

# **VALORISATION DES MATERIAUX A CARACTERE EVOLUTIF**

## **(Cas des marno-calcaire de l'Autoroute de Contournement de Settat)**

*Par : M. AIT EL AAL , H. EJJAOUANI, O. SIKI , H. MANSOURI, A. SKIKER*

### **I - INTRODUCTION :**

Dans un souci de développer le réseau routier et autoroutier qui tient une place importante dans l'économie du pays et devant les difficultés croissantes d'obtenir son financement, de nombreuses actions ont été entreprises. Parmi ces actions, nous citons l'incitation à l'utilisation des matériaux locaux dans ces projets en vue d'une optimisation des coûts. En effet, la réalisation des infrastructures routières en faisant appel à une meilleure exploitation des matériaux locaux, permet non seulement de réduire le coût du transport, mais également d'éviter les dégradations du réseau adjacent au chantier par les camions transportant les matériaux, et de préserver l'environnement en limitant l'exploitation d'autres gisements.

Toutefois, ces matériaux locaux doivent répondre aux exigences techniques spécifiées pour assurer des travaux de qualité. Ainsi, pour l'emploi de certains matériaux présentant quelques particularités, il est parfois nécessaire de procéder à des études spécifiques pour pouvoir les caractériser, d'apprécier leur comportement et de définir leurs conditions d'utilisation.

Ainsi, dans cet article, nous avons essayé de traiter la valorisation des matériaux marno-calcaire à caractère évolutif de l'Autoroute de Contournement de Settat pour la construction des ouvrages en terre.

### **I- PRESENTATION DU PROJET**

L'Autoroute de Contournement de Settat évolue dans une région qui fait partie du plateau de Settat. De point de vue géologique, cette zone est caractérisée par une dominance des formations marno-calcaire d'âge crétacé moyen et supérieur et des formations quaternaire constituées de limon dont la richesse en galets diminuent en s'éloignant de Settat.

Les reconnaissances géotechniques réalisées au niveau de ce tracé d'Autoroute moyennant une campagne de sondages ont mis en évidence une coupe lithologique qui se présente d'une façon générale comme suit :

- une terre végétale d'une puissance de 0. 20 à 0.50 m.
- une formation de couverture constituée de limon sableux ou tuffacé et de tufs calcaires qui sont mis en évidence généralement sur le premier mètre et rencontrés par endroit jusqu'à 5 m du terrain naturel.
- Un complexe de marno - calcaire ou calcaire marneux généralement jaunâtre rencontré sur la hauteur restante des déblais et par endroit, il se trouve directement sous la terre végétale.

Il ressort que ce complexe marno-calcaire représentant environ 90% des matériaux à extraire, sont généralement classés R2 et R3 selon le GTR :

|                   |                                      |                                                                              |                          |    |
|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----|
| Matériaux rocheux | Roches sédimentaires                 | Roches carbonatés                                                            | Craie                    | R1 |
|                   |                                      |                                                                              | calcaires                | R2 |
|                   |                                      | Roches argileuses                                                            | Marnes, argiles, pélites | R3 |
|                   |                                      | Roches siliceuses                                                            | Grés, poudings, brèches  | R4 |
|                   |                                      | Roches salines                                                               | Sel gemmes, gypse        | R5 |
|                   | Roches magmatiques et métamorphiques | Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers |                          | R6 |

D'après le GTR , ces matériaux rocheux sont évolutifs et les essais d'identification seuls ne permettent pas de se prononcer définitivement sur leurs possibilités de réutilisation .

Etant donné que ce projet d'Autoroute comprend 3 millions de m<sup>3</sup> de déblai et 1.5 millions de m<sup>3</sup> de remblais, les ressources en matériaux autres que les marno-calcaires disponibles pour la réalisation des ouvrages en terre se trouvent en quantité insuffisante. Il a été donc nécessaire de rechercher à valoriser ces matériaux marnocalcaire qui constituent l'alternative optimale pour la construction des ouvrages en terre de ce projet. A cet effet et pour satisfaire cet objectif, nous avons mené une étude spécifique comportant des essais spéciaux, en vue de tester d'abord leur comportement rhéologique particulièrement leur performances mécaniques une fois mise en œuvre dans divers conditions ainsi que leur sensibilité à l'érosion en vue de définir par la suite les conditions réelles de leur réutilisation dans la construction des ouvrages en terre.

Ainsi, avant de traiter les résultats de l'étude spécifique, les recommandations des différentes interventions d'expertise, les dispositions particulières prises en considération dans la réalisation des travaux, nous avons jugé utile de donner quelques indications sur les difficultés techniques et de mise en œuvre de ces matériaux.

## II- DIFFICULTES TECHNIQUES ET DE MISE EN ŒUVRE DES MARNO-CALCAIRES :

Les difficultés techniques et de mise en œuvre des marno calcaires dans la construction des ouvrages en terre se résument comme suit :

- Les matériaux sont extraits en blocs de taille souvent assez importante et une fois utilisés dans le corps de remblai, ils peuvent continuer à se fragmenter. En effet, la destruction de leur structure après mise en œuvre est d'autant plus importante que le matériau est moins fragmenté à l'extraction. Leur évolution ultime s'arrête aux grains élémentaires ainsi on aura un produit fini à composition granulaire étalée ayant le risque d'avoir une érosion et une immigration des fines sous circulation d'eau , ce qui provoque un vieillissement rapide des ouvrages en terre « remblais » et une perte dans ses performances mécaniques et de déformabilité.
- Le risque de réarrangement de leur structure peut entraîner des déformations importantes et par conséquent peut conduire à des comportements variables des différentes couches de remblais réalisées par ce type de matériaux. Ceci est d'autant plus accentué que le compactage de ces dernières est insuffisant.
- Les opérations de terrassement peuvent donner lieu pour ce type de matériaux, à la production d'une quantité importante de fines ce qui leur confère un comportement de sensibilité à l'eau sous

l'effet de circulation des engins. Cette production de fines est importante vue la fragilité du matériau en question.

Suite à quoi les caractéristiques géotechniques retenues pour apprécier leur caractère évolutif sont en général la masse volumique, la dureté, la fragmentabilité et la dégradabilité mais dans notre cas nous avons jugé utile d'étudier d'autres facteurs tels que le comportement mécanique et de compressibilité à long terme ainsi que sa sensibilité à l'érosion après mise en oeuvre.

### **III- ETUDE SPECIFIQUE :**

Dans cette étude, des essais spéciaux ont été réalisés pour déterminer les caractéristiques suivantes:

- L'évolution de la composition du matériau sous eau moyennant des essais d'identification ( analyse granulométrique et limites d'Atterbeg) à plusieurs cycles de lavage ;
- L'évolution de la composition du matériau sous compactage en réalisant des essais d'identification (analyse granulométrique et limites d'Atterbeg) avant et après Proctor normal et modifié sur différentes fractions granulaires 0/31.5 mm ; 0/20 mm et 0/10 mm ;
- La fragmentabilité et la dégradabilité du matériau par les essais de fragmentabilité et de dégradabilité ;
- La compressibilité du matériau sous différentes compositions granulaire et à des paliers du temps et de charges appropriés avec sa sensibilité à la fragmentation ;
- La sensibilité du matériau à l'érosion par des essais PINHOLE TEST avec et sans charge hydraulique et/ou mécanique.

Les résultats relatifs aux caractéristiques mécaniques et d'identifications ont révélé que les marno-calcaires sont dotés des caractéristiques suivantes :

#### **1-Caractéristiques d'identification et évolution granulaire**

- La fraction fine est dotée d'une plasticité faible à moyenne soit un indice de plasticité de 7 à 20%
- Les marno-calcaires une fois débités, donnent un matériau squelettique de type CiAi ou CiBi ( dont la fraction fine est soit A1 ou A2 ou B5 et B6).

Le matériau est évolutif dans les fourchettes suivantes :

- Sous eau la composition granulaire varie de 10 à 15% et se stabilise à partir du 2eme cycle « 48 heures » dont l'évolution porte sur les supérieurs à 12.5 mm.
- Sous compactage, le matériau évolue de 8 à 10% dans la fraction supérieure à 10 mm
- La teneur en eau optimale est de 9 à 17%.
- la densité maximale est élevée et varie de 1.75 à 2.00 t/m3, les fortes valeurs sont enregistrées dans certains terrains peu sableux.

#### **2-Caractéristiques de dureté**

- Le terrain est fragmentable sauf pour le niveau sableux, sa mise en œuvre n nécessite des engins puissants.
- 60% des échantillons ont des éléments grossiers peu dégradables.
- 40% des échantillons ont des éléments grossiers moyennement dégradables

### 3- Sensibilité à l'eau

- à des faibles teneurs en eau de 4%, la densité relative est de 90 à 94 %.
- les tassements dus à l'effondrement de structure sont non négligeables, ils sont de 10 à 50 cm suivant la hauteur du remblai. Ces tassements ne peuvent être évités que si la teneur en eau de mise en œuvre est proche de l'optimum Proctor, d'où la nécessité de mettre le matériau en œuvre à son état hydrique moyen.
- les tassements dus à la saturation de remblai après la mise en œuvre sera de 5 à 20 cm « suivant la hauteur du remblai » qui est compatible avec ce type d'ouvrage.

### 4-Sensibilité à l'érosion

Deux essais PINHOLE TEST ont été réalisés avec et sans charge, et ils ont confirmé que le matériau est non érodable et peut ainsi être utilisé sans protection des flancs.

### 5-Stabilité des talus de remblai

Les caractéristiques mécaniques enregistrées sur la fraction fine sont généralement comme suit :

$$C' \approx 0$$

$$\phi \approx 31^\circ$$

Ainsi, et si on intègre les éléments grossiers, l'angle de frottement devra être en principe amélioré et une pente de projet de 3m horizontal pour 2m verticale peut être adaptée.

## IV- RECOMMANDATIONS POUR LA REUTILISATION DES MATERIAUX MARNO-CALCAIRE DANS LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES EN TERRE :

Les résultats issus de la reconnaissance géotechnique, des essais spéciaux réalisés sur les marno-calcaire ont permis de retenir les recommandations suivantes :

- le matériau doit être préparé au préalable après extraction par son étalement et son fractionnement par le passage des engins lourds (bull, compacteurs à pieds dameurs) pour être suffisamment débités et imbriqués dans le corps du remblai ;
- le matériau doit être reporté à l'état hydrique moyen ou proche de moyen ( $0,85 W_{OPN}$ ) ;
- le matériau doit être mis en place en couche mince en procédant à un compactage intense ;
- le débitage et l'imbrication du matériau ( pas de vides entre les cailloux) au niveau du remblai sont à vérifier moyennant des tranchées à la pelle ;
- le prélèvement des échantillons après compactage pour identification et vérification de la classe du matériau.

Ainsi, avec le respect de ces dispositions de mise en oeuvre, les remblais en matériau marno calcaire devraient présenter une durabilité satisfaisante.

Sur chantier de l'autoroute de contournement de Settati et les conditions ci-avant ont été approchées comme suit :

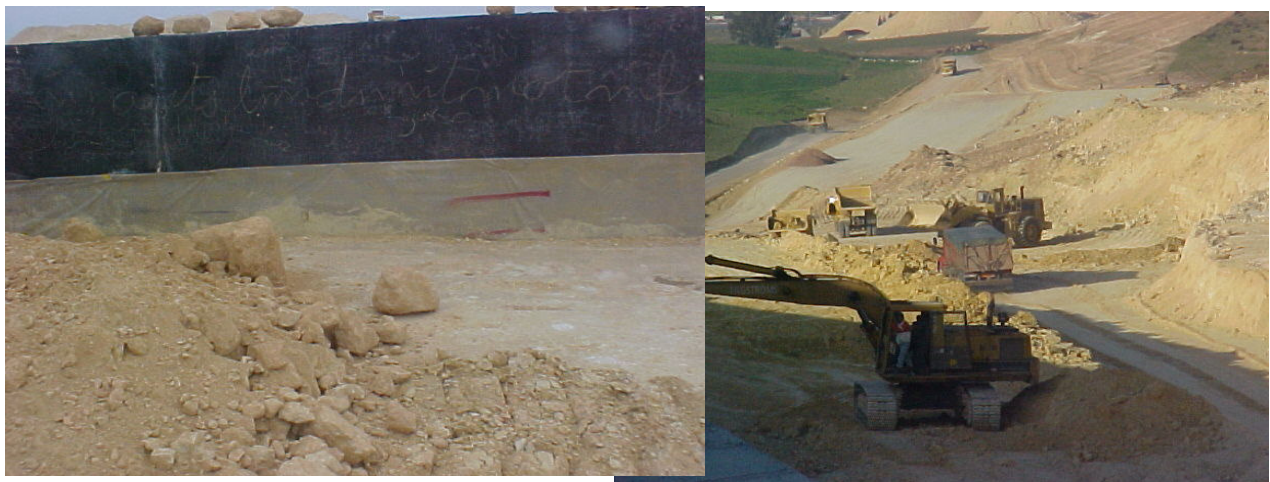
- l'extraction des matériaux de déblai avec une taille de bloc ne dépassant pas 500 mm moyennant des bulls.
- La maîtrise de la blocométrie par une épaisseur de couche élémentaire visée de 30 cm où les blocs sont déjà fractionnés sous les chenilles du boueur.
- L'humidification importante du matériau par l'ajustement de la teneur en eau de 3 à 4 points ajoutée pour passer de l'état très sec le plus fréquent à l'état moyen, ensuite le brassage du matériau après arrosage à l'aide d'un grader .

- le compactage effectué est d'abord 4 passes de VP4 ( compacteur lourd à pieds dameurs pour compléter la fragmentation), ensuite 2 passes de V4 ( compacteur lourd vibrant) suivant une grille de décision exigée par le GTR.

Avec ces dispositions, il en résulte :

- un fractionnement approximativement en 0/100 mm avec des éléments importants lorsqu'il s'agit du calcaire assez compact ;
- le matériau mis en remblai est de classe C1A1( IP=10 à 11) et C1A2 ( IP= 14 à 16) ;
- La teneur en eau mesurée sur la fraction 0/20 mm est de Wopn-2 obtenue par les méthodes d'arrosages adoptées ;
- Le compactage des remblais est voisin de 100% de l'OPN ;
- Les tranchées exécutées au niveau des remblais ont révélé que le matériau mis en place est bien rempli par les éléments les plus fins qui évitent les contacts blocs contre blocs pouvant engendrer des désordres ultérieurs

Les remblais ont été exécutés en adoptant une pente de talus de 2H/3V, et pour éviter le gonflement et l'érosion de ces matériaux, un revêtement de talus du remblai a été réalisé par une terre végétale de 10 à 20 cm .



**V- CONDITIONS D'UTILISATION DES MARNO-CALCAIRES EN PST (PARTIE SUPERIEUR DES TERRASSEMENT) :**

Tout d'abord et une fois réussi à figer la mise en place les marno-calcaires pour ne pas avoir de risque dans le corps du remblai la question de son utilisation en PST s'est posée ce qui nécessite d'avantage des restrictions et des précautions particulières et notamment:

- élimination des niveaux marneux tassant et gonflant
- humidification élevée pour garantir une mise en œuvre à une teneur en eau voisine de celle de l'OPN et dans tous les cas supérieur à  $0,85 W_{OPN}$ .
- compactage par une énergie plus intense (8 passes du compacteur vibrant type V4).

Afin d'examiner ces conditions d'utilisation de ces matériaux en PST et d'apprécier leur comportement, trois planches d'essais ont été exécutées avec ce matériau après avoir été débité par les engins de chantier et en le portant à des teneurs en eau voisines de  $W_{OPN}$ .

Le tableau suivant donne les conditions de réalisation de ces planches d'essais et les résultats correspondants :

**Tableau 1 : Résultat des planches d'essais**

| N° de planche | Action sur la teneur en eau                             | Epaisseur de la couche (cm) | Conditions climatiques               | Teneur en eau après compactage | Portance (en MPa) | Portance exigée (en MPa) |
|---------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------|
| 1             | Humidification après mise en œuvre à $W_{OPN}+1$        | 20                          | Evaporation (travail en temps chaud) | $W_{OPN}-2$ à $-3$             | 29 à 66           | 30                       |
| 2             | Humidification après mise en œuvre à $W_{OPN}+1$ à $+2$ | 20                          | Sans Evaporation (travail de nuit)   | $W_{OPN}-0,9$ à $+0,2$         | 33 à 74           | 30                       |
| 3             | Humidification après mise en œuvre à $W_{OPN}+2$ à $+3$ | 20                          | Evaporation (travail en temps chaud) | $W_{OPN}+1$ à $+2$             | 30 à 50           | 30                       |

La mise en œuvre de la PST en Marno-calcaire a été retenue suivant les conditions de la planche d'essais N°3. En, effet il est prudent de viser une humidification élevée pour garantir une mise en œuvre à une teneur en eau voisine de  $W_{OPN}$ .

Par ailleurs, pour caractériser les matériaux destinés à l'usage en partie supérieure des terrassement et se prononcer sur la classe de l'arase, il a été procédé également à l'évaluation de la grandeur indice CBR après immersion et indice CBR immédiat sur deux familles de marno calcaire après avoir subi l'opération de débitage par des engins recommandés. Les essais de qualification et d'identification ont révélé que ces matériaux sont classés  $A_1$  et  $A_2$  selon le guide GTR.

Comme, la portance d'un sol dépend considérablement de ses caractéristiques d'état, une valeur particulière d'un indice CBR correspond à un couple (Teneur en eau, Densité sèche).

Ainsi, il a été indispensable de déterminer les valeurs des indices CBR de ces matériaux en tenant compte des conditions d'état balayant le domaine couvert par les aléas du chantier. Pour cela, l'étude CBR est faite selon le processus suivant :

### 1. Choix des conditions d'état de saturation :

En l'absence de données fiables sur les teneurs en eau d'équilibre du sol, on a adopté l'état de saturation après 4 jours d'immersion.

### 2. Choix des conditions de masse volumique :

- La densité Proctor normale à 100%
- La densité Proctor normale à 95%

Au vu d'un de compactage prescrit pour la PST (8 passes cylindres vibrant type V4), et partant des résultats des densités sur remblais formés par une énergie moins intense (6 passes cylindres vibrant type V4), la densité prise est 95% OPM correspond à 56 coups.

### 3. Choix des teneurs en eau :

On a choisis deux teneur en eau WOPN+1 et WOPN-2 (correspond à 0.87  $W_{opn}$  pour une teneur en eau entre 16 et 18%, plage des teneurs en eau optimales des matériaux marno calcaire sur chantier) pour couvrir largement l'étendue possible des teneur en eau sur chantier.

Comme, il convient d'évaluer l'incidence des variations des paramètres d'état (compacité, et état hydrique) sur les valeurs de l'indice CBR de dimensionnement. Les résultats obtenus sont explicités dans les tableaux suivants :

**Tableau 2 : Résultat des essais Proctor et CBR**

| Famille II          | Proctor normal |      | CBR              |                  |
|---------------------|----------------|------|------------------|------------------|
|                     | Dmax           | WOPT | Avant imbibition | Après imbibition |
| OPN + 1<br>Coups 56 | 1.800          | 16.0 | 48.0             | 7.5              |
| OPN - 2<br>Coups 56 | 1.800          | 16.0 | 56.9             | 5.2              |

**Tableau 3 : Résultat des essais Proctor et CBR**

| Famille I              | Proctor normal |      | CBR              |                  |
|------------------------|----------------|------|------------------|------------------|
|                        | Dmax           | WOPT | Avant imbibition | Après imbibition |
| OPN + 1<br>56<br>Coups | 1.750          | 14.3 | 18.5             | 11.2             |
| OPN - 2<br>56<br>Coups | 1.750          | 14.3 | 34.0             | 7.5              |

Notons que dans le dimensionnement des chaussées, c'est principalement le cas de conditions les plus défavorables qu'il faut considéré.

Ainsi, Compte tenu du compactage prescrit pour la PST (8 passes cylindres vibrant type V4), et partant des résultats de densités sur des remblais compactés à une énergie moins intense (6 passes cylindres vibrant type V4), la valeur du CBR prise en compte est celle correspondant à 56 coups, énergie équivalente à 95% de la densité du proctor modifié, et la famille des teneurs en eau est celle qui correspond à OPN-2, comme cas très défavorable de l'état hydrique, ainsi les valeurs de dimensionnement sont :

**Tableau 4 : Résultat des essais Proctor et CBR**

| Famille I et II     | Proctor normal |      | CBR              |                  |
|---------------------|----------------|------|------------------|------------------|
|                     | Dmax           | WOPT | Avant imbibition | Après imbibition |
| OPN - 2<br>56 coups | 1.800          | 16.0 | 56.9             | 5.2              |
| OPN - 2<br>56 coups | 1.750          | 14.3 | 34.0             | 7.5              |
| <b>moyenne</b>      | -              | -    | -                | 6.3              |



Selon la classification des arases, les résultats du module de déformation EV2 obtenu sur les planches d'essais ainsi que celles de la portance obtenue par les essais CBR nous ont permis de classer l'arase en AR1( PST2 ou 3) mais pas en AR12 car cette portance ne peut être garantie comme pérenne compte tenu de la nature des matériaux ( la connaissance de ceux-ci prime sur la performance mesurée, même si celle-ci constitue un critère important d'appréciation).et surtout l'absence de stabilisation avec un liant .

Ainsi, il a été convenu de procéder à un couronnement de la PST par un matériau non évolutif soit un matériau B5 disponible sur chantier sur au moins 20 cm d'épaisseur, pour limiter la chute de portance des marno-calcaire à moyen terme causée par la part des niveaux marneux et pouvant être préjudiciable sur la durée de vie de la chaussée. Cette couche doit être mise en œuvre avec un compactage voisin de 100% de la densité maximale du Proctor Normal et avec une teneur en eau également à l'état moyen .

## **CONCLUSION**

Les résultats de l'étude spécifique ainsi que les différents avis techniques ont confirmé l'importance du fractionnement, de l'humidification et du taux de compactage de ces matériaux marno calcaire à caractère évolutif et la nécessité d'une grande vigilance sur le respect des différentes dispositions pour la réalisation des ouvrages en terre de durabilité satisfaisante.