

VALORISATION DES MATERIAUX ARGILEUX PAR LE TRAITEMENT A LA CHAUX

(CAS DE LA LIGNE A GRANDE VITESSE-TOARC 2)

Par : Mr M.AIT EL AAL (LPEE/CEGT), Mme A.SIKER (LPEE/CEGT), Mr A.SABIHI (LPEE/CEGT).

Résumé

L'aménagement du territoire conduit au développement des infrastructures tel que les routes, autoroutes et voie de chemins de fer, dont la réalisation requiert la mobilisation des mouvements de terre dans des sols parfois difficilement utilisables, nécessitant un traitement pour répondre aux caractéristiques physiques ou mécaniques requises pour l'emploi prévu et qui sont généralement exigées par le cahier de charges, notamment, l'état hydrique, l'insensibilité à l'eau et la portance.

Le développement des techniques de traitement des sols à la chaux est dû essentiellement à des impératifs économiques relatifs à l'optimisation des coûts des projets en valorisant les matériaux locaux, écologiques, environnementaux pour la limitation de constitution de décharges de matériaux impropres et à des raisons techniques puisque le traitement à la chaux permet la réalisation de remblais et couches de forme stables et durables.

La ligne à grande vitesse-TOARC 2 évolue dans une zone géologique caractérisée par une dominance des formations argileuses. Les reconnaissances géotechniques réalisées au niveau des buttes de déblais de ce tronçon du LGV ont mis en évidence, que les sols fins constituent presque 100% des matériaux à extraire.

De par la spécificité technique du projet, sa construction requiert l'utilisation de matériaux nobles en terrassements, dont particulièrement les matériaux insensibles à l'eau pour les substitutions des purges au niveau des remblais, les matériaux grossiers et portants pour la base des remblais de grande hauteur (BHR), les matériaux insensibles à l'eau aux interfaces TN/Remblais au niveau des zones humides ou inondables,...

Face à la contrainte de l'indisponibilité de ces matériaux nobles au niveau du tracé du TOARC2 et la pénurie en matériaux de carrière dans la région du projet, le traitement des sols fins des déblais du projet généralement classés A2 a constitué l'alternative optimale pour la réalisation du projet dans des conditions satisfaisant à la fois les exigences techniques et les contraintes du délai.

Cet article a pour objet, de partager l'expérience vécue sur le tronçon LGV-TOARC2 dans la réalisation des traitements à la chaux en passant en revue toutes les phases du projet de traitement à la chaux, à savoir :

- La justification du traitement à la chaux en substitution des solutions classiques d'utilisation des matériaux de carrière ;
- Les études spécifiques du traitement à la chaux prenant en considération les différentes utilisations ;
- Les techniques et les conditions de mise en œuvre du traitement ainsi que les difficultés particulières y afférentes ;
- Les modalités de contrôle ainsi que les dispositions techniques particulières adoptées sur le TOARC 2 pour l'exécution des traitements à la chaux.

I- Introduction

Le développement des infrastructures telles que routes, autoroutes, voies de chemins de fer requiert des travaux de terrassements. Ces terrassements concernent la réalisation de remblais, de couches de forme et d'assises. Ainsi, L'optimisation des coûts dans ces projets fait appel à une meilleure exploitation des matériaux locaux.

Dans le cadre de la réalisation du projet de la ligne à grande vitesse-LGV-TOARC 2 et devant la contrainte de dominance dans la région où se développe le tracé, de matériaux argileux ne répondant pas aux exigences techniques spécifiées dans le marché pour certains remblais particuliers, la technique du traitement de ces sols à la chaux a constitué la seule alternative pour la valorisation de ces matériaux dans le but d'avoir les performances nécessaires pour assurer des travaux de qualité.

Le recours à la technique du traitement des sols à la chaux ou aux liants hydrauliques dans la construction de certaines parties critiques de remblai (substitutions des purges au niveau des remblais, base des hauts remblais BHR, PST, couche de forme, etc.) présente d'énormes avantages à savoir :

- L'abaissement de l'état hydrique par le phénomène d'hydratation (diminution de la teneur en eau des matériaux humides ou très humides).
- L'amélioration des caractéristiques géotechnique et de compactage
- La stabilisation du sol par l'augmentation de sa portance

Néanmoins, pour l'application de ce traitement à la chaux de certains matériaux fins présentant quelques particularités, il est nécessaire de procéder à des études spécifiques pour pouvoir les caractériser, de conclure l'aptitude de ces sols au traitement et de définir leurs conditions d'utilisation.

Il est à noter que la technique de traitement des sols à la chaux n'a jamais été appliquée auparavant dans les infrastructures ferroviaires, d'où l'intérêt particulier qu'a suscité cette première expérience.

II-Présentation du Projet et consistance des travaux

La ligne ferroviaire à grande vitesse (LGV) Tanger-Kenitra s'inscrivant dans un projet marocain ambitieux, constitue une première hautement stratégique pour le Maroc. Cette liaison s'étendant sur une longueur de 200km, a été décomposée lors des travaux en tronçon nord et tronçon sud qui à leurs tours ont été subdivisés en plusieurs lots.

Le lot 2 du tronçon Nord relatif aux travaux de terrassements, d'ouvrages d'art et de rétablissements de communication de la ligne à grande vitesse entre Tanger-Kenitra est désigné sous le terme TOARC 2. Ce lot est situé entre les RP 221+180 et RP 312+500 correspondant approximativement aux PK33+630 et 59+800 de la LGV.

Les travaux portent sur :

- La construction de la LGV proprement dite sur une longueur d'environ 22.4 hors viaducs et l'affluent Rharifa et Lahlou, jusqu'au niveau supérieur de la sous couche ;
- La construction des ouvrages annexe à la LGV qui comprennent les plateformes pour les équipements ferroviaires et leurs accès.
- La réalisation des rétablissements de certains ouvrages d'arts (PRO : Pont Route, PRA : Pont Rails)

- L'aréalisation des voies latérales, des voies de désenclavement, de voies forestières et de voies d'accès aux plateformes annexes.
- L'aménagement des plateformes et des voies d'accès aux travaux.

III-Caractéristique géotechnique des matériaux de la région

Le lot TOARC 2 du tronçon Nord de la ligne LGV Tanger-Kenitra évolue dans une région qui fait partie de la chaîne rifaine. Du point de vue géologique, cette zone est caractérisée par une dominance des pélites non gréseuses et silts. Ces formations sont généralement associées à des éboulis et colluvions de pente et recouvertes par des formations argilo-limoneuses de surface.

Ce tronçon TORAC2 traverse également des vallées où l'on rencontre des couvertures en dépôts fluvialites de nature argileuse et silteuse.

D'après les campagnes de reconnaissances géotechniques réalisées sur les buttes des déblais du projet, on peut globalement scinder le projet en deux zones principales :

- Zone sud où les déblais sont caractérisés par des formations pélitiques non réutilisables en remblai et à mettre en dépôts définitifs. Ces formations pélitiques sont recouvertes de dépôts argileux.
- Zone Nord (D2237, D2249, D2281, D2299 et D2311) caractérisée par la dominance des argiles sableuses rougeâtres à jaunâtres et des silts sableux jaunâtres de classe GTR A2 à A1.

Ces sols fins A1, A2 représentant pratiquement 100% des matériaux à extraire des déblais du projet et qui doivent être réutilisés pour les terrassements en remblai du projet.

IV-Prescriptions particulières pour les remblais et couche de forme :

Nous récapitulons dans le tableau ci-dessous les principales exigences du marché TOARC 2 relatives aux matériaux des substitutions des purges, BHR, PST et couche d'assise de la couche de forme :

Nature de matériau	Exigences du CPS	Observations
Substitutions des purges sous les remblais	- Matériau insensible à l'eau	Pour les sols non traités, seuls les classes GTR.... Sont acceptables avec VBS < 0.2
BHR	- FR < 7 et DG < 5 - Passant à 50mm < à 60% (matériaux C2) - Passant à 2mm sur fraction 0/63 < 30% - Objectif de compactage : q3	
PST	<u>Qualité des matériaux selon référentiel SNCF (ST 590 B) :</u> - Classe de qualité en réutilisation : Rt2 - Classe de qualité en place : S2 <u>Performances à l'exécution :</u> - Objectif de densification : q4 - Portance EV2: • 95% des mesures ≥ 60MPa • 100% des mesures ≥ 50 MPa	Selon IN3278 (référentiel SNCF pour LGV) : Possibilité d'utilisation en PST de matériaux traités avec l'objectif de portance de : • 100% des mesures EV2 > 80 MPa.
Couche d'assise (couche de forme)	<u>Qualité des matériaux :</u> GNT 0/60 conforme à la fiche n° 4 de la <u>Performances à l'exécution :</u> - Objectif de densification : q3	Selon IN3278 (référentiel SNCF pour LGV) : Possibilité d'utilisation en CDF de matériaux traités avec

	- Portance EV2: • 100% des mesures ≥ 80 MPa	l'objectif de portance de : • 100% des mesures EV2 > 120 MPa.
--	---	--

Au vu des résultats de l'identification des sols se trouvant dans l'emprise de la LGV, il est clair que les déblais de cette liaison sont incapables de fournir des matériaux remplissant les exigences requises rappelées ci-dessus pour les travaux spéciaux suivants :

- Substitutions des purges au niveau des remblais ;
- Base des hauts remblais (BHR) ;
- Partie supérieure des terrassements PST ;
- Couche de forme.

Le besoin total en ces matériaux particuliers s'élève à 2.000.000 m³.

De ce fait et compte tenu de la pénurie en matériaux de carrière et emprunt dans la région du projet, Il a été jugé nécessaire de rechercher à valoriser les matériaux fins des buttes des déblais qui constituent l'alternative optimale pour la construction des ouvrages en terre du projet TOARC 2.

A cet effet et pour satisfaire cet objectif et subvenir aux besoins énormes du projet en matériaux de construction des ouvrages en terre, le traitement des sols locaux s'est révélé très intéressant.

C'est pourquoi, une étude spécifique comportant des essais spéciaux, en vue d'évaluer l'aptitude du sol au traitement, de tester les caractéristiques du sol traité et de définir par la suite les conditions réelles de leur réutilisation dans la construction des ouvrages en terre.

Le processus de validation du traitement a ainsi consisté en ce qui suit :

- Réalisation des études de traitement au laboratoire ;
- Réalisation de planches d'essais d'exécution pour vérifier l'adéquation des méthodes d'exécution et l'atteinte des objectifs en termes de qualité du sol traité et des performances après mise en œuvre.
- Mise en application de procédures spécifiques d'exécution du traitement en définissant les dispositions spéciales nécessaires aussi bien pour l'exécution que pour les contrôles de mise en œuvre.

Ainsi, avant de présenter les résultats de l'étude spécifique, nous avons jugé utile de donner quelques indications sur les principes d'actions des produits de traitement sur les sols ainsi que les difficultés techniques et de mise en œuvre des matériaux traités.

V- Principes d'action des produits de traitement sur les sols

Les sols fins, contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, qui influent sur ses propriétés géotechniques intrinsèques. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, et foisonnent sous l'effet du gel. Alors, ces sols sont considérés comme mauvais ou médiocres et ne présentent pas, par conséquent, les performances nécessaires pour supporter le trafic de chantier, la chaussée et le trafic futur

Le choix de l'agent de traitement et son dosage sont déterminés par le type de sol, sa teneur en eau au moment du traitement ainsi que les caractéristiques visées.

Dans le cadre de la réalisation du tronçon TOARC 2 du projet de la ligne à grande vitesse Tanger-Kénitra, compte tenu de la nature des sols et des caractéristiques et performances visées (insensibilité à l'eau, portance des couches traitées) et à l'issue des essais de laboratoire réalisés, la solution de traitement à la chaux a été préconisée pour leur utilisation dans la construction des remblais.

En effet, la chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement. C'est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du bâtiment et dans les matériaux de construction. La chaux intervient à différents stades du traitement des sols, et sa qualité a une influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. Certaines propriétés de la chaux présentent des avantages particuliers pour les traitements de sols notamment :

- L'abaissement de l'état hydrique par le phénomène d'hydratation.
- L'amélioration des caractéristiques de compactage.
- La stabilisation du sol par l'augmentation de sa portance.

VI- Etudes menées pour l'application du traitement

VI.1 Consistance de l'étude du traitement :

Les études de formulation effectuées par l'entreprise au laboratoire ont pour objet de vérifier l'efficacité du traitement, l'aptitude du sol au traitement et de déterminer le pourcentage de la chaux nécessaire pour atteindre les objectifs visés en fonction des teneurs en eau prévisibles à l'extraction.

Nous récapitulons dans le tableau ci-dessous, les exigences visées en fonction des utilisations prévues :

Nature de matériau	Objectif visé pour le sol traité	Observations
Substitutions des purges sous les remblais	- Insensibilité à l'eau : • IPI > 15 • CBR_{imbibé}/IPI > 1	Il s'agit de la condition du GTS qui permet de vérifier à la fois : - l'aptitude du sol au traitement. - l'insensibilité à l'eau du sol traité comme exigé par le marché.
BHR	- Insensibilité à l'eau : • IPI > 15 • CBR_{imbibé}/IPI > 1 - Rc sol traité > 0.5 MPa	
PST	- Insensibilité à l'eau : • IPI > 15 • CBR imbibé / IPI > 1 - Objectif de portance (*): • 100% des mesures EV2 > 80 MPa.	(*) exigence de portance selon le référentiel IN3278 pour PST traitée.
Couche d'assise (couche de forme)	- Insensibilité à l'eau : • IPI > 15 • CBR_{imbibé}/IPI > 1 - Objectif de portance (*): • 100% des mesures EV2 > 120 MPa.	(*) exigence de portance selon le référentiel IN3278 pour CDF traitée.

Ces études comportent, en général :

- L'évaluation qualitative des matériaux non traités par la réalisation des essais d'identification et essais de portance IPI, CBR avant traitement.
- La détermination des performances des matériaux traitées (IPI et CBR imbibé à 4 jours pour différents dosages).
- La réalisation de planches d'essais pour vérifier la portance réelle in-situ lorsque celle-ci est requise.

VI.2 Evaluation qualitative des matériaux non traités :

Les sols qui ont fait l'objet des études de traitement ont été classés en 2 familles en fonction de leur nature et caractéristiques d'identification. Il s'agit des sols dominants sur le projet TOARC2 et qui sont

- Soit des argiles sableuses rougeâtre à jaunâtre de classe GTR A2 ;
- Soit des silts sableux rougeâtres à jaunâtre de classe GTR A1 à A2.

Les résultats des identifications et de caractérisation de ces sols se présentent comme suit :

Famille de sol	Wn% (NF P 94-050)	% Passants au tamis-mm (NF P94-056)			Dmax (mm)	Limites d'Atterberg (NF-P 94-051)			VBS (g/100g) (NF-P 94-068)	PROCTOR NORMAL (NF P94 093)		Indice Portance Immédiat (IPI) (NF P94 078)				Classe GTR
		0,08	2	50		WL (%)	IP (%)	IC		Masse volumique sèche ydOPN T/m3 (NF P94 093)	Teneur en eau optimale W OPN % (NFP 94-050)	0.9*W _{OPN}	W _{OPN}	1.1*W _{OPN}	1.2*W _{OPN}	
F1 Argile sableuse rougeâtre à jaunâtre (D2237, D2299, D2311)	18,8	46,9	99	99	0,315	35	14	1,16	0,59	1,81	15,3	26,4	20,7	9,9	4,1	A ₂
	18,7	48,1	99	100	0,315	40	19	1,12	1,46	1,73	17,2	24,0	17,5	12,6	7,7	A ₂
	21,5	41,8	100	100	0,315	38	19	0,87	-	1,80	16,9	19,5	14,1	6,3	3,0	A ₂
F2 silt sableux jaunâtre (D2281 et D2265)	14,5	40,2	94	100	16	-	-	-	2,1	1,81	15,8	21,0	10,2	3,7	2,1	A ₁

Il est à préciser que compte tenu du contexte du projet, à leur état naturel les sols des déblais sont généralement à l'état hydrique humide à moyen. Les portances IPI à l'état humides sont globalement très faibles (IPI < 6) et ne sont pas compatibles avec une mise en œuvre correcte des remblais.

VI.3. Nature et qualité des autres matériaux

VI.3.1. Caractéristiques de la chaux

La chaux utilisée pour le traitement des sols est la chaux vive CL90Q fabriquée par Lafarge-Calcinor à l'usine Ben Ahmed. Les résultats d'analyse de la chaux utilisée, comparés aux valeurs limites de la fiche technique, sont consignés dans le tableau suivant :

Déterminations	Chaux vive CL90Q	
	résultats	Fiche technique
CaO total (% masse)	92,0	≥ 85
Réactivité T60°C (min)	2min 30sec	≤ 4
Réactivité Tmax (°C)	66,2 (10min)	≥ 68

Elle est conforme à la norme NF P98-101

VI.3.2. Eau

Les eaux utilisées pour l'humidification des sols sont soit des eaux de surface des écoulements traversant le projet TORAC 2, soit des eaux de puits à proximité du tracé.

Les eaux sont conformes à la norme NF P98-100. Elles doivent être exemptes de matières en suspension et de sulfates.

VI.4 Performances des matériaux traitées

Les caractéristiques de compactage des matériaux A₁ et A₂ traités à la chaux, déterminées par l'essai

Nature matériaux	Argile sableuse								silt sableux jaunâtre	
	D2237		D2249		D2299		D2311		D2281	
caractéristique	Densité sèche maximale (δd max)-T/m3	Teneur en eau optimale (Wopt)-%	Densité sèche maximale (δd max)-T/m3	Teneur en eau optimale (Wopt)-%	Densité sèche maximale (δd max)-T/m3	Teneur en eau optimale (Wopt)-%	Densité sèche maximale (δd max)-T/m3	Teneur en eau optimale (Wopt)-%	Densité sèche maximale (δd max)-T/m3	Teneur en eau optimale (Wopt)-%
Sol non traitée	1,81	15,3	1,78	15,8	1,73	17,2	1,80	16,9	1,81	15,8
Sol + 1,2% Chaux	1,78	17,0	1,78	15,8	1,72	17,4	1,74	17,4	1,78	16,2
Sol + 1,5% Chaux	1,77	17,0	-	-	1,70	17,4	1,74	17,5	1,77	16,3
Sol + + 2% Chaux	-	-	-	-	1,69	18,6	-	-	-	-

Proctor normal sont synthétisés dans le tableau suivant :

Constat :

Le traitement à la chaux induit un aplatissement de la courbe Proctor avec diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale

En moyenne, la diminution de la teneur en eau d'un sol traité est de l'ordre de 1 à 2 % pour 1 % de chaux.

Les résultats des essais IPI et CBR imbibé à 4 jours réalisés pour les dosages de 1,2 % , 1,5% et 2 % de la chaux sont synthétisés dans le tableau suivant :

Famille de sol	Teneur en eau du sol(%)	Paramètres	Dosages en chaux vive		
			1,2%	1,5%	2%

F 1	D2237	0,9*Wopt	IPI %	25	34	-
			CBR (4j) d'immersion %	40	53	-
			Teneur en eau du sol traité	15,5	15,3	-
			Pd (T/m³)	1,78	1,77	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,60	1,56	-
		1,0*Wopt	IPI %	17	24	-
			CBR (4j) d'immersion %	33	49	-
			Teneur en eau du sol traité	16,9	16,8	-
			Pd (T/m³)	1,78	1,77	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,94	2,04	-
		1,1*Wopt	IPI %	9	15	-
			CBR (4j) d'immersion %	22	32	-
			Teneur en eau du sol traité	18,6	18,4	-
			Pd (T/m³)	1,75	1,75	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	2,44	2,13	-
F1	D2249	0,9*Wopt	IPI %	29	-	-
			CBR (4j) d'immersion %	48	-	-
			Teneur en eau du sol traité	14,3	-	-
			Pd (T/m³)	1,77	-	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,66	-	-
		1,0*Wopt	IPI %	19	-	-
			CBR (4j) d'immersion %	57	-	-
			Teneur en eau du sol traité	15,8	-	-
			Pd (T/m³)	1,79	-	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	3	-	-
		1,1*Wopt	IPI %	8	-	-
			CBR (4j) d'immersion %	34	-	-
			Teneur en eau du sol traité	17,4	-	-
			Pd (T/m³)	1,76	-	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	4,25	-	-
F1	D2299	0,9*Wopt	IPI %	25	44	40
			CBR (4j) d'immersion %	39	54	59
			Teneur en eau du sol traité	15,7	15,7	16,7
			Pd (T/m³)	1,66	1,67	1,65
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,56	1,23	1,48
		1,0*Wopt	IPI %	45	46	48
			CBR (4j) d'immersion %	47	50	54
			Teneur en eau du sol traité	17,4	17,4	18,6
			Pd (T/m³)	1,68	1,64	1,67
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,04	1,09	1,23
		1,1*Wopt	IPI %	36	42	42
			CBR (4j) d'immersion %	45	50	57
			Teneur en eau du sol traité	19,1	19,1	20,5
			Pd (T/m³)	1,70	1,71	1,69
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,25	1,19	1,36
	D2311	0,9*Wopt	IPI %	26	32	-
			CBR (4j) d'immersion %	34	38	-
			Teneur en eau du sol traité	15,8	15,9	-
			Pd (T/m³)	1,68	1,70	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,31	1,19	-
		1,0*Wopt	IPI %	23	29	-
			CBR (4j) d'immersion %	35	42	-
			Teneur en eau du sol traité	17,6	17,7	-
			Pd (T/m³)	1,71	1,72	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	1,52	1,45	-
		1,1*Wopt	IPI %	16	25	-
			CBR (4j) d'immersion %	32	39	-
			Teneur en eau du sol traité	19,2	19,5	-
			Pd (T/m³)	1,71	1,70	-
			CBR (4js) Immersion / IPI	2,00	1,56	-
F 2		0,9*Wopt	IPI %	29	33	

		CBR (4j) d'immersion %	72	80	
		Teneur en eau du sol traité	14,9	14,6	
		Pd (T/m ³)	1,76	1,77	
		CBR (4js) Immersion / IPI	2,48	2,42	
	1,0*Wopt	IPI %	23	23	
		CBR (4j) d'immersion %	53	57	
		Teneur en eau du sol traité	16,4	16,1	
		Pd (T/m ³)	1,78	1,78	
		CBR (4js) Immersion / IPI	2,30	2,48	
	1,1*Wopt	IPI %	7	10	
		CBR (4j) d'immersion %	24	30	
		Teneur en eau du sol traité	18,0	17,6	
		Pd (T/m ³)	1,75	1,75	
		CBR (4js) Immersion / IPI	3,40	3,00	

VI.5 Interprétation des résultats de l'étude

A l'issu des résultats obtenus on peut conclure ce qui suit :

Les argiles sableuses jaunâtre à rougeâtre ainsi que les silts de classe GTR A2/A1 des déblais du projet TOARC2 s'apprêtent bien au traitement à la chaux. En effet pour les plages de teneurs en eau testées, on note une amélioration considérable de la portance IPI ainsi que des rapports CBRi/IPI largement supérieurs à 1.

❖ Vis-à-vis de l'utilisation en substitution des purges :

- Les valeurs des essais IPI et CBR imbibé à 4 jours et rapport CBRi/IPI sont concluants (IPI <15 et CBRi/IPI > 1) pour les deux dosages de la chaux de 1,2 % et 1,5 %.

Le critère d'insensibilité à l'eau est vérifié.

- Ainsi, pour l'utilisation en substitutions des purges, le traitement de l'argile sableuse de classe A2/A1 ou des silts A1, le dosage de 1,2% de la chaux est retenu pour des teneurs en eau à la mise en place proche de la teneur en eau optimale Proctor normal (Wopn), à savoir W comprise entre 0.9*Wopn et 1.1*Wopn.

❖ Vis-à-vis de l'utilisation en BHR :

- Le critère d'insensibilité à l'eau et d'efficacité du traitement conformément au GTS sont satisfaits (IPI > 15 et CBRi/IPI > 1).
- La condition sur la résistance à la compression est vérifiée sur cylindres D16H32 conformément au protocole défini avec la maîtrise d'œuvre sur chantier.
- Les résultats sont concluants : Rc à 14 jours de l'ordre de 0.7 MPa.

En plus ces tests de laboratoire sont complétés par des mesures de portance sur planches d'essais pour vérifier la portance des matériaux traités.

❖ Vis-à-vis de l'utilisation en PST et en couche de forme :

- Le critère d'insensibilité à l'eau est satisfait (IPI > 15 et CBRi/IPI > 1) pour les trois dosages 1.2%, 1.5% et 2% et ce pour la plage de teneur en eau proche de l'OPN (0.9*Wopn à 1.1*Wopn).

L'atteinte des performances de portance requises est vérifiée sur planches d'essais.

VII- Planches d'essais

VII.1 Consistance des planches d'essais

A l'issu des résultats des études de traitement au laboratoire, des planches d'essais ont été réalisées pour les différentes utilisations prévues dans l'objectif de :

- Vérifier l'adéquation du matériel et du mode de traitement ;
- Valider les différentes phases du traitement du sol (apport et réglage du matériau, humidification, épandage de la chaux, malaxage et compactage) ;
- Arrêter les modalités de mise en œuvre (épaisseur du matériau, teneur en eau minimale avant traitement, vitesse et nombre de passes du malaxeur pour atteindre l'objectif de mouture finale maximale de 20mm, compactage) ;
- Vérifier l'atteinte de l'objectif recherché à terme par l'opération de traitement, à savoir :
 - L'insensibilité à l'eau pour l'ensemble des utilisations (substitutions, BHR, PST et CDF).
 - La portance pour l'utilisation en PST et en couche de forme.

VII.2 Méthodologie d'exécution des planches d'essais

Les planches d'essais ont été exécutées selon la méthodologie suivante :

VII.2.1 Préparation des plateformes supports des planches d'essais

Les plateformes supports doivent être correctement nivelées et compactées avant approvisionnement des sols. La Vérification de la portance du support moyennant essais de plaque avec objectif d'un module $EV2 > 30$ MPa et $EV2/EV1 < 2$.

Pour le cas des substitutions des purges, dans le cas où le fond de purge ne donnerait pas cette valeur de 30 MPa, une première couche en matériaux granulaires sera réalisée.

Pour le cas de la PST et de la CDF, la couche sous-jacente doit être réceptionnée et validée conformément aux procédures en prédéfinies.

VII.2.2 Déroulement et protocoles des planches d'essais

VII.2.2.1 Pour les substitutions des purges :

La planche d'essais est réalisée en 2 planches unitaires avec deux dosages de la chaux de 1.2% et 1.5%.

Les paramètres d'exécution de la planche sont les suivants :

N° Planche unitaire	1	2
Teneur en chaux (c)	1.2%	1.5%
Epaisseur foisonnée	35 cm	35 cm

Epaisseur compactée visée (e)	30 cm	30 cm
Teneur en eau après traitement et avant compactage	>Wopn	>Wopn
$\gamma_{d\text{ OPN}}$ du sol non traité	1.79 t/m ³	
Wopn du sol non traité		
Dosage en chaux visé (Kg/m ²)	6.4	8.0

Les dimensions sont de 60ml de longueur et 8m de largeur chacune.

VII.2.2.2 Pour la PST :

Conformément au marché, la planche d'essais PST est réalisée comme suit :

- Sur 35 cm en une seule couche pour la PST en remblai ;
- Sur 70cm réalisée en deux couches pour la PST en déblai.

Compte tenu des résultats ayant été obtenu sur les premières planches d'essais en substitutions des purges et en PST, le dosage de la chaux retenu pour la planche d'essai PST est de 1.2%.

N° Planche unitaire	PST Déblai	PST Remblai
Teneur en chaux (c)	1.2%	1.2%
Epaisseur totale PST	70 cm	35 cm
Epaisseur foisonnée	2*40 cm	40 cm
Epaisseur compactée visée (e)	2*35 cm	35 cm
Teneur en eau après traitement et avant compactage	>Wopn	>Wopn
$\gamma_{d\text{ OPN}}$ du sol non traité	15.3	
Dosage en chaux visé (Kg/m ²)	7.5	7.5

VII.2.2.3 Pour la couche de forme (couche d'assise) :

La planche d'essais de la couche de forme (couche d'assise) est réalisée sur une épaisseur de 20cm prévue par le marché.

Compte tenu des résultats ayant été obtenu sur les premières planches d'essais en substitutions des purges et en PST, le dosage de la chaux retenu pour la planche d'essai est de 1.2%.

Les conditions de réalisation de ces planches unitaires sont décrites ci-après :

- Mise en place des piquets repères qui ont servi de guide de réglage avant le déversement du matériau,
- Etalage de matériau et réglage à la niveleuse pour obtenir une couche homogène et bien réglée en épaisseur.

- Malaxage de la couche sur toute son épaisseur dans le cas où le sol n'a pas une mouture homogène,
- Scarification de la couche sur les deux tiers de son épaisseur et arrosage pour ramener la teneur en eau du matériau à la valeur visée ; ensuite, malaxage de la couche sur toute son épaisseur et qui sera refermée immédiatement.
- La quantité d'apport d'eau a été calculée en fonction de la teneur du matériau juste après régalage.
- Vérification de la teneur en eau du matériau humidifié par rapport à la teneur en eau cible. Nous retiendrons un écart sur la valeur de la teneur en eau de +/- 0.5.
- Epandage de la chaux vive selon les dosages indiqués avec un recouvrement de 5 cm d'un passage à l'autre. Durant cette opération, un contrôle du dosage par mesure au sol sera effectué.
- Malaxage de la couche sera sur toute son épaisseur, en la refermant immédiatement. L'opération était prévue être répétée, éventuellement à plusieurs reprises, jusqu'à atteindre une mouture de 20 mm maximum.
- Réglage du pulvimixeur de façon à assurer un accrochage de quelques centimètres avec le sol support.
- Mesure de la teneur en eau après un temps d'attente pour l'hydratation de la chaux et son mûrissement (1H pour le cas de matériau sableux).
- Apport d'eau si nécessaire, après scarification pour atteindre une teneur en eau minimale de $1.0 \cdot W_{opt}$ du matériau traité.
- Réglage final à la niveleuse de la couche et compactage au départ suivant les conditions du GTR et éventuellement des planches d'essais de compactage.
- La vérification de la précision des dosages d'application de la chaux s'effectuée par mesure de trois points pour le dosage visé à l'aide de bâches souples de 1m^2 ou bacs carrés (cadres) de 0,707 de côté (0,5 m²).

VII.2.3 plan de contrôle des planches d'essais :

Nous récapitulons dans les tableaux ci-après, l'ensemble des contrôles réalisés durant les planches d'essais :

VII.2.3.1 Planche d'essais pour les substitutions des purges :

Phase	Contrôle	Fréquence	Exigence
Préparation du sol support	Essai à la plaque	4 essais de portance par Planche unitaire	$EV2 \geq 30 \text{ MPa}$ $EV2/EV1 < 2$
Approvisionnement du sol à traiter	Identification du matériau (AG, VBS, W, Proctor, IPI)	- 1 identification - W avant traitement	
Étalage et régalage du sol à traiter	-Vérification de l'épaisseur par piquets repères.	Piquets repères / 20m	Épaisseur à l'étalage 35cm +/- 5cm
Humidification et malaxage avant traitement	Mesure W après malaxage	W (moyenne de 5 mesures)	$W > W_{opn}$
Épandage de la chaux	Mesure du dosage de la chaux	Mini 2 mesures / bande/planche	
Malaxage du sol traité	1-Vérification par sondage de la profondeur de traitement. 2- Vérification teneur en eau	- Chaque planche unitaire - 5 W / planche unitaire	-Traitement sur toute l'épaisseur de la couche. - $W_{opn}-0.5 < W < W_{opn}+1$
Compactage	Mesure densités in-situ	- Mesures à 4, 6 et 8 passes	Compacité $> 95\% \text{ OPN (q4)}$ Épaisseur traitée : 30cm+/- 5cm
Portance à 8 jours	Essais à la plaque	- 5 points / planche	

Contrôle de l'insensibilité à l'eau	IPI et CBR imbibé 4j	- IPI à 2H, 24H, 3j et 7j - CBR après 2H, 24H, 3j et 8j de maturation.	IPI > 15 CBR imbibé > IPI
-------------------------------------	----------------------	---	------------------------------

VII.2.3.2 Planche d'essais pour la PST :

❖ PST en déblai :

Opérations	Contrôle à réaliser	Fréquence	Exigences
<u>Opérations préalables</u> Réception du support de la PST	<u>Selon procédure de mise en œuvre de la PST</u> 1 - Test de la déflexion visuelle 2 - Réception topographique	1- 1 test/demi plateforme 2 - Topo : 5 points / profil (Axe P; 5,25/ Axe; Rives)	1- Pas de matelassage 2 - Altimétrie : +/-5 cm - Planimétrie : largeur de chaque demi plate-forme mesurée depuis l'axe : 0/+5 cm
MISE EN ŒUVRE DE LA PST			
Mise de la 1ère couche sur 35 cm			
Approvisionnement du matériau	Identification du matériau (AG,VBS, Proctor OPN et Wnat)	- 1 Identification	
Etalage et réglage de la 1ère couche sur une épaisseur de 40 cm avant compactage.	- Implantation des piquets repères pour le réglage de l'épaisseur. - Vérification de la teneur en eau	- 5 points / profil - 3 mesures W avant traitement	Teneur en eau de l'ordre de $WOPN_{sol\ traité} +1$
Traitement à la chaux de la 1ère couche (Dosage 1,2%)	Idem mise en œuvre de sol traité à la chaux en substitution des purges		$Wopn - 0,5\% < W < WOPN + 1\%$ Dosage à appliquer : 7,5Kg/m3 (1,2%)
<u>Compaction :</u> Modalités de compactage (pour IC>1,25) - Type de compacteur : V4 - Vitesse : 2 Km /h - Nombre de passes : 8	- Q/S - Vérification épaisseur - Mesures des densités	- 1 vérification Q/S - 3 points / profils - 3 densités / profil	- IC $\geq 1,25$ - Epaisseur moyenne : 35 cm - Objectif q4 : ydc ≥ 95 OPN
Mise en œuvre de la 2ème couche sur 35 cm			
Approvisionnement du matériau	Identification du matériau (AG,VBS)	- 1 Identification	

Etalage et régalage de la 2ème couche suivant la cote théorique de la PST + 3cm avant compactage (épaisseur de l'ordre de 40 cm).	- Implantation des piquets repères pour le réglage du nivellement de la PST. - Vérification de la teneur en eau avant traitement	- 5 points / profil - 3 mesures W avant traitement	Teneur en eau de l'ordre de $WOPN_{sol\ traité} +1$
Traitement à la chaux de la 2ème couche (Dosage 1,2%)	Idem mise en œuvre de sol traité à la chaux en substitution des purges		$Wopn - 0,5\% < W < WOPN + 1\%$ Dosage à appliquer : 7,5Kg/m ³ (1,2%)
Vérification de la portance	Essais de plaque	- 4 points/profil	100 % des valeurs $EV2 \geq 80\text{ MPa}$
Réception topographique	Levé topo de la PST	- 9 points/profil (Cf. croquis points de contrôle)	- Altimétrie : +/- 5 cm - Planimétrie: 0/+ 5 cm - Pente transversale : +1 cm/m et pas de flache sur le profil en travers

❖ PST en remblai :

Opérations	Contrôle à réaliser	Fréquence	Exigences
<u>Opérations préalables</u> Réception du support de la PST	Selon procédure de mise en œuvre de la PST 1 -Test de déflexion visuelle 2 - Réception topographique	1- 1 test/demi plateforme 2 - Topo : 5 points / profil (Axe P; 5,25/ Axe; Rives) (Cf. croquis points de contrôle) NB: Les points 5,25/axe correspondent au changement de pente de la couche de forme LGV. Ces points sont nécessaires pour la vérification de l'épaisseur de la CDF.	1- Pas de matelassage 2 - Altimétrie : +/- 5 cm - Planimétrie : largeur de chaque demi plateforme mesurée depuis l'axe : 0/+5 cm
MISE EN ŒUVRE DE LA PST			
Approvisionnement du matériau	Identification du matériau (AG,VBS, Proctor OPN et Wnat)	- 1 Identification	
Etalage et régalage de la couche sur une épaisseur de 45 cm avant compactage.	- Implantation des piquets repères pour le réglage de l'épaisseur. - Vérification de la teneur en eau	- 5 points / profil - 3 mesures W avant traitement	Teneur en eau de l'ordre de $WOPN_{sol\ traité} +1$

Traitement à la chaux de la couche (Dosage 1,2%)	Idem mise en œuvre de sol traité à la chaux en substitution des purges		Wopn-0,5% < W < WOPN +1% Dosage à appliquer : 8,4 Kg/m ³ (1,2%)
<u>Compactage :</u> Modalités de compactage (pour IC>1,25) - Type de compacteur : V4 - Vitesse : 2 Km /h - Nombre de passes : 8	- Q/S - Vérification épaisseur - Mesures des densités	- 1 vérification Q/S - 3 points / profils - 3 densités / profil	- IC ≥ 1,25 - Epaisseur moyenne : 35 à 40 cm - Objectif q ₄ : ydc ≥ 95 OPN
Vérification de la portance	Essais de plaque	- 3 points/profil (Cf. croquis points de contrôle)	100 % des valeurs EV2 ≥ 80 MPa

VII.2.3.3 Planche d'essais pour la couche de forme :

Opérations	Contrôle à réaliser	Fréquence	Exigences
<u>Opérations préalables</u> Réception de la CDF support de la CDF	Selon procédure de mise en œuvre de la CDF en sol traité. (TO2-X -GC-TER-PRQ-0024)		<u>Geométrie:</u> - Altimétrie : +/-5 cm - Planimétrie : largeur de chaque demi plate-forme mesurée depuis l'axe : 0/+5 cm - Pente transversale : +1 cm/m et pas de flache sur le profil en travers <u>Portance:</u> 100% des valeurs EV2 >100MPa
MISE EN ŒUVRE DE LA COUCHE DE FORME (Couche d'assise sur 20cm)			
Approvisionnement du matériau	Identification du matériau (AG,VBS, Proctor OPN et Wnat)	- 1 Identification	
Etalage et régalage de la couche sur une épaisseur de 25 cm avant compactage.	- Implantation des piquets repères pour le réglage de l'épaisseur. - Vérification de la teneur en eau	- 5 points / profil - 3 mesures W avant traitement	Teneur en eau de l'ordre de WOPN _{sol} traité +1

Traitement à la chaux de la couche (Dosage 1,2%)	Idem mise en œuvre de sol traité à la chaux en substitution des purges		Wopn-0,5% < W < WOPN +1% Dosage à appliquer : 4,3 Kg/m ³ (1,2%)
<u>Compactage :</u> Modalités de compactage (Objectif q3 et IC>1,2) - Type de compacteur : V4 - Vitesse : 2 Km /h - Nombre de passes : 7	- Q/S - Vérification épaisseur - Mesures des densités	- 1 vérification Q/S - 3 points / profils - 3 densités / profil	- IC ≥ 1,2 - Epaisseur moyenne : 25cm - Objectif q3 : ydc ≥ 98,5 OPN
Vérification de la portance	Essais de plaque	- 3 points/profil	100 % des valeurs EV2 ≥ 100 MPa
Réception topographique	Levé topo de la CDF	- 9 points/profil (Cf. croquis points de contrôle)	- Altimétrie : +/- 3 cm par rapport à la cote théorique. - Planimétrie (largeur de chaque demi plateforme depuis l'axe) : 0/+ 5 cm - Pente transversale : +1 cm/m et pas de flache sur le profil en travers.

VII.3. Résultats des planches d'essais

VII.3.1 Planche d'essais pour les substitutions des purges sous les remblais :

VII.3.1.1 Contrôle de la plateforme support :

Les résultats d'essais à la plaque réalisés au niveau des deux bandes support des planches d'essais sont synthétisés dans le tableau suivant :

SITUATION	EV2 (MPa)			K (EV2/EV1)		
	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.
Bande droite PR311+800/PR311+880	32,6	86,5	50,2	1,46	1,92	1,67
Bande gauche PR311+800/PR311+880	44,1	72,6	54,8	2,01	2,40	2,16

VII.3.1.2 Caractéristiques du matériau avant traitement :

Le sol utilisé pour la réalisation de la planche d'essais présente les caractéristiques suivantes :

Paramètre	Résultat
Taux de fines(%)	47
Refus à 2mm(%)	5

VBS (g/100g)		1.62
Wopt (%)		16.2
Classe GTR		A1
$\gamma_{d\text{ OPN}}^3(T/m^3)$		1.76
IPI(%)	1,0*Wopt	20
	1,1*Wopt	12
	1,2*Wopt	4

VII.3.1.3 Caractéristiques de compactage des sols traités à la chaux

Les caractéristiques de compactage des silts sableux jaunâtres traités à la chaux, déterminées par l'essai Proctor normal sont synthétisées dans le tableau suivant :

Nature matériaux	Densité sèche maximale (δd_{max})-T/m ³	Teneur en eau optimale (Wopt)- %
Silts sableux jaunâtres + 1,2% Chaux	1,74	16,5
Silts sableux jaunâtres + 1,5% Chaux	1,73	16,6

VII.3.1.4 Teneurs en eau de mise en œuvre et dosages de la chaux

Les mesures des teneurs en eau des matériaux avant épandage de la chaux et après malaxage avec la chaux ainsi que les mesures au sol des dosages de la chaux appliqués sont synthétisées dans le tableau suivant :

Planche d'essais	Avant traitement		Dosage de la chaux (Kg/m ²)			Après traitement (*)	
	W (%)	W/Wopt	Visé	Appliqué	Ecart	W (%)	W/Wopt
A 1,5% de la chaux	16,7	1,03	8,04	8,30	+ 3,2%	17,1	1,03
A 1,2% de la chaux	19,6	1,21	6,41	6,23	- 2,8%	17,7	1,07

(*) : Mesures de teneurs en eau effectuées juste avant compactage.

VII.3.1.5 Performances des sols traités à la chaux

La portance des sols traités à la chaux est évaluée par la détermination de l'indice portant immédiat (IPI) et l'indice CBR après 4 jours d'immersion (CBR). Ces essais sont réalisés sur les échantillons des silts sableux jaunâtres traités à la chaux, compactés à environ 2 heures de la fin du malaxage dans des moules CBR à l'aide de la dame Proctor normal avec 56 coups/couche. Les éprouvettes confectionnées sont conservées dans des sacs étanches avant de les soumettre aux essais.

Les résultats d'essais obtenus sont synthétisés dans le tableau suivant :

❖ Essais de portance IPI/CBR :

Planche d'essais	W (%)	δ_d (T/m ³)	Age de maturation	IPI	CBR	CBR/IPI
A 1,5% de la chaux	17,0	1,75	2 heures	27	44	1,6
			24 heures	36	43	1,2
			3 jours	48	60	1,25
			8 jours	52	61	1,2
A 1,2% de la chaux	18,2	1,73	2 heures	20	35	1,75
			24 heures	31	43	1,4
			3 jours	39	41	1,05
			8 jours	46	47	1,02

❖ Mesure des densités in-situ :

Les résultats des mesures de densité in-situ réalisées à différentes énergies de compactage au niveau des deux planches d'essais et les taux de compactage qui en découlent sont synthétisés dans le tableau suivant :

Planche d'essais	Modalités compactage			Win-situ (%)			δd in-situ (t/m3)			δd réf. cor. (t/m3)	Taux compactage (%OPN)		
	Classe	Vitesse	Nbre passes	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy		Min	Max	Moy
A 1,5% de la chaux	V5	2 Km/h	4	15,4	16,7	16,2	1,54	1,61	1,58	1,73	89	93	91
			6	12,1	15,9	14,1	1,71	1,83	1,76		99	>105	102
			8	13,0	14,8	13,9	1,69	1,80	1,73		98	104	100
A 1,2% de la chaux			4	16,2	17,5	17,0	1,63	1,75	1,67	1,74	93	101	96
			6	12,6	17,5	15,1	1,66	1,94	1,79		95	>105	101
			8	13,6	16,9	14,8	1,75	1,87	1,82		100	>105	104

❖ Mesure de la portance :

Planche d'essais	EV2 (MPa)			K (EV2/EV1)		
	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.
A 1,5% de la chaux	73,8	128,6	99,7	1,50	1,81	1,61
A 1,2% de la chaux	77,6	107,1	89,2	1,25	1,59	1,41

Il est donc à noter un gain de portance de l'ordre de 40 MPa par rapport au sol support à 50 MPa, ce qui est cohérent pour une couche traitée d'une épaisseur de 30 cm.

VII.3.1.6 Interprétation des résultats

Le traitement des silts sableux aux deux dosages de 1,2% et 1.5% de la chaux a permis ce qui suit :

- L'amélioration nette de l'indice portant immédiat (IPI départ 4 à un IPI de 20).
- L'insensibilité à l'eau des sols traités (rapport CBR/IPI de l'ordre de 1,75).
- L'amélioration du comportement et des caractéristiques de compactage. L'objectif de compacité est atteint à 6 passes du compacteur V5 (taux de compactage obtenus sont compris entre 95 et plus de 100% OPN avec une moyenne supérieure à 100% OPN).
- L'amélioration significative de la portance suite au traitement (soit un gain en portance de l'ordre de 40 MPa par rapport au sol support).

Etant donné que les résultats enregistrés à 1.2% de chaux sont largement supérieurs aux valeurs recherchées pour les matériaux de substitution des purges, à savoir IPI > 15 et CBR/IPI > 1 et dans l'objectif d'optimiser l'opération de traitement, le dosage de 1.2% a été retenu pour le traitement des sols A1/A2.

VII.3.2 Planche d'essais pour la PST :

VII.3.2.1 Caractéristiques des matériaux utilisés :

- ✓ Les sols utilisés pour la planche d'essais de la PST traitée sont les silts sableux de classe GTR A2. Les résultats des essais d'identification réalisés sur un échantillon de ce silt sableux sont récapitulés dans le tableau ci-après.

% Passants à			Dmax	Limites d'Atterberg		PROCTOR NORMAL		Classe GTR
0,08	2	50		WL	IP	γ	W	
43,4	96	100	10	36	15	1,76	15,3	A2

- ✓ La chaux vive de traitement est de catégorie CL 90Q de LAFARGE CHAUX- Usine Ben Ahmed. Les résultats des essais de détermination de la réactivité réalisée sur un échantillon prélevé lors du traitement de la deuxième couche sont présentés dans le tableau suivant :

Température à 5 mn (°C)	61
Température à 10 mn (°C)	61
Température Maximale (°C)	61
Temps nécessaire pour atteindre la Température maximale	3 mn 55 s
Temps nécessaire pour atteindre 60 °C	2 mn 48 s

- ✓ Les caractéristiques Proctor Normal du sol traité à 1.2% de chaux sont les suivantes :

$$W_{OPN} = 15,6\%, \gamma_{d OPN} = 1,74 \text{ T/m}^3.$$

VII.3.2.2 mesure de la teneur en eau et du dosage de la chaux à la mise en œuvre :

Les matériaux de PST sont mis en place en deux couches traitées de 35cm d'épaisseur chacune.

Les mesures de teneur en eau ont été effectuées avant et après le traitement à la chaux dans l'objectif d'assurer un état hydrique de compactage moyen du sol.

Les résultats des essais de teneur en eau et de mesure du dosage de la chaux sont récapitulés dans les tableaux suivants :

❖ 1^{ère} couche :

a) Contrôle de teneur en eau:

Lieu			W %	W Moyenne %	W _{OPN}
<u>Avant traitement</u>	PR303+120	RD	15,5	16,5	15,6
	PR303+140	Axe	16,6		
	PR303+160	RG	15,6		
	PR303+180	Axe	18,4		
<u>Après traitement</u>	PR303+120	RD	15,7	15,6	
	PR303+140	Axe	15,4		
	PR303+160	RG	16,1		
	PR303+180	Axe	15,2		
Objectif	WOPN du sol traité -0.5% < W < WOPN du sol traité +1%				

b) Mesure de dosage en chaux

Référence mesures	Dosage moyen en chaux vive (Kg/m ²)
1 ^{ère} Bande à 16h30mn	7,07
1 ^{ère} Bande	8,61
2 ^{ème} Bande	8,73
3 ^{ème} Bande	8,21
4 ^{ème} Bande à 17h35mn	8,92
Exigence	≥ 7.5 Kg/m ²

On note un net surdosage en chaux de la première couche qui est de l'ordre de 1.4% contre le dosage théorique visé de 1.2%.

❖ 2^{ème} couche :

a) Mesure de teneurs en eau:

Lieu			W %	W Moyenne %	W _{OPN}
<u>Avant traitement</u>	PR303+130	RD	17,3	16.9	15,6
	PR303+180	Axe	16,8		
	PR303+210	RG	16,6		
<u>Après traitement</u>	PR303+140	Axe	16,4	16.0	
	PR303+160	RD	15,5		
	PR303+200	Axe	16,1		
Objectif	WOPN du sol traité -0.5% < W < WOPN du sol traité +1%				

b) Mesure de dosage en chaux

Référence mesures	Dosage moyen en chaux vive (Kg/m ²)
-------------------	---

1 ^{ère} Bande	7,81
2 ^{ème} Bande	7,72
4 ^{ème} Bande	7,53
6 ^{ème} Bande	7,14
Exigence	≥ 7.5 Kg/m ²

D'après les résultats ci-dessus, les matériaux A2 traités à la chaux sont mis en œuvre à l'état hydrique moyen (W de 15.6 à 16% contre WOPN de 15.6%) avec un dosage à la chaux légèrement supérieur au dosage visé (1.2% correspondant à 7.5Kg/m²) pour la 1^{ère} couche et presque exact pour la 2^{ème} couche.

VII.3.2.3 Performances après traitement :

❖ Essais de portance IPI/CBR :

Après traitement, des prélèvements de matériaux ont été effectués pour la détermination des indices de portance IPI et CBRi ; les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Indice de Portant Immédiat	Indice CBR après 4j d'immersion		CBR/IPI
	IPI (%)	CBR (%)	Gonflement	
1 ^{ère} couche	38	62	0,09	1,63
2 ^{ème} couche	28	52	0,09	1,86
Exigence	≥15	-	-	≥1

❖ Mesure des densités in-situ :

Le compactage des deux couches de PST est effectué selon les modalités arrêtées lors de la planche d'essais de mise en œuvre des sols traités à la chaux en substitutions des purges, à savoir IC≥1.25.

Le nombre de passes ainsi appliqué au compacteur V4 est de 7 passes.

La synthèse des résultats des essais de détermination de la densité sèche in-situ réalisés au Gammadensimètre sont donnés dans les tableaux suivants :

Planche d'essais	Modalités compactage			δd réf. cor. (t/m ³)	Taux compactage (%OPN)		
	Classe	Vitesse	Nbre passes		Min	Max	Moy
1 ^{ère} couche	V5	2 Km/h	7	1.74	96	101	99
2 ^{ème} couche					99	105	103

L'objectif de densification étant q₄ (p_dm ≥ 95% p_dOPN), le compactage est jugé très satisfaisant.

❖ Mesure de la portance :

Planche d'essais	EV2 (MPa)			K (EV2/EV1)		
	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.
1,2% de la chaux	113	225	140	1.07	1.84	1.39

Les essais de portance permettent de conclure ce qui-suit :

- Le module EV2 obtenu varie de 82 à 225 avec un rapport K (EV2/EV1) largement inférieur à 2.
- 100% des valeurs EV2 sont supérieures à 80 MPa.

VII.3.2.4 Interprétation des résultats

Le traitement des argiles sableuses A2 du TOARC 2 à 1,2% et 1.5% de la chaux a permis ce qui suit :

- L'amélioration nette de l'indice portant immédiat.
- L'insensibilité à l'eau des sols traités (rapport CBR/IPI largement supérieur à 1).
- L'amélioration du comportement et des caractéristiques de compactage. L'objectif de compacité q4 est atteint à 7 passes du compacteur V5.
- L'atteinte de l'objectif de portance requis pour la PST en sol traité, à savoir :
 - 100% des valeurs EV2 $\geq$ 80 MPa.

Ainsi, les sols A2 traités à 1.2% de chaux sont conformes à l'utilisation en PST des déblais dans les conditions suivantes :

VII.3.3 Planche d'essais pour la couche de forme :

VII.3.3.1 Caractéristiques des matériaux utilisés :

- ✓ Les matériaux utilisés pour la planche d'essais sont les silts sableux de classe GTR A2. Les résultats des essais d'identification réalisés sur un échantillon de ce silt sableux sont récapitulés dans le tableau ci-après.

% Passants à			Dmax	Limites d'Atterberg		PROCTOR NORMAL		Classe GTR
0,08	2	50		WL	IP	Y	W	
47,5	96	100	12,5	36	14	1,78	15,6	A2

- ✓ La chaux vive de traitement est de catégorie CL 90Q de LAFARGE CHAUX- Usine Ben Ahmed. Les résultats des essais de détermination de la réactivité réalisée sur un échantillon prélevé lors du traitement de la deuxième couche sont présentés dans le tableau suivant :

Température à 5 mn (°C)	60
Température à 10 mn (°C)	61
Température Maximale (°C)	61
Temps nécessaire pour atteindre la Température maximale	6 mn 15 s
Temps nécessaire pour atteindre 60 °C	3 mn 10 s

- ✓ Les caractéristiques Proctor Normal du sol traité à 1.2% de chaux sont les suivantes :

$$W_{OPN} = 16.0\%, X_{d\,OPN} = 1,76T/m^3.$$

VII.3.3.2 mesure de la teneur en eau et du dosage de la chaux à la mise en œuvre :

La couche d'assise est mise en place sur une épaisseur de 20cm (25cm foisonnée).

Les mesures de teneur en eau ont été effectuées avant et après le traitement à la chaux dans l'objectif d'assurer un état hydrique de compactage moyen du sol.

Les résultats des essais de teneur en eau et de mesure du dosage de la chaux sont récapitulés dans les tableaux suivants :

❖ Contrôle de teneur en eau:

Lieu		W %	W Moyenne %	WOPN
<u>Avant traitement</u>	PR311+520	17,1	17,4	16,0
	PR310+550	17,8		
	PR310+580	17,3		
<u>Après traitement</u>	PR311+520	16,0	16,4	
	PR310+550	16,8		
	PR310+580	16,5		

❖ Mesure de dosage en chaux

Référence mesures	Dosage moyen en chaux vive (Kg/m ²)
1 ^{ère} Bande	5,68
3 ^{ème} Bande	5,13
5 ^{ème} Bande	5,54
7 ^{ème} Bande	5,34
9 ^{ème} Bande	5,05
Objectif	≥ 4.3 Kg/m ² (*)

D'après les résultats ci-dessus, les matériaux A2 traités à la chaux sont mis en œuvre à l'état hydrique moyen (W de 16.4% contre W_{OPN} de 16.0%) avec un dosage à la chaux légèrement supérieur au dosage visé (1.2% correspondant à 4.3Kg/m²).

VII.3.3.3 Performances après traitement :

❖ Essais de portance IPI/CBR :

Après traitement, des prélèvements de matériaux ont été effectués pour la détermination des indices de portance IPI et CBRi ; les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Paramètre	Indice de Portant Immédiate	Indice CBR après 4j d'immersion		CBR/IPI
	IPI (%)	CBR (%)	Gonflement	
	25	40	0,13	
Exigence	≥15	-	-	≥1

❖ Mesure des densités in-situ :

Le compactage de la couche d'assise est effectué selon les modalités arrêtées lors de la planche d'essais de mise en œuvre des sols traités à la chaux en substitutions des purges, à savoir IC $\geq$ 1.25.

Le nombre de passes ainsi appliqué au compacteur V4 est de 7 passes.

La synthèse des résultats des essais de détermination de la densité sèche in-situ réalisés au Gammadensimètre sont donnés dans les tableaux suivants :

Planche d'essais	Modalités compactage			δd réf. cor. (t/m ³)	Taux compactage (%OPN)		
	Classe	Vitesse	Nbre passes		Min	Max	Moy
CDF	V5	2 Km/h	7	1.76	99	105	100.5

L'objectif de densification étant q₃ (p_dm $\geq$ 98.5% p_dOPN), le compactage est atteint.

❖ Mesure de la portance :

Planche d'essais	EV2 (MPa)			K (EV2/EV1)		
	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.	Valeur min.	Valeur max.	Valeur moy.
1,2% de la chaux	100	173	135	1.21	1.87	1.4

Les essais de portance permettent de conclure ce qui-suit :

- Le module EV2 obtenu varie de 100 à 173 avec une moyenne de 135 MPa.
- 100% des valeurs EV2 sont supérieures à 100 MPa requise.

VII.3.2.4 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus sur la planche d'essais de mise en œuvre de la CDF LGV (couche d'assise) en sol traité à la chaux, il ressort ce qui suit :

La mise en œuvre de sol A2 traité à 1.2% de chaux sur une épaisseur de 20 cm selon les modalités de la procédure de mise en œuvre des sols traités à la chaux permet d'atteindre l'objectif de portance fixé pour la CDF en sol traité, à savoir :

- ❖ 100% des valeurs EV2 $\geq$ 100 MPa.

Ainsi, les sols A2 traités à 1.2% de chaux sont conformes à l'utilisation en couche d'assise de 20cm de la couche de forme LGV.

VIII- Modalités de mise en œuvre du traitement

VIII.1opérations préalables

En règle générale, les opérations préalables à l'exécution des travaux de traitement de sol à la chaux sont :

- Réception visuelle et/ou géotechnique du support.
- Réglage par nivellement et compactage du support.
- Réception topographique du support.
- Etalonnage de l'épandeur de chaux selon la procédure de l'annexe 6 du GTS (Nombre minimal des mesures pour le dosage retenu = 20 avec $C_v \leq 5\%$).
- En plus, il faut s'assurer des conditions météorologiques suivantes :
 - Vitesse du vent à 1m du sol < 40 Km/h.
 - Pas de pluie.

VIII.2 Exécution du traitement :

La mise en œuvre du traitement à la chaux se fait comme suit :

- Avant le déversement du matériau, des piquets repères seront placés pour servir de guide de réglage de l'épaisseur à appliquer.
- Vérification de la teneur en eau naturelle du matériau pour déterminer la quantité d'eau d'apport pour ramener la teneur en eau à WOPN du sol traité.
- Approvisionnement, étalage et régalinge du matériau avec une niveleuse permettant d'obtenir une couche homogène et bien réglée en épaisseur.

- Scarification à la niveleuse du matériau régalié puis humidification et malaxage à la niveleuse ou au malaxeur ;
- Au cas où le sol n'a pas une mouture homogène, la couche sera malaxée sur toute son épaisseur avec le malaxeur.
- Nivellement de la couche à la niveleuse ;
- Epandage de la chaux suivant le dosage retenu avec un recouvrement latéral de 20 cm d'un passage à l'autre. En longitudinal, le recouvrement doit être de 5m. Durant l'opération d'épandage, un contrôle du dosage par mesure au sol sera effectué.
- Malaxage de la couche sur toute son épaisseur. Cette opération pourra être répétée, éventuellement à plusieurs reprises, pour atteindre une mouture de 20 mm maximum.
- Le pulvimixeur sera réglé de façon à assurer un accrochage de quelques centimètres avec la couche sous-jacente.
- Vérification de la teneur en eau du matériau traité par rapport à la teneur en eau cible (W_{OPN} du sol traité).
- Réglage et compactage de la couche selon les modalités de compactage arrêtées à l'issue d'une planche d'essai.

IX-Conclusion

Les travaux de construction des remblais et des couches de formes représentent une part importante du coût global des grands projets de terrassements des infrastructures routières et ferroviaires. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts.

Il est donc intéressant de privilégier les performances des remblais et de la couche de forme en sol argileux ou limoneux, par la technique de traitement des sols à la chaux ou aux liants hydrauliques. Cette technique présente de nombreux avantages, notamment, l'économie d'énergie (traitement à froid), l'économie de transport de matériaux (réutilisation des matériaux locaux), l'économie en granulats d'apports (préservation de l'environnement), et l'économie sur le coût total des projets.

Dans le cadre de la réalisation du projet de La ligne à grande vitesse-TOARC 2, sur la base des études menées, le traitement à la chaux a été utilisé efficacement en remplacement des solutions classiques en matériaux granulaires et a permis l'exécution des composantes suivantes du projet dans de bonnes conditions techniques, économiques et de délai :

- Substitutions des purges au niveau des remblais ;
- Base des hauts remblais (BHR) ;
- Partie supérieure des terrassements PST ;
- Couche de forme (couche d'assise).

Le volume de ces traitements à la chaux s'est élevé à 2.000.000 m³.

Il est à préciser que cette variante d'utilisation du sol traité à la chaux a constitué une alternative optimale pour les raisons suivantes :

- Aptitude des sols fins de la zone du projet au traitement. En effet la nature relativement fine et argileuse ainsi que l'état d'humidité proche de l'état humide ont favorisé l'application du traitement sans demande exagérée en eau d'apport.
- Performances géotechniques importantes des sols traités à la chaux (insensibilité à la chaux et portance élevée) relevées lors des études de traitement au laboratoire ainsi que lors des planches d'essais.
- Pénurie en matériaux granulaires de carrière et emprunts dans la région du projet, ce qui présentait des risques de retards d'approvisionnement du chantier et par la suite le retard des travaux.

A travers l'expérience réussie vécue sur ce tronçon de la ligne LGV et étant donné la pénurie en matériaux de construction de la région Nord du Maroc, il est à notre avis judicieux de prévoir systématiquement les variantes de traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques dans les cahiers de charges des grands projets de terrassements de la région Nord. Bien entendu, cette proposition doit être justifiée par les investigations géotechniques nécessaires et les avis des experts en la matière.