

Proceedings
Seventh International Congress
International Association
of Engineering Geology

5-9 SEPTEMBER 1994 / LISBOA / PORTUGAL

Editors

R. OLIVEIRA, L. F. RODRIGUES, A. G. COELHO & A. P. CUNHA
LNEC, Lisboa, Portugal

OFFPRINT



A. A. BALKEMA / ROTTERDAM / BROOKFIELD / 1994

Caractérisation minéralogique et géotechnique des 'Terres Noires' du Sud-Est de la France, en vue d'applications routières

Mineralogical and geotechnical characterization of the 'Black Lands' of the South-East of France, having in view road applications

T.S.H. Phan
Ho Chi Minh City Polytechnic University, Vietnam

P. Antoine
IRIGMLGM, Université Joseph Fourier Grenoble, France

ABSTRACT : The "Terres Noires" formation is a series of marls, which age ranges from middle to upper Jurassic. They are widespread over considerable areas in the southeastern part of France and thus they are frequently involved in engineering works, particularly for motorways. The authors describe the special weathering processes and the main geotechnical characteristics in view of using these marls as embankments.

RÉSUMÉ : Les Terres Noires correspondent à une formation marneuse d'âge Jurassique moyen à supérieur qui occupent de très importantes surfaces dans le Sud-Est de la France. Elles se trouvent ainsi impliquées dans de nombreux travaux de génie civil et particulièrement la construction des autoroutes. Les auteurs décrivent les processus d'altération et les caractéristiques géotechniques en vue de leur emploi en remblai routier. Des recommandations sont formulées pour cet usage.

1 INTRODUCTION

La zone externe des Alpes occidentales françaises est constituée de terrains sédimentaires formés d'une alternance de séquences de marnes et de calcaires dont les âges s'échelonnent du Lias au Crétacé. La séquence marneuse la plus ancienne est celle des "Terres Noires" (Bathonien à Oxfordien) dont l'épaisseur, quoique très variable, peut-être considérable et dépasser les 2000 m. Pour cette raison, et compte-tenu du plissement, cette formation affleure sur des surfaces considérables dans tout le secteur délimité à l'Ouest par la vallée du Rhône, au Nord par la latitude de Grenoble, à l'Est par le front des nappes de la zone interne alpine et au Sud par les chaînons provençaux.

Cette extension considérable fait que la plupart des travaux de génie civil réalisés dans cette zone rencontrent les formations de Terres Noires. Ceci est particulièrement vrai pour les tracés autoroutiers lesquels posent le problème du réemploi des déblais et celui de la stabilité des talus. La liaison autoroutière en projet, entre Grenoble et Sisteron en offre un bon exemple. Les "Terres Noires" y représentent en effet, la majorité des affleurements rocheux rencontrés selon les divers tracés envisagés. L'altérabilité des divers faciès de marnes a donc été particulièrement étudiée dans le cadre du projet.

2 APERÇU STRATIGRAPHIQUE

Les travaux de P. ARTRU (1972) ont montré que la formation des "Terres Noires" comprend généralement deux membres, essentiellement marneux et très épais, séparés par un niveau repère médian.

Le membre inférieur appartient au Jurassique moyen (Bajocien supérieur à Bathonien). Il est constitué de marnes noires à débit en fines plaquettes, très caractéristique.

Le niveau médian, plus carbonaté, est un calcaire argileux, parfois dolomitique. Sa patine rousse et sa résistance plus forte aux agents atmosphériques (il forme assez facilement des ressauts) en font un bon niveau repère. Son âge correspond sensiblement à la limite Bajocien-Bathonien.

Le membre supérieur est à nouveau constitué de marnes en plaquettes, mais celles-ci renferment des nodules plus carbonatés de teinte grise ou beige. Son âge s'étend du Bathonien à l'Oxfordien moyen.

3 CARACTÉRISATION DES DIVERS FACIÈS

Compte-tenu de la grande extension géographique de la formation il n'était pas certain a priori que ses caractéristiques géotechniques soient suffisamment constantes pour que l'on puisse raisonner globalement quant à leur utilisation routière. Trois sites géographiquement très distincts ont donc été étudiés à

des fins de comparaison, dans le Trièves, les environs de Digne et de Barcelonnette.

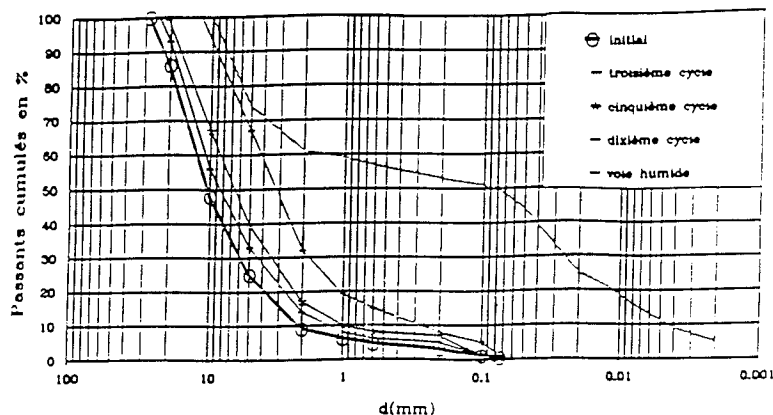


Figure 1. Évolution des courbes granulométriques entre le tamisage par voie sèche et par voie humide

3.1 Constitution minéralogique

Les divers faciès de "Terres Noires" dérivent du mélange, en proportions variables, de deux phases principales :

- une phase carbonatée représentée principalement par de la calcite (et parfois un peu de dolomie) ;
- une phase détritique sableuse (quartz dominant et un peu de feldspaths) et argileuse (argiles et interstratifiés ainsi que phyllosilicates variés - micas, chlorites).

La phase carbonatée (roche saine) représente de 70 à 80% du volume total. Les faciès correspondants sont donc des marnes calcaires, voire des calcaires argileux, renfermant une fraction silteuse non négligeable. Au sein de la phase argileuse l'illite est largement prédominante ainsi que la chlorite. La kaolinite est absente dans les échantillons provenant de la région de Barcelonnette mais présente dans les autres (en faibles quantités). Il en va de même pour les interstratifiés (chlorite-smectite ou illite-smectite le plus abondant).

Les résultats des essais au bleu de méthylène sont en bon accord avec les données de la minéralogie. Les valeurs de bleu (V.B.) sont en général faibles comme le montre le tableau suivant ce qui confirme la nature silteuse de la fraction détritique fine :

Localité	V.B. roche saine	V.B. roche altérée
Trièves	0,7 à 1,7	1,3 à 2,5
Draix		1 à 3,2
Barcelonnette	0,5 à 0,6	0,5 à 1,1

On remarque en particulier les valeurs très faibles des échantillons du secteur de Barcelonnette où, justement, les interstratifiés à smectite font défaut.

3.2 Le processus d'altération des "Terres Noires"

Le processus d'altération met en jeu, classiquement, des phénomènes physiques et chimiques. L'action des premiers est la plus évidente. Les surfaces de marnes exposées aux agents atmosphériques subissent une desquamation et un écaillage poussés qui produisent un matériau meuble, constitué de fines plaquettes, dont la taille varie, selon le degré d'évolution, de quelques millimètres à quelques centimètres. Ce matériau, doté d'un indice de vides élevé, est très perméable. L'action des précipitations sera différente selon que du ruissellement pourra prendre naissance ou non. Dans le premier cas, on assistera à l'ablation très rapide d'une partie de la couverture meuble et à la dégradation de ces plaquettes en produits silteux. L'évolution des courbes granulométriques entre un tamisage par voie sèche et par voie humide met bien en évidence cette dégradation.

La charge solide entraînée par les filets liquides et, par conséquent, par tous les ruisseaux, sera très importante ce qui pose des problèmes pour tous les ouvrages hydrauliques ainsi que pour la conservation des sols.

Dans le second cas une infiltration épidermique se produira au sein du manteau altéré superficiel, rapidement limitée vers la profondeur par la présence de la marne compacte imperméable. Une action chimique pourra alors prendre naissance dont l'effet principal est une décarbonatation des produits meubles. Les eaux, chargées de carbonates, percoleront alors vers le bas des pentes et leur évaporation conduira généralement au dépôt du carbonate, lequel pourra conférer une certaine cohésion entre les plaquettes. Ceci permet la tenue du manteau meuble sur des pentes atteignant 35 à 40°.

3.2.1 Essais pénétrométriques

L'appréciation de l'épaisseur de la tranche altérée et la détermination de ses caractéristiques de résistance sont des éléments déterminants. Elles ont été réalisées par l'utilisation d'un pénétromètre léger, portable, bien adapté, conçu et réalisé à l'IRIGM. Les graphiques obtenus sont très révélateurs du degré d'altération, de la qualité de la couche altérée superficielle ainsi que de son épaisseur.

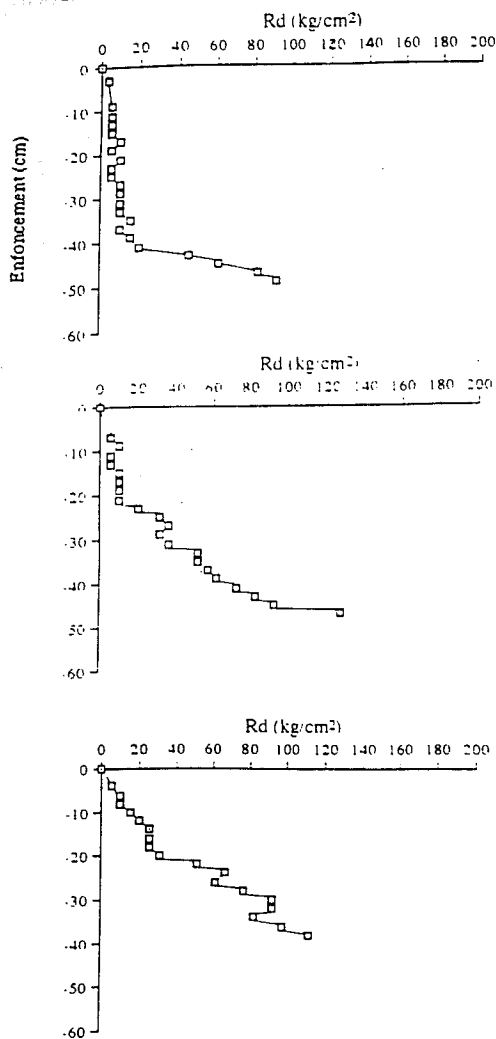


Figure 2. Exemples de graphiques pénétrométriques dans la couche superficielle

3.2.2 Calcimétrie

La mise en évidence d'une variation significative des teneurs en carbonates entre la roche saine et la roche

altérée est difficile puisqu'une partie de la calcite retirée aux plaquettes est souvent redéposée sous forme d'un enduit superficiel. Par ailleurs on a considéré comme roche saine la marne massive (refus au pénétromètre) mais rien ne prouve qu'il n'y a pas déjà eu transformation par rapport au faciès original. Toutefois, la comparaison avec des analyses pratiquées sur des carottes de sondage montre que ce critère est acceptable. Les calcimétries réalisées sur 122 échantillons indiquent les tendances suivantes (teneurs moyennes en CO_3Ca) :

	Roche saine (% CO_3Ca)	Roche altérée (% CO_3Ca)
Trièves		
Membre supérieur	45	35
Membre inférieur	33	29
Draix		
Membre supérieur	45	44
Membre inférieur	38	30

Les résultats de Barcelonnette sont trop peu nombreux pour être significatifs mais on notera que les valeurs ci-dessus montrent bien la tendance à la décarbonatation entre les faciès sains et altérés, notamment pour le membre supérieur.

3.2.3 Analyse minéralogique

La comparaison des résultats d'analyses par diffraction X de la marne saine et de ses produits d'altération révèle les faits suivants :

- les variations dans la teneur en carbonates ne peuvent être appréciées valablement ;
- les paragenèses argileuses sont inchangées.

3.2.4 Observations au microscope électronique à balayage

L'observation au MEB à des grossissements variant de 500 à 7500 permet de mieux cerner la progression de la décarbonatation lors de l'altération. Les principaux faits observés peuvent être résumés comme suit :

- la texture de la marne associe étroitement calcite argile et grains de quartz. Trois types de texture sont reconnaissables : compacte (beaucoup de calcite), alvéolaire (calcite partiellement dissoute et paillettes d'argile, floconneuse - argile dominante) ;
- la dissolution de la calcite est très perceptible et la disparition des grains rhomboédriques laisse fréquemment des vides de forme géométrique reconnaissable. La porosité augmente nettement lorsque l'on passe des faciès sains aux faciès altérés ;
- la texture la plus fréquemment représentée est la texture alvéolaire caractérisée par l'abondance de micropores au voisinage desquels les cristaux de calcite restants sont corrodés. Il est difficile d'établir si la différence entre texture compacte et texture alvéolaire est entièrement due à l'altération.

3.2.5 Le mécanisme de l'altération

Il est désormais possible de résumer la succession des phénomènes conduisant à l'altération du faciès "Terres Noires". La décompression naturelle liée à l'érosion facilite la pénétration de l'eau dans une couche superficielle de quelques décimètres. L'humidité provoque le gonflement des interstratifiés à smectites ou de la pyrite (par oxydation et hydratation ou formation d'acide sulfurique puis de gypse - secteur de Barcelonnette). La desquamation du matériau s'amorce en retrouvant les zones de faiblesse du sédiment (lamines). La percolation de l'eau dans le matériau meuble en voie d'élaboration contribue à la décarbonatation et à l'accroissement de la porosité (une diminution de 20 à 30 % de la teneur en carbonate conduit à un quadruplement de la porosité). Le renouvellement périodique des circulations superficielles conduit peu à peu à une diminution de la granulométrie du matériau altéré (la taille des plaquettes décroît progressivement) et l'évolution s'achève par libération des silts lesquels ne représentent probablement rien d'autre qu'une partie de la phase détritique sédimentaire initiale.

4 APTITUDE DES "TERRES NOIRES" À LA CONFECTION DE REMBLAIS

Les indications précédentes montrent bien que les marnes silteuses étudiées sont en fait très sensibles à l'action de l'eau laquelle se trouve à l'origine de la détérioration des caractéristiques géotechniques du matériau. La question se pose de savoir si une telle évolution est possible en remblai ce qui aurait pour conséquence inévitable des tassements inacceptables notamment pour une chaussée autoroutière. Divers essais complémentaires ont donc été réalisés pour préciser le comportement du matériau et aboutir à des recommandations pour la mise en place en vue de limiter leur détérioration avec le temps. Etant donné que les conditions de laboratoire étaient, selon toute probabilité, plus sévères que celles prévalant dans un remblai, un contrôle a été réalisé par carottage dans des remblais existants constitués à partir des marnes du membre supérieur (ce niveau seul sera concerné par les travaux autoroutiers en projet).

4.1 Les essais relatifs à l'évolutivité des "Terres Noires"

Il s'est agi principalement d'essais d'altérabilité (mesure de la réduction du D_{10} d'un granulat 10/20 après 4 cycles d'humidification séchage - indice DG) et d'essais de fragmentation selon la méthode Schaeffner (évolution du D_{10} d'un granulat 10/20 après pilonnage à la dame Proctor - indice FR) ou par fragmentation dynamique - indice FD.

Les résultats ont été les suivants :

Localité	DG	FR	FD
Déblai du Fau	1,07	3,6	27,7
Remblai des Blancs	8,50	5,5	30,4
Remblai du Col du Fau	31,40	3,6	31,8

On constate que, dans l'ensemble, les matériaux tous empruntés au membre supérieur sont peu fragmentables mais que leur altérabilité peut varier dans de fortes proportions. Le déblai du Fau est en fait entaillé dans une marne particulièrement riche en carbonate (de 55 à 79%).

4.2 Essais Proctor et CBR

Des essais Proctor, CBR, oedométrique et de cisaillement ont été réalisés sur des échantillons carottés en sondage au Col du Fau (marnes du membre supérieur). La roche a été broyée et passée aux tamis de 20 et de 2mm. Le tamisat à 20 mm a été utilisé pour les essais Proctor et CBR, celui à 2 mm pour les essais oedométrique et de cisaillement.

L'énergie de compactage joue un rôle particulièrement important dans le cas des matériaux évolutifs. Une énergie trop faible laisse subsister des vides d'où une possibilité de poursuite de l'altération et de tassement ultérieur. Une énergie plus importante accroît la pression de gonflement et son amplitude. Il a donc été procédé à des essais Proctor normal et modifié. Pour estimer l'influence de l'altération il a été en outre réalisé un essai Proctor modifié sur le matériau après un cycle d'humidification-séchage. Les résultats sont donnés sur la figure 3.

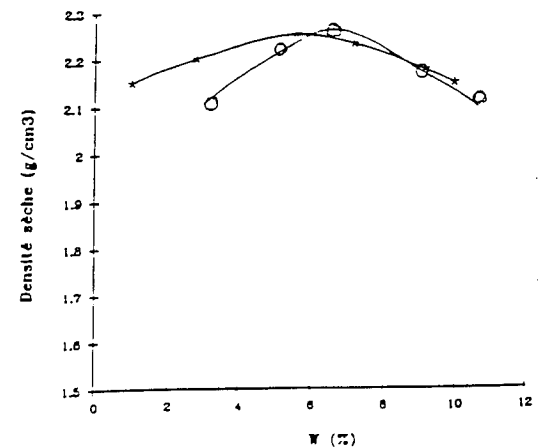


Figure 3. Essai Proctor sur un échantillon normal (1) et après humidification séchage (2)

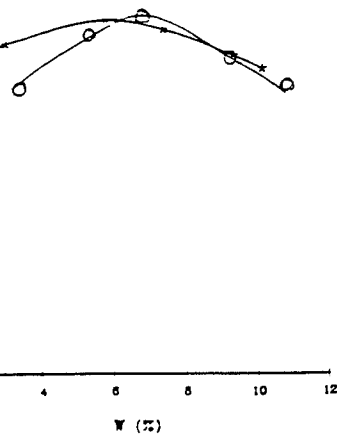
	DG	FR	FD
	1,07	3,6	27,7
cs	8,50	5,5	30,4
du Fau	31,40	3,6	31,8

dans l'ensemble, les matériaux tous membre supérieur sont peu ais que leur altérabilité peut varier proportions. Le déblai du Fau est en une marnes particulièrement riche en à 79%).

r et CBR

or, CBR, oedométrique et de cisail- lisés sur des échantillons carottés en du Fau (marnes du membre supé- a été broyée et passée aux tamis de tamisat à 20 mm a été utilisé pour et CBR, celui à 2 mm pour les es- et de cisaillement.

compactage joue un rôle particulière- ans le cas des matériaux évolutifs. o faible laisse subsister des vides té de poursuite de l'altération et de r. Une énergie plus importante ac- e gonflement et son amplitude. Il a à des essais Proctor normal et mo- ter l'influence de l'altération il a été n essai Proctor modifié sur le maté- e d'humidification-séchage. Les ré- s sur la figure 3.



Proctor sur un échantillon normal (1) tion séchage (2)

L'emploi d'une énergie élevée sur le matériau initial montre que la fraction fine voit son rôle minoré. L'essai après altération montre au contraire que la production supplémentaire de fines conduit à une courbe plus pointue d'où une moindre latitude quant à la teneur en eau en vue d'atteindre l'optimum de compactage.

L'essai CBR a été réalisé tout d'abord à la teneur en eau optimum Proctor modifié soit 6,6% puis après imbibition, soit un indice de saturation compris entre 87 et 100% (figure 4).

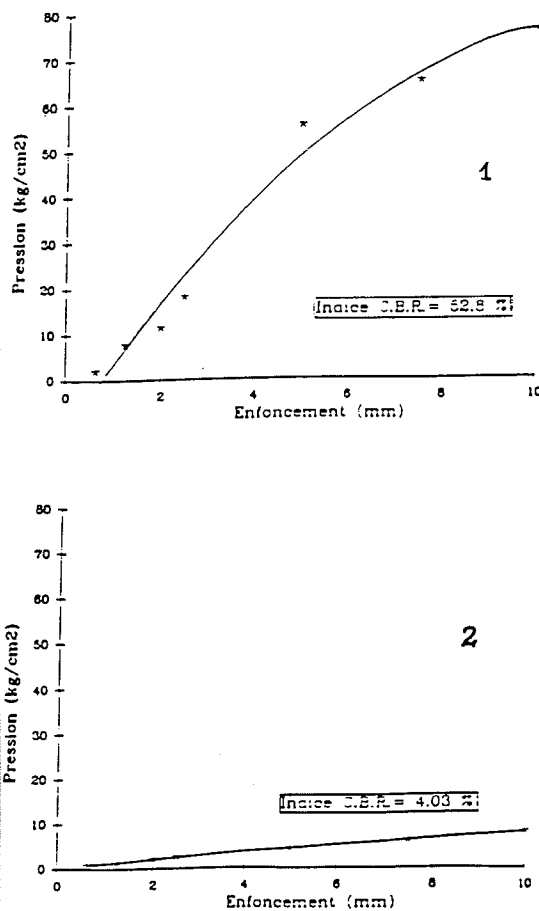


Figure 4. Influence de l'imbibition sur l'essai C.B.R.

- 1 - matériau à $\omega = 6,6\%$
- 2 - matériau à saturation

On constate que l'imbibition jusqu'à saturation conduit à l'effondrement des caractéristiques de portance. Le rôle néfaste de l'eau est bien mis en évidence.

4.3 Essais oedométriques

Les échantillons d'essai ont été réalisés comme indiqué précédemment. Les masses volumiques sèches et les teneurs en eau sont celles de l'optimum Proctor modifié. Le compactage de l'échantillon a été réalisé en quatre couches et ses dimensions avant essai étaient de 70 mm de diamètre et 24 mm de hauteur. Les courbes obtenues pour diverses valeurs de contrainte normale (de 25 à 400 KPa) montrent un tassement immédiat et une absence de tassement secondaire due au fait que l'échantillon n'était pas saturé.

Les essais de gonflement ont été réalisés après 24 heures de chargement et deux heures d'imbibition. Sous 400 KPa on constate un tassement supplémentaire d'environ 1 % ce qui correspondrait à l'affaiblissement structural de J. CAMAPUM DE CARVALHO - (1985) Le regroupement des courbes de tassement et de gonflement permet de déterminer la pression de gonflement laquelle est de l'ordre de 220 kPa.

4.4 Essais de cisaillement

Des essais de type consolidé-drainé ont été réalisés sur des échantillons préparés comme indiqué plus haut, à l'aide d'une boîte de Casagrande. Après un compactage à l'Optimum Proctor modifié on a obtenu $c' = 12$ kPa et $\phi' = 56^\circ$ ce qui est considérable.

Après imbibition ces valeurs tombent respectivement à 6 KPa et 38° ce qui apparaît encore trop élevé. Il est probable que la surconsolidation entraînée par le compactage intense (plus intense que celui des remblais étudiés) est à l'origine de cette résistance au cisaillement élevée.

5 CONCLUSIONS

Les essais réalisés ont mis en évidence le processus d'altération des Terres noires, essentiellement par décarbonatation mais sans modification de la phase argileuse. La présence d'interstratifiés à smectite ou de pyrite explique les modalités de l'écaillage superficiel très spécifique de ce matériau. Sur le plan pratique il est particulièrement intéressant de noter que les membres inférieurs et supérieurs de la formation ne se distinguent pas de ce point de vue en dépit d'une teneur en carbonate légèrement plus forte dans le membre supérieur. Les essais mécaniques ont révélé que le matériau était peu fragmentable, mais sensible à l'eau avec évolution de la granulométrie vers les fines et chute de l'indice CBR (effondrement structural). Par contre le compactage accroît sensiblement la résistance au cisaillement.

L'observation de carottes réalisées dans des remblais anciens montre que l'altération est moins importante que ce que l'on pouvait penser (il subsistait

beaucoup de blocs résiduels emballés dans une gangue argileuse). Il apparaît donc que l'on puisse réaliser des remblais relativement élevés à l'aide des Terres-Noires à condition de prendre quelques précautions :

- lors de la mise en place il faut homogénéiser au maximum le matériau et accélérer la production de fines par arrosage-séchage (ce qui sera toutefois plus contraignant au niveau des teneurs en eau de compactage) ;

- le compactage devra être réalisé par levées minces (de l'ordre de 30 cm) à l'énergie de l'OPM pour obtenir un matériau bien serré ;

- protéger le corps du remblai des infiltrations d'eau ;

- veiller à poser le remblai sur un terrain stable. Eviter en particulier de le fonder sur une couche de terrains superficiels de mauvaises caractéristiques comme cela fut le cas au remblai des Blancs sur la RN 85. Les instabilités observées avaient été attribuées à tort aux matériaux du remblai eux-mêmes.

REFERENCES

- Artru, P. 1972. Les Terres Noires du bassin rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen. Stratigraphie, sédimentologie, géochimie). *Thèse Doct. Es Sc.*, Lyon, 178 p.
- Camapum de Carvalho, J. 1985. Etude du comportement d'une marne compactée. *Thèse Doct.Ing.*, Toulouse, 181 p.
- Phan, T.S.H. 1993. Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du Sud-est de la France. *Thèse Univ. de Grenoble* 246p.