

Comportement et organisation de sols de Boulbène dans le Tarn

Quelques éléments sur le passage d'une structure prismatique à une structure verticale dans les horizons enrichis en argile

J.C. Michel⁽¹⁾, D. Tessier⁽²⁾ et J.C. Favrot⁽³⁾

(1) UMR A-462 SAGAH INRA/INH/Université d'Angers, Sciences AGronomiques Appliquées à l'Horticulture, 42, rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé

(2) INRA, Science du Sol, route de Saint-Cyr, 78026 Versailles

(3) INRA-ENSA, Place Viala, 34060 Montpellier

RÉSUMÉ

Dans la région Sud-Ouest de la France, les sols développés sur les alluvions anciennes de la vallée du Tarn (appelés encore boulbène) présentent, malgré une évolution pédologique comparable, des horizons B argilliques à structures très différentes (prismatique ou verticale) en fonction de leur position topographique.

Les données classiques montrent que les teneurs en argile des horizons argilliques oscillent entre 36 et 55 % dans les faciès prismatique à verticale. Leur nature minéralogique est sensiblement comparable (illites-smectites), avec cependant un caractère smectitique plus marqué dans le faciès verticale. Les cations échangeables sont essentiellement Ca, Mg, Na et K, avec un rapport Ca/Mg respectivement voisin de 2 et 3 pour les faciès prismatique et verticale (*tableau 1*).

En fonction du type de structure, les courbes de dessiccation/humectation présentent des comportements macroscopiques extrêmes. Le gonflement atteint respectivement 3 et 25 % dans les faciès prismatique et verticale et semble avant tout à relier à l'aptitude de l'argile à devenir plus dense par dessiccation, et non à l'obtention d'une teneur en eau supérieure aux hauts états d'hydratation.

La présence d'une structure prismatique est associée à : (1) un faible gonflement et une légère déformation horizontale, (2) la présence d'oxydes de fer cimentant les cristallites d'argiles et (3) une orientation isotrope des particules argileuses. Cette organisation engendre une structure rigide avec une très faible variation de volume. En revanche, la structure verticale est caractérisée par (1) un matériau partiellement déferrié, (2) un fort gonflement et, (3) une importante déformation quasi isotrope.

Cette évolution d'une structure prismatique à verticale peut être corrélée aux ondulations du micro-relief. Des conditions d'hydromorphie temporaire apparaissent principalement dans de légères dépressions, entraînant la dissolution des oxydes de fer. Il en résulte une aptitude du matériau argileux à se compacter en conditions sèches mais aussi de retenir plus d'eau et de gonfler plus largement en conditions humides. Le gonflement du sol devient alors suffisant pour provoquer sa rupture par cisaillement et la formation de plans de glissement caractéristiques de ce type de faciès et, *in fine*, entraîner une micro-division des particules argileuses. Ainsi, le passage d'une structure prismatique à une structure verticale et leurs propriétés hydrauliques respectives sont donc principalement à relier à l'évolution de la taille, de l'arrangement et du degré de cimentation des particules argileuses plutôt qu'à un changement d'ordre minéralogique.

Mots clés

Déformation, formes du fer, phénomènes de gonflement/retrait, micromorphologie, structure du sol, texture des argiles.

SUMMARY

BEHAVIOUR AND ORGANISATION OF BOULBENES SOILS (TARN). Change from prismatic to vertic structure.

In south-west France, soils developed from old alluvial deposits of the Garonne river basin (also called boubène) present clayey horizons with very different (prismatic or vertic) structure (but similar pedological evolutions) as a function of their topographical position.

The classical methods showed that the clay content of the argillic horizons ranges between 36 and 55 %. The nature of the clay is comparable i.e. interstratified illite-smectite clays with a slightly more smectitic character for the vertic horizon. Exchangeable cations are mainly Ca and Mg with Ca/Mg between 2 and 3 for the two argillic horizons.

Depending on the structure, the drying/wetting curves show extreme macroscopic behaviours. The swelling reached 3 and 25 % for the prismatic and vertic facies respectively, and seems to be mainly due to the aptitude of the clay to shrink and not to the ability to take more water when fully hydrated.

The presence of a prismatic horizon was associated with different features: (1) little swelling and small horizontal deformation, (2) presence of iron oxides cementing clay aggregates and (3) an isotropic clay particle orientation as seen through the TEM. This organisation leads to rigid structure with small lateral volume change. By contrast, the vertic horizon was characterised by (1) a partly deferricated clay mass, (2) a large swelling and, (3) a large quasi isotropic deformation.

This evolution from prismatic to vertic could be correlated to the micro-relief undulations of the soils. Temporarily hydromorphic conditions appeared mainly in small depressions, which leads to a dissolution of iron oxides. The resulting effect was the aptitude of the clay material to be more compact in dry conditions and to absorb more water and thus to swell to a large extent in wet conditions. Thus the swelling of the material was sufficient to provoke its rupture and the formation of slickensides, and in fine to cause a clay particle micro-division. Thus the passage from prismatic to vertic structure and the correlative hydraulic properties were mainly due to a change in the clay particle size, arrangement and cementation more than a change in mineralogy.

Key-words

Soil deformation, iron forms, shrink/swell phenomena, micromorphology, soil structure, clay texture.

RESUMEN

COMPORTAMIENTO Y ORGANIZACIÓN DE LOS SUELOS DE BOULBENES (TARN).

Cambio de prismático a la estructura de vertic

En el Sur-Oeste de la Francia, los suelos son desarrollados sobre aluviones antiguos del valle del "Tarn" (llamados aun Boulbènes) que presentan, desafortunadamente una evolución pedológica comparable de los horizontes B arcilloso de estructura muy diferente (prismática o vertica) en función de su posición topográfica.

Los datos clásicos muestran que el contenido en arcilla de los horizontes argillicos varían entre 36 % y 55 % en la estructura prismática y vertica. Su naturaleza mineralógica es sensiblemente comparable (ilitas y esmectitas), con un carácter esmectita ligeramente mas importante en la estructura vertica. Los cationes cambiables son principalmente Ca, Mg, Na, y K, con una relación Ca/Mg cerca de 2 y 3 en la estructura prismática y vertica.

En función del tipo de estructura, las curvas de sequedad/humedecimiento presentan comportamientos macroscopicos extremos. La dilatación alcanza respectivamente 3 t 25 % en la estructura prismática y vertica, asemeja estar ligado a la aptitud de la arcilla que se presenta mas compacta y no a la obtención de un contenido en agua superior a los altos estados de hidratación.

La presencia de una estructura prismática esta asociada a: (1) una débil expansión y una ligera deformación horizontal, (2) la presencia de óxidos de hierro cimientan los cristales de arcilla y (3) una orientación isotropica de las partículas arcillosas. Esta organización produce una estructura rígida con una muy débil variación de volumen. Por lo contrario, la estructura vertica esta caracterizada por (1) un material parcialmente sin fierro, (2) una fuerte expansión y (3) una importante deformación casi isotropica.

Esta evolución de una estructura vertica a una prismática puede ser correlacionada a las ondulaciones del micro relieve. Las condiciones de Hidromorfía temporal aparecen principalmente en las ligeras depresiones, conduciendo a la disolución de los óxidos de fierro. Esto resulta de una aptitud del material arcilloso a compactarse en condiciones de sequedad pero también de retener mas agua y de expandirse mas en condiciones de humedad. Esta expansión es suficiente para provocar su ruptura y la formación de caras de fricción que son características de este tipo de estructuras y por consecuencia, provoca una micro división de las partículas arcillosas. Así, el paso de una estructura prismática a una estructura vertica y sus propiedades hidráulicas respectivas están principalmente ligadas a la evolución del tamaño y el acomodo de las partículas arcillosas mas que a un cambio en el orden mineralógico.

Palabras claves

Deformación, formas del fierro, fenómenos de expansión/contracción, micromorfología, estructura del suelo, textura de las arcillas.

Il est généralement admis que l'activité biologique et les actions physiques sont les deux grands types de mécanismes de base de la structuration des sols. Dans les sols à fort potentiel de gonflement, la structuration est essentiellement due à des actions physiques. Ainsi dans les vertisols et sols associés, la présence de faces de glissement (slickensides) et de fissures est à relier à l'amplitude du gonflement qui peut, dans certains cas, dépasser 30 % (Wilding et Tessier, 1988).

Des travaux ont été réalisés sur les sols développés sur les alluvions anciennes de la vallée du Tarn (Région Sud-Ouest de la France) (Michel, 1993). Ces sols présentent une grande variété de faciès sensiblement différents par la texture et la structure de leur horizon argileux B (Favrot *et al.*, 1992). La présence d'un micro-relief d'échelle décimétrique (~ 50 cm), en relation avec la profondeur du sol, est à l'origine de l'individualisation de 2 types de structures, prismatique et verticale, respectivement observées en position de micro-buttes et de micro-dépressions (Tessier *et al.*, 1992). D'un type de sol à l'autre, les horizons présentent des comportements extrêmes, et ont révélé des fonctionnements hydriques très différents, notamment par le mode de réponse au drainage (Longueval, 1988; Bouzigues et Vinas, 1989). Ces résultats ont conduit à s'interroger sur le poids des divers facteurs susceptibles de modifier l'organisation microscopique du sol à caractère prismatique vers une structure de type verticale, de façon à comprendre et mieux prévoir leur comportement physique et hydrologique.

L'objectif de cet article est de définir, à partir d'un site pédologique bien connu, les mécanismes qui régissent le comportement macroscopique des sols à caractère verticale. A cet effet, nous nous appuyerons sur l'étude de la microstructure du sol et l'analyse de son comportement macroscopique, en particulier à travers l'étude du gonflement et de son caractère plus ou moins isotrope.

MATERIAUX ET METHODES

Les sols étudiés, appelés Luvisols-Rédoxisols (AFES, Référentiel pédologique, 1995) ou sols lessivés hydromorphes (CPCS, Classification des sols, 1967), présentent une évolution pédologique comparable, avec une succession d'horizons A_p - E_g - BT_g - BC_g (Bouzigues et Vinas, 1989). L'accumulation d'argile au niveau de leur horizon BT_g peut induire un niveau d'engorgement saisonnier et, en conséquence, l'installation de conditions temporaires d'hydromorphie. Ces conditions apparaissent à l'origine d'une évolution des sols à structure prismatique vers des sols à caractère verticale, notamment en fonction de leur position topographique (micro-dépressions) (figure 1).

Dans les horizons B texturaux (tableau 1), la distribution granulométrique indique une teneur en argile plus élevée dans le faciès verticale (55 %) que dans le faciès prismatique (36 %). Leur nature minéralogique est sensiblement comparable (illites, smectites), avec cependant un caractère smectitique plus marqué dans le

Figure 1 - Relation entre la structure des horizons B argilliques, la position topographique et la profondeur du sol.
Figure 1 - Relationships between structure of B argillic horizons, topographical position and soil depth.

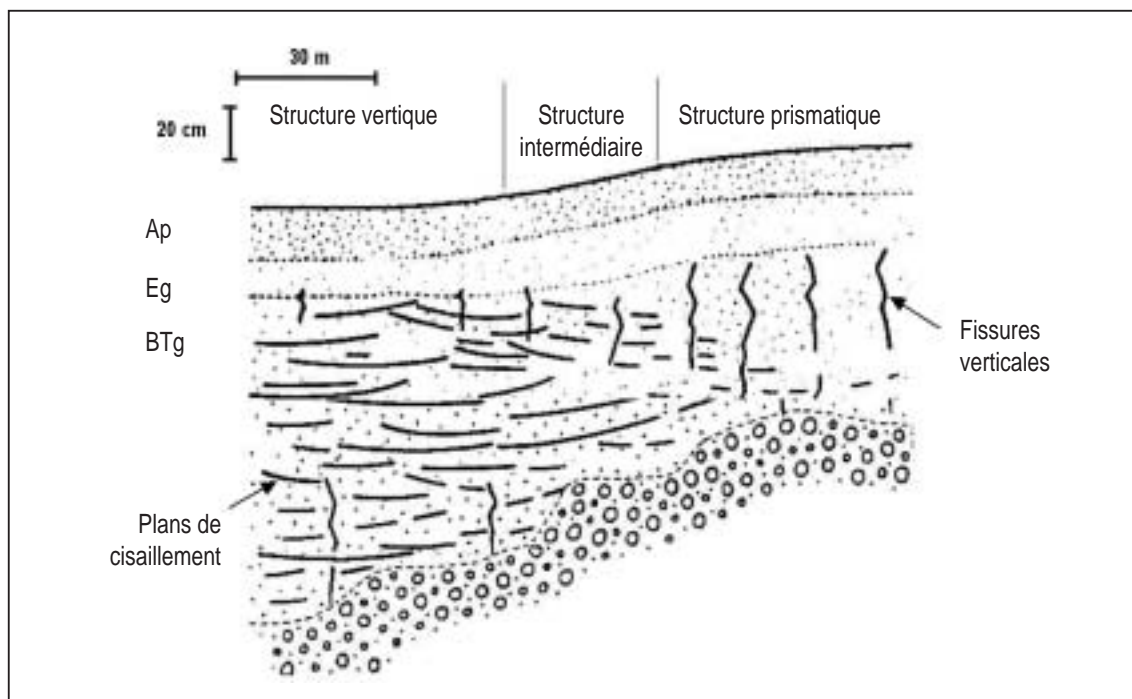


Tableau 1 - Principales caractéristiques physico-chimiques des horizons prismatique et vertique.**Table 1** - Main physico-chemical characteristics of prismatic and vertic horizons.

		Teneur en argile (%)	Surface spécifique de l'argile (m ² g ⁻¹)	CEC horizon	Cations échangeables (cmol _c kg ⁻¹)				pH
					Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	
Sol à faciès prismatique	Ap	32,0	153	67	49	6,6	3,4	0,9	6,4
	Eg	-	139	63	44	6,1	1,4	1,9	6,5
	BTg (prism.)	36,3	258	93	39	19,7	1,2	2,9	5,3
Sol à faciès vertique	Ap	12,2	159	46	42	4,5	3,2	0,4	6,9
	Eg	28,0	195	69	62	9,2	2,4	1,1	7,3
	BTg (vert.)	55,3	278	197	153	46,7	3,5	7,6	7,0

faciès vertique, comme en attestent les diffractogrammes de rayons X (établis sans traitement préalable des argiles) (figure 2).

Le faciès vertique est associé à des capacités d'échange et des surfaces spécifiques plus élevées que le faciès prismatique. Les cations échangeables sont toujours préférentiellement Ca, puis Mg, avec un rapport Ca/Mg qui avoisine respectivement 2 et 3 pour les horizons BT_g à caractère prismatique et vertique. La proportion de cations dispersants (K et surtout Na) saturant le complexe d'échange n'est pas négligeable (~ 5 %). Le pH est voisin de 7 dans le faciès vertique alors qu'il atteint 5,3 dans le faciès prismatique. Bien que le cortège cationique reste globalement identique d'un faciès à l'autre, l'analyse du complexe d'échange en liaison avec le pH va de pair avec une accumulation relative de cations dans les dépressions (faciès vertique). Une désaturation partielle du complexe d'échange est observée dans le faciès prismatique, là où le milieu géochimique est appauvri en cations. Au total, les différences de teneur en argile et la nature minéralogique de l'argile des deux faciès ne permettent pas d'expliquer ici la présence de deux structures si différentes.

Afin de préciser le rôle des conditions temporaires d'hydromorphie, en particulier au niveau de ces horizons argilliques, des études sur les différentes formes du fer ont été entreprises. Elles ont été réalisées sur la fraction argileuse des échantillons prismatique et vertique, puis sur des prélèvements sélectifs effectués dans le faciès vertique au sein du fond matriciel et au niveau des slickensides (tableau 2).

Les légères variations notées dans les teneurs en fer des fonds matriciels des faciès prismatique et vertique concernent quasi-exclusivement la teneur en fer au sein du réseau cristallin des silicates (argiles), plus importante dans le cas du faciès vertique. Les autres formes de fer ne sont pas véritablement différentes d'un faciès à l'autre dans la gamme granulométrique étudiée (0 à 2 mm). En revanche, au sein du faciès vertique, on constate de grandes différences entre les teneurs en fer des slickensides (fortement déferifiés) et le fond matriciel. Bien que la teneur en fer du réseau cris-

tallin des argiles soit identique dans les deux cas, toutes les autres formes du fer ont pratiquement disparu dans les zones affectées par le cisaillement.

Étude des propriétés physiques

Des échantillons non remaniés (mottes) issus des horizons à faciès prismatique et vertique ont été étudiés dans la gamme de potentiels de l'eau allant de -1 kPa à -100 MPa afin de suivre l'évolution de leur espace poral et leur contenu en eau. Le suivi a été effectué à l'aide du dispositif décrit par Tessier et Berrier (1979) pour des potentiels de l'eau inférieurs à -1,6 MPa, et sous des humidités relatives contrôlées pour des potentiels de l'eau supérieurs. Les courbes de rétention en eau ont été établies à partir d'une douzaine de répétitions pour chacun des deux faciès.

Afin d'analyser l'ampleur du gonflement et son caractère plus ou moins isotrope, un cylindre de sol non remanié (200 cm³) a été pré-

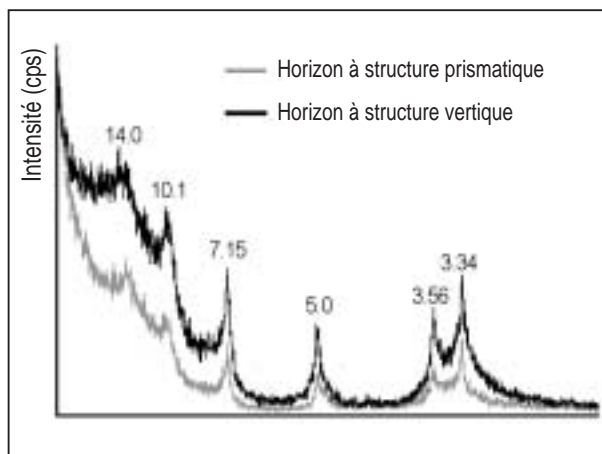
Figure 2 - Diffractogrammes de Rayons X des horizons B à structure prismatique et vertique.**Figure 2** - X-ray diffractograms of B horizons.

Tableau 2 - Principales formes du fer au sein des horizons prismatique et vertique (g.kg⁻¹).**Table 2** - Main forms of iron in prismatic and vertic horizons (g.kg⁻¹).

	Fe total HF	Fe libre DEB	Fe amorphe TMM	Fe silicate	Fe oxyde
Horizon à structure prismatique (< 2 mm)	23,4	12,7	1,8	10,7	10,9
Horizon à structure vertique (< 2 mm)	31,0	12,1	1,3	18,9	10,9
Fond matriciel de l'horizon à structure vertique (< 2 µm)	31,4	15,6	2,7	15,8	16,9
Slickensides de l'horizon à structure vertique (< 2 µm)	19,6	2,9	0,4	16,7	2,5

levé dans chacun des horizons B. Pour l'étude du gonflement, l'échantillon a d'abord été séché très lentement à l'air, puis humecté à sa base par l'injection d'eau à débit constant (0,25 mm³/s) de telle sorte que les gradients hydriques soient les plus faibles possibles. Durant l'expérimentation, le volume apparent du cylindre ainsi que sa teneur en eau ont été mesurés à l'aide d'un appareil triaxial (Bishop et Wesley, 1975) qui contrôle également les déformations radiales et axiales (Michel *et al.*, 2000). En outre, une pression isotrope constante de 10 kPa a été imposée à la périphérie de l'échantillon.

La variation du volume poral peut être interprétée en terme d'indice des vides (e) en fonction de l'indice d'eau (θ); lesquels correspondent respectivement aux rapports du volume des vides (V_v) et du volume d'eau (V_w) sur le volume de solide (V_s) (Tessier, 1984). De ces mesures, un indice de gonflement $lg = \Delta e / (1 + e_{-100MPa})$ a été calculé (Chrétien et Tessier, 1988).

Relation avec la microstructure

Afin d'expliquer les comportements macroscopiques très différents d'un faciès à l'autre, des études micromorphologiques ont été réalisées sur des lames minces en microscopie optique. Celles-ci ont été réalisées à partir de blocs séchés à l'air et imprégnés sous vide à l'aide de résines rendues fluorescentes par adjonction d'un pigment sensible aux U.V. (Hartmann *et al.*, 1992).

Les observations ont été complétées par des études d'organisation de la phase solide au M.E.T. sur la fraction argileuse et sur des fragments orientés prélevés sélectivement au sein du fond matriciel et au niveau des slickensides du faciès vertique, ainsi qu'à l'intérieur du faciès prismatique. Ceux-ci ont été initialement soumis à un potentiel de l'eau de -3,2 kPa, puis inclus dans une résine, et des sections ultra-microtomiques ont été préparées pour l'observation en microscopie électronique à transmission (T.E.M.) (Righi *et al.*, 1999).

RÉSULTATS

Comportement physique :

Rétention d'eau et spectre poral

Les courbes de variation de volume apparent et de rétention d'eau réalisées sur mottes sont reportées *figure 3*. Concernant le faciès vertique, la variation du volume apparent est relativement importante dans toute la gamme de potentiel de l'eau, et plus particulièrement pour des potentiels compris entre -100 kPa et -100 MPa. L'indice de gonflement atteint en effet 25 %. La porosité à l'air est négligeable en deçà de potentiels de l'eau inférieurs à -100 kPa, mais l'échantillon vertique n'atteint jamais la saturation en eau. En revanche, les variations de volume apparent du faciès prismatique sont très faibles dans toute la gamme des potentiels de l'eau et indiquent un gonflement/retrait de l'ordre de 5 %. L'indice d'air augmente progressivement de -1 kPa à -100 kPa, puis augmente rapidement jusqu'à -100 MPa.

Afin d'étudier la capacité d'hydratation de l'argile ainsi que la variation de volume de l'argile à différents potentiels de l'eau, nous avons admis que le mécanisme de la rétention de l'eau et l'augmentation du volume poral du sol sont dus à l'argile. La rétention de l'eau rapportée à la teneur en argile obéit à une loi de comportement similaire pour des potentiels de l'eau inférieurs à -100 kPa, tandis qu'à -1 600 kPa, elle est plus élevée dans le faciès vertique que dans le faciès prismatique (*figure 4a*).

Parallèlement, l'étude du volume poral de l'argile (*figure 4b*) indique que l'argile du faciès vertique présente toujours un volume plus faible que l'argile du faciès prismatique, même dans l'état le plus hydraté. En outre, la variation du volume de l'argile est faible dans le faciès prismatique (10 %) alors qu'elle est considérable dans le faciès vertique (50 %). L'argile des deux faciès se distingue donc par une aptitude différente à se rétracter. La variation du volume global de l'échantillon de sol considéré (exprimé ici en indice de gonflement), qui atteint respectivement 3 % et 25 % dans les faciès prismatique et vertique, révèle le comportement quasi-rigide du matériau prismatique, alors que l'essentiel du gonflement/retrait du matériau vertique intervient aux bas potentiels (au-delà de -100 kPa).

Figure 3 - Courbes de rétention d'eau et de variation de volume apparent des horizons vertique et prismatique.

Figure 3 - Water retention and total volume variation curves of vertic and prismatic horizons.

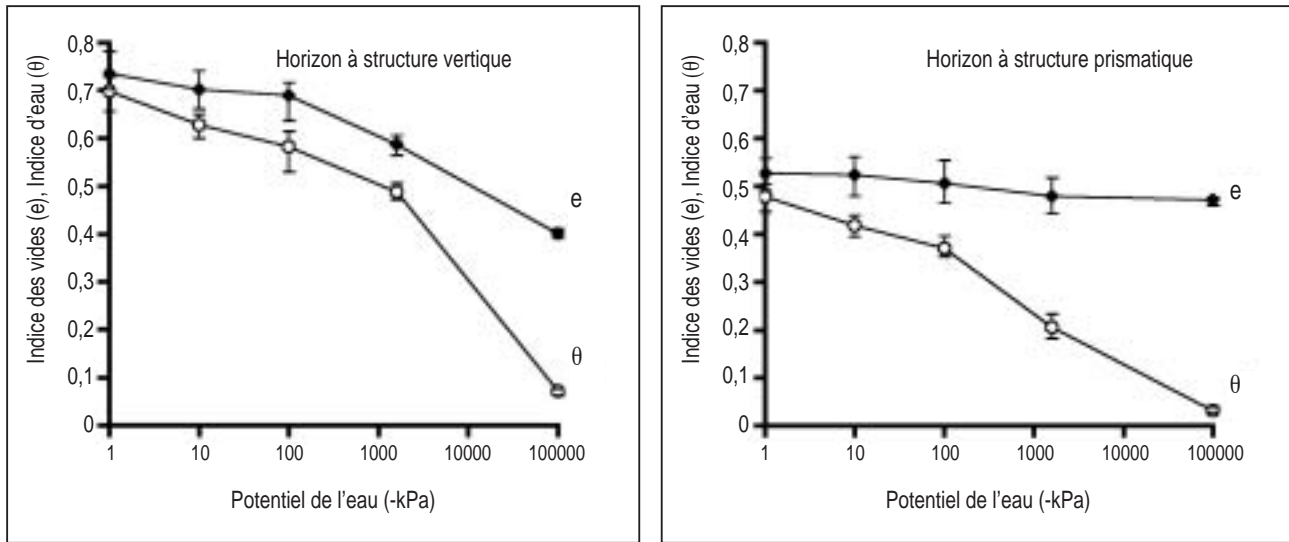
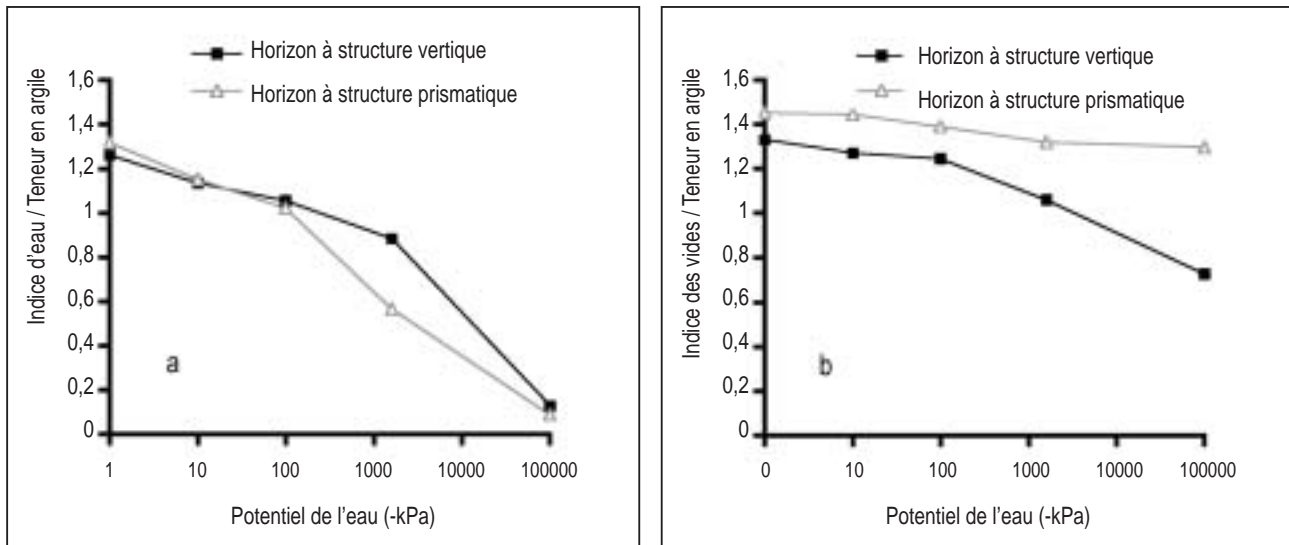


Figure 4 - Courbes de rétention d'eau de l'argile des horizons à structure vertique et prismatique (4a). Courbes de variation du volume apparent de l'argile des horizons à structure vertique et prismatique (4b).

Figure 4 - Water retention curves of clays of vertic and prismatic structure horizons (4a). Total volume variation curves of clays of vertic and prismatic structure horizons (4b).

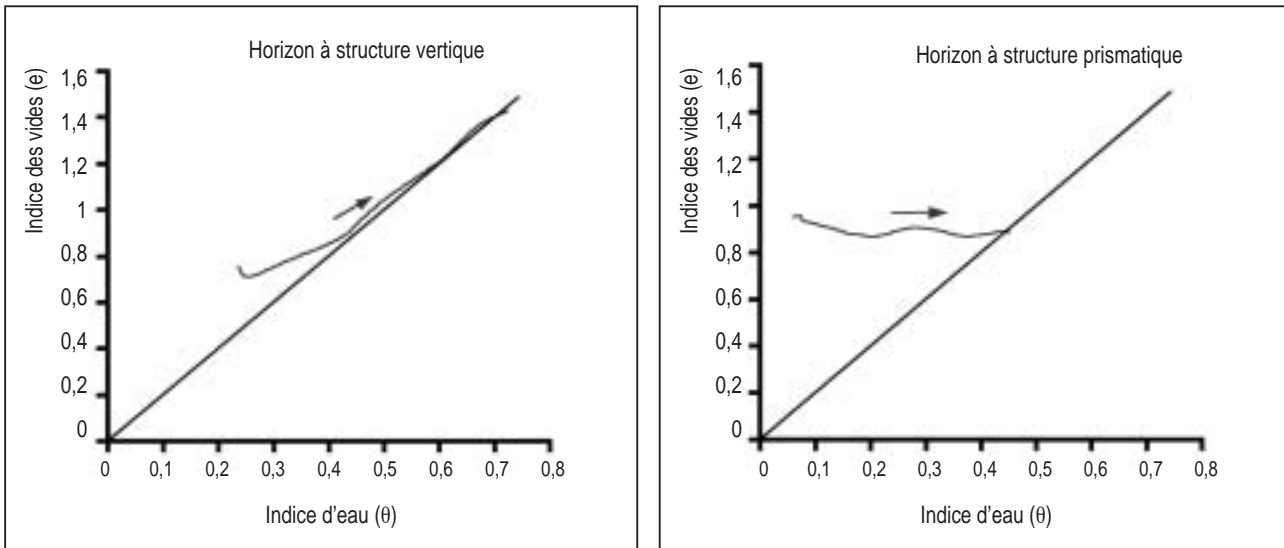


Chacun des faciès possède donc une organisation qui lui est propre bien que le volume poral de leur argile et leur capacité d'hydratation soient similaires aux forts états d'hydratation. Le passage d'un faciès prismatique à un faciès vertique correspond donc à un changement de spectre poral, et donc aussi de géométrie de la phase solide.

Ampleur et anisotropie du gonflement

L'étude du gonflement a été effectuée avec l'appareil triaxial. Les courbes de gonflement (*figure 5*) montrent que le matériau vertique possède une potentialité de gonflement considérable (25 %) par rapport au matériau prismatique dont le changement de volume n'ex-cède pas 5 %. Contrairement au faciès prismatique qui est quasi-rigide, l'humectation du faciès vertique s'accompagne d'un gonflement normal sur une large gamme de teneur en eau, c'est-à-dire que

Figure 5 - Courbes de réhumectation des cylindres de sols à structure verticale et prismatique réalisées par l'appareil triaxial.
Figure 5 - Rewetting curves of soil cylinders with vertic and prismatic structure carried out with the triaxial apparatus.



l'augmentation du contenu en eau au cours de l'humectation va de pair avec une augmentation de volume identique. Il ressort que le matériau verticale est celui qui présente à la fois le volume le plus faible à l'état sec et le volume le plus important à l'état humide. Le passage du caractère prismatique au verticale conduit donc à une baisse de la densité du sol à l'état humide et surtout à une densification à l'état sec.

La différenciation des deux faciès a ensuite été interprétée sur la base du gonflement et de son caractère anisotrope (figure 6). Dans le faciès prismatique, sous une pression de confinement de 10 kPa (liée aux conditions expérimentales), la prise d'eau s'accompagne d'un retrait latéral faible (~ 1 %). Pour le faciès verticale, les déformations radiales et axiales avoisinent 6 % et sont donc quasi-isotropes. En outre, un retrait latéral (1 %) est observé dans le faciès verticale durant la première phase de l'humectation.

Rôle de la texture de l'argile dans la genèse de la structure : Observations microscopiques

Les observations en microscopie optique montrent que des plans de fracture sont systématiquement observés dans le faciès verticale (figure 7a). Ils traversent la matrice argileuse avec un angle d'environ 30° par rapport à l'horizontale. Ce faciès apparaît sous des teintes grisâtres au niveau des slickensides, comme au niveau des revêtements argileux qui se distinguent à la périphérie des agrégats. La partie centrale des agrégats est de couleur rouille-ocre, ce qui confère à cet horizon verticale une apparence bariolée. La porosité visible en microscopie optique est pratiquement inexistante, notamment celle d'origine biologique. Elle

se localise le plus souvent dans les zones grises, mais les pores sont rarement interconnectés. En revanche, pour le faciès prismatique (figure 7b), une porosité importante d'origine biologique, surtout racinaire, avec également des fissures plus ou moins interconnectées, est visible. Les prismes apparaissent de teinte rouille et ocre, parsemés de quelques plages grises de réduction plus ou moins contrastées, lui conférant de ce fait un aspect faiblement bariolé.

Concernant la fraction argileuse du faciès prismatique, les observations au MET indiquent la présence d'agrégats de cristallites de grande taille clairement identifiables (~ 2 μm) (figure 8). Des oxydes de fer sont en outre présents entre les cristallites d'argiles. L'orientation des particules est faible.

En revanche, pour le fond matriciel du faciès verticale, l'argile est relativement orientée (figure 9a). La goethite a été identifiée et cimente certains agrégats (figure 9b), tandis que d'autres en sont dépourvus (figure 9c). Il n'a pas été possible de mettre en évidence des différences dans la taille des agrégats de cristallites argileux entre les deux faciès prismatique et verticale. Par contre, dans les slickensides, des agrégats de cristallites de petite taille, voire des cristallites isolés, sont identifiables (0,2 μm) (figure 9d) et les oxydes de fer ont totalement disparu (figure 9e).

DISCUSSION

- Les résultats obtenus montrent clairement que la présence d'un faciès prismatique est associée à différentes caractéristiques : (1) un faible gonflement/retrait et une légère déformation radiale, (2) la présence d'oxydes de fer qui cimentent les agrégats de cristallites, (3) une organisation largement isotrope des parti-

Figure 6 - Anisotropie du gonflement des horizons à structure verticale et prismatique : étude des directions de déformations lors de l'humectation.

Figure 6 - Swell anisotropy of vertic and prismatic horizons : study of the deformation directions during rewetting.

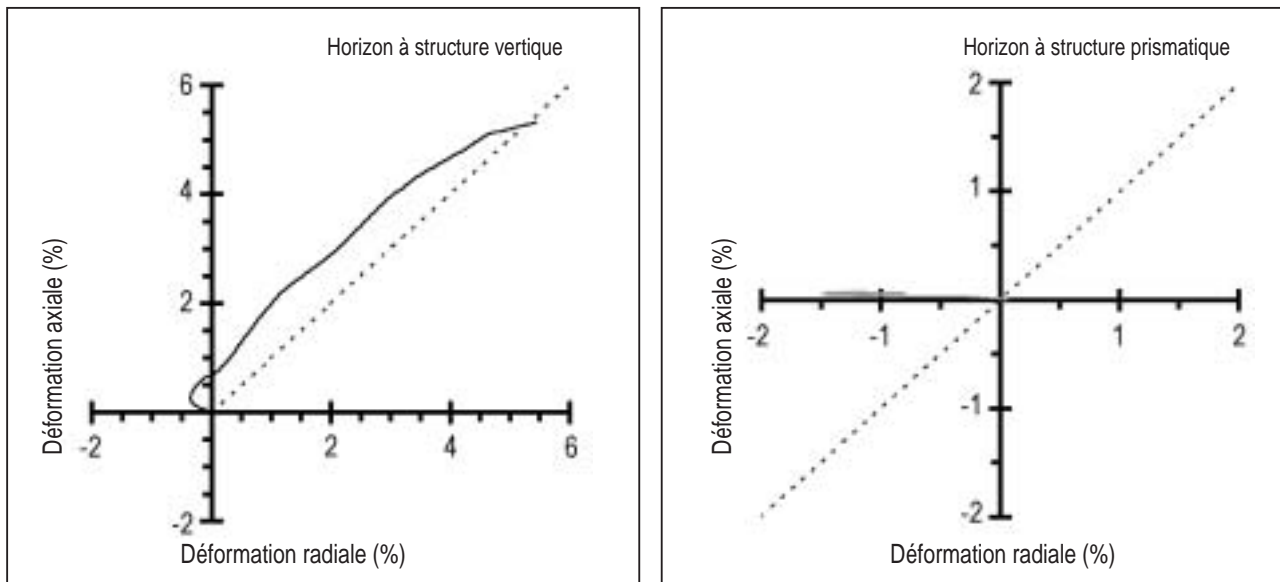
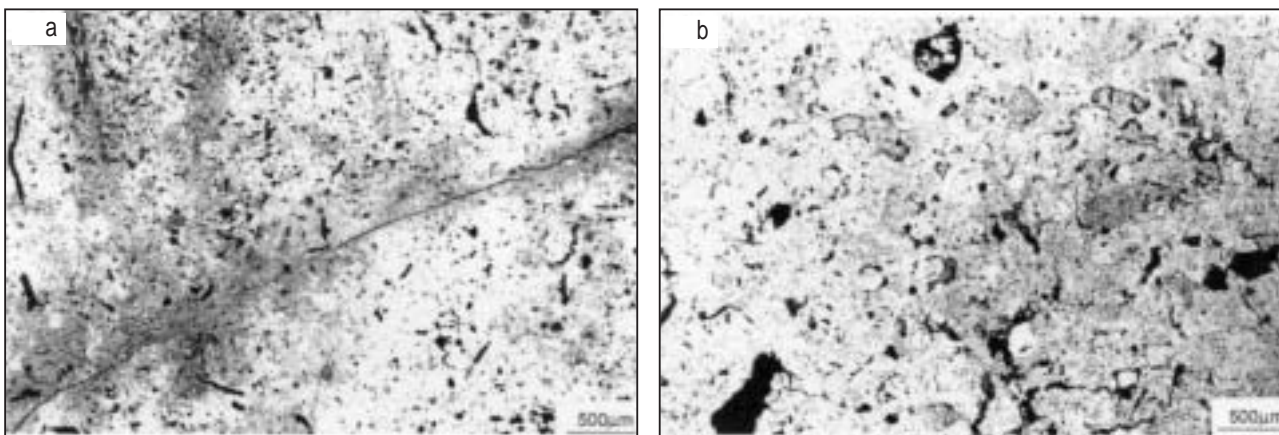


Figure 7 - Organisation micromorphologique des horizons à structure verticale (7a) et prismatique (7b).

Figure 7 - Micromorphological organisation of vertic (7a) et prismatic (7b) horizons.



cules d'argiles au MET. C'est cette organisation particulière qui confère au sol une structure relativement rigide et quasi-isotrope.

- L'horizon vertique est caractérisé par (1) un fond matriciel partiellement déferriqué, (2) une grande potentialité de gonflement/retrait, (3) des déformations radiale et verticale substantielles, (4) une texture des argiles plus fine, notamment au niveau des slickensides. Seul le sol vertique présente des plans de cisaillement que l'on retrouve jusqu'à l'échelle de l'arrangement des particules argileuses.

Les analyses classiques montrent l'existence de gradients physiques et physico-chimiques verticaux et horizontaux.

Verticalement, la distribution granulométrique traduit un lessivage qui se traduit en profondeur par la formation d'horizons argilliques. C'est cette accumulation d'argile qui engendre la présence d'une nappe perchée et induit des conditions d'hydromorphie temporaire. L'intensité de l'hydromorphie est modeste dans le sol prismatique et ne modifie pas la localisation du fer dans les argiles à l'échelle de l'élément structural. Elle est beaucoup plus importante dans le sol vertique, notamment en raison du niveau piézométrique de la nappe (Favrot *et al.*, 1992). Ceci vient du fait que, pour le profil prismatique en position de microbuttes, le niveau d'engorgement n'atteint que la partie basse du

Figure 8 - Organisation de la fraction argile au M.E.T., à $-3,2$ kPa de l'horizon à structure prismatique.

Figure 8 - Clay fraction organisation of prismatic horizon at $-3,2$ kPa by M.E.T.

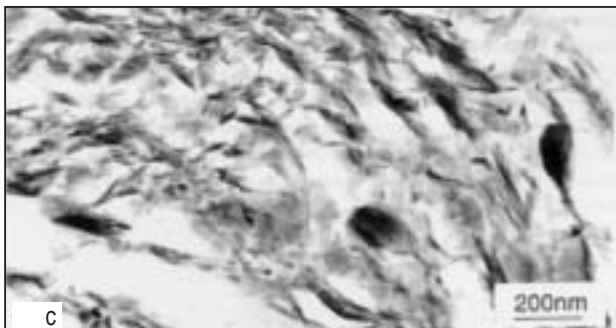
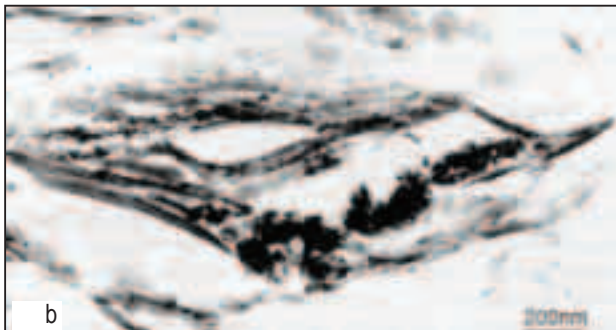
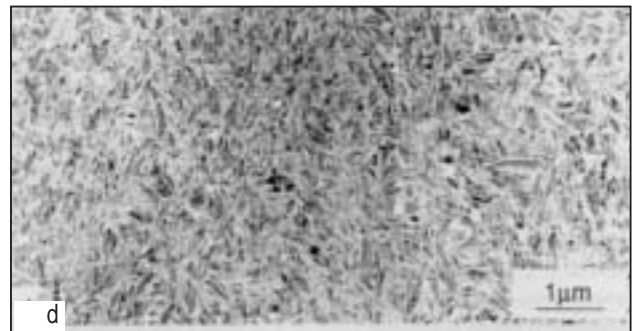
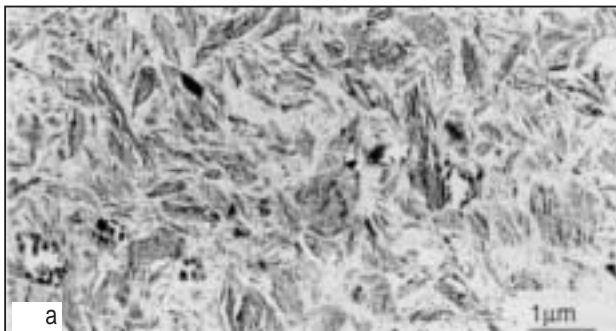


profil. L'engorgement est plus prononcé dans le profil verticale développé dans de légères dépressions. Ceci souligne donc l'influence du micro-relief et de la profondeur du sol sur la distribution spatiale horizontale des deux types de structures prismatique et verticale.

Dans le faciès prismatique, la taille des particules argileuses, déferriées ou non, reste similaire, ce qui indique que l'évolution texturale de l'argile reste limitée, même en l'absence d'oxydes de fer. En revanche, dans le faciès verticale, la déferrification partielle autorise une certaine réorganisation de l'argile, car une partie du fer qui jouait le rôle de liant et assurait une certaine rigidité des particules a disparu. Nous en concluons que la déferrification est à l'origine des comportements macroscopiques différents. Ainsi, lors des cycles de dessiccation/humectation, le faciès verticale acquiert une aptitude à se densifier en conditions sèches. Il peut absorber plus d'eau et ainsi

Figure 9 - Organisation de la fraction argile au M. E. T., à $-3,2$ kPa du fond matriciel (9a, 9b, 9c) et des plans de glissement (9d, 9e) de l'horizon à structure verticale

Figure 9 - Clay fraction organisation at $-3,2$ kPa by M. E. T., of the matrix (9a, 9b, 9c) and slickensides (9d, 9e) of vertic horizon



gonfler en conditions humides. Le processus de déferrification est donc le principal changement d'ordre minéralogique que l'on peut noter dans l'évolution des sols.

Cette déferrification entraîne les effets constatés sur le gonflement des sols. Il apparaît alors que la texture des argiles change. Comme l'ont en effet déjà suggéré Tessier *et al.* (1992), le gonflement dans le sol vertique apparaît alors suffisant pour provoquer la rupture du matériau au niveau de zones de cisaillement. Le cisaillement n'est pas seulement un phénomène macroscopique. D'après nos résultats, il résulte d'une réorganisation du sol au niveau le plus fin, notamment à l'échelle des particules argileuses du fond matriciel.

CONCLUSION

L'étude conjuguée des propriétés physiques, minéralogiques et de l'organisation des sols de boubènes (alluvions anciennes du Tarn, secteur de Villaudric) indique que leur genèse fait intervenir plusieurs niveaux d'organisation, en particulier des niveaux intermédiaires entre l'échelle de la microscopie optique (centimétrique à millimétrique) et l'échelle de la structure des minéraux (minéralogie s.s.). Ainsi, la texture des argiles apparaît déterminante dans les propriétés physiques des sols. Elle conditionne aussi l'aptitude d'un sol à gonfler et à se rétracter.

Dans les sols étudiés, la rétention de l'eau peut être associée à une phase initiale de retrait qui implique l'élargissement de fentes de retrait macroscopiques du fait de la fermeture de fissures microscopiques. Son rôle est mal connu, mais il semble important dans une phase transitoire d'humectation, notamment vis-à-vis de la dynamique de l'eau. Lorsque l'humectation se poursuit, la réorganisation du sol fait intervenir un gonflement macroscopique à l'origine de la fermeture des fentes de retrait.

Contrairement au faciès prismatique qui gonfle peu, l'ampleur du gonflement apparaît suffisante pour provoquer la rupture du matériau. Il ne s'agit pas seulement d'un phénomène local lié à la présence d'un plan de cisaillement. L'ensemble de l'organisation du sol est concerné c'est-à-dire aussi bien la taille que l'assemblage des particules fines du sol.

Le gonflement de l'argile n'est possible qu'après une phase d'hydromorphie de telle sorte que les oxydes de fer ne jouent plus leur rôle de liant rigidifiant la matrice argileuse. Le passage du faciès prismatique au faciès vertique implique donc un fonctionnement hydrique particulier qui est à l'origine d'une phase de dissolution et de migration du fer, « libérant » ainsi les propriétés de gonflement/retrait des argiles, lesquelles expriment leurs propriétés lors des phases de dessiccation/humectation.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D. et Girard M.C., 1995 - Référentiel Pédologique. INRA Ed., 332 p.
- Bishop A.W. et Wesley L.D., 1975 - A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. in *Géotechnique*, 25 (4), 657-670
- Bouzigues R. et Vinas A., 1989 - Identification de différents faciès structuraux dans les horizons argilliques des sols de boubènes. Conséquences sur les transferts hydriques. Travail de synthèse AIP Drainage CEMAGREF-INRA S.E.S., 595, 92 p.
- Chrétien J. et Tessier D., 1988 - Influence du squelette sur les propriétés physiques des sols : Hydratation, gonflement et structuration. *Science du sol*, 26 (4), 255-268.
- C.P.C.S., 1967 - Classification des Sols, Association Française pour l'Etude du Sol, INAPG, 96 p.
- Favrot J.C., Bouzigues R., Tessier D., et Valles V., 1992 - Contrasting structures in the subsoil of the boubènes of the Garonne river basin (France). *Geoderma*, 53, 125-137
- Hartmann C., Tessier D. et Wilding, L.P., 1992 - Simultaneous use of transmitted and incident ultraviolet light in describing soil microfabrics. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 56, 1867-1870
- Longueval C., 1988 - Drainage—Champ d'essais de Bouillac. In *Expérimentation sur les sols et les productions végétales*, C.R. annuels Compagnie Aménagement des Coteaux de Gascogne, Tarbes, 150 p.
- Michel J.C., 1993 - Etude du mécanisme de structuration des sols argileux. Cas des sols de Boubènes à Villaudric (Tarn). Mémoire de D.E.A. Pédologie, Univ. Nancy I, INRA Versailles éd., 58 p.
- Michel J.C., Beaumont A., et Tessier D., 2000 - A laboratory method for measuring the isotropic character of soil swelling. *Eur. J. Soil Sci.*, 51 (4), 689-697.
- Righi D., Elsass F., et Lapeyronnie J.P., 1999 - Clay minerals in soils : global characterization of X ray diffraction using analytical electron microscopy. *Colloques de l'INRA*, 20-21/11/97, 92, 79-92.
- Tessier D. et Berrier J., 1979 - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Science du sol*, 1, 67-82.
- Tessier D., Bouzigues R., Favrot J.C., et Valles V., 1992 - Influence of decimetric microrelief on clay texture evolution of hydromorphic soils of the Garonne river. Differentiation of vertic and prismatic structures. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 315 II, 1027-1032
- Tessier D., 1984 - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Dr.ès-Sciences, Univ. Paris VII, 361p., I.N.R.A. Versailles Ed.
- Wilding L.P. et Tessier D., 1988 - Genesis of vertisols : Shrink-swell phenomena. In *Vertisols : their distribution, properties, classification and management*, (eds L. WILDING and R. PUENTES) : 55-81. Texas A & M, College Station.