

COMPACTAGE DYNAMIQUE DE REMBLAIS PAR LE PROCEDE DE RAPID IMPACT COMPACTION (RIC)

RAPID IMPACT COMPACTOR (RIC) - AN INNOVATIVE DYNAMIC COMPACTION DEVICE FOR EMBANKMENT IMPROVEMENT

Laurent PEZZOLO¹, Serge LAMBERT²

1 Bureau d'études Géotec, Strasbourg, France

2 Entreprise Keller, Strasbourg, France

RÉSUMÉ — Le traitement des sols par compactage dynamique peut être un bon compromis technico-économique pour le traitement des sols de mauvaise qualité. Pour être efficace, il nécessite une forte énergie de compactage qui peut être traumatisante pour l'environnement. Cet article présente une évolution du procédé de compactage dynamique par le Rapid Impact Compaction (RIC). L'énergie de compactage est donnée par une masse de 7 à 9 tonnes tombant avec une hauteur de chute de 1,20 m à fréquence élevée (40 à 60 coups / min) sur une plaque de 1,50 à 2,00 m de diamètre. L'expérience du chantier d'extension de l'EuroAirport de Bâle-Mulhouse (68 - France) montre d'une part l'efficacité du RIC pour traiter des remblais hétérogènes sur 5 m d'épaisseur et d'autre part la très rapide atténuation des vibrations avec la distance par rapport au point d'impact.

ABSTRACT — Dynamic compaction can be a good technico-economic compromise for poor quality soil. To be efficient, a strong compaction energy is needed which can have side effects on the environment. The Rapid Impact Compactor (RIC) is a dynamic compaction device based on the piling hammer technology used to increase the bearing capacity of soils through controlled impacts. The RIC is giving an impact energy by dropping a 7 to 9 tons weight from a height of 1,20 m at a blow rate of 40 to 60 times a minute. The impact foot is a steel foot with a diameter of 1,50 m. It appears on the site of the EuroAirport from Bâle-Muhlouse (68) that Rapid Impact Compaction had successfully reach a depth treatment down to 5 m on one side and a quick reduction of vibration with the distance from the impact on the other side.

1. Introduction

Dans un contexte où le foncier devient de plus en plus rare et cher, les terrains encore disponibles correspondent bien souvent à d'anciennes friches industrielles, ou à des terrains que les "anciens" ont délaissés du fait de leur mauvaise qualité (remblais, zone marécageuse...). Les maîtres d'ouvrages peuvent alors hériter d'un passif foncier avec de fortes contraintes géotechniques : sols présentant une faible portance et/ou une forte compressibilité pour les surcharges apportées par les projets, n'autorisant donc ni des fondations ni des dallages ni des structures routières classiques.

Lorsque le géotechnicien est associé dès l'amont de l'opération (étape 1 : études géotechniques préalables de la norme NF P94-500), il établit une première identification des risques majeurs : détection de ces zones et caractérisation des sols, permettant alors d'orienter l'aménagement vers les zones les plus favorables. Mais les contraintes urbaines, les infrastructures existantes et le schéma d'aménagement des projets conditionnent généralement l'implantation et la conception des ouvrages, sans malheureusement pouvoir prendre en compte des contraintes géotechniques. Il incombe alors au géotechnicien et aux entreprises de travaux spéciaux de composer avec cet héritage complexe et de trouver des solutions techniques et économiques d'amélioration des sols adaptées ; le compactage dynamique permet d'apporter une réponse intéressante à cette problématique.

2. Contexte et enjeux

2.1. *Projet et contexte géotechnique du site*

L'extension de la zone du fret (Z4) de l'EuroAirport de Bâle-Mulhouse à Saint-Louis (68 - France) s'inscrit dans la grande plaine alluviale du Rhin, qui a fait l'objet de multiples exploitations en gravières pour les activités du BTP (matériaux sablo-graveleux de classe D31). Ces "trous" profonds de 20 à 30 m ont ensuite été comblés sans précautions particulières et posent alors des problèmes géotechniques pour les ouvrages projetés : bâtiments, chaussée aéronautique, structure routière.

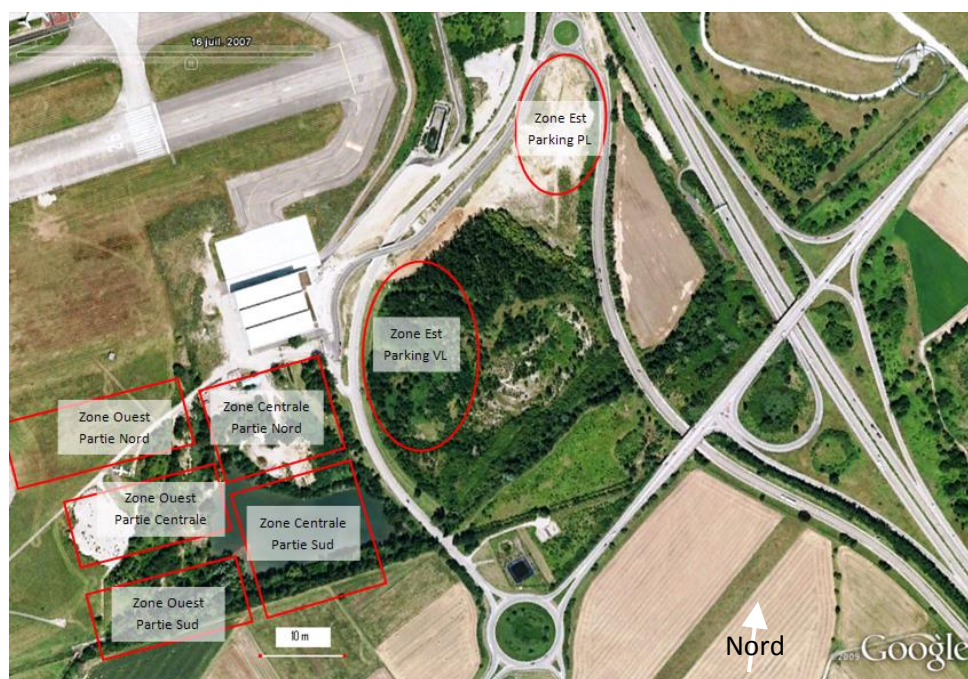


Figure 1. Vue aérienne du projet - parking VL à l'Est

Le projet de parkings pour 400 véhicules légers (14 500 m²) se trouve ainsi au droit d'une ancienne gravière remblayée (voir figure 1), où les investigations géotechniques par pressiomètre et pénétromètre statique ont mis en évidence :

- des remblais de nature très hétérogènes : limon sableux à argileux, argile, sable et graviers, galets et débris divers (morceaux de bois, d'enrobé, localement polystyrène, blocs de béton...) ; leur épaisseur est très variable, de 4 m à 14 m au droit du projet, et leur compacité est très irrégulière :

- Pression limite : $0,3 \leq p_l^* \leq 2,55$ MPa
- Module pressiométrique : $1,7 \leq E_m \leq 21,5$ MPa
- Effort de pointe : $0,5 \leq q_c \leq 3$ à 4 MPa (remblais limono-argileux)
et $5 \leq q_c \leq 20$ à 30 MPa (remblais limono-graveleux),

- puis des alluvions sablo-graveleuses régulièrement très denses :

- Pression limite : $p_l^* \geq 5$ MPa
- Module pressiométrique : $32,5 \leq E_m \leq 250$ MPa

La grande nappe rhénane baigne les alluvions à grande profondeur, vers 20 m.

2.2. Enjeux

En regard des remblais d'épaisseur irrégulière et de nature hétérogène, et de la présence au moins localement d'éléments évolutifs, l'estimation des tassements prévisibles à long terme s'avère délicate. Bien que les surcharges d'exploitation soient réduites (usage de parkings), le maître d'ouvrage souhaite toutefois éviter des travaux d'entretien et/ou de réfection à terme. Il convient donc de limiter les risques de déformations des voiries et des parkings, mais aussi d'éviter tout risque de dégradation des réseaux enterrés (eaux pluviales notamment) qui doivent traverser le site.

2.3. Environnement du projet

Le projet s'insère dans une zone de friches, en extrémité sud-est des installations aéroportuaires existantes et d'infrastructures et bâtiments en cours de construction. Il est ainsi entouré par :

- la route du fret qui dessert l'aéroport en bordure ouest ;
- un bâtiment en activité (centre d'aviations d'affaires) 60 m au nord-ouest, fondé superficiellement dans les alluvions sablo-graveleuses ;
- un ouvrage d'art enjambant la route du fret, ses remblais d'accès de 5 m de hauteur, situés à 20 m en limite Nord. L'une des culées du pont se trouvant au droit de l'ancienne gravière remblayée, elle a nécessité des fondations profondes par pieux forés-tubés ancrés dans les alluvions sablo-graveleuses à 15 m de profondeur; ses remblais d'accès ont fait l'objet d'un préchargement ;
- le talus de l'ancienne gravière, dans sa partie non remblayée à l'est.

Cet environnement constitue une forte contrainte qui doit être intégrée dans le choix de la solution de traitement des sols, et impose de prendre des dispositions particulières pour s'assurer que les travaux ne créeront pas de désordres aux avoisinants.

3. Choix du procédé et définition des objectifs

Dans ce contexte géotechnique très hétérogène, compte tenu de la surface importante à traiter et de l'environnement du site, il a été retenu une solution d'amélioration mécanique des couches superficielles par compactage dynamique, qui permet de réduire notablement l'indice des vides des sols. Cette technique conduit ainsi à densifier et homogénéiser les terrains d'assise des voiries et des réseaux associés, et de limiter les tassements absolus et différentiels à long terme. L'objectif du traitement défini au stade de la mission d'ingénierie géotechnique G2 phase Projet était le suivant :

- densification de la masse globale d'au moins 5% sur les 5 m supérieurs (soit un abaissement général moyen de la plateforme de l'ordre de 25 cm) ;
- augmentation de 80 à 100% du module pressiométrique E_m par rapport aux valeurs initiales.

Pour atteindre ces objectifs, le maillage du traitement et l'énergie de compactage (masse x hauteur de chute) ont été laissés à l'initiative de l'entreprise spécialisée. Ces dispositions sont justifiées au moyen de planches d'essais lors des études d'exécution en mission G3, en tenant compte de l'environnement du site pour déterminer l'énergie maximale admissible par les ouvrages existants.

4. Présentation des travaux

4.1. Présentation du procédé RIC

L'entreprise Keller a proposé un traitement selon le procédé RIC 9000. A la différence du compactage traditionnel (masse de 10 à 15 tonnes lâchée en chute libre de 10 à 30 m), le principe de la méthode RIC consiste à faire tomber une masse plus légère (ici 9 tonnes) depuis une hauteur de chute réduite (1,20 m). L'énergie importante est donnée grâce une fréquence de coups très élevée, 40 à 60 coups / min. Le point d'impact est porté par une plaque métallique de diamètre 1,50 m guidée dans sa chute, permettant un transfert optimal de l'énergie. L'énergie de compactage peut ainsi atteindre 4,3 à 6,4 MN.m/min.

Les différents paramètres suivants sont enregistrés automatiquement pour chaque point d'impact :

- nombre de coups,
- enfoncement total (profondeur du cratère),
- enfoncement ultime au dernier coup,
- énergie totale.

Ces données sont synthétisées dans un tableau avec indication de la date, de l'heure et de la durée du traitement de chaque point d'impact.

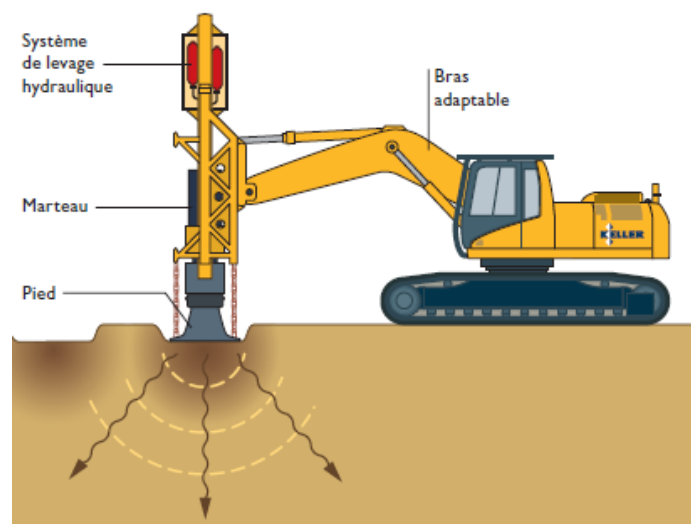


Figure 2. Principe du RIC

4.2. Investigations complémentaires par CPT

Pour compléter les reconnaissances réalisées lors des missions géotechniques de conception, au démarrage des travaux il a été réalisé 6 essais de pénétration statique dans le sol vierge. Ces sondages ont confirmé la grande hétérogénéité des sols, ont permis des corrélations avec les mesures pressiométriques et ont conduit à définir deux zones de planche d'essais aux caractéristiques géomécaniques très différentes.

4.3. Planches d'essai et critères retenus

Deux planches d'essais ont été réalisées selon un maillage primaire avec une maille carrée de 3,50 m x 3,50 m, puis un maillage secondaire selon la même maille, soit un point de compactage tous les 2,47 m x 2,47 m = 6,1 m².

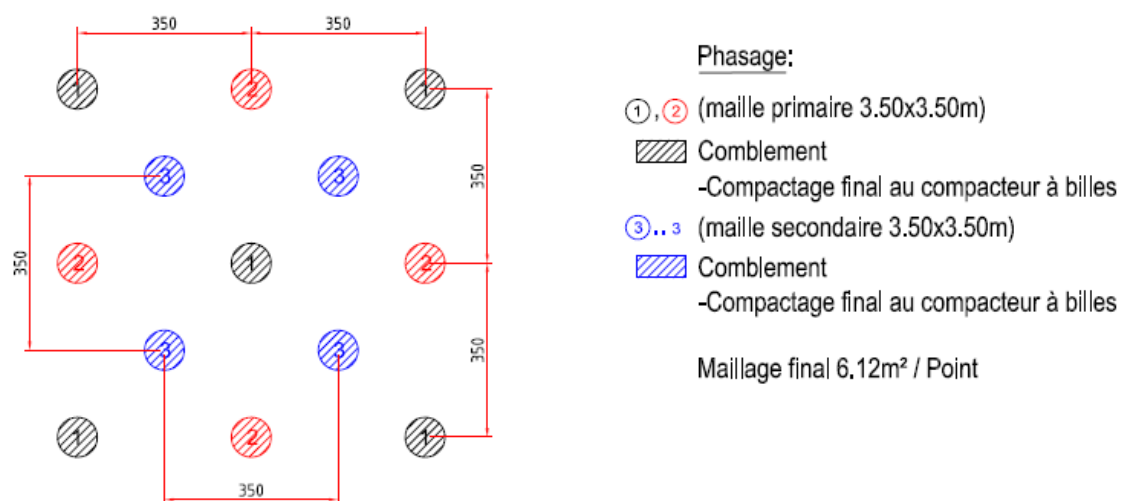


Figure 3. Planche d'essais RIC9000

La planche n°1 a permis de montrer une augmentation de l'effort de pointe q_c de plus de 100% sur 5 m de profondeur entre les sondages avant traitement (q_c mini de 8 MPa) et les résultats après traitement (q_c compris entre 25 et 35 MPa). Elle a aussi montré que 30 à 40 coups étaient suffisants lorsque les sols étaient déjà assez compacts.

La planche n°2 a conclu à une conformité du traitement puisque l'enfoncement de 80 à 90 cm constaté sur les points d'impact (surface du point = 1,77 m² / maille de 6,1 m²) correspond au critère de densification d'au moins 5% fixé comme l'un des objectifs de traitement.

Les deux planches d'essais ont ainsi permis de valider le maillage de 6,1 m² pour l'ensemble de la plateforme, bien que les caractéristiques des sols soient très variables. Les critères d'arrêt suivants ont été définis, permettant à l'opérateur de s'adapter à la réponse du terrain :

- enfoncement global ≥ 80 cm par point d'impact ;
- enfoncement unitaire au dernier coup : 10 mm ;
- nombre de coups ≥ 40 par point d'impact.

Pour contrôler les caractéristiques des sols améliorés, et justifier d'une amélioration des caractéristiques initiales de 80 à 100%, il a été retenu comme critères de réception les valeurs de résistance de pointe suivantes :

- $q_c > 10$ MPa dans les remblais sablo-graveleux à caillouteux,
- $q_c > 4$ MPa dans les remblais limono-argileux.

4.4. Suivi des vibrations

Des mesures de vibrations ont été réalisées par la société Innogéo avant le démarrage des travaux, pour apprécier l'incidence du traitement par le RIC sur les avoisinants. La chaîne de mesure était constituée de 8 capteurs comportant chacun 3 géophones ; ils ont été répartis sur le sol à distance croissante du point d'impact et dans le bâtiment le plus proche (centre d'aviation d'affaires).

Les maxima des vitesses particulières enregistrées ont été comparés aux seuils définis par les règles techniques annexées à la circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les "installations classées pour la protection de l'environnement" (code de l'environnement), pour les 3 bandes de fréquence définies dans cette circulaire.

Les mesures ont montré une très rapide atténuation de la vitesse particulière avec la distance ; les valeurs sont inférieures au seuil le plus contraignant pour la catégorie "construction très sensible" au-delà d'une distance de 22 m du point d'impact. On note par ailleurs qu'à partir de 50 m du point d'impact les vitesses sont inférieures à 1 mm/s.

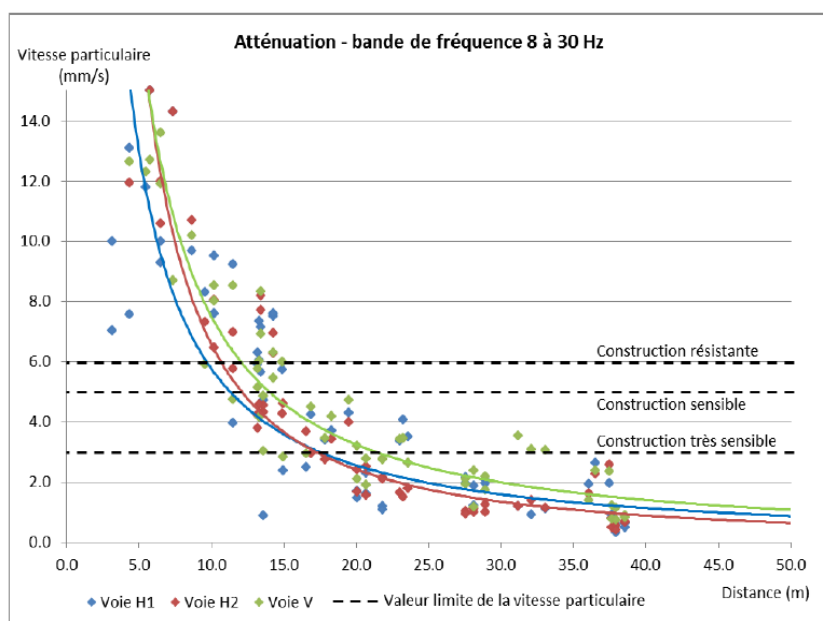


Figure 4. Courbe d'atténuation de la vitesse particulaire (source Innogéo)

5. Suivi des travaux et contrôles

5.1. Travaux réalisés

Les travaux ont consisté en la réalisation de 2000 points de compactage avec un maillage final de 1 point pour 6,1 m², pour une superficie traitée de 12500 m². Ils ont été réalisés en 2 semaines (mars et avril 2013).

Ces travaux ont été suivis par Géotec dans le cadre d'une mission G4 de supervision géotechnique d'exécution.



Figure 5. Point d'impact du RIC - cratère profond de 90 cm

Bien que les mesures de vibration lors des essais n'aient pas mis en évidence de valeurs dépassant les seuils admissibles pour les constructions avoisinantes, une tranchée de dissipation a été réalisée le long de la route du fret, entre la zone à traiter et le bâtiment et l'ouvrage d'Art existants. Cette tranchée coïncide en fait avec

le tracé de la future conduite (DN 1800 mm), dont la réalisation a ainsi été anticipée. Les vibrations ont été suivies en continu dans le bâtiment au moyen 2 capteurs, avec définition d'un seuil d'alerte à 1 mm/s.

5.2. Contrôles

Les essais de contrôles après traitement ont consisté en 30 essais de pénétration statique profonds de 6 m. Ils ont montré que les objectifs définis lors des planches d'essai ont été atteints jusqu'à 5 m de profondeur.

L'examen des enregistrements des paramètres du RIC indique :

- des enfoncements variables de 30 à 40 cm dans les zones les plus compactes ;
- des enfoncements de 80 à 90 cm dans les zones les plus molles (limono-argileuses) ;
- nombre de coups / point d'impact compris entre 40 et 80 ;
- une énergie moyenne de 4 MN.m.

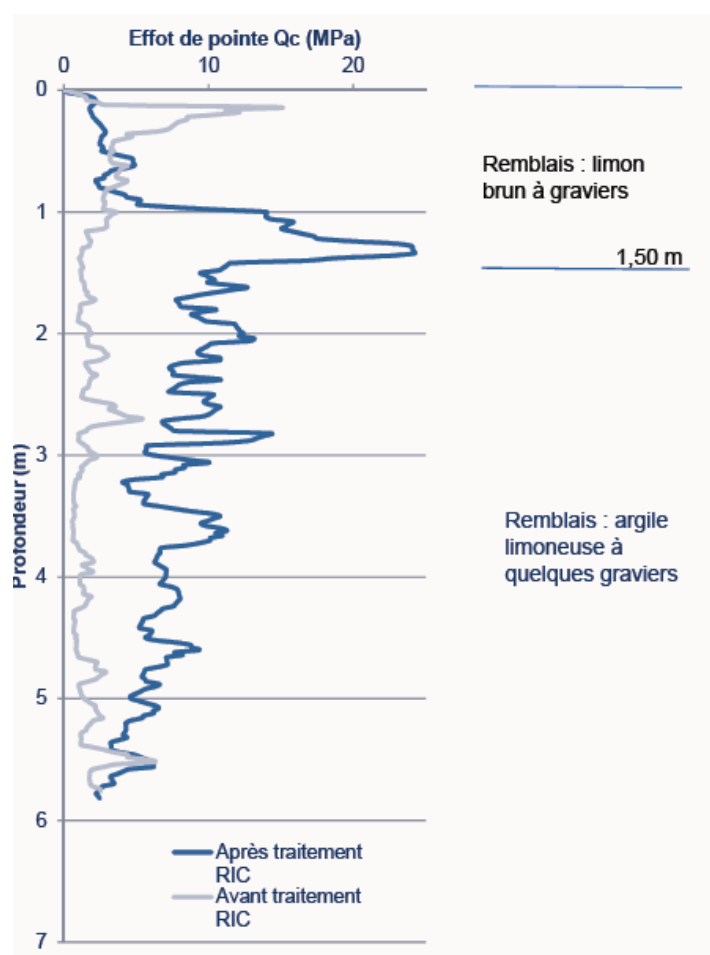


Figure 6. Efficacité du traitement jusqu'à 5 m

5.3. Travaux de finition - structure des voiries

Après réalisation du traitement, les points d'impact ont été comblés et la plateforme a été mise à niveau. Le compactage de surface a été repris de manière traditionnelle

au moyen d'un pied de mouton. La couche de forme a ensuite pu être mise en œuvre, avec intercalation d'un géotextile anticontaminant.

6. Retours d'expérience

Tout comme le compactage dynamique, le RIC est très efficace dans les sols pulvérulents (sable, gravier et blocs) saturés ou non ; il est par contre inefficace dans les sols argileux saturés. Pour les terrains intermédiaires entre ces deux extrêmes, l'efficacité du compactage est plus ou moins importante selon la teneur en matériaux fins du sol, selon le degré de saturation et selon la perméabilité du sol.

La compression du matériau sous l'impact peut être vérifiée en phase d'exécution par la mesure du volume de compression (volume de l'empreinte) corrigé du soulèvement. Lorsque l'enfoncement de la masse se traduit uniquement par du gonflement, l'effet de la compression et les vibrations générées n'ont pas d'effet sur les caractéristiques du sol.

L'influence du compactage dynamique est décroissante avec la profondeur et dépend de l'état initial des caractéristiques mécaniques du sol en profondeur. La formule suivante déduite des observations sur de nombreux chantiers donne une estimation de la profondeur D du traitement :

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha(H \times M)}$$

H : la hauteur de chute en mètres ;

M : masse utilisée en tonnes ;

Alpha : coefficient caractérisant le type de la chute. Dans le cas du RIC, ce coefficient varie de 10 à 15 selon la compacité du sol en profondeur. Le maximum étant pour les terrains très lâches.

A la différence du compactage dynamique traditionnel, la plaque reste en contact en permanence avec le sol et la déperdition d'énergie est moins importante.

Le niveau de la nappe est également un paramètre déterminant pour connaître la profondeur d'influence. Pour les matériaux limono-argileux, la profondeur D est par contre limitée à la profondeur de la nappe.

L'augmentation des caractéristiques de sol par compactage dynamique est étroitement liée aux caractéristiques suivantes :

- l'énergie de compactage,
- leur granulométrie,
- leur pourcentage de fines FC,
- la profondeur de la couche à renforcer,
- l'état initial de compacité,
- la teneur en eau des sols.

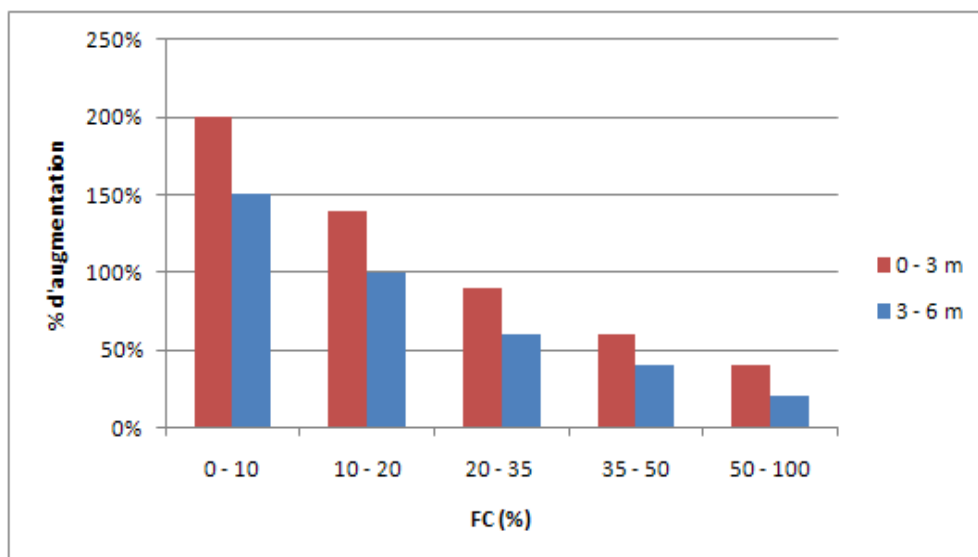


Figure 7 : Pourcentage d'augmentation des caractéristiques en fonction du pourcentage de fines.

7. Conclusion

La technique du Rapid Impact Compaction, développée à l'origine pour les réparations rapides de terrains d'aviation militaires, s'est peu à peu étendue à des applications civiles, et en Europe Centrale depuis 2007. Cette évolution du procédé de compactage dynamique constitue une alternative à la méthode traditionnelle, en alliant performances techniques, sécurité et coût. Les résultats de données empiriques et l'expérience acquise sur de nombreux chantiers permettent ainsi une application optimisée du procédé, comme dans le cas du chantier de l'EuroAirport pour le traitement, jusque vers 5 m de profondeur, de remblais hétérogènes de compacité très variable. La technique permet en outre de limiter de manière considérable les vibrations sur les avoisinants.

Références bibliographiques

- Adam D., Paulmichl I., Adam C., Falkner F.-J. (2013). Five years of Impact Compaction in Europe, 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pages 1225 to 1228.
- Serridge C.J., Synac O. (2006). Application of the Rapid Impact Compaction (RIC) technique for risk mitigation in problematic soils, IEAG2006, paper number 294.
- Kristiansen H., Davies M. (2004). Ground improvement using Rapid Impact Compaction, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, paper No. 496.