

Construction d'un remblai routier expérimental en résidus de bauxite

A. MOURATIDIS

Université Aristote
de Thessalonique
54124 Thessalonique, Grèce
tasos@hermes.civil.auth.gr

Résumé

Les résidus de bauxite, souvent appelés « boue rouge », constituent un sous-produit industriel issu du traitement de la bauxite en vue de la production d'alumine. Dans le cadre d'un programme-pilote pour la valorisation de ces résidus comme matériau de remblais, le laboratoire des Routes de l'université de Thessalonique a réalisé des études sur leur comportement géotechnique. Ces études ont abouti à retenir deux formules : une formule dite « A » constituée par le mélange de résidus de bauxite avec un sol du groupe A-1 (classification AASHTO) et une formule dite « B » constituée par le matériau originel traité aux cendres volantes. Un remblai routier expérimental a permis de tester en vraie grandeur leurs performances. Ce remblai a supporté des charges importantes pouvant atteindre un trafic de 30-50 poids lourds par jour, et n'a pas manifesté, jusqu'à présent, de signes significatifs de déformation. Ce projet a permis de vérifier avec succès la capacité de réutilisation des résidus de bauxite en tant que matériaux de remblais.

Mots-clés : résidus de bauxite, remblai, construction, route, matériau, trafic, terrassements.

Construction of an experimental highway embankment by bauxite residues

Abstract

Bauxite residues, often called "red mud", constitute a by-product of bauxite processing for the production of alumina. Within the frame of an experimental research for the utilization of bauxite residues as a road embankment material, the Highway Engineering Laboratory of the University of Thessaloniki has performed studies on their geotechnical performance. These studies led to two potential formulas to apply on site: the first one, called "A" consists of a mixture of bauxite residues and a soil A-1 (classification AASHTO), the second comprises the material in its original condition treated by fly-ash. This earth structure, subjected to heavy loading, corresponding to 30-50 trucks daily, has not exhibited any signs of distress or deformation. The pilot-project, meant to provide evidence of potential use of bauxite residues as a road embankment material, was proven by its performance assessment to be successful and promising.

Key words: bauxite residues, embankment, construction, road, material, traffic, earthwork.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 novembre 2009.

Introduction

Les résidus de bauxite, souvent appelés « boue rouge », sont générés suivant le procédé industriel du traitement de la bauxite en vue de la production de l'alumine. En Boétie, l'usine d'« Aluminium de Grèce » produit environ 700 000 tonnes de résidus de bauxite par an, dont une grande partie est amenée par pompage et dispersée, sous forme liquide, en mer. En effet, tous les pays gros producteurs de résidus de bauxite (États-Unis, Australie, Japon, Inde) suivent la pratique de « disposition » ou de « rejet » plutôt que celle du recyclage malgré la sensibilisation générale pour les problèmes d'environnement.

Que ce soit dans la métallurgie ou dans l'industrie des matériaux de construction, la quantité totale recyclée reste jusqu'à présent très limitée, voire infime. Cette constatation s'explique par le coût du transport du sous-produit jusqu'à un site de recyclage ou de réutilisation et aux difficultés pratiques que pose son utilisation. Il est également vrai que le comportement de ce matériau demeure de nos jours mal connu.

Les principaux domaines de valorisation des résidus de bauxite sont actuellement la production de ciments colorés, la fabrication de briques et de tuiles, le confinement de déchets toxiques, l'extraction d'éléments minéraux. Les applications en construction routière occupent une place secondaire ; les cas réels d'application du sous-produit à un projet routier sont rares. Un premier projet-pilote d'utilisation de résidus de bauxite en technique routière a été réalisé par le laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Aix-en-Provence à Bramefan (1995). Il s'agissait d'une construction de remblai en résidus de bauxite, stabilisés par cendre volante, d'une longueur de 300 m et d'une hauteur de 1 m (LRPC d'Aix-en-Provence, 1997).

La valorisation dans le domaine des travaux routiers semble prometteuse, car cette activité présente l'avantage de pouvoir absorber de grandes quantités de matériaux, comparée aux autres domaines de valorisation (Jitsangiam *et al.*, 2008). Étant donné que l'objectif des opérations de recyclage est d'introduire des produits secondaires aux ouvrages techniques à un taux de volume de réutilisation élevé, la construction routière constitue ainsi un enjeu d'application majeur. Pour favoriser l'utilisation de ces résidus, des recherches en laboratoire et en conditions de chantier sont nécessaires.

TABLEAU I Composition chimique des résidus de bauxite.
Chemical composition of bauxite residues.

Constituant (%)	ALG Grèce	Reynolds États-Unis	Gargano Italie	Pechiney France	Oradea Roumanie
Al ₂ O ₃	15	15	12	15	21
Fe ₂ O ₃	51	55	46	30	40
SiO ₂	10	5	12	7	10
TiO ₂	5	5	7	12	5
CaO	13	8	1	—	5
Na ₂ O	2	2	7	—	9
Divers	4	10	—	—	10

Recherches en laboratoire

À l'université de Thessalonique, le laboratoire des Routes a entrepris un premier projet de recherche sur les résidus de bauxite en 1993. Ce projet consistait à déterminer les propriétés du sous-produit industriel en laboratoire ainsi que ses effets de stabilisation sur différents types de sol dans la perspective d'une réutilisation dans différents domaines de la construction d'ouvrages en terre : remblais, barrages, barrières étanches de confinement de déchets toxiques.

Les résidus de bauxite de l'usine d'« Aluminium de Grèce » sont similaires, de par leur composition chimique, à ceux des États-Unis, contenant un pourcentage élevé d'oxyde ferrique (Tableau I). Des essais d'alcalinité ont donné une valeur moyenne de pH = 11.

Quant aux propriétés physiques du matériau, l'analyse en laboratoire a fourni des caractéristiques d'un silt non plastique. Les valeurs de la limite de liquidité variaient de 35 à 39. Sur un nombre limité d'essais, la limite de plasticité a pu être déterminée, $w_p = 33-35$, ce qui conduirait à un indice de plasticité $I_p = 4$. Pourtant, sur la majorité des essais, la limite de plasticité n'a pu être déterminée et le matériau a été considéré comme non plastique (Tableau II).

Ces essais de laboratoire sur des mélanges « sol-résidus de bauxite » ont mis en évidence certaines propriétés intéressantes et bénéfiques du matériau : l'indice de portance CBR augmentait sensiblement, de 12 à 34, pour un sol semi-grenu (A-2-7) à la présence de résidus de bauxite et la résistance en compression simple passait de 0,7 à 5,5 kg/cm² pour un matériau grenu (A-1) de faible plasticité (Mouratidis et Tsohos, 2002).

L'évaluation des résultats des essais, jugés positifs et prometteurs, a donné lieu, quelques années plus tard, à une deuxième étape de recherche en laboratoire (2001-2003) en vue de la construction expérimentale d'un remblai routier.

TABLEAU II Propriétés physiques des résidus de bauxite.
Physical properties of bauxite residues.

Granulométrie	Limites d'Atterberg	Masse spécifique
Passant No. 200 (0,074 mm) = 80-100 %	$W_L = 35-39$ $I_p = 0$ (NP)	$\gamma_s = 3,4-3,9$ t/m ³

Durant cette deuxième étape de recherche, un grand nombre de sols naturels ont été examinés et évalués en laboratoire, notamment des sols non cohérents A-1, A-2 et un « sol-type » semi-fin A-4. Par ailleurs, des essais de laboratoire ont mis en évidence des effets favorables sur la déformabilité et la plasticité des sols cohérents (A-4 et A-6).

Des mélanges de ces sols et de résidus de bauxite ont constitué la base de l'analyse en laboratoire et de l'applicabilité en construction routière de ce matériau secondaire.

Les analyses en laboratoire ont conduit aux conclusions suivantes. En présence de résidus de bauxite :

- les matériaux grenus montrent un accroissement de leur cohésion et de leur résistance au cisaillement ;
- les sols fins deviennent moins plastiques et plus résistants.

Suite à une longue période de recherche en laboratoire sur des échantillons de mélanges « sols-résidus de bauxite », deux formules ont été finalement retenues : un mélange de sol A-1 et de résidus de bauxite en proportion 60/40 (%) à cause du volume important du sous-produit absorbé (formule A) et une formule (B) de résidus de bauxite, en état originel, nécessitant un taux de 4 % de cendre volante pour améliorer la maniabilité et réduire l'humidité. En plus, il a été démontré que la présence de cendre volante contribuait à la génération d'une cohésion (Mouratidis, 2004) ; ce phénomène est essentiel pour l'emploi du sous-produit en construction de remblais routiers. Cette deuxième formule pouvait comporter un certain risque, mais elle a été jugée susceptible de mettre en évidence toute l'ampleur des applications possibles du matériau. Les valeurs optimales du dosage en résidus de bauxite ont été choisies par rapport à la valeur maximale de la densité sèche γ_d (Fig. 1), obtenue au cours des essais en laboratoire. Par ailleurs, il était clair que les caractéristiques mécaniques ne poseraient pratiquement aucun problème à la stabilité de l'ouvrage en terre projeté.

Une troisième formule (C) d'un sol représentatif A-4, en état pur, a été également retenue pour servir de base d'évaluation de l'expérience-pilote.

Des essais de compression simple sur un mélange d'un sol grenu (A-1) et d'un sol cohérent (A-4) ont montré l'action de type « liant hydraulique » des résidus de bauxite (Fig. 2). Des valeurs importantes de résistance en compression simple ont été enregistrées lors des essais sur des éprouvettes de 7 et 14 jours (Tableau III).

Les résultats des essais CBR sur des échantillons constitués de mélanges réalisés selon les formules retenues sont donnés dans le tableau III. Des essais de cisaillement à la boîte ont également été réalisés afin de fournir les données nécessaires aux calculs de stabilité du remblai.

Les valeurs des caractéristiques de cisaillement de tous les matériaux se sont révélées assez élevées et, par conséquent, aucun problème de stabilité ne semblait se poser a priori pour la construction du remblai.

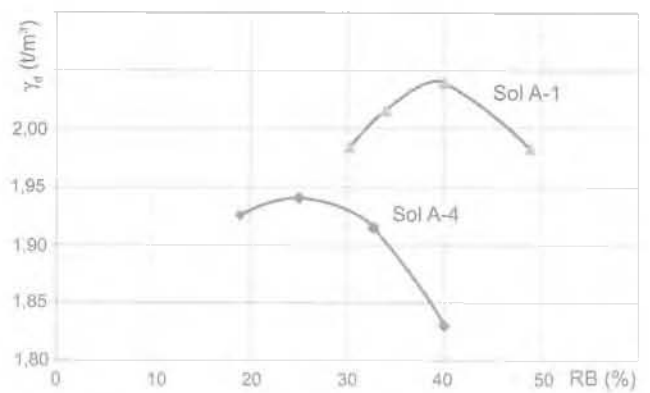


FIG. 1 Courbes de variation de la densité sèche maximale des mélanges « sols-RB ». Variation of dry density of "soil-BR" mixes.



FIG. 2 Essai de compression simple. Test of unconfined compression.

3

Construction du remblai expérimental

La construction du remblai routier expérimental s'est déroulée en avril et mai 2003, au sein du réseau routier local de Boétie. Le remblai a une hauteur de 2 m et une largeur de plateforme de 8 m (Fig. 3). La longueur totale est de 100 m et comprend deux rampes d'accès de part et d'autre du remblai dans le sens de l'axe de la route locale.

Les résidus de bauxite ont été récupérés des lagunes de séchage au voisinage du site de construction et transportés sur le chantier de l'ouvrage expérimental (Fig. 4). Les sols naturels constitutifs du remblai ont été empruntés aux sites voisins du chantier.

Le remblai a été construit en trois sections distinctes : deux sections pour l'application des formules A et B et une troisième « section-type » constituée par un sol semi-fin du groupe A-4 (formule C).

L'équipement de construction a été assez modeste à cause de la taille limitée de l'ouvrage. Chargeuse à pneus et compacteur léger ont constitué l'essentiel du matériel de construction. Le remblai a été construit en couches de 40 cm.

TABEAU III Effets de stabilisation sur mélanges « sol-résidus de bauxite ».
Stabilizing effects of "soil-bauxite residues" mixes.

Matériau/ mélange	Proctor Modifié		CBR(*)	Compression simple (kg/cm ²)		
	γ_m (t/m ³)	$W_{L,PM}$ (%)		q_u (*)	7 jours	14 jours
1 Résidus de Bauxite (RB)	1,9	24	16	-	-	-
A-1	2,2	6,7	39	0,7	-	-
2 A-1 + RB (90/10)	2,2	7,2	-	5,5	8,2	21
3 A-1 + RB (60/40)	2,1	16	34	5,5	-	-
A-2-6	1,6	15	12	1,85	-	-
4 A-2-4 + RB (50/50)	1,75	22	34	-	2,75	-
A-2-7	1,6	15	12	-	-	-
5 A-2-7 + RB (50/50)	1,75	22	34	-	-	-
A-4	2,01	9,2	22	5,6	-	-
6 A-4 + RB (75/25)	1,96	15	32	-	12,2	18,3
7 RB + CV (4 %)			16	1,8	-	-

(*) Essais CBR et de compression simple en laboratoire suivant immersion de 4 jours.

TABEAU IV Caractéristiques de cisaillement à la boîte.
Shear strength characteristics.

Matériau	Cohésion c' (kg/cm ²)	Angle de frottement ϕ' (degrés)
1. A-1 + RB (60/40)	0,72	38
2. RB + CV (4 %)	0,43	41
3. A-4	0,56	32

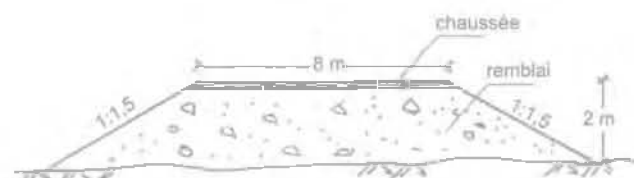


FIG. 3 Coupe transversale du remblai.
Transverse section of the embankment.

Les terrassements ont été effectués en période relativement sèche de manière conventionnelle et sous contrôle continu du taux d'humidité du matériau. L'humidité des résidus de bauxite variait de 16 à 22 %.

L'engin de compactage, un compacteur à cylindres lisses de 3 tonnes, a produit un compactage d'intensité moyenne, le degré de compactage variant de 88 % à 93 % de l'optimum Proctor modifié (Fig. 5).

Pendant la réalisation de l'ouvrage en terre, la maniabilité des matériaux ainsi que leur mise en place en couches horizontales n'ont présenté aucun problème.

La totalité des travaux a été réalisée en quelques semaines. Les matériaux utilisés et, surtout, les mélanges constitués de résidus de bauxite n'ont pas présenté de fissures de retrait juste après l'exécution des travaux. Aucune mesure spéciale d'entretien à court terme n'a été prise.



FIG. 4 Apport de matériau.
Transfert of material.



FIG. 5 Compactage des couches de remblai.
Compaction of embankment layers.

La finalisation de l'ouvrage comportait aussi la mise en place d'une couche de terre végétale sur les pentes du remblai afin de protéger l'ouvrage contre l'érosion.

Comme le site expérimental choisi s'inscrit dans une installation industrielle, la route subit une circulation importante de poids lourds, estimée entre 30 et 50 poids lourds par sens et par jour. Il a donc été jugé nécessaire de recouvrir la plate-forme d'une couche de grave non traitée de 20 cm, constituée de gravillons de bauxite, pour recevoir et répartir les charges importantes dues aux camions. L'ouvrage a ensuite été ouvert à la circulation.

4

Contrôle de qualité

Des essais en place et en laboratoire ont été réalisés tout au long de la phase de construction. En dehors des contrôles d'humidité continus et des essais de compactage périodiques, une série d'essais de résistance mécanique en place a été effectuée. L'équipement utilisé était assez simple et se composait d'un pénétromètre CBR et d'un pénétromètre autoforeur. Les résultats des mesures, en valeurs moyennes, sont donnés dans le tableau V.

Le comportement des matériaux en place a été jugé satisfaisant bien que les valeurs des mesures soient inférieures à celles du laboratoire. La résistance mécanique des mélanges comportant des résidus de bauxite est très élevée et indique des matériaux adéquats à la construction de remblais routiers. Par conséquent, le comportement mécanique ne doit pas constituer un objet de préoccupation pour ce genre de construction. En effet, les points critiques de cette procédure ont été :

- la maniabilité des matériaux ;
- le contrôle de l'humidité du sous-produit ;
- le comportement à long-terme et le risque d'érosion.

Des contrôles systématiques et des mesures efficaces à cet égard sont nécessaires afin d'assurer une performance de haut niveau de l'ouvrage en terre.

5

Comportement sous charges de trafic

La chaussée a été mise sous circulation après sa construction. Les véhicules lourds sur la route de service produisaient un trafic journalier de 30-50 poids lourds par sens et ont exercé des charges importantes sur la chaussée et la plateforme du remblai.

TABLEAU V Mesures en place des caractéristiques mécaniques.
On site strength characteristics.

	Matériau	Indice CBR		Compression simple (kg/cm ²)	
		Laboratoire	En place	Laboratoire	En place
1	Sol A-1 + RB (60/40)	34	> 15	5,5	4,5
2	RB + Cendre volante	16	13	1,8	3,5
3	Sol A-4	27	> 15	5,6	5,0



FIG. 6 Le remblai routier terminé (2003).
The road embankment completed (2003).

Un an après la mise en circulation, la structure du remblai ne portait aucun signe visible de défaut ou de détérioration. Des mesures de tassement ont été effectuées sur les bords de la chaussée. Les valeurs du tassement total, dû principalement à la déformabilité du remblai, variaient de 1 à 2 mm, ce qui démontre la durabilité de l'ouvrage construit.

De même, cinq ans après la mise sous trafic du remblai routier, les tassements mesurés en plateforme variaient de 4 à 11 mm, ceci dû principalement à l'érosion superficielle subie dans le temps (Kehagia, 2008). Le revêtement des pentes en terre végétale s'est aussi bien comporté et aucune trace de dégradation par érosion n'a pu être discernée.



FIG. 7 Le remblai routier cinq ans après (2008).
The road embankment five years after construction (2008).

Globalement, la structure du remblai est restée intacte sous l'effet des charges de trafic et des intempéries. Cette performance de l'ouvrage, suite à une procédure de construction simple et facile à mettre en œuvre, remet en question la classification des résidus de bauxite placés en classe III des sous-produits industriels par rapport à leur aptitude d'application en technique routière (OCDE, 1977). Cette classe comprend des matériaux secondaires de qualité médiocre qui peuvent être utilisés, seulement, dans des cas exceptionnels. L'expérience présentée ici démontre, au contraire, qu'il suffit d'un traitement de séchage pour que le matériau puisse être appliqué en technique routière de façon simple et efficace. Les résidus de bauxite devraient donc être considérés comme un sous-produit de classe I.

Conclusion

La construction d'un remblai routier expérimental en résidus de bauxite a démontré de façon claire la possibilité d'utiliser ce sous-produit industriel en technique routière. L'utilisation de ce matériau « secondaire » peut donc s'avérer non seulement bénéfique vis-à-vis de l'environnement, mais également efficace en terme de performance technique à long terme. En effet, la structure du remblai n'a présenté aucun signe de détérioration cinq ans après sa construction et sa mise sous trafic.

La perspective d'une application systématique de ce matériau se heurte toutefois au coût du transport. Le sous-produit peut constituer un matériau de construction dans la région de Boétie et, en général, au voisinage des installations de production industrielles. Pour une utilisation plus générale, il faudra trouver un moyen de subventionner le coût de transport selon une stratégie dirigée par les autorités locales, régionales et probablement aussi par l'industrie de production.

Bibliographie

- Jitsangiam P., Nikraz H., Jamieson E., Kitanovich R., Sirignin K. – Sustainable use of a Bauxite Residue (Red Sand) as Highway Embankment Materials. New Zealand Society for Sustainable Engineering and Science Conference, Auckland, 2008.
- Kehagia F. – An innovative geotechnical application of Bauxite Residue. *EJGE Journal*, vol. 13, 2008.
- LRPC d'Aix-en-Provence – Utilisation des résidus inertes en technique routière. Rapport technique, 1997, 90 p.
- Mouratidis A., Tsohos G. – Investigation of red mud properties for use in road construction. *Proceedings 4th International Congress on Environmental Geotechnics*, Rio de Janeiro, 2002, p. 493-496.
- Mouratidis A. – Construction expérimentale d'un remblai routier aux résidus de bauxite. Comptes rendus de la conférence sur l'emploi des sous-produits industriels en construction des routes, Thessalonique, 2004, p. 73-81.
- Newson T., Dyer T., Adam C., Sharg S. – Effect of structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, n° 132, 2006, p. 143-150.
- OCDE – Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière. Rapport d'un groupe d'experts. Paris, 1977, 174 p.