

Influence de la salinité de l'eau de compactage sur les caractéristiques géotechniques des sols routiers des zones littorales

Tiana Richard Randriamalala*(1), Nambinina Richard Randriana(2), Haritiana Jeannelle Rakotoniriana (2), Jean de Dieu Ramaroson (3), Frédéric Randrianarivelo(2), Lala Andrianaivo(2).

(1) Laboratoire National des Travaux Publics et des Bâtiments, Département Recherche et Matériaux, B.P. 1151, Antananarivo 101 Madagascar.

(2) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

(3) Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil, BP 6294, Antananarivo 101 Madagascar.

*auteur correspondant, email : randriamalalantiana@yahoo.fr

Résumé

Cette étude nous a permis de déterminer l'impact de l'eau de mer de la côte Est de Madagascar ou de l'eau salée sur les travaux de terrassements des sols pris dans les régions Est et Nord-Ouest de Madagascar. Nous avons trouvé que la portance des sols diminue avec l'utilisation de sel dans l'eau de compactage. Le pourcentage de fine argileuse et son activité ont une grande influence sur le comportement mécanique du sol, surtout pour l'eau de mer ou eau salée de teneur en sel plus de 35g/l. Cette étude peut servir de base en matière de construction routière à Madagascar surtout dans les régions côtières et littorales du pays.

Mots clés : compactage, eau de mer, essai Proctor, essai indice portant CBR, indice de plasticité, essai au bleu de méthylène, limites d'Atterberg, routes, salinité, sol.

1. INTRODUCTION

La construction routière tient une place importante pour le développement d'un pays (Economie-Afrique,2012). Des recherches et des expériences ont été menées dans différents pays pour trouver des techniques de conception, de mise en œuvre et de gestion en matière de construction routières (A.M.P.C., 2015). En général, parmi les différentes couches qui constituent les routes nationales, la couche de fondation (François D. et al., 2015), qui caractérise les terrassements routiers, joue un rôle important en ce qui concerne la portance du sol routier. Autrement dit, la construction routière dépend essentiellement des travaux de terrassement subissant des opérations de compactage. En Mauritanie (régions désertiques), les terrassements routiers sont construits par l'incorporation des sables de dunes compactés avec de l'eau naturelle (Gara S., (1994). Dans le Sud Marocain (zone Saharienne) et dans les régions désertiques similaires, les constructeurs de routes ont utilisé l'eau salée comme l'eau de compactage des matériaux généralement constitués des sables lors des travaux de terrassements (Alderson A., Mectaf J.B., 1991). La difficulté d'accès à l'eau ne fait que rehausser le coût de la construction routière dans certaines régions de Madagascar surtout dans les régions côtières. En effet, les eaux douces et les eaux potables sont difficiles à trouver dans ces régions côtières tandis que l'eau de mer y est en abondance. L'objectif principal est d'étudier la possibilité d'utiliser l'eau de mer ou eau salée en tant qu'eau de compactage des matériaux de la couche de fondation des routes en zone côtière.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Caractéristique du cadre de l'étude

Nous avons étudié l'effet de la salinité en utilisant de :

- L'eau salée à différentes teneurs comme eau de compactage des matériaux du sol de la région Nord-Ouest de Madagascar (Mahajanga).
- L'eau de mer comme eau de compactage des matériaux du sol de la région Est de Madagascar (Toamasina). L'eau de mer a été prise sur la côte Est de Madagascar, ces localités de l'étude sont placées sur la figure 1.



Figure 1 : Localisation des sites d'étude

2.2. Identification des matériaux

2.2.1. Eau saline

L'eau saline est considérée comme le mélange de l'eau additionnée de sel de cuisine. Pour notre étude, l'eau salée a été préparée en introduisant progressivement du sel à des teneurs : 0g/L, 35g/L et 45 g/L dans l'eau de compactage. Le choix de ces teneurs se pose sur la connaissance de la teneur en sel de l'eau de mer qui se trouve en général entre 30 à 40 g/L. Nous avons considéré tout simplement la valeur 45g/L pour déterminer l'effet extrême de l'eau saline (Oceana Plasma, 2015).

2.2.2. Eau de mer

L'eau de mer contient, principalement des ions halogénures (ions chlorures), des ions alcalins (ions sodiums). On trouve 30 à 40 grammes de sels dissous pour un kilogramme d'eau de mer (Oceana Plasma, 2015). L'eau de mer utilisée pour le compactage du sol est prise sur la côte Est de Madagascar. Pour mesurer sa teneur en sel, nous l'avons évaporé dans une étuve de 105°C, ainsi nous avons trouvé que sa teneur en sel est environ 32g/L.

2.2.3. Le sol

Les types de sol utilisés pour effectuer cette étude sont ceux souvent utilisés comme sol d'emprunt et proche du chantier:

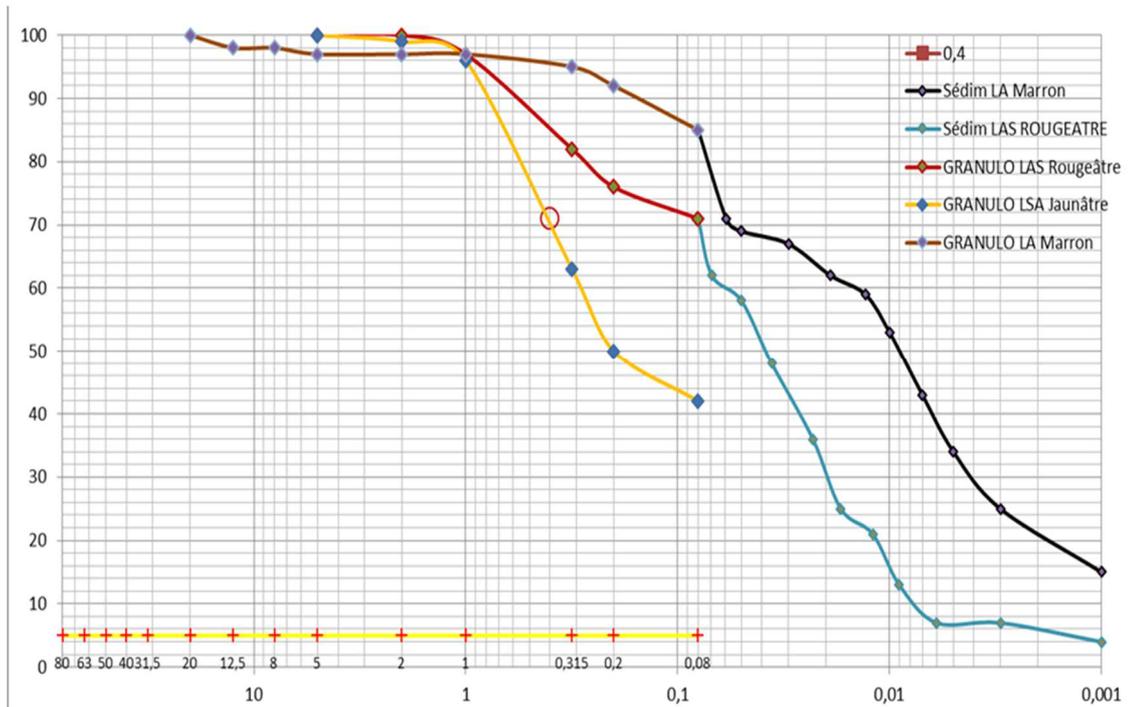
- Limon argilo- sableux de couleur rougeâtre (LAS rougeâtre)
- Limon sablo- argileux de couleur jaunâtre (LSA jaunâtre)
- Limon argileux de couleur marron (LA marron)

Pour la détermination des caractéristiques géotechniques du sol, les essais suivants ont été effectués :

- L'analyse granulométrique,
- la sédimentométrie,
- limites d'Atterberg
- l'essai au bleu de méthylène par la méthode de « test à la tâche »,
- l'essai Proctor modifié
- l'essai CBR (California Bearing Ratio)
- l'essai au bleu de méthylène.

3. RESULTATS

Les courbes granulométriques des échantillons de sols sont présentés dans la figure 2.



Légende :

- Echantillon N° 1 de nature LAS rougeâtre
- - - Echantillon N° 2 de nature LSA jaunâtre
- - - Echantillon N° 3 de nature LA marron

Figure 2. Courbes granulométriques par sédimentométrie des 03 types de sol

Dans un premier temps, nous avons utilisé l'eau potable comme eau de compactage. D'une part, les sols sont compactés avec de l'eau salée à différentes teneurs, d'autre part, ils sont compactés avec l'eau de mer. Nous avons illustré dans les figures suivantes, l'effet de la salinité de l'eau de compactage sur les différentes caractéristiques géotechniques routières considérées (poids volumiques et portance du sol après 96h d'imbibition).

Effet de la salinité sur le poids volumique au moment du compactage et après 96heures d'imbibition

Les résultats sont représentés dans la figure 3.

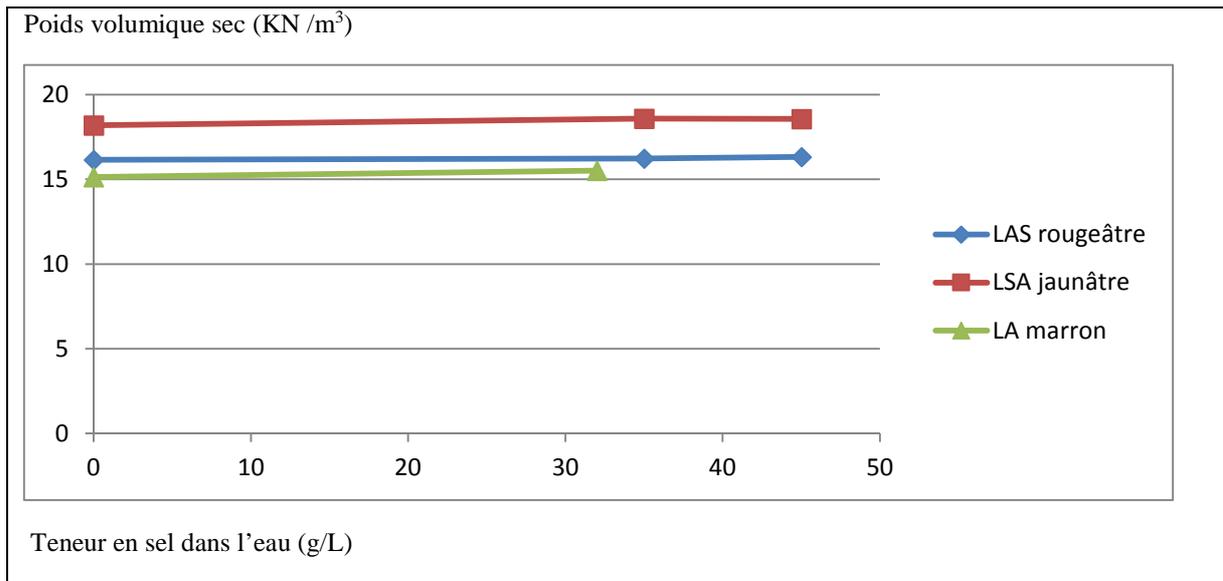


Figure 3. Effet de la teneur en sel sur le poids volumique après 96 heures d'imbibition des types de sol

La figure 2 montre que les poids volumique au moment du compactage et après 96heures d'imbibition sont peu affectés par la présence du sel.

Effet de la salinité sur la portance après saturation (après 96h d'imbibition) : Indice CBR après saturation (%)

Les résultats sont représentés dans la figure 4.

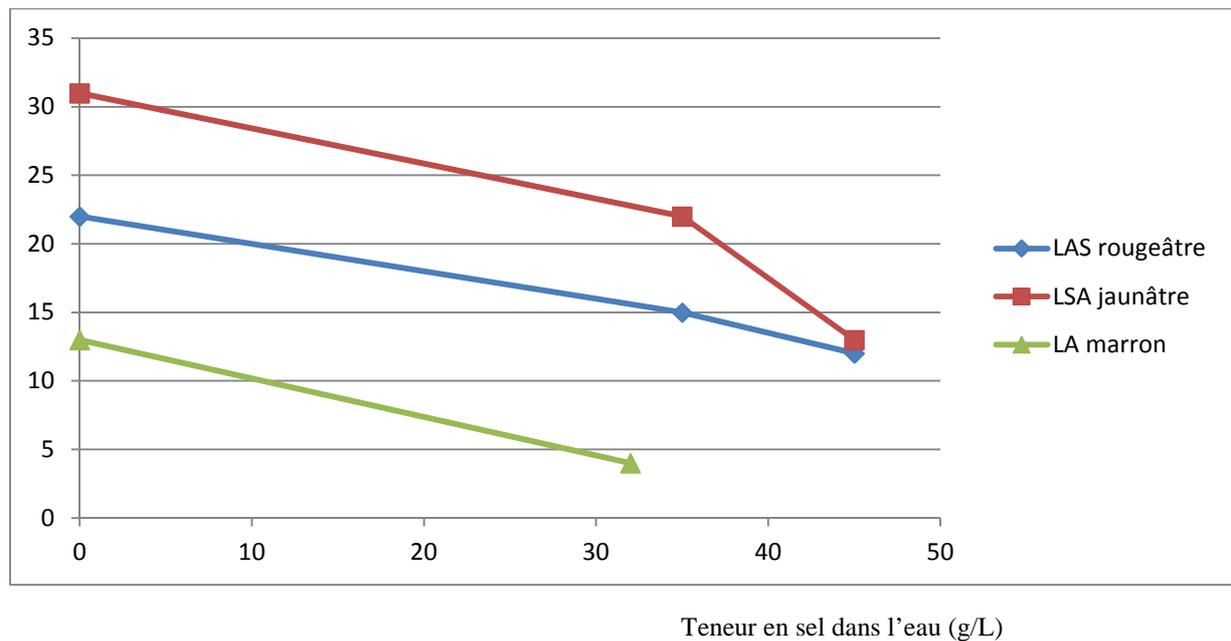


Figure 4. Effet de la salinité sur la portance après saturation des types de sols considérés

Cette figure montre que la portance du sol diminue lorsque la salinité de l'eau de compactage augmente.

L'essai au bleu de méthylène a été effectué pour déterminer généralement l'activité de l'argile dans le sol. Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles (Normes géotechniques, 2014).

Les trois types de sols que nous avons étudié (LAS rougeâtre, LSA jaunâtre, LA marron) ont des valeurs de bleu à peu près égales, ces valeurs sont respectivement 1,2g ; 0,9g ; 1,1g.

D'après le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92), ces sols analysés appartiennent à une même classification. En effet si $0,2 \leq V_{Bs} < 1,5$ la catégorie du sol est un sol sablo limoneux, sensible à l'eau (Magnan J-P., 1989).

Les figures 5, 6 et 7 montrent les résultats obtenus par la méthode dite « test de la tâche » de l'essai au bleu de méthylène.

Résultats du test à la tâche



Figure 5 : LAS rougeâtre

Figure 6 : LSA jaunâtre

Figure 7 : LA marron

Les résultats des essais sont récapitulés dans le tableau 1.

Tableau 1. Tableau récapitulatif des résultats

Paramètres	LAS rougeâtre	LSA jaunâtre	LA marron
Teneur en eau w : (%)	4,1	2,3	34,4
Poids volumique des particules solides γ_s : (KN/m ³)	26,87	26,75	30,44
Particules fines PF: (%)	71	42	85
Limite de liquidité w_L : (%)	41,4	30,4	66,9
Limite de plasticité w_P : (%)	24,5	17,4	45,8
Indice de plasticité I_p : (%)	17,0	13,0	21,1
Teneur en eau optimale w_{opt} : (%)	18,6	11,4	Eau potable : 25,8 Eau de mer : 23,5
Poids volumique optimal γ_{dopt} : (KN/m ³)	17,04	19,3	Eau potable: 16,48 Eau de mer : 16,84
Gonflement relatif (%) en fonction de la teneur en sel (g/L):	à 0g/L : 0,06 à 35g/L : 0,06 à 45g/L : 0,03	à 0g/L : 0,08 à 35g/L : 0,06 à 45g/L : 0,06	à 0g/L : 2,62 à 32g/L : 3,15
Indice portant CBR (%) en fonction de la teneur en sel (g/L) :	à 0g/L : 22 à 35g/L : 15 à 45g/L : 12	à 0g/L : 31 à 35g/L : 22 à 45g/L : 13	à 0g/L : 13 à 32g/L : 4
Valeur au bleu du sol VBs : g/100g)	1,2	0,9	1,1

4. ANALYSES ET INTERPRETATIONS

D'après ce tableau 1, la portance diminue lorsque la salinité augmente. Pourtant, nous constatons que l'échantillon LA marron est beaucoup plus influencé par cette diminution. LAS rougeâtre aussi est plus influencé par rapport à LSA jaunâtre. Les types de sol jouent un rôle important sur l'influence de la salinité de l'eau de compactage :

- Plus le pourcentage de particules fines du sol est élevé, plus l'influence de la salinité de l'eau de compactage est importante : à 85% de fines, LA marron a une portance très faible parmi les trois types de sol considérés lorsque l'eau de compactage utilisée est l'eau de mer (32g/L de sel) ; de plus LAS rougeâtre

aussi, à 71% de particules fines, a un indice de portance plus faible par rapport à LSA jaunâtre lorsque la salinité augmente.

- Plus le sol est plastique, c'est-à-dire sa quantité d'argile est élevée, plus son indice de portance CBR diminue lorsque le taux du sel dans l'eau de compactage augmente : la portance de LA marron qui a un indice de plasticité le plus grand ($I_p = 21\%$) est le plus faible, suivie par LAS rougeâtre ($I_p = 17\%$) et enfin LSA jaunâtre ($I_p = 13\%$). Et même, lorsqu'un type de sol présente un pourcentage élevé d'argile, son indice portant est faible par rapport à celui qui contient un pourcentage faible d'argile, tout en utilisant de l'eau potable (Ben Mosbah Yasmine et al., 2015). Ainsi, l'utilisation de l'eau saline dans les opérations de compactage affecte beaucoup plus la portance du sol dont le pourcentage de fines est élevé. Le pourcentage de l'argile est très sensible à l'action de l'eau saline.

Un autre test a été effectuée pour déterminer l'activité de l'argile : « l'essai au bleu de méthylène ». Les valeurs au bleu des sols LAS rougeâtre et LA marron sont presque la même. Le taux d'activité de LAS rougeâtre est donc beaucoup plus élevé même si sa quantité d'argile est faible par rapport à celui de LA marron. L'activité d'argile de LA marron est faible même si sa quantité d'argile est élevée. Cela confirme la sensibilité de l'argile avec l'eau saline même si son activité est faible.

Nous pouvons donc conclure ici que les portances de LAS rougeâtre et de LSA jaunâtre sont toujours acceptées lorsque la teneur en sel de l'eau de compactage est à peu près égale à celle de l'eau de mer ; même si elles diminuent, elles sont toujours bonnes d'après la correspondance entre CBR et portance du sol.

5. CONCLUSION

Cette étude, s'appuyant sur des données bibliographiques et sur des résultats des essais de laboratoires, a permis de présenter l'effet de la salinité de l'eau dans les opérations de compactage des matériaux du sol des régions Est et Nord-Ouest de Madagascar pour des travaux de terrassements.

Les résultats sont encourageants car l'eau salée étudiée à une teneur en sel proche de l'eau de mer ou l'eau de mer (de la côte Est de Madagascar) proprement dite peut être utilisée pour le compactage de sol de la plate-forme et du corps de la chaussée sans effet néfaste sur les matériaux.

Les portances sont toujours acceptables pour les sols (LAS rougeâtre et LSA jaunâtre) dont le pourcentage de fines ne présente pas un taux élevé, tandis que pour le sol (LA marron) dont le pourcentage d'argile est beaucoup plus élevé, la portance est faible du fait de la sensibilité de cette argile à l'eau saline même si son activité n'est pas vraiment élevé. Lorsque les limons et argiles figurent en grande quantité dans les types de sol, la portance du sol diminue par rapport aux sols qui présentent un pourcentage de fines un peu faible, même lorsque l'eau de compactage n'est pas de l'eau salée ni de l'eau de mer mais tout simplement de l'eau potable. La diminution de la portance pour ces types de sol est encore beaucoup plus élevée lorsque la salinité de l'eau de compactage augmente.

Ainsi, cette étude qui utilise l'eau de mer /eau salée dans les opérations de compactage présente des avantages économiques certains et peut servir une base de données en matière de construction routière du pays. Non seulement nous avons montré que l'eau de mer est une alternance à l'eau potable dans les localités où on n'en trouve pas, mais nous avons établi aussi que l'eau de mer améliore les caractéristiques géotechniques, notamment le poids volumique et la portance après 96 heures d'imbibition. Toutefois, nous ne pouvons pas prétendre épuiser toutes les recherches sur l'effet de la salinité sur le sol, ainsi il est souhaitable que la présente soit complétée par une étude de l'utilisation de l'eau de mer ou eau salée pour construire les autres couches de la route (couches de forme, couche de base, ...), d'une part, et l'étude des phénomènes physico-chimiques qui peuvent exister entre le sel présent et les matériaux du sol sur les routes, d'autre part.

6. BIBLIOGRAPHIE

1. A.M.P.C., (2015) : Association Marocaine permanente des congrès de la route, Aspects particuliers de la technique routière en zone Saharienne, ww.ampr.ma/.T2-03ASP.htm, consulté le 15 janvier 2015.
2. Alderson A. et al. (1991), Routes dans les régions désertiques, AIPCR,
3. Association Française de Normalisation (AFNOR) (1997) : Sols : Reconnaissance et Essais - Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR. NF P 94-078.1er tirage 97-05-F. Paris La Défense Cedex : AFNOR

4. Ben Dhia M.H., (1983) : Les tufs et encroutements calcaires dans la construction routière. Thèse de l'Université de Paris VI, 189 pages.
5. Bigot G. et al. (2000): Retrait, gonflement et tassement des sols fins. Bull. Lab. Ponts et Chaussées, 229, p. 105-114.
6. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (1998) : Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, 213-Jan-Fév, Réf 4159. Pp33-42.
7. Durouchoux C., (2001):Les barrages. E.N. Ponts et Chaussées, Points Formation Edition, "Application de la géologie dans les travaux du génie civil".
8. François D. et al., (2015) : Les Routes, les Différentes couches d'une route, pp5-8
9. Gara S., (1994) : Effet de la teneur en fines sur le comportement des graves non traitées : application au sable du désert, DEA – ENIT, Tunisie, 75 pages
10. Keller E.A. (2000) - Environmental geology. Prentice Hall.
11. Mode opératoire LCPC de 1970. Projet de mode opératoire C.E.B.T.P. (1977)
12. Ould Sid A.C. et al. (1995), Bulletin de liaison des Laboratoires Ponts et Chaussées, 199, sept-oct-, Ref 3995, pp27-34. « Terrassements routiers dans les sables de dunes de Mauritanie »
13. Paillier C., (2015) : Travaux pratiques de géotechnique, Page 1 / 6IUT St Pierre, – Département Génie civil. ESSAI
14. Randriamalala T., (2005) : Aptitude des sols aux traitements minéraux (chaux et ciment) et aux stabilisants chimiques », Fév 2005, p28.

7. WEBOGRAPHIE

15. Aboutcivil. Civil Engineering (2015). Civil Engg Lectures, Books, Notes, Softwares site. <http://www.aboutcivil.org/california-bearing-ratio-test.html>, consulté le 05 février 2015.
16. AgroParisTech (2015) : Aide-mémoire de mécanique des sols : graduateschool.agroparistech.fr/site.php, consulté le 20 janvier 2015.
17. ARVOR Géotechnique, (2011) : « Indice Portant Immédiat- Indice CBR Immédiat- Indice CBR après immersion (NF P 94-078) ». http://arvor-geo.fr/cariboost_files/IPI_20CBR_20du_2026_01.pdf, consulté le 04 mai 2015.
18. Beauchamp J., (2003) : Mécanique des roches et des sols, <https://www.upicardie.fr/~beaucham/.../mecasol.htm?> Consulté le 14 décembre 2014.
19. Ben Mosbah Yasmine et al. (2015) : Travail pratique n°2 de mécanique des sols : compactage et portance d'un sol, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, aegc.epfl.c... (pp 1-17), consulté le 02 février 2015.
20. Bilodeau JP, (2009) : Optimisation de la granulométrie des matériaux granulaires ..., Succion dans les matériaux granulaires de fondation des chaussées, archimede.bibl.ulaval.ca/Archimede/.../26136.html, consulté le 06 janvier 2015
21. Economie Afrique (2012): Construction de routes : la voie du développement de l'Afrique, <http://industrie.economie-afrique.com/industrie/construction-routes-developpement-afrique/>, consulté le 10 Juin 2015.
22. FAO, (2015) : Consistance des sols – FAO.org. ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6706f/x6706f08.htm, consulté le 25 janvier 2015.
23. Groupe AFNOR (2015) : Normalisation, Certification, Edition et Formation, <http://www.boutique.afnor.org/norme/nf-p94-078/sols-reconnaissance-et-essais-indice-cbr-apres-immersion-indice-cbr-immédiat-indice-portant-immédiat-mesure-sur-échantil/article/707154/fa042054#info>, consulté le 15 février 2015.
24. Magnan J-P., (1989) : Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols, Bull, liaison Labo P. et Ch. • 159 - janv.-févr. 1989 - Réf. 3378, www.geotech-fr.org/.../BLPC%20159%20pp%2093-1..., consulté le 15 février 2015.
25. Normes géotechniques, (2014): Reconnaissance et essais géotechniques, Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux, <https://fr.scribd.com/doc/.../normes-geotechniques>, consulté le 05 janvier 2015
26. Oceana Plasma, (2015) : La Chimie de l'eau de mer, oceanplasma.org/documents/chimie.html, consulté le 09 février 2015.
27. ROCAMIX, (2008) : Cours de mécanique des sols, Cours de capacitation pour l'utilisation du « Système Rocanix », www.rocamix.fr/mecanica_suelos.php, consulté le 10 février 2015.
28. Sol Conseil, Soler Conseil, (2015): Qu'est ce que la géotechnique ? www.geotechnique.eu/, consulté le 10 janvier 2015.