

RÉUTILISATION DES MATÉRIAUX ÉVOLUTIFS MARNEUX EN BASE DE REMBLAIS DE GRANDES HAUTEURS

M. ALJ

Division des travaux Oued Amlil – M'Soun de l'autoroute Fès – Oujda, Société nationale des Autoroutes du Maroc, Maroc
alj.mohammed@adm.co.ma

RÉSUMÉ

Les travaux de terrassement objet de cette présentation concernent la section Oued Amlil – Taza, de l'autoroute Fès – Oujda (320 Km).

Le tracés de cette section se caractérise par La présence de matériaux évolutifs de classe R31 selon le GTR, évoluant vers des matériaux type A2, A3 ou A4; en quantité très importante (plus de 60% des déblais) et la quasi absence de matériaux rocheux ou granulaires, insensibles et frottants. Le climat du couloir est sec favorisant l'évaporation ce qui complique la maîtrise de la teneur en eau des matériaux ;

Le projet d'exécution a prévu la réutilisation des matériaux conformément au guide des terrassement routier (GTR) et il a limité la réutilisation des matériaux évolutif type R3 au remblai ordinaire sous certaines conditions (état hydrique m, couche mince : 30 cm, Dmax < 100 mm & validation par planche d'essai).

Les contraintes sues visé auront pour conséquences la mise en dépôt définitif de plus de 50% des matériaux réutilisables de déblai, et les matériaux squelettiques (CiBj) ou type A2 disponibles, pouvant servir au base de remblai de grande hauteur (BRGH), purges ou partie supérieur des terrassements (PST), ne couvrent même pas 30% des besoins. Le reste des besoins sont à satisfaire à partir d'emprunts.

Vu les éléments sus visé, des expertises ont été diligentées dans l'objectif d'élargir les possibilités de réutilisation des matériaux évolutifs en base de remblais tout en préservant la stabilité des ouvrages et en limitant le risque de déformation ultérieur après construction. Les résultats des expertises ont été concluants et ont permis d'étendre la réutilisation des matériaux évolutifs (R31 vers A2 ou A3 avec IP<30) au remblai de grande hauteur au niveau des parties latérales toute en respectant certaines dispositions constructives en fonction du profil de l'assise et de la hauteur du remblai.

Cette disposition a permis de faire des économies considérables sur la quantité des matériaux destinés au base de remblais de grande hauteur provenant d'emprunts ainsi que sur la quantité des matériaux destiné au dépôt définitif, d'où un impact positif sur l'environnement du tracé.

Avec cette disposition nous avons économisé prêt de 1 000 000 m³ de matériaux BRGH sur 4 500 000 m³ prévu initialement (22%). En terme de coût ça c'est traduit par une économie de prêt de 40 millions de dhs (4 000 000 d'Euro).

1. UNE PRESENTATION DU PROJET

La section Oued Amlil – Taza, long de 34,5 km est l'une des sections de l'autoroute Fès – Oujda (328 km) dernier maillon de l'axe Est – Ouest du réseau autoroutier marocain.

Cette autoroute de 2x2 voies de catégorie L1 selon la norme ICTAAL 2000 a une vitesse de référence 130 km/h et une déclivité maximale en pente de 5%. Elle comprend une chaussée de 2x3,5 m dans chaque sens avec une bande d'arrêt d'urgence revêtue de 2,50 m et une berme de 0,75m. Une terre pleine centrale de 3 m sépare les 2 sens de circulation.

La réalisation de cette liaison a nécessitée un mouvement de terre totale de 22 millions de m³.

Les études ont été réalisées par le BET KHATIB & ALAMI (Liban) et les travaux de la section courante (répartie en 2 tronçons) ont été confiée à l'entreprise LENA (Portugal). La maîtrise d'œuvre est assurée par la division travaux Oued Amlil – M'Soun avec le LPEE (laboratoire public des études et essais) comme assistant pour les prestations du laboratoire de contrôle extérieure.

A l'instar de tous les chantiers autoroutiers marocains, le suivi des travaux d'exécution de ce chantier sont géré par un système assurance qualité de niveau 3, exigeant à l'entreprise de disposer de 2 niveaux de contrôles : interne et externe à la production.

Le coût du projet est d'environ 120 millions d'Euro hors les 7 viaducs de franchissement des grands cours d'eaux.

2. LE CONTEXTE ET LES CONTRAINTES DU PROJET :

2.1. Le contexte géologique :

Cette section d'autoroute relie le centre de Oued Amlil (PK92) à la ville de Taza (PK127,5). Elle empreinte le couloir de contact (couloir de Taza) entre deux principaux domaines géologiques : le domaine atlasique au sud et le domaine rifain au nord.

Le tracé de l'autoroute évolue plutôt dans le domaine rifain. Il traverse des terrains à topographie sinueuse, faisant partie du domaine du pré rif externe. Les formations rencontrées sont généralement de nature marneuse, d'âge Miocène.

2.2. le tracé du projet :

La ligne rouge du projet a divisé le Profil en long en 40 déblais et 40 remblais (déclivité maximale 5%) de moyenne à grande hauteur, voir de très grande hauteur en raison d'une topographie très marquée. Sur les 40 remblais, 17 sont de grandes hauteurs ($H_{max} > 10$ m).

2.3. Les contraintes géotechniques et climatologique :

Le tracé de l'autoroute se caractérise principalement par :

- La présence de matériaux évolutifs de classe R31 selon le guide des terrassement routiers (GTR), évoluant vers des matériaux type A2, A3 ou A4; en quantité très importante: de l'ordre de 8 500 000 m³ sur un total de 13 000 000 m³ de déblai (65%) ;
- La quasi absence de matériaux rocheux ou granulaires, insensibles et frottants sur le couloir du tracé de l'autoroute ;
- Une climatologie favorisant l'évaporation avec ce que cela implique sur la maîtrise de la teneur en eau des matériaux ;

2.4. Les spécifications de réutilisation prévue par le projet d'exécution :

Le cahier des spécifications technique du projet d'exécution a prévue la réutilisation des matériaux conformément au GTR toute en limitant la réutilisation des matériaux évolutif type R3 au remblai ordinaire sous conditions suivantes [2]:

- Granulométrie : fragmentation pour un $D_{max} < 100$ mm ;
- Epaisseur de couche mince : 30 cm ;
- Etat hydrique moyenne.

Et réalisation d'une planche d'essai pour arrêter les conditions de réutilisation.

2.4.1. Les caractéristiques des matériaux marneux du couloir du tracé:

Il s'agit des sols marneux de caractéristiques suivantes :
Poids volumiques apparent : entre 15 et 23 kN/m³ pour un poids volumique apparent moyen de 21.20 kN/m³
Teneur en eau : faible avec une moyenne de l'ordre de 9.7 % correspondant à des matériaux secs à très secs.
Indice de plasticité sur matériaux fins classés A2 à A3 (entre 10 et 40), voire A4 ($I_p > 40$).

2.4.2 Réutilisation

Compte tenu du contexte local, et surtout en période estivale avec forte évaporation, l'extraction a été faite frontalement.

Ces matériaux se présentant, en place, principalement en matériaux rocheux R3, évoluent à l'extraction en C1A2 à C1A3.

A la mise en oeuvre, les matériaux sont élaborés avec une fragmentation du matériau jusqu'à l'obtention d'une mouture aussi fine que possible : de l'ordre de 0/100 mm, afin d'éviter à terme l'évolution du matériau en permettant une fermeture optimale au compactage. Ceci évitera la pénétration de l'eau dans le matériau.

3. LES PROPRIETES DES SOLS NON SATURES SENSIBLES A L'EAU [1]:

Le comportement de matériaux fins, sensibles et non saturés mis en remblai dépend de divers paramètres, notamment :

- La nature du matériau : en l'occurrence des sols argileux et marneux classés R3 évoluant vers A2, A3 voire A4 ;
- La compacité et la teneur en eau lors de mise en oeuvre ;
- Les contraintes (ou charge de service, et donc la hauteur des remblais,.....) ;
- L'anisotropie des contraintes (en fonction de la position dans le corps du remblai).

Les études et recherches entreprises, de plus en plus, sur les milieux fins non saturés permettent les conclusions principales suivantes :

- Suite à la saturation, les déformations seront plus importantes si les matériaux ont été mis en oeuvre à l'état sec ;
- Le sur compactage n'est pas une garantie de non déformation.

Les observations faites sur les remblais existants, les raisonnements théoriques permettent les conclusions suivantes :

3.1. La teneur en eau de mise en oeuvre:

un matériau compacté du côté humide présentera des déformations (souvent du gonflement) réversibles avec des effets de bord (déformations faibles des talus), alors qu'un matériau compacté du côté sec présentera des déformations plus fortes qui dépendent de leur position au sein du remblai.

3.2. En fonction de la position dans le remblai :

Le tableau suivant résume les conséquences de la saturation des sols fins au niveau de chaque partie du remblai en fonction des contraintes et de l'intensité de compactage.

Tableau 1 - Les déformations prévisibles dans un remblai par position [1].

POSITION		contraintes	intensité du compactage	conséquences de l'imbibition	observations
Axe du remblai	partie supérieure PST	faibles charge de service	surcompactage à la mise en œuvre par rapport à la charge de service	gonflement souvent réversible par imbibition car la charge est faible	
	base de remblai	contraintes fortes	en général le compactage est inférieur à la charge de service mais augmente avec le poids des remblais	1 / si saturation sur charge de service: apparition de surpressions interstitielles avec risque de rupture type "court terme" fonction de la consolidation: suivi des pressions 2 / si teneur en eau proche de W_{opn} (ou W_{opm}): léger gonflement réversible 3 / si $W < W_{opn}$: risque d'effondrement réversible	Cependant l'énergie de compactage Proctor normal, qui correspond à des hauteurs de remblai de l'ordre de 25 mètres limite les risque d'effondrement
Talus		très anisotrope	variable	flexion transversale de la partie externe fissurations longitudinales reptations glissements	

Il faut aussi signaler les désordres dus à la présence de matériaux différents (et donc mis à des teneurs en eau différentes) tant que l'équilibre des suctions n'est pas atteint.

Pour limiter l'apparition de désordres, de déformations, les conclusions des observations sur les remblais réalisés avec des matériaux fins sensibles, non saturés, préconisent les mises en oeuvre suivantes :

- mise en oeuvre des matériaux du côté humide par rapport à l'optimum Proctor,
- compactage intense au sens du GTR, et sans sur compactage.

Enfin, il faut envisager la mise en place des parties sensibles comme les chaussées le plus tardivement pour permettre une plus grande saturation possible avant mise en service.

4. EXPERTISE POUR REUTILISATION DES MATERIAUX MARNEUX EVOLUTIFS EN BRGH (BASE DE REMBLAIS DE GRANDES HAUTEURS):

Le plan de mouvement de terre élaboré lors de la phase de consultation des entreprises (basé sur les sondages de reconnaissance géotechnique du projet d'exécution) prévoyait la présence de quantité importante en matériaux classe A2 (classification GTR) sur les déblais du tracé, pouvant être réutilisés en base de remblais de grande hauteur.

Avec l'avancement des travaux de déblai, il s'est avéré que plus de 90% de ces quantités se présente sous forme de rocher R3 (même R31) évoluant vers des matériaux marneux A2, A3 ou même A4.

Les contraintes vues visé auront pour conséquences la mise en dépôt définitif de plus de 50% des matériaux réutilisables de déblai, et les matériaux squelettiques (CiBj) ou type A2 disponibles, pouvant servir au base de remblai de grande hauteur (BRGH), purges ou partie supérieur des terrassements (PST), ne couvrent même pas 30% des besoins. Le reste des besoins sont à satisfaire à partir d'emprunts. Et par conséquent l'équilibre financier des contrats n'est plus assuré.

4.1. Les Objectifs de l'expertise :

Vu les éléments sus visé, une expertise a été diligentée par ADM dans l'objectif d'élargir les possibilités de réutilisation des matériaux évolutifs en base de remblais tout en préservant la stabilité des ouvrages et en limitant le risque de déformation ultérieure après construction.

4.2. Les intervenants :

Pour cette expertise la maîtrise d'oeuvre a sollicité l'avis technique d'EGIS-Géotechnique (Mr G. Le Touzo, France) avec l'assistance technique du directeur du centre expérimentale (CES) des sols du LPEE (Mr H. EJJAOUANI, Maroc).

4.3. Méthodologie :

La démarche suivie pour cette expertise était la suivante :

- Consultation des documents du projet d'exécution, particulièrement :
 - L'analyse des études géotechniques du projet (rapports du LPEE),
 - Les pièces écrites (C.C.T.P) du marché de travaux,
 - Les résultats de la planche d'essai de réutilisation des matériaux R3 prévue par le CCTP,
 - Des documents de phase travaux : PMT et bilan des cubatures,
- Recherche bibliographique :
 - Utilisation des matériaux fins, évolutifs et sensibles, en général non saturés,
 - Réalisation de remblais en matériaux sensibles.
- Propositions de mise en remblais et dispositions constructives.

4.4. Problématique de réutilisations des matériaux R31 [1] :

4.4.1. *Les désordres prévisibles :*

L'utilisation de matériaux sensibles (matériaux classés R3, A3 et A2 au sens du GTR), souvent très fortement surconsolidés en place comporte, à termes, de nombreux risques pouvant entraîner la stabilité des ouvrages.

- Apparition de fissures longitudinales, souvent en limite BAU – voie lente de la chaussée, mais aussi au niveau du TPC,
- Affaissement au niveau des ouvrages sous remblai : passages inférieures, ouvrages hydrauliques,
- Déformations des talus, très visibles quand il y a présence d'ouvrages d'assainissement : fossés longitudinaux, descentes d'eau,
- Déformations pouvant aller jusqu'au glissement, plus ou moins régressif,
- Déformation du profil en long et en travers avec les conséquences sur la pérennité de l'assainissement de la plate-forme, et notamment sur les risques d'une mauvaise évacuation des eaux sur la plate-forme,
- Perte à terme de la portance de la plate-forme, suite à une diminution de la portance de la partie supérieure des terrassements (PST).

4.4.2. *Quelques explications sur le mécanisme des désordres*

Les désordres prévisibles sont dus essentiellement à la migration de l'eau au sein des remblais, par :

- la base des remblais,

- les talus,
- la plate-forme (chaussée, couche de forme, TPC non revêtu),
- l'absence ou le mauvais entretien de l'assainissement.

Le comportement des sols non saturés fait que les déformations internes, au sein des massifs compactés, se présentent comme suit :

- gonflement des zones peu chargées, notamment en partie supérieure des remblais,
- effondrement des parties chargées du remblai, et cela concerne les bases de remblai,
- distorsions dues au cisaillement pour les parties extérieures des remblais et donc les talus.

4.4.3. *Maîtrise de la circulation des eaux :*

Les variations de circulation de l'eau au sein d'un corps de remblai se situent :

- au niveau des talus et des couches drainantes sous chaussée en favorisant les phénomènes d'imbibition dessiccation, entre les zones de matériaux différents et donc au niveau des parements ou carapaces,
- par la base des remblais, au contact du terrain naturel où se situent les risques d'imbibition par remontée capillaire ou d'inondation.

Donc il a fallu (comme prévu par le projet d'exécution) :

- de couper les venues d'eau sous chaussées, au niveau PST sous la couche de forme, en mettant en place des tranchées drainantes +/- profondes en limite déblai / remblai, (zone de transition) comme suit :

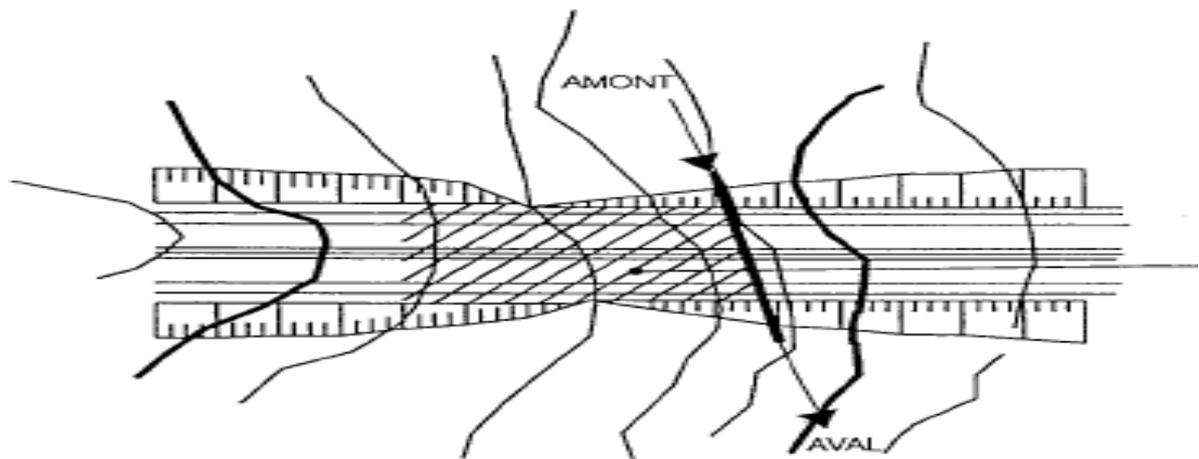


Figure 1 - Schéma de drainage des eaux au niveau de la zone de transition déblai – remblai [1].

- Couper toutes les eaux superficielles : assainissement étanche du TPC, assainissement longitudinal de plate-forme,

4.5. Dispositions constructives de réutilisations des matériaux R31 :

4.5.1. *Homogénéité des matériaux :*

Le GTR, si l'on se réfère à ce guide pour la mise oeuvre des matériaux, ne recommande pas la mise en place, pour les grands ouvrages en terre, de matériaux ayant des comportements mécaniques et/ou hydrauliques très différents.

Dans cet ordre d'idée, l'objectif est, en premier, de **mettre en oeuvre un matériau homogène**, dont le comportement peut être le mieux maîtrisé.

Sur ce projet, les matériaux disponibles (argiles, argiles marneuses et marnes, marno-calcaires, etc...) se présentent en place sous forme semi-rocheuse, se classant en R3i selon le GTR.



Photo 1 – Les matériaux R31 à l'extraction

Les matériaux après extraction évoluent mécaniquement vers des sols classés C1A1 ou A2 et C1Bi éventuellement. Après transport, régalage et compactage, ces matériaux évoluent vers des sols fins classés A3, A2.

Mais des éléments grossiers ou blocs (+/- dégradables) peuvent subsister, plus ou moins « englober » de fines argileuses.

L'objectif, pour bloquer les risques d'évolution et de comportement à terme (voire long terme) par saturation ou imbibition, est l'obtention d'un matériau à structure continue, sans ségrégation, bien plein, plus ou moins blocailleux, mais dont les éléments du squelette seront suffisamment confinés pour rester en place même s'ils ont tendance à se déstructurer

Ainsi il faut obtenir un matériau avec une **mouture la plus fine possible** après compactage (0/100 mm ou moins) qui a été confirmée à l'issue d'une planche d'essai.

L'obtention d'une mouture 0/100 a été fait par les engins classiques de mise en œuvre (bull à l'étagage et compactage par un V5 à pied dameur).

Pour cela, il a été envisagé une extraction frontale à la pelle, pour une meilleure fragmentation, et aussi pour maintenir au mieux la teneur en eau du matériau, surtout en période estivale, où l'évaporation est maximale.

4.5.2. Remblais composites :

Sur notre projet, et comme sur beaucoup de projet, la pénurie de bons matériaux (en l'espèce de matériaux rocheux ou alluvionnaires suffisants) doit conduire à valoriser au mieux les matériaux disponibles.

L'objectif est que la zone active, c'est-à-dire la zone située sous la zone d'influence de la chaussée, ait un comportement homogène.

Trois profils types, pour ces hauts remblais, ont été établis et sont présentés ci-après :

- remblai de hauteur < 15 m,
- remblai de hauteur comprise entre 15 et 20 m
- remblai de hauteur supérieure à 20 m.

Ces profils privilégient :

1- une réutilisation optimale des matériaux R3, mais à l'état hydrique m, principalement en épaulements et base des hauts remblais. La teneur en eau de mise en oeuvre proche de l'Optimum Proctor avec un objectif de compacité minimale q_4 selon le GTR ($0.90 WOPN < W < 1.1 WOPN$).

2- Le recours, le plus possible aux matériaux granulaires de classe C1B5 (ou voire rocheux) en base des remblais supérieurs à 15 m et dans la partie dite «active du noyau» ;

3- La réutilisation des argiles A2 (voire A3m ou R3m) pour les parties supérieures (entre 0 et 15 m ; cf. PT types présentés ci-après).

La partie supérieure des terrassements (PST) a été réalisé avec des argiles A2m (ne provenant pas de matériaux marneux R3) ou des matériaux frottants (CiBj ou CiAj).

Les figures suivantes présentent les schémas de montage de remblai en fonction de sa hauteur et de la pente de l'assise :

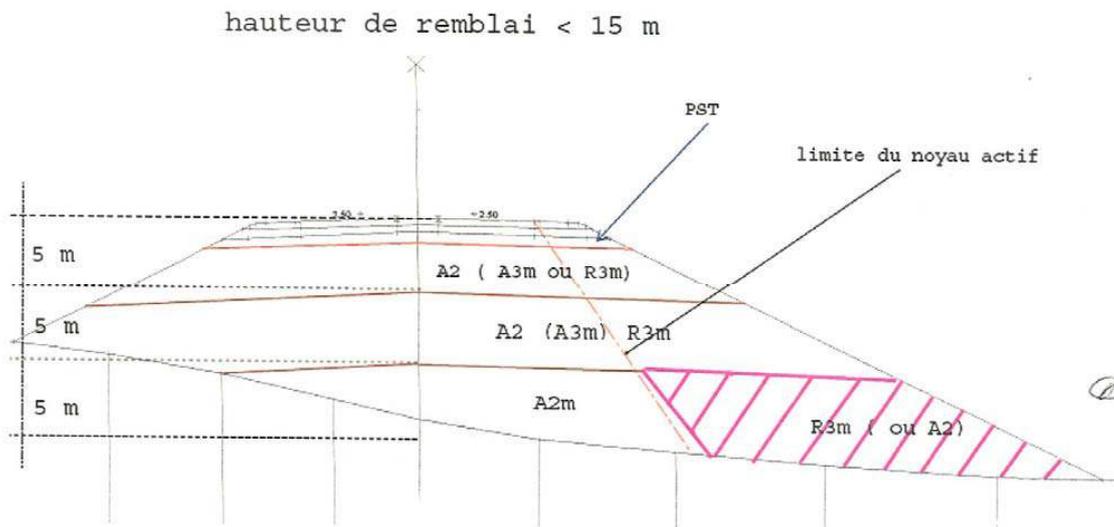


Figure 2 - Schéma de montage d'un remblai de hauteur inférieure à 15 m [1].

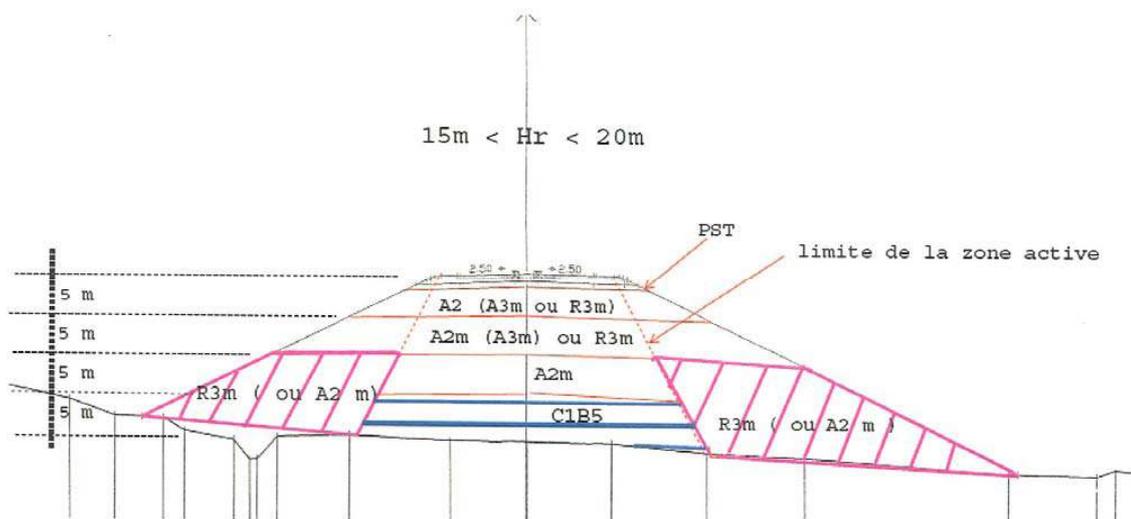


Figure 3 - Schéma de montage d'un remblai de hauteur comprise entre 15 m et 20 m [1].

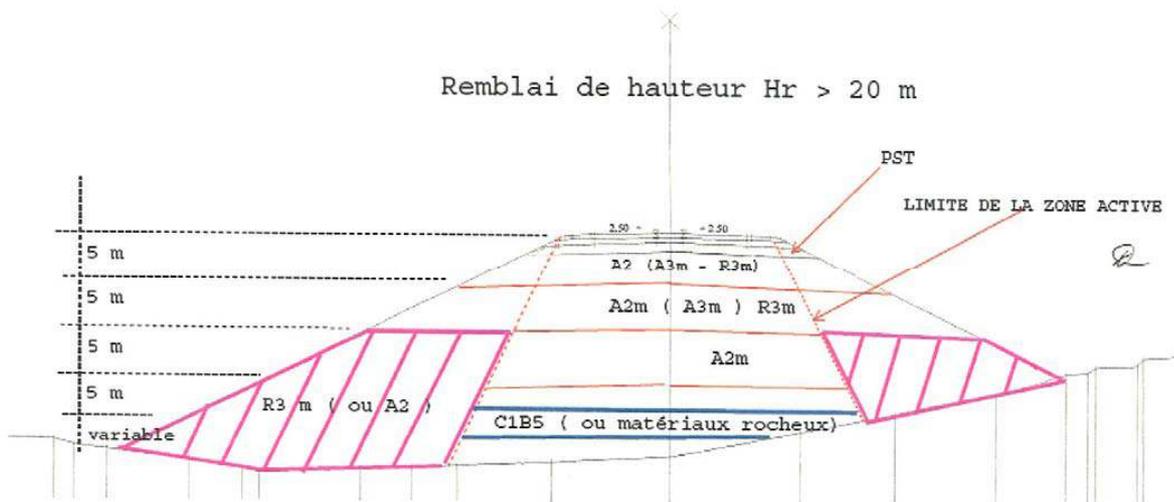


Figure 4 - Schéma de montage d'un remblai de hauteur supérieur à 20 m [1].

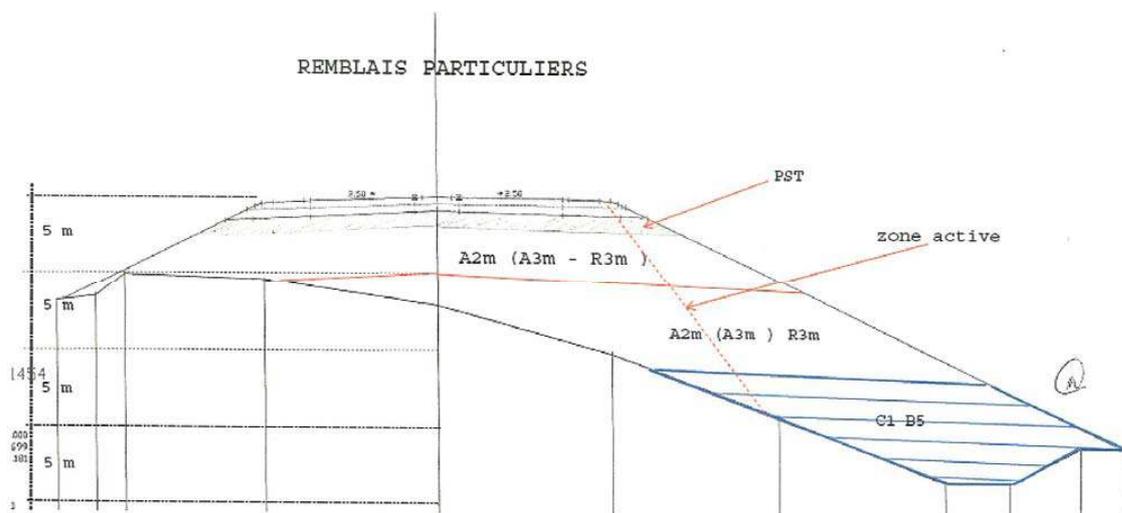


Figure 5 - Schéma de montage d'un remblai sur versant [1]

Ce dernier schéma est le plus fréquent sur le tracé du projet.

Les photos suivantes ont été prise lors du montage des bases de remblai avec noyau actif en matériaux frottant et parties latérales en R31 évoluant vers A3 (IP<30)



Photo 2 – réalisation du BRGH du remblai R35



Photo 3 – réalisation du BRGH du remblai R32

Légende Photos 2 & 3 : le noyau actif est réalisé par un matériau frottant de couleur jaunâtre de classe C1B5, et les bords en matériaux évolutif R31 vers A3 de couleur grisâtre en des couches minces de 30 cm à l'état hydrique moyenne. Etalage avec des boteurs et compactage avec des V5 à pieds dameures.

5. IMPACT DE LA REUTILISATION DES MATERIAUX MARNEUX EVOLUTIFS EN BRGH SUR LE PROJET:

La réutilisation des matériaux de classe R31 évoluant vers A2 ou A3 (avec IP<30) au niveau des bases de remblais de grandes hauteurs a été opérée au niveau de 11 remblais sur un total de 17 remblais de grandes hauteurs.

Les matériaux R31 et A3, ont été pratiquement réutilisés sur l'ensemble des remblais ordinaires de cette section.

Le tableau suivant résume la situation d'utilisation des résultats de l'expertise sur les remblais du tracé :

Tableau 2 - récapitulatif de réutilisation des R3 au niveau des BRGH des remblais.

N° Remblai	Localisation		H max (m)	Volume du remblai (m3)	Volume du BRGH (m3)	La quantité réalisée en R3 (m3)
	PK début	PK fin				
Remblai 14	11+880	12+200	17,00	175.000	95.700	35.500
Remblai 15	12+500	12+900	30,00	635.000	406.000	232.000
Remblai 17	14+820	16+600	25,70	1.142.000	816.000	270.000
Remblai 18	17+700	19+500	18,00	593.000	236.000	80.300
Remblai 30	26+700	27+300	18,90	212.800	151.000	8.100
Remblai 32	27+670	27+920	20,30	154.600	70.200	24.900
Remblai 33	28+260	28+500	29,30	295.400	193.600	86.700
Remblai 34	28+900	29+300	24,30	238.200	112.000	30.200
Remblai 35	29+740	30+250	19,80	324.000	137.200	98.200
Remblai 36	30+550	30+900	17,10	164.200	85.400	30.200
Remblai 39	32+220	32+460	18,00	133.600	82.000	27.500
Echangeur TE			11,00	235.000	156.000	22.700
Total					2.541.100	946.300

Au niveau des remblais ordinaires (hauteur <10 m), les matériaux ont été réutilisés dans les conditions prévues par le cahier des charges.

5.1. L'impact de la réutilisation des R3 sur l'environnement du tracé :

La réutilisation des matériaux évolutifs R3 au niveau des bases de remblais de grandes hauteurs permet d'éviter l'ouverture d'emprunts pour combler le besoin de prêt d'un million de m3 de matériaux ainsi que la mise en dépôt définitif de cette même quantité.

Avec cette disposition, les quantités en matériaux squelettiques (type CiBj) ou A2 de bonne qualité disponibles sur les déblais du projet ont été réservées au noyau actif des BRGH et pour la partie supérieure des terrassements (PST).

L'impact positif de cette disposition concernera également l'économie de quantités supplémentaires de rejet des gaz d'échappement des engins, et qui devaient être mobilisés pour la mise en dépôt et l'extraction de nouveaux matériaux (travaux d'extractions, transports supplémentaires..).

5.2. L'impact financier sur le montant des travaux :

Cette réutilisation permet une économie importante de ressources financières au projet. En effet les quantités de R3 déblayés ont été réutilisées directement dans l'emprise au lieu d'être mises en dépôts définitifs en plus de l'économie des montants de prêt de 1 million de m3 de matériaux à chercher des emprunts, et de la même quantité à mettre en dépôts définitifs.

Selon les prix des contrats de travaux, cette initiative a fait gagner au projet plus de 42.000.000 de dirhams, soit prêt de 4.000.000 d'Euro.

RÉFÉRENCES

1. Rapport d'expertise de Mr G.LE TOUZO d'EGIS_Géotechnique du 23 mars 2009 ;
2. CCTP du contrat n°235/07/S relatif à la construction de la section d'autoroute Oued Amlil – Taza.