

RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'UTILISATION DE PELITES EVOLUTIVES EN REMBLAI : L'AUTOROUTE A89 SECTION 4.3 ET SON CHANTIER EXPERIMENTAL

Stéphan Bernhard
EGIS Route
Direction Technique et de l'Innovation
Stephan.Bernhard@egis.fr

RESUME :

Le tracé de la section 4.3 de l'autoroute A89 entre Terrasson et Brive (Corrèze) traverse une formation rocheuse, les pérites du permien, dont le réemploi en technique routière est habituellement déconseillé en France en raison de leur évolutivité. Ces pérites, dont la réutilisation présentait un enjeu majeur dans l'économie du projet, ont fait l'objet d'une étude spécifique ainsi qu'une expérimentation en vraie grandeur afin d'évaluer leurs possibilités réelles de valorisation. La réalisation d'un remblai expérimental à Gumond ainsi que son suivi pendant une période de 19 mois ont permis de définir les conditions les mieux adaptées pour l'extraction et la mise en œuvre de ce matériau en remblai routier. Ces conditions, reprises dans le marché de travaux, ont été appliquées aux travaux en grande masse ce qui a permis d'une part de satisfaire les exigences d'optimisation du mouvement des terres sur le projet et d'autre part de faire progresser la pratique en matière de réutilisation de matériaux évolutifs.

Le présent article reprend en partie l'article de Bernhard et al. [5] diffusé dans le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°274 (LCPC, janv-mars 2009) et le complète à partir de données de chantier du maître d'œuvre travaux, EGIS Route.

1 CONTEXTE – ENJEUX DU PROJET

Le 11 janvier 2006, Autoroutes du Sud de La France (ASF) a mis en service dans le département de la Corrèze un nouveau tronçon de l'autoroute A89 sur 11 km entre le diffuseur de Mansac-Terrasson et l'échangeur avec l'autoroute A20 au nord de Brive [1].

Le contexte géologique et géotechnique du secteur faisait peser des risques techniques et financiers lourds sur le maître d'ouvrage. En effet, la géométrie des ouvrages en terre, d'une hauteur atteignant fréquemment 15 à 25 mètres, sur un sol à morphologie tourmentée (nombreux profils dissymétriques dus à l'évolution du tracé sur des flancs de vallons nombreux et variés) et les ressources constituées majoritairement de matériaux sensibles et/ou évolutifs imposaient de déroger aux spécifications usuelles. Ceci a conduit ASF à faire appel au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lyon associé à Scetauroute¹, maître d'œuvre de l'opération, pour réaliser un chantier expérimental afin de préciser les spécifications à respecter pour l'exploitation de ces matériaux.

L'objectif de cette expérimentation était de définir les exigences de conception spécifiques destinées à assurer la stabilité et plus particulièrement une déformabilité des ouvrages compatible avec l'usage requis. C'était un enjeu majeur, notamment dans les parties d'ouvrages exposées aux risques d'imbibition : bases de remblai, talus, partie supérieure des terrassements (PST).

Le présent article décrit les caractéristiques géotechniques des pélites rencontrées sur site avant de présenter les conditions de réalisation du chantier expérimental de Gumond ainsi que les résultats du suivi de l'ouvrage. Un chapitre sera ensuite consacré à l'application des enseignements de l'expérience au chantier en vraie grandeur.

2 ÉTUDE PARTICULIERE DES PELITES – JUSTIFICATION DU CHANTIER EXPERIMENTAL

2.1 Données géologiques et géotechniques du projet

L'étude géotechnique de projet de la section Terrasson – Brive a été réalisée par le LRPC de Lyon à la demande de Scetauroute et pour le compte de ASF.

La section autoroutière se situe dans les formations permo-carbonifères du bassin de Brive, constituées de dépôts, de couleur rouge à gris-verdâtre, très variables : grès grossiers solides parfois conglomératiques, grès pélitiques micacés et/ou argileux, pélites argileuses et/ou silteuses, etc... Les dispositions structurales irrégulières paraissent imputables à un affaissement différentiel et à une stratification lenticulaire.

L'étude géotechnique a conclu à la présence majoritaire dans les déblais du tracé d'une formation pélitique compacte à très compacte surmontée de sols sablo-argileux issus de l'altération du rocher en place. Cette formation pélitique représente près de 80 % des ressources en matériaux de cette section de l'autoroute A89, soit 3,4 millions de mètres

¹ Scetauroute est devenu Egis Route en 2007

cubes. Un tiers environ est constitué de matériaux meubles, les deux autres sont des formations rocheuses.

La frange altérée, que l'on appellera « pélites sols » ou « pélites altérées », d'une épaisseur de 1 à 4 mètres, a été identifiée par les caractéristiques géotechniques suivantes (tableau 1) :

Tableau 1 : caractéristiques géotechniques des pélites altérées

Vitesse microsismique (m/s)	1000 – 2000
W_{nat} (%)	8 – 18
Passant à 1,5 μm (%)	7 – 18
Passant à 80 μm (%)	45 – 85
W_L (%)	34 – 49
I_p	13 – 20
VBS	1,7 – 2,8
ρ_{dOPN} (t/m^3)	1,90
W_{OPN} (%)	13

D'après le GTR [2], ces sols sont majoritairement classés A2.

Les pélites indurées ont, quant à elles, été rencontrées sous la forme de deux faciès : le premier argileux, le second gréseux. Les principales caractéristiques relevées lors de la campagne de l'étude projet sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2 : caractéristiques géotechniques des pélites rocheuses

		Pélites argileuses	Pélites gréseuses
		2500 – 3500	2500 – 3500
Matériau naturel	Vitesse microsismique (m/s)	2500 – 3500	2500 – 3500
	ρ (t/m^3)	2,38 – 2,44	2,31 – 2,37
	W_{nat} (%)	3,4 – 5,9	4,2 – 6,5
	ρ_s (t/m^3)	2,63 – 2,64	2,62
	Porosité n	0,08 – 0,09	0,11 – 0,13
	FR (*)	2,2 – 6,8	4,4 – 16,9
	DG (**)	> 100	> 100
Matériau déstructuré suite à l'essai de dégradabilité	W_L (%)	33 – 36	Indéterminable
	I_p	12 – 14	Indéterminable
	VBS	1,60 – 2,10	0,78 – 1,10

(*) FR : coefficient de fragmentabilité (NF P 94-066)

(**) DG : coefficient de dégradabilité (NF P 94-067)

L'ensemble de la formation pélitique non altérée se trouve dans un état quasi saturé et présente une dégradabilité très élevée. Bien que peu différenciables à l'œil, les deux faciès présentent des différences physiques mises en évidence par les essais de laboratoire. On peut ainsi constater que les pélites argileuses se distinguent par :

- une masse volumique supérieure à celle des pélites gréseuses,
- une fragmentabilité moindre.

La différence de granularité entre les deux faciès a également été mise en évidence par l'analyse granulométrique réalisée sur le matériau déstructuré par les cycles de l'essai de dégradabilité (figure 1). Une fois déstructurées, les pélites argileuses ont des caractéristiques similaires à celles de la frange altérée identifiée ci-avant. Les pélites gréseuses déstructurées ont quant à elle une courbe granulométrique plus proche de celle d'un sable.

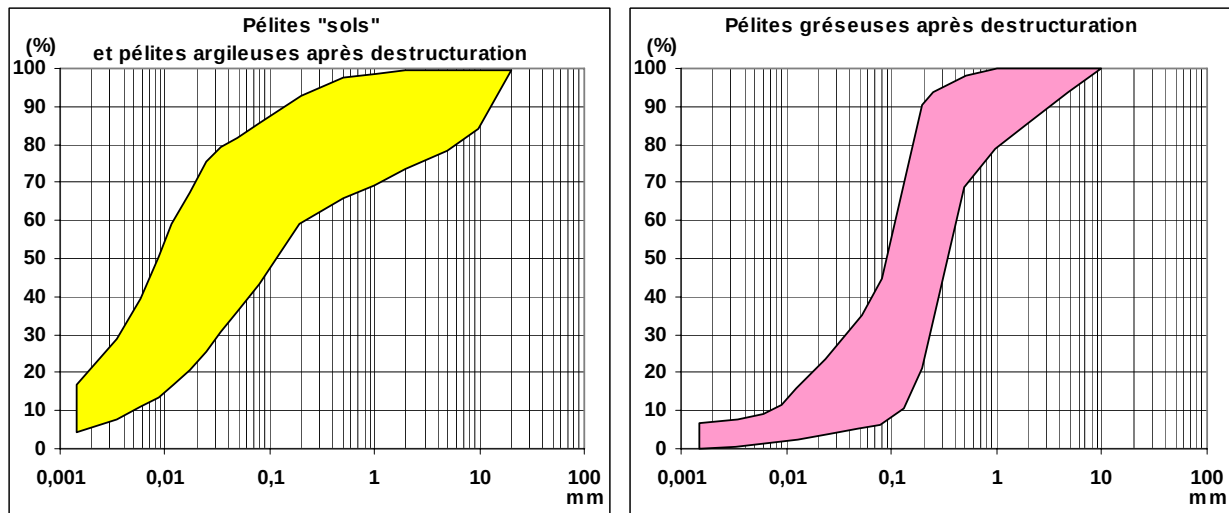


Figure 1 : fuseau granulométrique des pélites rocheuses destructurées après l'essai de dégradabilité

D'après le GTR [2], les pélites argileuses sont classées R31. Il s'agit de matériaux évolutifs peu fragmentables mais fortement dégradables, dont l'utilisation en remblai routier est déconseillée du fait des risques d'évolution granulaire et de comportement à moyen et long terme dus aux charges apportées par le remblai, conjuguées à d'éventuels changements d'état hydrique. Les pélites gréseuses sont, quant à elles, majoritairement classées R34 selon le GTR [2]. Il s'agit de roches évolutives fragmentables, dont la fragmentation et la teneur en eau lors de la mise en œuvre conditionnent les possibilités de réutilisation ainsi que la stabilité des ouvrages à réaliser.

Les pélites indurées constituant l'essentiel des ressources du chantier et compte-tenu du caractère évolutif de ces matériaux, une étude spécifique a été entreprise visant à préciser leur comportement après mise en œuvre dans différents cas d'utilisation :

- en remblai courant avec ou sans imbibition,
- en base de haut remblai sur terrain naturel humide,
- en PST, voire en couche de forme.

2.2 Étude spécifique du comportement des pélites

Deux analyses minérales par diffraction des rayons X sur poudre ont permis d'identifier les principaux composants des pélites, à savoir : quartz, feldspaths, micas et argile. Dans cette étude spécifique, limitée à la zone du chantier expérimental, il n'a pas été décelé de minéraux réputés gonflants, alors que le chantier de l'A89 a mis en évidence de la smectite et de la montmorillonite.

Des tests et mesures en laboratoire ont ensuite été réalisés par le LRPC de Lyon afin de déterminer les caractéristiques géotechniques et géomécaniques des pélites à l'état naturel, après une destructuration provoquée artificiellement (chocs thermiques et hydriques ou actions mécaniques) et pour certaines, après avoir subi un traitement à la chaux vive éventuellement associée à du ciment.

Une attention particulière a été portée sur leur tenue à l'eau, des risques d'imbibition étant possibles après mise en place des pélites dans certains contextes, notamment :

- en base de remblai, au contact d'un sol support très humide, voire avec présence d'une nappe subaffleurante. L'objectif dans ce cas, est d'utiliser des pélites insensibles ou rendues insensibles à l'eau, afin d'éviter la mise en oeuvre systématique d'un tapis drainant en matériau granulaire d'apport extérieur ;
- en PST, lorsque celle-ci est recouverte par une couche de forme granulaire donc particulièrement perméable ;
- en corps de remblai, si ce dernier est situé dans un thalweg ou sur un flanc de versant révélant des résurgences visibles ou potentielles, insuffisamment captées et drainées.

Par ailleurs, les remblais du projet atteignant fréquemment des hauteurs élevées (15 à 25 m) ou présentant un profil en travers dissymétrique ou mixte, il est apparu nécessaire d'améliorer les performances mécaniques des pélites naturelles, en vue :

- d'assurer la stabilité des hauts remblais (améliorer la résistance au cisaillement de leur partie inférieure) ;
- de limiter les déformations différentielles dans le cas des remblais à géométrie transversale variable (acquisition d'une compacité élevée et d'une certaine rigidité globale) ;
- d'obtenir un comportement relativement homogène des PST situées en profil mixte (recherche d'un module élastique proche de celui du matériau en place ou substitution partielle de ce dernier par du remblai).

Pour répondre à ces exigences, une étude particulière a été réalisée à la fois sur les pélites altérées et sur les pélites indurées.

2.2.1 Étude spécifique des pélites altérées

Les investigations ont d'abord consisté à caractériser le comportement du matériau à l'état naturel, puis celui du matériau après traitement à la chaux. Une étude de formulation d'un traitement chaux + ciment a également été réalisée en vue d'une éventuelle réutilisation en couche de forme.

Les essais pratiqués sur le matériau naturel ont confirmé sa sensibilité à l'eau. Son Indice Portant Immédiat (IPI), compris entre 15 et 24, est acceptable lorsque sa teneur en eau w est inférieure à la teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (OPN) w_{OPN} , mais ses propriétés mécaniques chutent notablement lorsque w dépasse w_{OPN} (IPI = 3,4 pour $w = 22,4$ %). Après quatre jours d'imbibition – correspondant ici, à l'état de saturation – l'indice CBR (ICBR) chute de près de 19 points du côté sec ($w = 9,2$ %) de l' OPN et seulement d'à peine 3 points du côté humide ($w = 18,6$ %). Un gonflement significatif est par ailleurs observé sur l'éprouvette "sèche" ($w = 9,2$ %).

Après traitement à la chaux, la portance du matériau est nettement améliorée comme on peut le voir sur la figure 2. La sensibilité à l'eau reste cependant réelle dans le cas d'une imbibition après traitement (figure 3). En effet, le rapport ICBR/IPI est inférieur à 1, ce qui confirme la chute de portance du matériau après immersion.

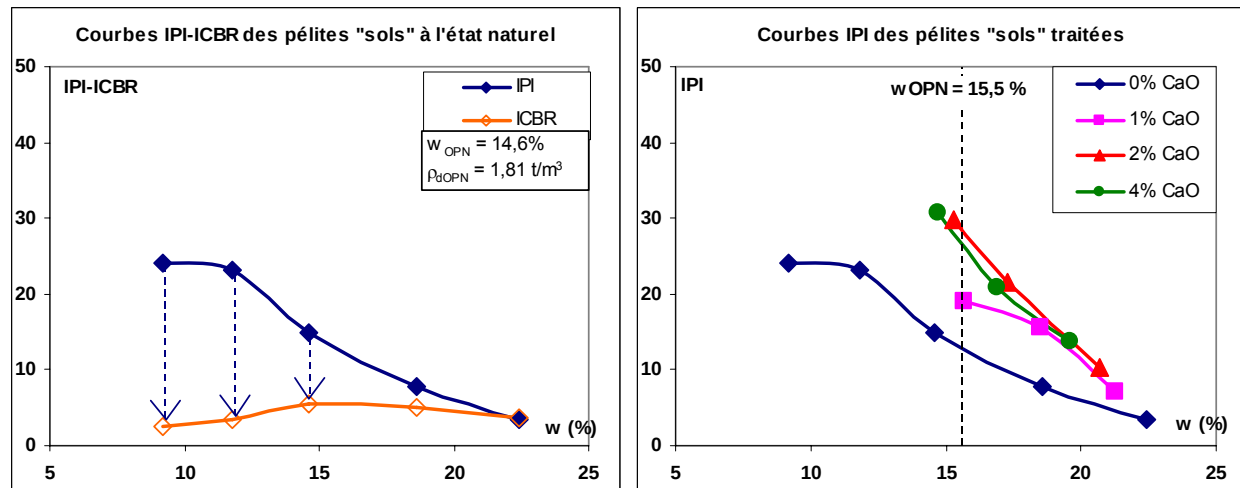


Figure 2 : courbes IPI et ICBR – immersion des pélites altérées à l'état naturel et traitées à la chaux.
Références Proctor Normal du matériau traité à 1 % de chaux vive : $w_{OPN} = 15,5\%$, $\rho_{dOPN} = 1,74 \text{ t/m}^3$

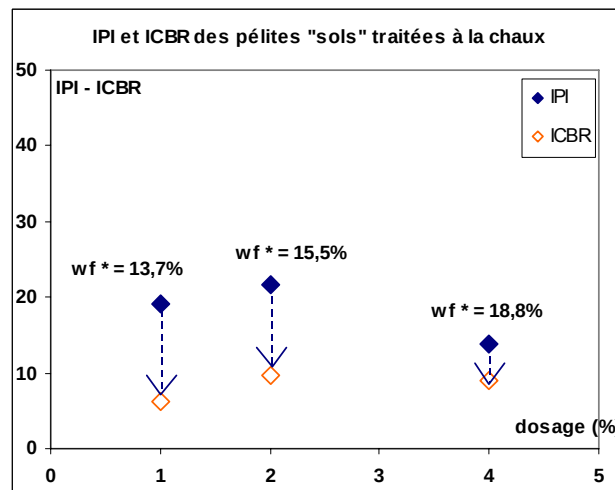


Figure 3 : IPI et ICBR-immersion sur le matériau traité
* wf : teneur en eau après traitement

Des essais de cisaillement à la boîte ont été réalisés sur le matériau remanié et recompacté à une masse volumique sèche proche de celle à l'OPN. Compte-tenu des valeurs mesurées (tableau 3), l'utilisation des pélites altérées naturelles en remblai apparaît problématique et ce malgré l'adoption de pentes de talus de remblai à 2H/1V (soit $\sim 27^\circ$). De plus, ces valeurs peuvent s'avérer légèrement optimistes car elles sont obtenues à partir d'échantillons de sol compactés sensiblement à 100% de la masse volumique sèche à l'OPN alors que la masse volumique sèche réelle moyennement appliquée sur les chantiers correspond à un objectif de compactage q4 (95% de ρ_{dOPN} en moyenne et 92% de ρ_{dOPN} en fond de couche) en remblai et éventuellement q3 (98,5% de ρ_{dOPN} en moyenne et 96% de ρ_{dOPN} en fond de couche) dans des conditions particulières (grands remblais par exemple).

Le traitement à la chaux induit quant à lui une augmentation nette de la résistance au cisaillement du matériau (tableau 3). La mise en saturation du sol traité se traduit par une diminution significative des caractéristiques mécaniques initiales, mais ces dernières demeurent néanmoins élevées (tableau 3).

Tableau 3 : caractéristiques mécaniques des pérites altérées à l'état naturel et traitées à la chaux

Dosage en chaux	ρ_d (t/m ³)	w (%) après traitement	Durée de cure	Durée d'imbibition	w (%) après imbibition	c' (kPa)	ϕ' (°)
État naturel	1,82	15,7	-	sans	15,7	32	23
1%	1,75	14,5	67j	Sans	14,4	282	37
1%	1,74	14,5	67j	31j	21,7	104	24
2%	1,74	14,7	24h	3h	20,6	94	27

2.2.2 Étude spécifique des pérites indurées

La sensibilité à l'eau du matériau a été testée sur le matériau réduit à sa fraction 0/25 mm par fragmentation. Les mesures (figure 4) montrent que, dans les deux cas de figure (pérites argileuses et pérites gréseuses), la portance immédiate se révèle correcte du côté sec de l'OPN et diminue fortement du côté humide. De même, toujours du côté sec de l'OPN, la portance chute notablement après quatre jours d'immersion.

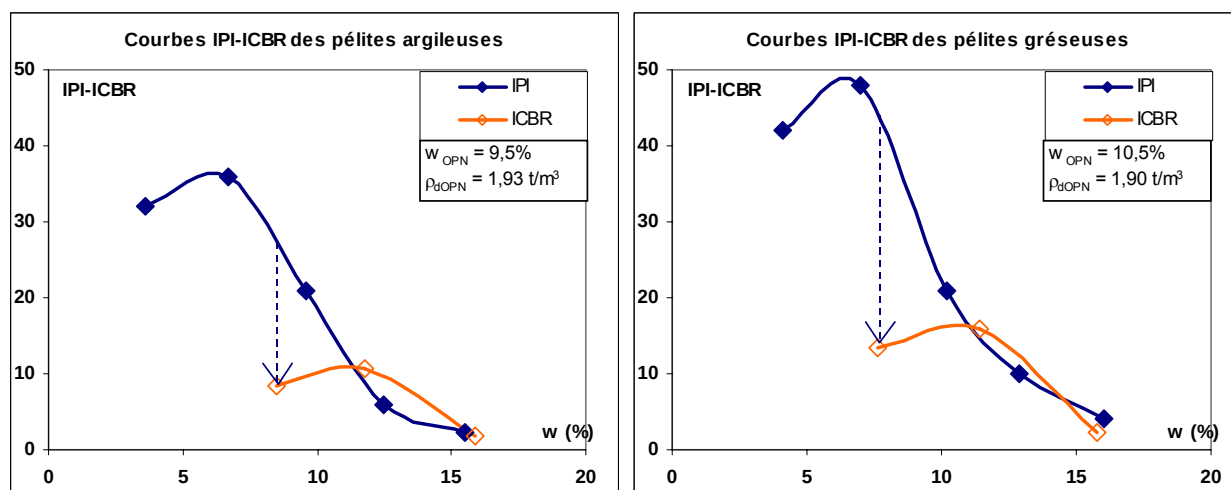


Figure 4 : courbes IPI et ICBR – immersion des pérites indurées réduites en fraction 0/25 mm

Des essais ont également été réalisés afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau. Des échantillons de pérites argileuses indurées intactes, prélevées par carottage et conditionnées en étui étanche pour éviter toute dégradation naturelle, ont fait l'objet d'essais triaxiaux. Les caractéristiques mécaniques élevées correspondent à des valeurs de sols indurés ou roches tendres : $c' = 595$ kPa et $\phi' = 52^\circ$ mesurés en moyenne sur neuf essais. L'évolution finale de ces pérites indurées étant cependant peu prévisible, on a cherché à caractériser ces matériaux dans un état avancé de destructuration, c'est à dire totalement transformés en éléments inférieurs à 1 mm. Cet état physique a été obtenu au moyen d'opérations mécaniques telles que concassage et broyage. Des essais de cisaillement à la boîte ont ensuite été réalisés sur le matériau compacté à une masse volumique sèche proche de celle de l'OPN (tableau 4).

Tableau 4 : caractéristiques mécaniques des pérites évoluées artificiellement

Nature du matériau	ρ_d (t/m ³)	w (%) après compactage	c' (kPa)	ϕ' (°)
Pélite argileuse (réduite en fraction 0/1 mm)	1,82	6,2	21	26
Pélite gréseuse (réduite en fraction 0/1 mm)	1,82	6,8	36	30

2.3 Justification du chantier expérimental de Gumond

Comme vu au paragraphe 2.1, les ressources en matériau du site sont essentiellement constituées de pélites indurées. Ces dernières, malgré leur état quasi-saturé en place, se comportent comme des matériaux dans un état hydrique sec (s) à très sec (ts) après extraction et déstructuration. En effet, ces pélites sont très compactes donc la saturation correspond à une teneur en eau très faible ($3,4 \% < w < 5,9 \%$ pour les pélites argileuses, tableau 2).

Les difficultés liées au compactage des matériaux secs [3] ainsi que celles pour établir des références de compactage fiables pour les matériaux évolutifs [4] militaient donc pour l'acquisition d'une connaissance la plus complète possible de la formation pélitique afin de tenter d'en déduire un mode d'utilisation et d'exploitation économiquement fiable et réaliste.

L'objectif était d'établir un cahier des charges spécifique mentionnant les contraintes d'exécution incontournables ainsi que les objectifs à atteindre. Le respect de ces stipulations rendues contractuelles dans le marché de travaux devant garantir la qualité d'usage de l'ouvrage réalisé.

A ce stade des connaissances et afin de finaliser le projet, il devenait donc impératif de s'assurer en vraie grandeur des moyens et méthodes à mettre en oeuvre pour obtenir les résultats visés.

3 REALISATION DU CHANTIER EXPERIMENTAL

3.1 Conditions de réalisation du chantier expérimental

Les opérations de terrassement du chantier expérimental ont été réalisées de septembre à novembre 2001 sur le site de la future tranchée couverte de Gumond. Les travaux ont consisté d'une part à réaliser un déblai (volume de $35\,000\text{ m}^3$) permettant de vérifier la stabilité des talus à différentes pentes, vérifier leur altération dans le temps et tester plusieurs modes d'extraction. D'autre part, un remblai contigu (volume de $28\,000\text{ m}^3$) a été réalisé avec comme objectif de déterminer les conditions optimales de mise en œuvre des matériaux.

3.2 Extraction des matériaux de déblai

Les matériaux de recouvrement du déblai (pélites « sols »), présents sur une épaisseur moyenne de 1,50 mètre, ont été extraits avec des engins mécaniques traditionnels. Compte-tenu de leur mauvais comportement mécanique après imbibition (figure 4), les sols ont été traités à l'extraction à 1 % de chaux.

Pour les pélites rocheuses, deux techniques d'extraction ont été utilisées :

- la première a consisté à ripper les matériaux (figure 5) à l'aide d'un buteur de forte puissance (modèle Caterpillar D10N, 577 CV). Il s'agit des matériaux fragmentables rencontrés sous la couche d'altération. Ceux-ci ont ensuite été fragmentés par chenillage puis mis en cordon avant une reprise à la pelle hydraulique afin de leur assurer une homogénéité optimale. Le matériau obtenu, de granulométrie 0/300 mm environ, présente

l'avantage de contenir une fraction 0/20 mm suffisante pour permettre une bonne fermeture à la mise en œuvre. Le rendement dans ces conditions est assez variable, de 750 m³/h à faible profondeur à 210 m³/h plus profondément ou dans les zones indurées ;



Figure 5 : extraction des pérites indurées par rippage

- la seconde a consisté à extraire les matériaux les plus indurés par minage, produisant des blocs de taille très importante (2000 à 3000 mm, voir figure 6). Après élimination des gros blocs, le matériau obtenu présente une granulométrie globalement étalée et grossière (granulométrie 0/500 mm à 0/800 mm localement).



Figure 6 : extraction des pérites par minage

3.3 Réalisation du remblai expérimental et dispositions de suivi

Le remblai, d'une longueur d'environ 100 mètres sur une hauteur d'environ 10 mètres, a été réalisé sur une assise en matériaux limono-argileux humides (franchissement d'un thalweg). La pente de talus de ce remblai est de 2H/1V.

Une base drainante d'épaisseur 1 mètre en matériau rocheux calcaire de granularité 0-500 mm a été mise en œuvre sur environ la moitié de la surface du remblai au sol. Sur l'autre moitié, les matériaux d'apport ont directement été mis en œuvre sur le sol support.

Neuf planches ont ainsi été réalisées sur le remblai conformément au tableau 5 présentant les conditions de mise en œuvre et au profil en long schématique de la figure 7.

Les planches 1 à 6, visant à qualifier le comportement des pérites mises en œuvre en remblai courant, ont été compactées avec un objectif de densification q₄. Les planches 1 et

2, constituées de pérites altérées, ont été réalisées pour évaluer l'influence du sol support (terrain naturel humide dans un cas et assise drainante dans l'autre) sur la couche de sol traitée. Les planches 3, 4, 5 et 6, ont été réalisées en pérites rocheuses rippées ou minées et fragmentées et mises en œuvre en couches d'épaisseurs différentes.

Les planches 7, 8 et 9 sont des couches de forme traitées, pour lesquelles différents dosages et énergie de compactage ont été testés.

Tableau 5 : conditions de mise en œuvre des planches d'essai

	Matériaux	Compacteur	Épaisseur de chaque couche	Vitesse	Nombre de passes
Planche 1	Pérites altérées traitées à 1% de chaux, sur le sol support humide	V5	0,50m (état m) 0,30m (état s)	3 km/h	5
Planche 2	Pérites altérées traitées à 1% de chaux, sur la base drainante	V5	0,50m (état m) 0,30m (état s)	3 km/h	5
Planche 3	Pérites rippées, fragmentées	V5	0,30 m	3 km/h	5
Planche 4	Pérites rippées, fragmentées	V5	0,60 m	2 km/h	8
Planche 5	Pérites minées, fragmentées	VP5	0,30 m	3 km/h	5
Planche 6	Pérites minées, fragmentées	V5	0,30 m	3 km/h	5
Planche 7	Pérites rippées, fragmentées traitées à 1% de chaux + 3% de ciment	VP5	0,35 m	3 km/h	3
Planche 8	Pérites rippées, fragmentées traitées à 1% de chaux + 5% de ciment	V5	0,35 m	3 km/h	6
Planche 9	Pérites rippées, fragmentées traitées à 1% de chaux	V5	0,35 m	3 km/h	3

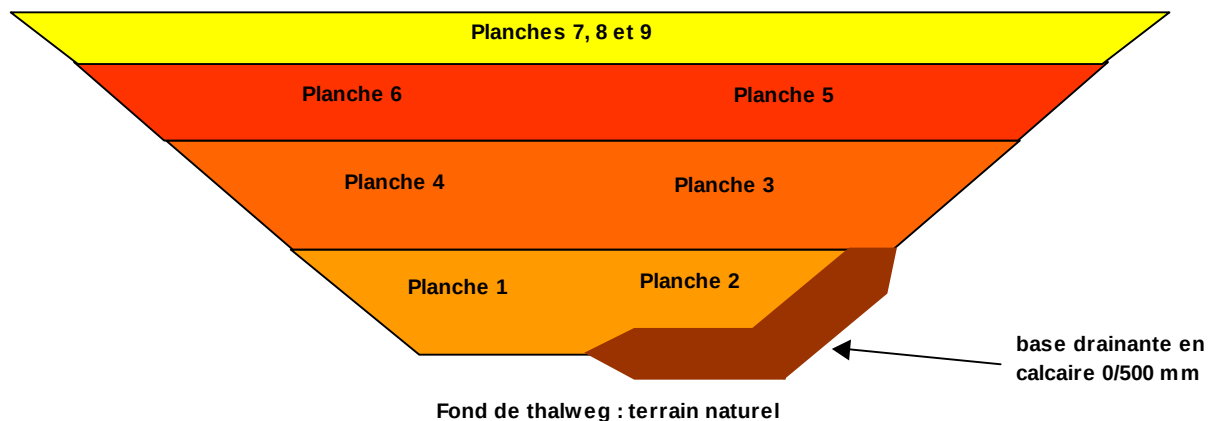


Figure 7 : profil en long schématique de la disposition des planches d'essai

Pendant la montée du remblai, un dispositif de sept tassomètres à plaque (figure 8) a été mis en place pour suivre les tassements des différentes couches et neuf bornes de nivellement ont été placées en surface.

En outre, les reconnaissances suivantes ont été réalisées dans le remblai dès son achèvement :

- quatre sondages destructifs à la tarière de 63 mm complétés d'essais pressiométriques ;
- deux sondages carottés de diamètre 106 mm équipés d'un inclinomètre chacun ;
- des essais en laboratoire sur les carottes : détermination de la masse volumique apparente humide (MVAH) par passage au banc gamma-gamma (§ 4.5.2) et par pesées et mesures dimensionnelles, mesure de la teneur en eau des échantillons.

4 SYNTHÈSE DU SUIVI DE L'OUVRAGE

Le remblai a été suivi pendant une période de dix-neuf mois à compter de son achèvement. Le présent paragraphe dresse les principales conclusions de ce suivi. La figure 8 représente l'implantation des dispositifs de suivi.

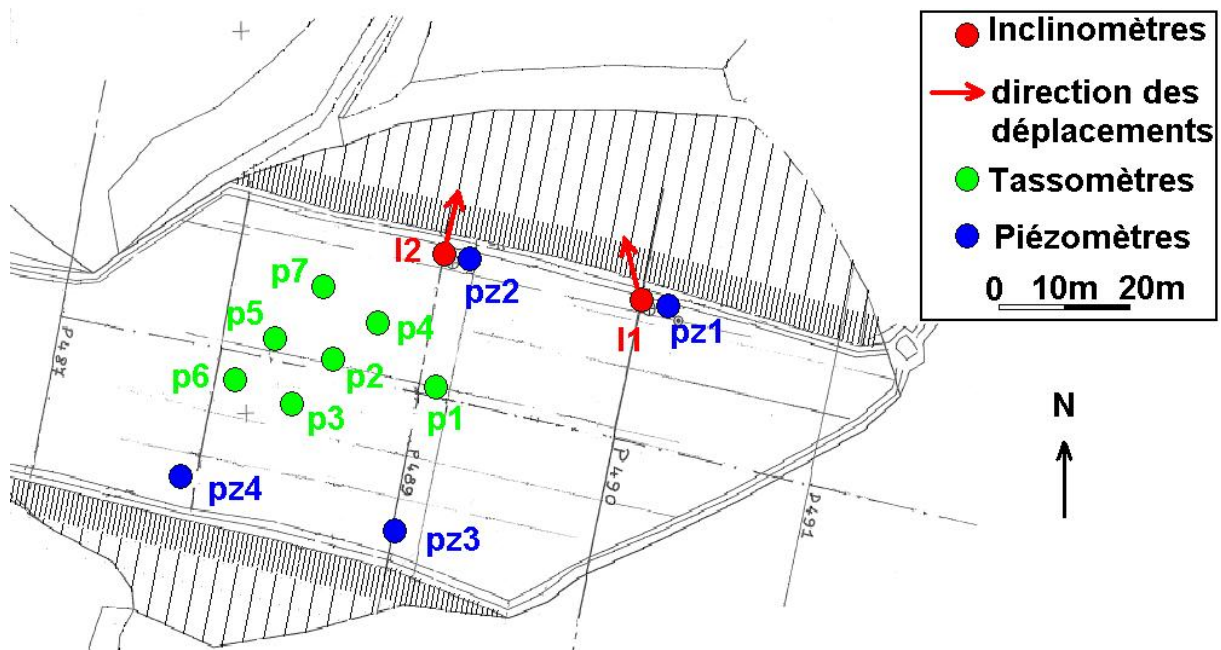


Figure 8 : vue en plan de l'implantation des dispositifs de suivi

4.1 Observations d'ordre général

Après réalisation de ce remblai selon des procédures parfaitement définies et respectées, il n'a pas été constaté de pathologie avérée, même dix-neuf mois après son achèvement. Le seul fait notable résulte d'une visite sur site le 15 mai 2003, lors de laquelle a été constaté l'existence côté aval, d'une forte humidité en base de remblai, localisée sous un horizon nettement marqué situé à moins sept mètres environ de la plate-forme de l'ouvrage. Le contraste d'état hydrique entre ces deux parties du remblai est souligné par la présence d'une végétation hydrophile relativement développée dans la zone humide (figure 9).



Figure 9 : zone humide en base du remblai (15 mai 2003)

Il semble possible d'expliquer ce phénomène soit par la pénétration latérale d'eaux issues des flancs du thalweg dans le remblai comme cité précédemment, soit par l'infiltration par gravité d'eaux météoriques et de ruissellement à partir de la plate-forme et des talus. La pénétration de l'eau est en effet favorisée par la faible pente adoptée pour ces derniers (2H/1V) et l'absence totale de couverture végétale.

Le fort contraste de perméabilité entre les pélites altérées traitées à la chaux mises en oeuvre en partie inférieure du remblai (planches 1 et 2) et les pélites indurées fragmentées mécaniquement (planches 3 et 4, moins riches en fines et donc plus perméables) situées au-dessus, pourrait expliquer la localisation du niveau de transition. On rappelle que les essais de caractérisation en laboratoire ont montré la sensibilité des pélites rocheuses mises en oeuvre à l'état naturel (§ 2.2.2) en cas d'imbibition prolongée d'où une vigilance à avoir vis-à-vis de la stabilité de l'ouvrage à long terme.

4.2 Suivi des déformations horizontales

Les deux inclinomètres implantés en arrière de la crête du talus aval (figure 8), suivis depuis le 15 avril 2002 (six mesures effectuées après le point zéro), montrent une légère tendance du remblai à fluer, notamment au niveau de l'horizon compris entre 4 et 8 à 9 mètres sous le niveau de la plate-forme, soit dans les pélites rippées et minées. Les courbes enregistrées tendent également à montrer que la partie inférieure du remblai, particulièrement la zone en matériaux traités, voire celle en pélites rippées et chenillées, serait relativement stable de même que le sommet du remblai (4 mètres supérieurs) semble peu affecté par les déformations.

Les graphes mettant en évidence l'évolution des déplacements horizontaux en fonction du temps, montrent qu'après une stabilisation du phénomène à l'automne 2002, une réactivation des déplacements se serait produite durant la période hivernale 2002/2003 (figure 10). A noter que la pente des courbes caractérisant ce mouvement général vers l'aval du talus durant cette dernière phase, se trouve très voisine de celle relevée en début d'observations (été 2002).

La dernière mesure en date du 16 juin 2003, met en évidence la poursuite des mouvements horizontaux tout en observant un léger ralentissement. Ce phénomène d'amplitude modérée à cette date (déplacement inférieur à 8 mm) aurait justifié la poursuite des observations et ce, jusqu'à l'atteinte d'une stabilisation jugée définitive. Le dispositif de suivi n'a malheureusement pas pu être conservé pendant les travaux de terrassements (le remblai expérimental a été intégré au corps de remblai de l'A89 dans ce secteur).

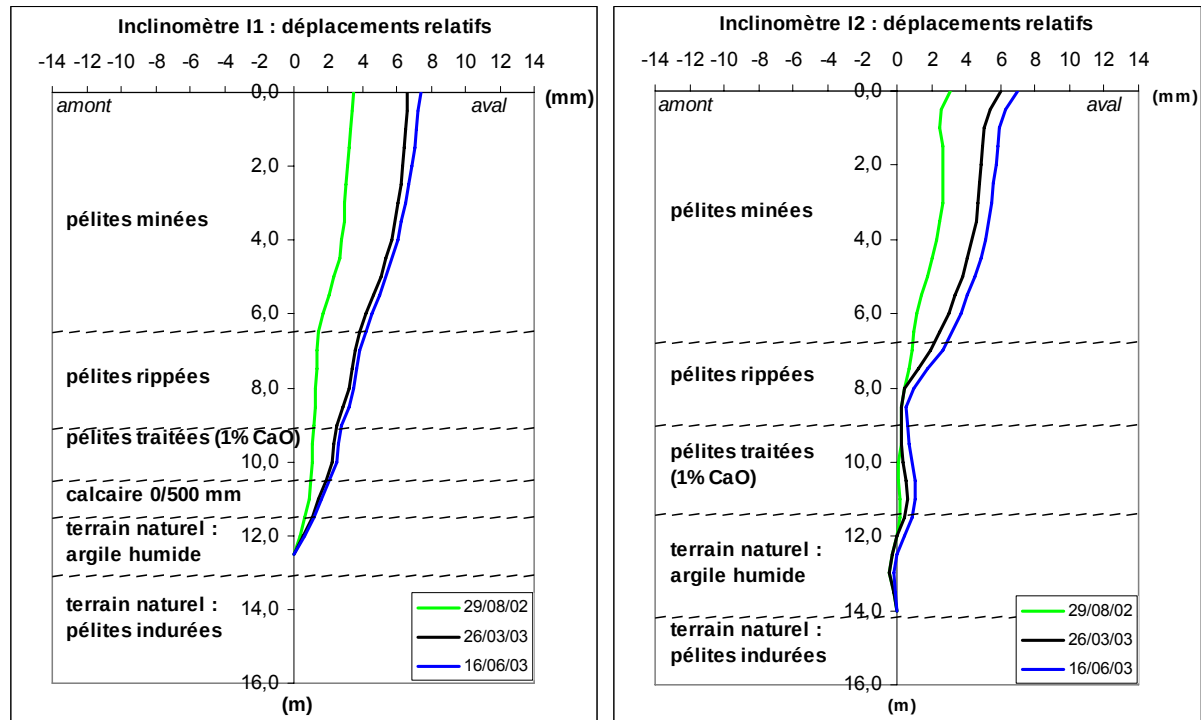


Figure 10 : mesures inclinométriques effectuées entre juin 2002 et juin 2003

4.3 Suivi des niveaux d'eau

Les huit mesures effectuées durant la période d'observation (du 15 avril 2002 au 16 juin 2003) montrent que l'ensemble des niveaux piézométriques fluctue dans une plage de l'ordre du mètre tout en demeurant en dessous ou à la limite de la surface du terrain naturel et qu'exceptionnellement, de l'eau libre règne dans l'un des piézomètres depuis le printemps 2003 alors que celui-ci se trouvait antérieurement totalement sec.

4.4 Suivi des déformations verticales

A la fin de la réalisation de l'ouvrage, les tassements dus à la montée du remblai ont pu être mesurés à partir des tassomètres. Il en ressort que l'ensemble du remblai a tassé de 13 cm dans la zone ayant une base drainante (tassomètre p1) et 15,8 cm dans la zone dépourvue de base drainante (tassomètre p2). Les valeurs citées ci-avant sont des valeurs corrigées par rapport au tassement du sol support. De plus, la couche de base en pélites altérées traitées à la chaux a tassé de 3,0 cm et 6,1 cm d'après les deux mesures réalisées.

L'entreprise titulaire du marché a ensuite procédé au suivi tassométrique et topographique du remblai. D'une manière globale, les déformations verticales observées à partir des tassomètres après achèvement du remblai et durant plus de 16 mois dont deux hivers, se révèlent très limitées (inférieurs à 3 cm). D'autre part, les bornes de nivellement posées et suivies par Scetauroute² de manière concomitante avec les tassomètres, ne présentent pas d'évolutions significatives ce qui confirme la quasi absence de mouvements verticaux après la construction du remblai expérimental.

On retiendra également que, au vu de cette expérimentation (remblai traité posé sur le terrain naturel humide avec et sans matelas drainant), il n'y a pas d'éléments objectifs réels

² Scetauroute est devenu Egis Route en 2007

montrant, vis-à-vis du comportement de l'ouvrage, un avantage manifeste à la réalisation de la base drainante. Néanmoins, il est indéniable que la présence d'une assise de remblai en matériaux granulaires frottants mise à la place d'un terrain naturel fin, humide et peu portant, facilite le compactage de la première couche de pérites.

4.5 Exploitation des sondages carottés

Les deux sondages carottés de 13 et 16 mètres de profondeur, réalisés à partir du sommet du remblai, ont permis de visualiser l'état effectif en place des matériaux rapportés et partiellement, de ceux constituant le sol support (pénétration respective de 1,5 et de 4,5 mètres dans le terrain naturel).

4.5.1 Observations concernant l'opération de carottage et le prélèvement d'échantillons

Au vu des données existantes, on peut émettre les remarques suivantes :

- le remblai a pu être carotté à 100% ce qui est un gage de compacité minimale, de l'existence d'une certaine cohésion et de l'absence de vides de grandes dimensions ;
- le sol support constitué de colluvions limono-argileuses humides a été prélevé à 77% alors que les pérites compactes en place ont été carottées à 100% ;
- la couche drainante en calcaire, du fait de son absence de cohésion, a posé quelques difficultés pour sa traversée et la remontée de quelques éléments grossiers (carottage à 50%).

Néanmoins, la tenue des parois de chaque sondage a été suffisante pour autoriser la pose et le scellement des inclinomètres sans la protection généralisée d'un tubage.

D'une manière globale, les carottes prélevées présentent un aspect "plein" avec existence d'éléments indurés découpés pris dans une matrice silteuse peu compacte. Quelques vides de faible importance ont été observés ponctuellement.

On retrouve ici un phénomène comportemental particulier des matériaux à granularité très contrastée (mélange de sols fins et d'éléments grossiers durs) : lorsqu'ils se trouvent en quantité dominante, au cours du compactage, les éléments grossiers entrent prioritairement en contact entre eux, encaissant ainsi l'essentiel de l'énergie déployée. La fraction fine du matériau ne fait alors que remplir les vides existants sans subir de serrage réel.

Si le squelette est constitué de matériaux durs, insensibles à l'eau et résistant aux contraintes ultérieures apportées par le remblai et donc sans possibilité d'évolution physique notable, le comportement du corps de remblai ne pose pas problème. Par contre, si les éléments grossiers tendent à se fractionner ou à se déliter progressivement (conjugaison de phénomènes de décompression, d'imbibition, de contraintes mécaniques diverses,...) un réarrangement des matériaux est alors possible, accompagné de mouvements d'ampleur variable. Ceci est notamment le cas des pérites indurées où l'on constate la présence de nombreux éléments de type roche tendre englobés dans des sols fins limono-argileux.

La difficulté essentielle réside dans l'obtention, après compactage, d'un produit relativement stable, c'est à dire suffisamment confiné et serré pour ne plus pouvoir changer d'état physique.

4.5.2 Résultats et analyse des mesures réalisées sur carottes

L'exploitation visuelle des carottes ainsi que les mesures au banc gamma sur celles-ci confirment bien la présence de blocs indurés, emballés plus ou moins dans une matrice fine peu compacte (tableau 6). L'existence de vides est également décelée.

Globalement, les pélites compactes extraites par rippage ou par minage et mises en oeuvre de manière identique présentent des masses volumiques sèches relativement homogènes ($2,08 \text{ t/m}^3$ pour les pélites rippées et $2,12 \text{ t/m}^3$ pour les pélites minées), dont l'écart se justifie par une teneur en eau différente à la mise en oeuvre.

Les matériaux traités n'appellent quant à eux pas de remarques particulières. Leur masse volumique apparente humide (MVAH) moyenne est de $1,98 \text{ t/m}^3$.

Tableau 6 : résultats des mesures réalisées sur carottes

Cas concerné	Aspect visuel	MVAH (t/m^3)	Masse volumique sèche ρ_d (t/m^3)	Teneur en eau w (%)
Pélites traitées	Carottage 100% éléments indurés découpés + fines de remplissage	1,87 à 2,02 (moy. 1,98)	1,58 à 1,74 (moy. 1,67)	14,8 à 19,1
Pélites rippées		1,98 à 2,13 (moy. 2,08)	1,81 à 1,94 (moy. 1,87)	9,1 à 9,9
Pélites minées		1,96 à 2,23 (moy. 2,12)	1,73 à 1,97 (moy. 1,87)	13,5 à 16,9
Colluvions	Carottage 77% Sols saturés et peu compacts	1,86 à 1,92	1,44 à 1,53 (moy. 1,48)	23,1 à 29,9
Pélites en place	Carottage 100 % Formation compacte	2,33 à 2,37	1,97 à 2,24 (moy. 2,12)	5,6 à 8,4

4.5.3 Résultats et analyse des mesures géomécaniques en place

Les valeurs notées dans la base du remblai en matériaux traités sont nettement supérieures ($E_M = 70 \text{ MPa}$ – $pl^* = 2,79 \text{ MPa}$) à celles habituellement mesurées dans les sols fins mis en oeuvre à l'état naturel. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus en laboratoire (cohésion triplée entre sol naturel et sol traité).

Pour ce qui est des parties de remblai constituées soit de pélites rippées, soit de pélites minées, les mesures pressiométriques sont très étalées. Néanmoins, globalement, les mesures déterminées caractérisent un remblai de qualité correcte. Seuls quatre essais sur trente trois se distinguent par des valeurs sensiblement plus faibles ($10 < E_M < 17 \text{ MPa}$ et $0,70 < pl^* < 1,20 \text{ MPa}$). Les autres résultats correspondent à un remblai relativement compact et rigide, tous modes d'exécution confondus ($20 < E_M < 50 \text{ MPa}$ et $1,30 < pl^* < 2,40 \text{ MPa}$).

Pour ce qui est du sol support, il y a lieu de distinguer le cas des dépôts de sols fins très humides (ou produits d'altération) concentrés en fond de thalweg et celui des matériaux en place normalement consolidés et peu altérés.

Pour les colluvions comprimées par la charge du remblai, on a mesuré : $2 < E_M < 11 \text{ MPa}$, $0,34 < pl^* < 0,94 \text{ MPa}$ et $5,9 < E_M/pl^* < 11,8$. Ces valeurs confirment bien le caractère déformable de ces sols, décelé dans les échantillons carottés.

Pour les pélites compactes non remaniées, on a mesuré : $52 < E_M < 61 \text{ MPa}$, $5,83 < pl^* < 6,41 \text{ MPa}$ et $8,1 < E_M/pl^* < 10,5$. Ces chiffres reflètent l'état de matériaux indurés tels qu'on les rencontre couramment dans les déblais avant déconfinement.

4.6 Conclusions sur le suivi du remblai expérimental

A partir de l'exploitation de l'ensemble de ces données du suivi de l'ouvrage, on peut conclure que, dans la mesure du respect des règles établies concernant la mise en œuvre des pérites compactes, l'emploi en remblai de ces dernières est possible tant sur le plan technique qu'économique. En effet, les caractéristiques mécaniques relevées dans le corps de remblai correspondent à celles normalement observées dans ce type d'ouvrage et il n'a pas été observé de tassements significatifs du corps de remblai après exécution. Par contre, le suivi des inclinomètres a révélé un sensible mouvement de fluage d'une partie du remblai vers l'aval du talus, non stabilisé lors du dernier relevé. L'absence d'éléments de comparaison ne permet pas de conclure si un tel phénomène est habituel pour tout remblai de géométrie équivalente ou non.

De plus, hormis l'aide au compactage de la première couche, la mise en place d'une base drainante en matériaux granulaires ne semble pas indispensable dans le présent contexte. La mise en place d'une couche de pérites altérées traitées à la chaux en base de remblai permet de protéger les pérites sus-jacentes sensibles à l'eau vis-à-vis d'éventuelles remontées capillaires du terrain naturel très humide. Une attention particulière doit cependant être apportée vis à vis du risque d'imbibition du remblai consécutif aux eaux météoriques, de ruissellement ou d'infiltration. En effet, les pérites fragmentées peuvent demeurer perméables après mise en œuvre et de l'eau peut se stocker en leur sein.

Ainsi, à partir de l'expérimentation réalisée à l'échelle d'un chantier de terrassement et du suivi du comportement de l'ouvrage-test dans le temps (19 mois), l'usage des matériaux pélitiques a été admis dans le cadre des travaux relatifs à la section autoroutière concernée.

5 APPLICATIONS AU CHANTIER EN VRAIE GRANDEUR

5.1 Recommandations issues du chantier expérimental

Sur la base des résultats du chantier expérimental et du suivi du remblai durant 19 mois dont deux hivers, des préconisations particulières d'exécution ont pu être établies.

Ces dernières, dont l'application stricte est censée garantir la qualité des ouvrages futurs, ont été reprises et incluses dans les différents documents relatifs au projet tels que l'avant-projet autoroutier (APA), le dossier de consultation des entreprises (DCE), le marché et le plan d'assurance qualité (PAQ). Les principales sujétions complémentaires aux règles d'exploitation habituellement appliquées concernent les points suivants :

- après minage, tri et évacuation de tous les éléments blocailleux de grande dimension ($D > 600$ mm) sans distinction de classes ;
- mise en œuvre des matériaux pélitiques restants en couches minces de 30 cm d'épaisseur maximale, avec fragmentation préalable des éléments présentant une dimension supérieure à 300 mm. À noter que, d'après le GTR [2], la dimension des plus gros éléments ne doit pas dépasser les deux tiers de l'épaisseur de la couche compactée. La diminution de l'épaisseur des couches, contraire à la règle des deux tiers, a été motivée pour favoriser la fragmentation des éléments rocheux lors du compactage ;
- poursuite de l'opération de réduction de sorte à obtenir la granulométrie visée (passant à 20 mm constituant plus de 50% de la masse totale du matériau) ;
- application d'une énergie de compactage équivalente à celle imposée en couche de forme (objectif de densification q_3), pour réduire le risque d'évolution du matériau ;

- humidification des pérites de manière à les amener dans un état hydrique dit "moyen" ;
- protection du remblai contre l'imbibition et le risque de saturation à partir des eaux tant météoriques (percolation) qu'en provenance de remontées capillaires, résurgences diverses, nappes superficielles...

Scetauroute³ a ainsi intégré au CCTP les prescriptions particulières suivantes (tableau 7 et [1]) :

Tableau 7 : conditions de réemploi retenues pour les pérites [1]

Réutilisation	Traitement	Objectifs		
		Teneur en eau	Granulométrie	Compactage
Remblai courant à l'état naturel	Aucun	0,9 W _{OPN}	D max < 250 mm 0/20 = 50%	q3, couches minces (0,30m)
Remblai nécessitant une insensibilisation à l'eau	1% CaO	W _{OPN}	D max < 200 mm 0/20 = 60%	q3, couches minces (0,30m)
PST	1% CaO	W _{OPN}	D max < 100 mm	q3 EV 2 > 40 MPa

5.2 Application au chantier

5.2.1 Préparation du chantier

Le chantier de cette section d'A89 nécessite des moyens importants du fait de l'importance des quantités de déblais à exploiter. L'entreprise attributaire du marché a ainsi mobilisé 7 échelons de pelles de 50 à 75 tonnes accompagnées de tombereaux rigides ou articulés pour extraire les matériaux péritiques. Un échelon de décapeuses a également été mis en œuvre pour l'extraction des matériaux meubles de surface.

La reconnaissance géotechnique complémentaire menée par l'entrepreneur avant le démarrage du chantier en grande masse a permis de confirmer globalement les caractéristiques des matériaux péritiques relevées lors de l'étude de projet (tableau 8).

Tableau 8 : résultats de la reconnaissance géotechnique de l'entreprise [1]

Pérites	Classification GTR			
	A1/A2 ts à th	B5/B6 ts à th	R34/C1A1 s à ts	R31 s à ts
Dmax (mm)	20	20		
< 20 mm (%)	100	100		
Wnat	6,6 - 21,3	7 - 20	4,4 - 14,1	3,4 - 8,3
IP	< 23	< 14		
VBS	0,48 - 2,79	0,48 - 2,4	0,59	
pd (t/m3)			1,99 - 2,45	2,3 - 2,5
pd OPN (t/m3)	1,7 - 2		1,9	1,98
WOPN (%)	9,7 - 16,7		12	10,9
FR			> 22	2,2 - 6,8
DG			> 100	> 100

La réalisation de planches de convenance a permis de confirmer les résultats issus du chantier expérimental de Gumond mais aussi de tester les moyens prévus par l'entrepreneur en relation notamment avec les objectifs de fragmentation, d'humidification et de compactage dont le respect est nécessaire à la pérennité des ouvrages et de mettre en place les grilles de décision et le plan de contrôle.

³ Scetauroute est devenu Egis Route en 2007

Le chantier de cette section d'A89 requiert ainsi pour un seul et même matériau la plupart des techniques utilisées en terrassement : minage, drainage, fragmentation, humidification, traitement, compactage.

5.2.2 Conditions de mise en œuvre en vraie grandeur

Le suivi d'exécution et les contrôles dressés en cours de chantier de terrassements ont montré que les consignes contractuelles ont globalement bien été appréhendées et respectées par l'entreprise titulaire du marché. Il est vrai que cette dernière, ayant réalisé le chantier expérimental, se trouvait bien informée des difficultés présentes.

A partir de ces informations, les remarques ou observations suivantes ont pu être émises :

- les matériaux les plus problématiques pour leur réutilisation, à savoir les R31, c'est à dire ceux que le GTR proscriit si ce n'est à prendre des risques importants, n'ont pas été réutilisés isolément en remblai du fait de l'impossibilité de les fragmenter dans des conditions technico-économiques correctes avec les moyens et méthodes appliqués sur le chantier et de l'existence d'un mouvement des terres excédentaire ne rendant pas leur réutilisation impérative ;
- après minage et évacuation des gros éléments ($D > 600$ mm), la fraction exploitable a été directement mise en remblai. A ce stade, les opérations de chenillage/labourage ont permis de réduire la taille des plus gros éléments et corriger la granulométrie du matériau dans la mesure où les pérites R34 étaient majoritairement présentes ;
- le suivi du chantier a permis de montrer une variation non négligeable des références OPN même au sein d'un même déblai. Une corrélation a toutefois pu être déterminée [1] sur ce chantier précis entre la VBS, ρ_{dOPN} et w_{OPN} , ce qui a permis de définir régulièrement les besoins en eau et vérifier la densité obtenue après compactage ;
- la nature grossière des matériaux utilisés (type roches tendres) conjuguée au caractère évolutif de ces derniers, ne permet pas l'établissement de références OPN fiables, limitant ainsi les possibilités de suivi de compactage à partir de mesures de densité en place. En effet, la masse volumique sèche à l'OPN déterminée en laboratoire sur la fraction 0-20 mm du matériau n'est pas extrapolable à celle de la granulométrie complète.

Par ailleurs, il n'existe que peu de méthodes permettant de s'assurer de la densification correcte d'un ouvrage en terre. Seule l'usage de la double sonde gamma offre cette possibilité mais, comme vu précédemment, se heurte pour l'interprétation des mesures de densité à l'absence de référence établie. Il découle de ce constat que le moyen le plus fiable pour une mise en place correcte des matériaux de remblai consiste à s'assurer du respect permanent des prescriptions contractuelles ou déduites des règles de l'art, ou fondées sur l'expérimentation in situ (chantier expérimental et planches de convenance).

Ainsi, il y a lieu de vérifier :

- la bonne adéquation entre le matériel proposé et le cas de chantier réel (performances et dimensionnement) ;
- l'application effective et sans dérive des procédures de mise en œuvre et de contrôle validées lors des épreuves de convenance ;
- la quantité d'énergie de compactage dépensée par unité de volume de remblai mise en place (application de la méthode de suivi dite "en continu" ou Q/S).

En corollaire à l'impossibilité d'établir et d'exploiter toute référence OPN [4], l'état hydrique des pérites ne peut être calé sur w_{OPN} . C'est pourquoi on préconisera d'établir la classe d'état

(ts à th) à partir d'un essai de comportement réalisé sur la fraction 0/20 mm du matériau, à savoir la mesure de l'IPI. Pour les matériaux les plus grossiers il s'agit d'une valeur par défaut, le comportement d'ensemble étant déterminé sur site au vu du résultat d'essais ou tests de chantier (sondages, déformations visuelles,...).

6 CONCLUSIONS

La réalisation du remblai expérimental de Gumond ainsi que son suivi pendant 19 mois ont permis de définir des conditions particulières pour la réutilisation des pélites, reprises dans le marché de travaux. Il s'agit notamment d'effectuer une fragmentation poussée des éléments indurés et de maîtriser les conditions de mise en œuvre : granularité et teneur en eau de mise en œuvre imposés, mise en œuvre en couches minces et densification de type couche de forme. Lors des travaux en grande masse, le contexte géologique s'est révélé plus favorable que prévu, ce qui a permis de réduire l'utilisation des pélites indurées au profit de pélites plus fragmentables. Les recommandations de mise en œuvre ont tout de même été appliquées pour les pélites fragmentables, ce qui a permis de répondre de manière satisfaisante à l'objectif de réutilisation optimale des matériaux fixé par le maître d'ouvrage.

Dans le cas où la nécessité absolue de réemployer des matériaux de classe R31 se présenterait, il semble impératif de s'orienter vers une élaboration mécanique de ces derniers (concassage ou criblage) pour obtenir de manière garantie la réduction granulaire visée (0/250 mm, par exemple). La relative fragilité de ce type de matériau laisse escompter un concassage à grand rendement, sans fatigue ni usure particulière du matériel dans le cas présent. En ce qui concerne la mise en œuvre de ces matériaux ainsi élaborés mais qui demeurent néanmoins évolutifs, on préconisera d'appliquer les mêmes exigences que celles retenues sur le chantier actuel. Compte tenu de l'incertitude concernant l'évolution des pélites mises en remblai et ce, malgré les différentes précautions prises dans l'élaboration de ces ouvrages, il serait judicieux de réaliser pour les plus représentatifs d'entre eux, un suivi géométrique à long terme. Ceci suppose la mise en place d'une instrumentation adaptée accompagnée d'un plan de surveillance et de contrôle ainsi que la réalisation d'un point zéro dès l'achèvement de l'ouvrage.

Bibliographie :

- [1] LEJEUNE J.-P., Autoroute A89 La section Terrasson – Brive Nord, *Travaux*, juillet-août **2000**, pp.51-58.
- [2] Ministère de l'Équipement et des Transports, *Guide Technique - Réalisation des remblais et des couches de forme*, LCPC-SETRA, **2000**, Fascicule I (98 pages) et Fascicule II (102 pages).
- [3] ISTED, *Le savoir-faire français en matière de compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux de terrassements et chaussées*, Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement, **1987**, 44 pages.
- [4] PUECH J.-P., Géotechnique et projets de terrassements autoroutiers, *Travaux*, juillet-août **1989**, pp.7-17.
- [5] BERNHARD S., BIMBARD J., LEJEUNE J.-P., Réutilisation de pérites évolutives en remblai : un chantier expérimental sur l'autoroute A89, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, janv-mars **2009**, pp. 47-62