

VALORISATION DES MATERIAUX LOCAUX SUR L'AUTOROUTE DESSERVANT LE PORT TANGER MED

M. CHOUH

Société Nationale des Autoroutes du Maroc, Maroc
chouh.mohamad@adm.co.ma et chouh.mohamad@gmail.com

RESUME :

Pendant le développement du projet de l'infrastructure autoroutière desservant le Port Tanger Méd, l'une des principales contraintes que se sont imposés les responsables de ce projet est l'atténuation de son impact sur l'environnement. Ainsi, une série d'actions ont été entreprises pour atteindre cet objectif, dont la plus importante est la valorisation des matériaux locaux pour la construction de la Partie Supérieure des Terrassements (PST) de la plateforme autoroutière.

L'éloignement du site des travaux des gîtes pouvant fournir des matériaux nobles a incité les managers à réfléchir à une solution alternative plus écologique que la solution de base qui consiste à ouvrir une nouvelle carrière, pour extraire une quantité considérable de matériaux, environ 800 000 m³, puis la transporter sur plus de 50 Km.

La solution retenue pour éviter des désagréments à l'écosystème est l'utilisation des marne extraites des déblais du projet, qui devraient normalement être mises en dépôt, et les réutiliser pour la construction de la PST moyennant un traitement à la chaux qui permet l'amélioration des caractéristiques de ce matériau, initialement non réutilisable.

Outre l'impact, facilement perceptible, de cette solution sur l'environnement, elle a permis de réduire le coût du projet.

1. INTRODUCTION:

Le projet de construction de l'Autoroute desservant le Port Tanger Méd, d'une longueur de 54 Km (voir Figure 1), a prévu le recours au traitement des sols à la chaux pour améliorer les performances de la partie supérieure des terrassements. Cette technique n'a jamais été adoptée auparavant sur une autoroute Marocaine encore moins avec des matériaux évolutifs du genre marne indurée.

Habituellement l'on utilise pour la PST, dans le nord Marocain, des matériaux granulaires insensibles à l'eau en exigeant une épaisseur de 50 cm au lieu des 35 cm adoptés en utilisant le traitement à la chaux des sols provenant des déblais.

La région du projet étant caractérisée par sa pénurie en matériaux naturels nobles, pouvant satisfaire les exigences d'une PST en matériaux granulaires, il a été décidé d'opter pour la solution de traitement à la chaux des matériaux disponibles sur le tracé. Cette solution innovante, en plus de son avantage économique, puisqu'elle a permis de réduire le coût de la PST de plus de 60%, elle a aussi participé, avec d'autres mesures prises sur chantier, d'atténuer notablement l'impact du projet sur l'environnement.

Figure 1 – Situation des gîtes de matériaux nobles par rapport au projet



2. LES SPECIFICATIONS DE LA PST :

Les caractéristiques requises pour la partie supérieure des terrassements sont :

2.1. Cas des matériaux non traités :

Les matériaux doivent être insensibles à l'eau au sens du GTR, ils doivent garantir l'obtention d'une valeur minimale du module à la plaque de 50 Mpa mesurée sur un massif compacté en multicouches d'une hauteur de l'ordre de 1,50 m avec un matériau porté à une teneur en eau d'au moins égale à $W_{opn} + 1$.

Les performances mécaniques à obtenir pendant l'exécution de la PST en matériaux granulaire d'une épaisseur de 0,50 m sont : $E_{v2} \geq 40$ Mpa et $E_{V2}/E_{V1} < 2$ et ce pour 95% des points contrôlés. Ces performances permettent de classer l'arase entre les classes AR2 et AR1 (AR1-2).

Tous les matériaux se trouvant dans l'emprise du projet et même ceux des gîtes avoisinants ne répondent pas à ces exigences. Les carrières les plus proches pouvant fournir des matériaux valables pour une PST granulaire se trouvent à plus de 50 Km du site du projet.

2.2. Cas des matériaux traités à la chaux:

Le traitement des matériaux à la chaux pour l'amélioration de l'arase des terrassements est réalisé conformément au guide technique du SETRA-LCPC. Le traitement devra permettre de stabiliser et d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux et de les rendre peu sensibles à l'eau. Après traitement ces matériaux doivent avoir un IPI supérieur à 15% et un rapport :

$$\frac{ICBR \text{ (après quatre (04) jours d'immersion)}}{IPI} \text{ au moins égal à } 1.$$

Les performances mécaniques de portance à obtenir au niveau de la PST sont $EV2 \geq 40$ Mpa. Comme pour l'option granulaire les performances requises pour la PST traitée à la chaux permettent de classer l'arase entre AR2 et AR1 (AR1-2).

Toutes les familles des matériaux provenant des déblais de l'autoroute ont fait l'objet d'essais de caractérisation et d'études pour apprécier leur aptitude au traitement à la chaux.

3. JUSTIFICATION DE L'OPTION TRAITEMENT :

En l'absence des matériaux granulaires répondant aux spécifications requises, dans l'emprise et dans les gîtes environnant, le chantier a préféré le recours au traitement des sols à la chaux au lieu d'élaborer des matériaux à partir des carrières ouvertes dans la dorsale calcaire se trouvant à environ cinquante kilomètres du tracé de l'autoroute en question.

3.1. Justification économique :

L'option traitement a été choisie pour les raisons suivantes :

- Valorisation des matériaux locaux : Ce procédé permet l'utilisation des matériaux en place sans avoir recours à des matériaux d'emprunt ou provenant de carrière qui sont souvent plus coûteux. Cette solution réduit en même temps la quantité des matériaux à mettre en dépôt ;
- Réduction des distances de transport : L'utilisation des matériaux locaux baisse le coût de transport entre le point d'extraction et le point de mise en œuvre. En effet, la distance de transport de matériaux locaux n'excède pas 4 à 5 Km par rapport à la distance de 55 Km depuis la carrière la plus proche si la PST n'est pas traitée. Ainsi, la solution retenue réduit d'une part le coût du projet et d'autre part l'émission des gaz à effet de serre.

Tableau 1 – Comparaison des deux options pour la section 1 d'une longueur de 22 Km

Solution PST	Matériaux pour PST		Dépôt définitif		Transport des matériaux		Chaux pour traitement		MONTANT TOTAL (KDH)
	Quantité (m3)	Montant (KDH)	Quantité (m3)	Montant (KDH)	Distance (Km)	Montant (KDH)	Quantité (T)	Montant (KDH)	
Sans traitement	220 000	13 200	130 000	325	52	22 880	-	-	36 405
Avec traitement	150 000	2 475	-	-	4	1 200	9 000	9 000	12 675

Le tableau 1 ci-dessus permet l'évaluation de l'écart en terme de coût entre la solution de la PST non traitée de 50 cm d'épaisseur réalisée avec un matériau insensible à l'eau, et la solution d'une PST en matériaux, extraits des déblais du projet, traité à la chaux. Pour cette dernière option, il convient de rappeler que l'épaisseur adoptée est de 35 cm.

Cette analyse révèle que la PST granulaire reviendrait trois fois plus chère que la PST traitée à la chaux.

3.2. Justification technique :

En plus de l'aspect économique, le traitement a un intérêt écologique, puisque la valorisation des ressources locales en matériaux limite l'ouverture des carrières et des dépôts, atténuant ainsi l'impact du projet sur le milieu naturel. Le traitement participe, en l'optimisation des mouvements des terres, à la réduction des nuisances causées aux riverains et à la faune et la flore en diminuant les transports à l'extérieur du chantier.

Pour atteindre les objectifs du traitement cela passe inéluctablement par une bonne maîtrise de la qualité du produit fini et surtout par une maîtrise de l'étude de base, des constituants, du mélange, de la chaîne de production depuis la préparation des matériaux jusqu'à la mise en œuvre.

La composition du mélange résulte d'une formulation de niveau 2 conformément au guide technique des traitements des sols du L.C.P.C, cette première phase qui est fondamentale dans le processus a aboutit à une connaissance des matériaux susceptibles à être traités, à la définition de l'échantillon représentatif par classe GTR et l'exécution des études de formulation au laboratoire précisant la teneur en eau optimale et le dosage minimal de la chaux permettant de garantir les performances de portance fixées par les termes de références.

3.2.1. Caractérisation des matériaux :

La définition des différentes natures des matériaux aptes au traitement sur le tracé a été arrêtée après l'exécution d'une campagne de reconnaissance in situ et des essais de laboratoire : proctor – IPI - CBR, dont les résultats sont dressés dans le tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2 – Caractérisation des matériaux

Déblai	Classe	CBR	Fr	Dg	50 mm	2 mm	0,08 mm	Wn	IP	Vbs	Wopn	dm	IPI
D1/D2/D3/D4/D5	R32	5	5	18	Roche marno-calcaire			6	27	-	12	1,92	8
D4/D6/D9	R31	4	5	22				6	26	-	15	1,88	7
D6/D9	R34	2	8	-				6	32	-	14,5	1,87	13
D12/D14	A2	-	-	-	100	95	78	15	23	2	16	1,83	17
D11	A3	-	-	-	100	90	60	18	30	250	17,5	1,81	12

Ces résultats montrent que les matériaux de classe R3i sont caractérisés par un état en place sur consolidé semi rocheux avec des états hydriques très secs, les matériaux de classe A3 sont caractérisés par une forte plasticité et un état hydrique très humide.

la réussite du traitement de ces matériaux à la chaux est conditionnée par ;l'évolution de la granulométrie vers des sols fins, la modification de l'état hydrique très sec à des états moyens voire humide et la stabilité de ces matériaux pendant la mise en oeuvre.

3.2.2. Essais d'aptitude au traitement :

Les essais d'aptitude au traitement ont été réalisés sur des échantillons représentatifs par classe de sol selon la norme NFP94-100. Les résultats obtenus sont dressés dans le tableau 3 suivant :

Tableau 3 – Aptitude des matériaux au traitement

Classe GTR	Type de traitement	Gonflement volumique	Aptitude du sol
R31	3% de Cao	9%	Douteux
R32		5%	Adapté
R34		9%	Douteux
A2		2%	Adapté
A3		8,5%	Douteux

Ces résultats montrent que pour les classes R31, R34 et A3 il y a possibilité de gonflement volumique, mais le développement correct de la prise pouzzolanique sera apprécié lors de l'étude de traitement dont les résultats sont résumés dans le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4 – Etude de traitement

Classe	Proctor		IPI	CBR	Analyse granulométrie						IP	VBS
	W opn	D max			50 mm	20mm	10mm	5mm	2mm	0.08mm		
R 31	16	1.84	15	20	100	100	99	89	61	19	16	0.6
R 32	13.5	1.95	17	22	100	100	98	90	62	16	18	-
R 34	16.5	1.75	22	23	100	100	100	94	80	44	17	1
A 2	19	1.71	25	45	100	100	97	88	80	56	16	0.63
A 3	18	1.75	22	24	100	100	97	90	70	37	-	0.56

Ces résultats confirment que pour les différentes classes, il y a eu un effet pouzzolanique de la chaux avec une augmentation de 400% de l'indice CBR.

Cependant pour les classes R34 et A3, le rapport de l'indice CBR après quatre (04) jours d'imbibitions par rapport à l'indice portant immédiat est très proche de 1 et étant donné que les essais d'aptitudes les ont jugés douteux vis à avis du traitement, ces matériaux ont été écartés.

A l'issue de ces études, les seuls matériaux retenus pour être traités à la chaux sont ceux de classes GTR **R32** et **A2**. Pour les tester dans des conditions réelles d'exécution, il a été procédé à plusieurs planches d'essais par classe de sol.

3.2.3. Planches d'essais sur les classe R32 et A2 :

Plusieurs planches d'essais ont été réalisées pour les matériaux de classe R32 et A2 afin d'arrêter les modalités d'exécution conduisant aux résultats optimaux.

Le procédé d'exécution adopté sur chantier pour l'exécution de ces planches d'essais est le suivant :

- Etalage des matériaux pendant plusieurs jours avec fermeture de surface pour permettre leur dégradation à l'air libre ;
- Première passe de l'arroseuse pour augmenter la teneur en eau des matériaux, se trouvent à l'état sec, avec passage du malaxeur pour fragmenter et dégrader les matériaux mécaniquement ;
- Deuxième passe de l'arroseuse pour amener les matériaux à des teneurs en eau comprises entre Wopn+1 et Wopn + 2 ;
- Etalage de la chaux, avec contrôle de dosage ;
- Deuxième malaxage mécanique pour mixer le liant avec le sol et de le fragmenter davantage pour le ramener dans les conditions de moulage du laboratoire de chantier ;

- Le compactage est assuré principalement par un V5. Dix (10) passes ont été adoptées et la longueur maximale de traitement ne dépassant pas 80 ml ;
- Le traitement de feuilleteage se fait par niveleuse et compacteur à pneu.

Les contrôles de réception ont conduit aux résultats figurant dans le tableau 5 suivant :

Tableau 5 – Résultats des planches d’essais

Classe	Dosage	Compactage	Epaisseur	Wn (%)	Ic (%)	EV 2	K	IPI	ICBR	G* (%)	Wn * (%)
R 32	3 % chaux	10 passes	0.35 m	14,5	≥ 99	≥100	< 2	19	20	0,8	15.5
A 2		8 passes	0.35 m	22	≥ 95	≥ 70	< 2	15	33	0,2	22

* *Mesure de gonflement et de teneur en eau après immersion de quatre (04) jours dans l’eau.*

Les tableaux de contrôle de mouture sont dressés dans le tableau 6 suivant :

Tableau 6 – Contrôle de mouture

Classe	Situation	20 mm	10 mm	5 mm	0.08 mm	IP	VBS
R32	Avant	100	98	90	16	18	-
	Après	99	89	78	33	29	1.1
A2	Avant	100	97	90	37	-	0.56
	Après	100	93	87	64	19	1.03

Ce tableau montre que la classe granulaire des matériaux est de 0/20 mm ce qui est conforme à l’échantillon représentatif du laboratoire.

4. REALISATION DE LA PST TRAITEE A LA CHAUX :

4.1. Techniques d’exécution :

L’application de la PST, au niveau de l’autoroute desservant le Port Tanger Méd, a été menée selon une cadence moyenne journalière de l’ordre de 2 500 m³ correspondant à environ 400 ml par voie et par jour.

Cette activité commence par l’étalage des matériaux pendant plusieurs jours afin qu’ils subissent une évolution naturelle ; l’arrosage préalable et le pitrisage du sol sous le trafic des engins le fragmentant davantage en lui donnant l’aspect d’un sol fin à l’étalage.

La chaux utilisée est une chaux vive conforme à la norme NFP98-101, l’approvisionnement du chantier est assuré depuis l’usine par des camions bananes type livreur de ciment de 22 tonnes de capacité, des bons de livraison attestent de l’arrivée de la chaux sur chantier. Le contenu en chaux est déversé dans deux citernes semi mobiles équipées de pompes d’alimentation, elles sont menées de filtres pour réduire le rejet de la poussière. Les citernes se déplacent aisément sur des chariots vers les lieux de traitement,

la durée de stockage de la chaux est limitée à deux jours pour éviter son altération par l'air ambiante.

Les matériaux utilisés pour le traitement de la PST sont de classe GTR R32 ou A2 ayant des caractéristiques géotechniques similaires à l'échantillon testé au laboratoire.

Ces matériaux seront acheminés depuis les buttes prévues par le Plan de Mouvement de Terres spécifique pour les matériaux destinés au traitement. Une action mécanique et une action thermique sont effectuées pour transformer ces matériaux semi rocheux en sols pulvérulents.

Au niveau des arases des déblais l'on procède à des réceptions géotechniques qui recommandent des purges localisés ou généralisés au niveau des sols impropres au traitement.

On procède par la suite à la réception géotechnique de l'arase pour l'implantation de l'axe et les limites des entrées en terre.

L'étalage des matériaux à traiter se fait plusieurs jours à l'avance pour permettre la décomposition naturelle de ce type de sol initialement à l'état semi-rocheux, un premier arrosage avec fermeture de surface est effectué pour augmenter la teneur en eau des matériaux. Les engins de fragmentation mécanique : bulldozers, tracteur muni de socs et compacteur à pied dameur interviennent pour réduire les matériaux à une mouture de classe 0/20 mm, la quantité d'eau nécessaire est calibrée par la mesure de la teneur en eau du sol en place. La teneur en eau est ramenée par des arroseuses à rampe fixe à une valeur comprise entre Wopn+1 et Wopn+2.

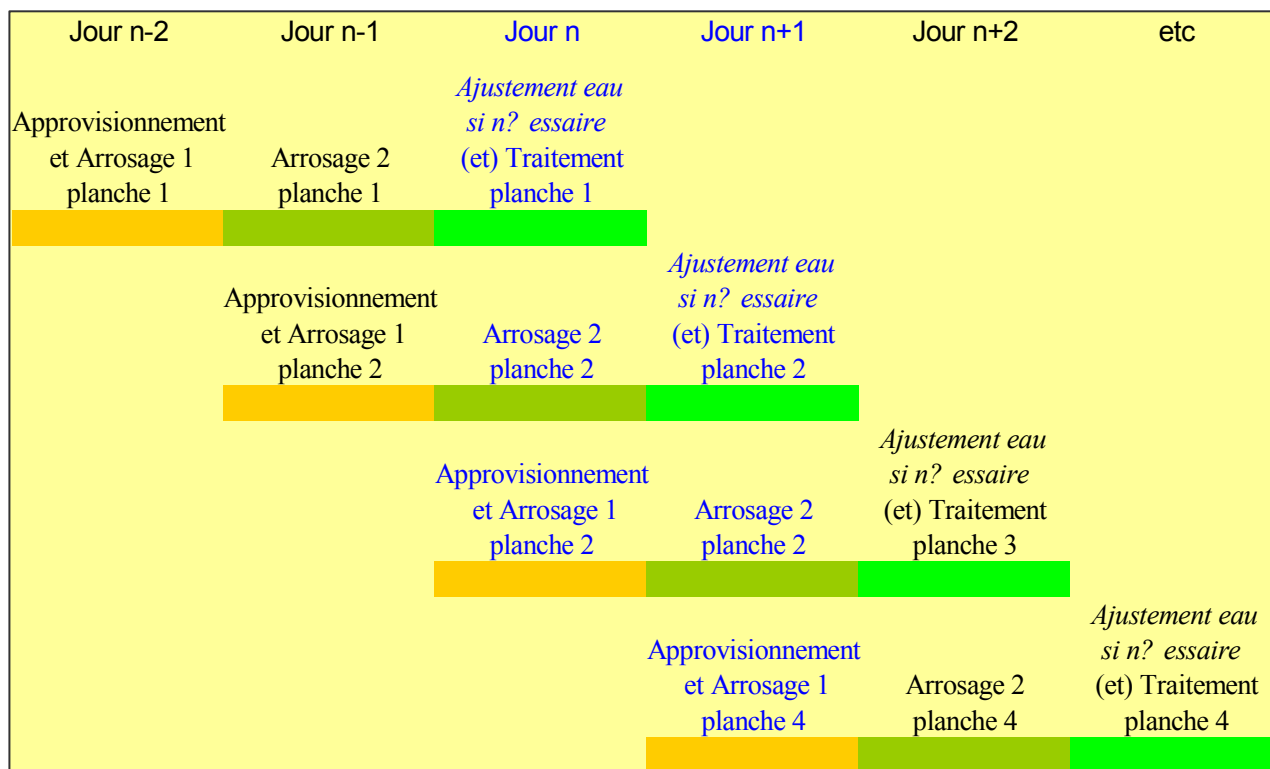
La chaux est épandue sur la surface de la couche à traiter préalablement réglée et délimitée de manière à maîtriser le dosage en chaux et la profondeur de traitement. Le matériel d'épandage est un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d'avancement, il est doté d'un système permettant d'avoir un coefficient de variation longitudinal et transversale inférieure à 15%. Il est muni de dispositif de jupes souples canalisant le liant jusqu'à la surface du sol à traiter.

Le malaxage est assuré par des malaxeurs à arbre horizontal couvert d'une cloche et permettant un mélange intime entre la chaux et les matériaux à traiter sur une profondeur de 35 cm. Le malaxage est effectué en deux temps par bandes avec recouvrement de 20 cm pour réduire davantage la mouture des matériaux à des classes inférieures à 0/20 (0/10 voire 0/5 mm).

Le compactage des sols traités est assuré par un compacteur V5 effectuant le même nombre de passes que celui des planches d'essai (10 passes). Puis un compacteur à pneu est prévu pour assurer la compacité au fond de couche et pour traiter le problème de feuilletage. La PST traitée est exécutée selon la méthode de remblai excédentaire. L'arase est contrôlée topographiquement pour s'assurer que sa pente transversale est de 4%.

Pour disposer, avant traitement d'un matériau à peu près à la teneur en eau visée et surtout homogène, il a été adopté sur le chantier une procédure permettant de préparer les planches plusieurs jours à l'avance, comme indiqué sur la Figure 2 ci-dessous.

Figure 2 – Processus d'humidification des matériaux



Il est évident que la mise en œuvre d'un processus de ce type conduit à une augmentation de moyens d'arrosage, car chaque jour se déroulent outre un atelier d'approvisionnement et un atelier de traitement, deux ateliers d'humidification.

Cette procédure, pour qu'elle soit efficace, a été accompagnée des moyens de contrôles des teneurs en eau afin de caler au mieux les ajouts d'eau à mettre en œuvre.

Les opérations d'humidification des matériaux se font le soir ou le matin de très bonne heure afin de limiter au maximum l'évaporation immédiate. Et une fermeture après humidification – malaxage, par un passage d'un compacteur lisse sans vibrer limite l'évaporation dans la journée.

La Figure 3 ci-dessous illustre les différentes étapes de mise en œuvre de la PST traitée à la chaux :

Figure 3 – Ateliers de mise en oeuvre



Atelier d'humidification



Atelier d'épandage



Atelier de malaxage



Atelier de compactage

4.2. Plan de contrôle :

Sur le chantier, la démarche qualité adoptée permet de s'assurer, pendant toutes les phases de réalisation de la PST traitée, que les dispositions prises garantissent le respect des spécifications requises, tout en protégeant l'environnement vis-à-vis des émissions de poussière et sans pour autant compromettre les cadences des travaux qui devraient rester cohérentes avec les délais d'exécution fixés par le Programme Général des Travaux.

Cette démarche qualité se base sur une série de contrôles, certains sont topographiques, d'autres des essais in situ ou au laboratoires. Les paramètres à contrôler sont :

- L'assise de la PST traitée ;
- Epandage de la chaux ;
- Arrosage ;
- Malaxage ;
- Qualité de la chaux ;
- Profondeur de malaxage ;
- Epaisseur de la PST traitée et la côte de l'arase.

Les critères à satisfaire en tous points de la PST sont les suivants:

- Taux de compactage $\geq 95\%$ d'opn,
- Portance $E_{v2} \geq 40$ Mpa,
- Indice de portance immédiat IPI ≥ 15 ,
- Rapport CBR à 4 jours d'imbibition par rapport à l'indice portant immédiat ≥ 1 .

En fin de chantier, la synthèse des actions d'assurance de la qualité est destinée à l'établissement du dossier de récolement qui contient en particulier :

- Les éventuelles anomalies, leurs causes et leur mode de traitement ;
- Le bilan des quantités de produit de traitement selon les résultats de contrôle du dosage et les relevés cumulés des données des bons de livraison ;
- La nature des matériaux de traitement ;
- Le recueil des événements météorologiques : pluviométrie, température, vent ...etc ;
- La méthodologie appliquée pour le pilotage du dosage.

4.3. Problèmes rencontrés :

Lors des travaux de traitement des matériaux à la chaux, le chantier a connu quatre (04) principaux problèmes :

- La nature des matériaux R32 qui sont initialement à l'état semi rocheux se débitant à l'extraction sous forme de blocs de marne sur consolidé alors que l'étude de traitement est faite sur un échantillon de classe 0/20 mm.

Pour ramener ces matériaux semi rocheux à une classe granulométrique 0/20 mm, le procédé adopté consiste à une transformation des blocs de marne par étalage de plusieurs jours à l'air libre, sous l'action de l'humidification par l'arrosage pour changer leur état hydrique et sous l'action des engins bulldozers, compacteurs à pieds dameurs et des malaxeurs ; la mouture finale est satisfaisante. L'on arrive à la fin de ce processus à une classe 0/10 mm voire 0/5 mm. Sans cette transformation de granulométrie le traitement ne peut pas réussir sur ce type de matériaux ;

- L'état hydrique très sec des matériaux in situ avant le traitement a nécessité le recours à une source d'eau (barrage colinéaire) situé à proximité du tracé. Il fallait ramener les matériaux d'une teneur en eau de 6% à 14% voire 16%. Pour optimiser la consommation de l'eau, notamment pendant la saison estivale, l'humidification se faisait soit tard le soir soit très tôt le matin, et la longueur des planches à traiter ne dépasse guère 60 à 80 ml par atelier de compactage afin de limiter l'évaporation pendant le compactage ;
- Le phénomène de feuilletage qui provoque la décomposition de la surface traitée sur une pellicule superficielle de 5 cm a été traité par un rabotage à la niveleuse, léger arrosage et compactage au pneu ou au pied dameur ;
- Le vent de l'est qui caractérise la région de Tanger se lève plusieurs fois par mois et bloque l'opération de traitement pendant plusieurs jours à cause des problèmes de dosage, qui n'est plus maîtrisable dans ces conditions, et des nuisances affectant l'environnement du fait de la propagation des poussières de chaux pouvant nuire au milieu naturel.

5. CONCLUSION :

En l'absence de gisements, à proximité de l'autoroute de desserte du Port Tanger Méd, pouvant fournir des matériaux naturels répondants aux exigences d'une PST granulaire, le chantier a eu recours à la variante de traitement, cette solution permet une mise en œuvre dans de bonnes conditions de traficabilité, de compactage et d'homogénéité de la plate-forme. En outre, la technique de traitement à la chaux présente de nombreux avantages dont les plus importants sont énumérés ci-après:

- Le traitement de la PST en place à la chaux a un avantage économique notable. En effet, la réutilisation des matériaux en place est un facteur important de diminution du coût global du projet puisqu'il réduit les quantités de déblais, la mise en dépôt, l'apport de granulats élaborés et la valeur de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais à mettre en dépôt contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier et permet une

diminution des impacts indirects, comme la gêne aux riverains et aux usagers du réseau routier adjacent au chantier. Aussi, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution traditionnelle.

- La réutilisation des matériaux en place, moyennant le recours au traitement à la chaux, limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables et réduit l'ouverture de nouveaux dépôts et emprunts. Ce qui atténue considérablement l'impact du projet sur la faune et la flore et contribue à la préservation l'environnement.

Enfin il conviendrait de noter que cette expérience a permis la vulgarisation de la technique de traitement à la chaux, jamais utilisée auparavant sur les chantiers autoroutiers Marocains, technique qui peut être adoptée sur d'autres chantiers où les matériaux nobles se font rares.

REFERENCES :

1. Guide des Terrassements Routiers, réalisation de remblais et des couches de formes, fascicules I et II, GTR SETRA-LCPC 2ème édition Juillet 2000 ;
2. Guide technique de traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques LCPC - SETRA, janvier 2000;
3. Norme Française NF P 94-100 ;
4. Norme Française NF P 98-101 ;