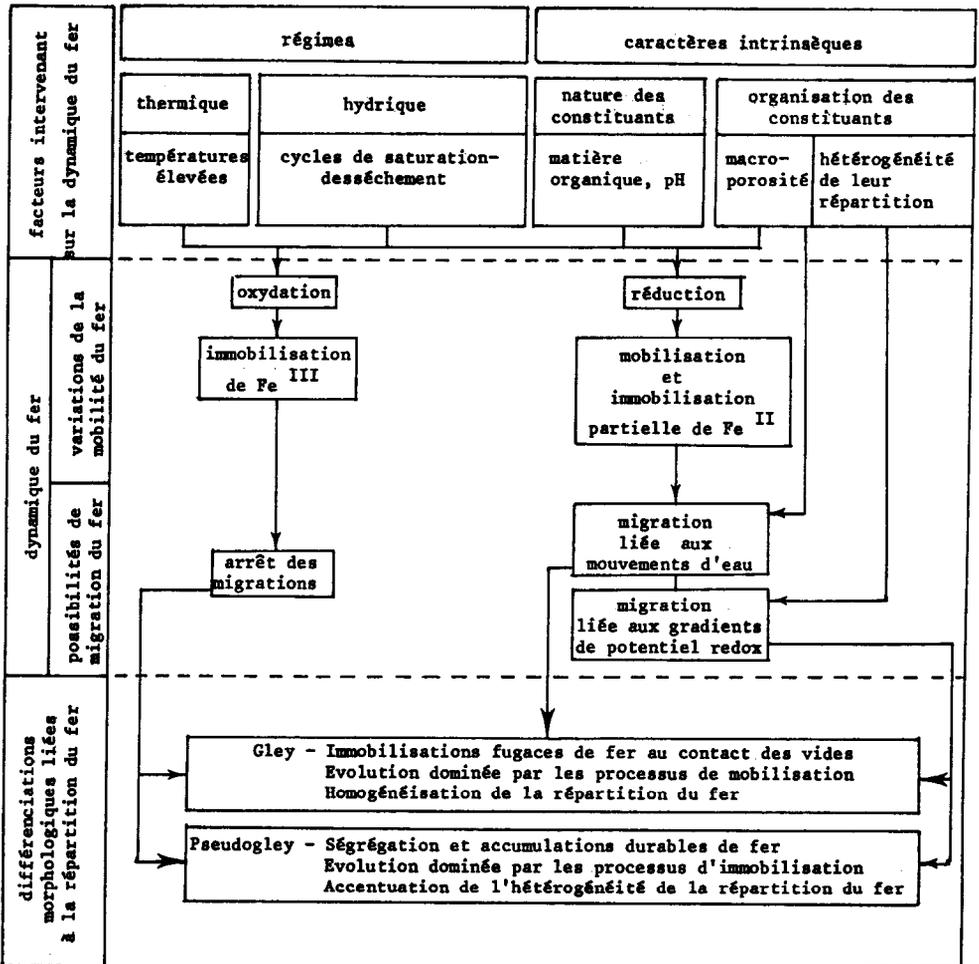


Tableau II : La dynamique du fer dans les sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau - Facteurs intervenant sur cette dynamique et les transformations qui en résultent dans les sols.

qu'un type de morphologie puisse résulter de la combinaison différente de divers facteurs intervenant simultanément et interférant entre eux, diminue le caractère diagnostique que ces différenciations pourraient avoir, de la durée et de la nature de la saturation du sol par l'eau.

3 - ENSEIGNEMENTS TIRES DE CES ETUDES.

Ces exemples pris en régions tropicales, montrent l'importance et la rapidité des transformations de l'organisation ou de la nature des constituants du sol et des modifications de son fonctionnement, déterminées par la saturation par l'eau. D'autres enseignements peuvent être tirés des résultats présentés.

Du point de vue méthodologique, on note l'intérêt des études comparatives de sols diversement soumis à l'excès d'eau, pour mettre en évidence l'importance des transformations dues à la saturation (comparaison des fractions organiques, par exemple). Les études dynamiques quant à elles, basées sur la répétition de mesures faites dans un même sol ou un même dispositif expérimental, dans des situations hydriques différentes, montrent la rapidité et le caractère parfois cyclique des transformations (variations de l'espace poral, mobilisation ou immobilisation du fer, par exemple).

A ces transformations correspondent des caractères propres aux sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau, pouvant avoir une valeur diagnostique de la durée et la nature de la saturation.

Certains sols subissant un excès d'eau présentent une compacité due au processus de consolidation. La compacité est alors indicatrice d'une saturation prolongée et continue; mais elle peut être difficile à mettre en évidence en raison des importantes variations cycliques de l'espace poral, parfois enregistrées dans ces sols. La compacité peut aussi ne pas être due à la saturation du sol par l'eau, mais à une évolution progressive d'un horizon illuvial ou à l'alternance de fortes dessiccations et humectations transformant le mode d'assemblage des constituants du sol.

Accumulation des matières organiques, formation de produits humifiés faiblement polymérisés, résultent de l'évolution particulière de la frac-

tion organique des sols saturés d'eau. Ces caractères ont une valeur diagnostique des conditions actuelles de saturation; ils évoluent rapidement dès qu'un changement s'opère dans le régime hydrique des sols. Il faut encore souligner que le caractère peu polymérisé des produits humifiés formés est atténué, en régions tropicales, par la longueur de la saison sèche.

La redistribution du fer due aux processus d'oxydo-réduction, conduit suivant les cas, à une ségrégation durable ou temporaire de cet élément. Les deux types de différenciation observés dans les sols acides présentés en exemple, sont caractéristiques d'une évolution marquée par l'excès d'eau, mais ils ne peuvent être que difficilement considérés comme diagnostiques de la durée de saturation. La redistribution du fer résulte d'une dynamique complexe, différente suivant que le milieu est acide ou basique. Dans les exemples présentés, la dynamique du fer apparaît liée à celle de l'eau (durée, continuité ou discontinuité de la saturation), de l'espace poral (circulation des fluides) et à l'évolution de la fraction organique (présence de substances réductrices et complexantes); d'où la nécessité d'une approche systémique des processus et des transformations déterminés par la saturation du sol par l'eau.

Certaines transformations de l'organisation, de la nature des constituants ou modifications du fonctionnement des sols dues à la saturation, doivent être prises en compte pour une bonne utilisation de ces milieux particuliers.

La compacité par exemple, peut gêner le développement des racines des plantes cultivées et, limitant le drainage, favorise l'établissement puis le maintien de la saturation du sol par l'eau. Elle peut être accrue par le passage d'engins utilisés pour les façons culturales, en raison de la fragilisation de la structure aux fortes humidités. L'augmentation de la compacité constitue le plus souvent une gêne, mais elle est parfois recherchée par des labours effectués dans les rizières inondées par exemple, pour limiter le drainage et améliorer l'économie de l'eau dans ces sols.

Le déficit en oxygène dans les sols saturés est à l'origine de la présence de substances minérales réduites ou de substances organiques à faible poids moléculaire. Des quantités importantes de ces substances sont parfois responsables de phénomène de toxicité (inhibition de la rhizosphère oxydante du riz par exemple, absorption de fer ferreux).

Les conséquences de la mobilisation de certains éléments du sol sont également à prendre en considération. Le fer réduit et mobilisé dans des horizons superficiels humifères, peut provoquer la formation d'horizons indurés à faible profondeur dans des sols de rizières par exemple, ou colmater des drains mis en place dans des parcelles aménagées.

CONCLUSION

Les études réalisées sur l'hydromorphie montrent l'importance et la rapidité des transformations déterminées par l'excès d'eau. A ces transformations qui apparaissent liées entre elles par des relations complexes, correspondent des caractères propres aux sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Ces caractères ont une valeur diagnostique variable du mode de saturation du sol par l'eau. Cette valeur diagnostique dépend de la spécificité du caractère, mais aussi de sa stabilité, de sa permanence, de ses possibilités d'évolution plus ou moins rapide, voire de sa fugacité.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- DUCHAUFOR Ph., 1977 - Pédologie. I Pédogenèse et classification; chapitre XI
Les sols hydromorphes. Masson, Paris : 357-395.
- HENIN S., 1976 - Cours de physique du sol. I Texture, structure, aération.
ORSTOM, Paris; EDITEST, Bruxelles; 159 p.
- MOORMANN F.R., VAN BREEMEN N., 1978 - Rice : Soil, water, land. Publication
IRRI, 185 p.
- PONNAMPERUMA F.N., 1972 - The chemistry of submerged soils. Advances in agromy, vol. 24 : 29-96.
- VIZIER J.F., 1983 - Etude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées - Dynamique du fer et différenciation des profils. Travaux et Documents de l'ORSTOM, n°165, 294 p.