

Compactage du ballast

Détermination d'un indicateur par photogrammétrie

Rapport d'étude, février 2020



Partenaire(s) de l'étude

CER, Dter Normandie Centre

LRR, Dter Normandie Centre

Rapport d'étude du Cerema

Compactage du ballast

Détermination d'un indicateur par photogrammétrie

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1,0	15/12/2019	
1,1	17/02/2020	

Affaire suivie par

Denis JOUIN - Laboratoire Régional de Rouen – Unité GID
Tél. : +33 2 35 68 82 88
Courriel : denis.jouin@cerema.fr
Site de Grand Quevilly : Cerema Normandie Centre – 10 chemin de la poudrière 76120 Le Grand Quevilly

Références

n° d'affaire : C18RE0007

Partenaire : CER

Devis n° xx/xxx du jj/mm/aaaa

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Denis Jouin	15/12/2019	
Avec la participation de	Delphine Jacqueline, Rodolphe Duval		
Contrôlé par			
Validé par			

Résumé de l'étude :

RFF sous-traite de plus en plus souvent le compactage du ballast ferroviaire. Elle recherche un indicateur lui permettant d'évaluer la qualité du compactage réalisé par le sous-traitant. Le CER a été chargé par RFF d'une étude pour évaluer cette compacité par des méthodes acoustique, sismique et électromagnétique.

La présente étude, à l'initiative du CEREMA et dans le cadre d'une API, ajoute une quatrième méthode : analyse statistique du nuage de points 3D de la surface du ballast obtenu par photogrammétrie.

L'étude montre que les caractéristiques statistiques des modèles numériques de terrain construits par photogrammétrie sont fortement corrélées au niveau de compactage du ballast et indiquent avec robustesse la qualité du compactage effectué.

SOMMAIRE

1 ORIGINE.....	5
1.1 Histoires.....	5
1.2 Vision.....	5
1.3 Conversation ferroviaire.....	5
1.4 API (Actions de Partenariat et d'Innovation).....	6
2 PRÉMISSES.....	6
2.1 Premier passage.....	6
2.2 Passage à niveau.....	7
2.3 De la photo au nuage de points, puis au MNT.....	7
3 INDICATEURS.....	8
3.1 Statistiques basiques.....	8
3.2 Histogramme.....	8
3.3 Tortuosité : Pourquoi ?.....	9
4 MÉTHODOLOGIE.....	11
4.1 Le cadre de l'expérimentation.....	11
4.2 Acquisition des données : prise de vue et nuage de points 3D.....	12
4.3 La base de référence des tests.....	12
4.4 Le test.....	12
5 DANS LA PRATIQUE.....	12
5.1 Planche d'essai.....	12
5.2 Prises de vue.....	15
5.3 Outils de photogrammétrie.....	17
5.4 Le nuage de point dense.....	17
6 DÉFINIR UNE RÉFÉRENCE.....	18
6.1 Transformation effectuée sur chaque emprise.....	19
6.2 Calcul des indicateurs sur l'emprise compactée.....	19
6.3 Calcul des indicateurs sur l'emprise semi-compactée.....	22
6.4 Calcul des indicateurs sur l'emprise foisonnée.....	25
6.5 Bilan.....	27
6.6 Visualisation d'un profil.....	28
7 PROTOCOLE ET RÉFÉRENCES.....	28
7.1 Protocole.....	28
7.2 Références.....	29
7.3 Tester un nuage de points pour déterminer son état de surface.....	29

8 DÉTERMINATION DE L'ÉTAT D'UNE EMPRISE.....	30
8.1 Test 1 : emprise compactée.....	30
8.2 Test 2 : emprise semi-compactée.....	33
8.3 Test 3 : emprise foisonnée.....	36
9 CONCLUSION.....	38
10 GLOSSAIRE.....	40
10.1 Photogrammétrie.....	40
10.2 Statistique.....	41
10.3 Logiciels.....	41
10.4 Sigles.....	42
11 ANNEXES.....	43
11.1 API.....	43
11.2 Plan de la planche d'essai.....	47
11.3 Tortuosités.....	48
11.3.1 État de surface.....	48
11.3.2 Anisotropie.....	48
11.3.3 Influence du maillage du MNT.....	49
11.3.4 Prise en compte de la topologie.....	50
11.3.5 Bilan.....	50
12 TABLES DES FIGURES.....	51

1 Origine

1.1 Histoires

Vers l'an 2000, travaillant sur les SIG¹, je fus amené, à la demande d'un hydrologue², à exploiter un MNT pour déterminer les bassins versants. Ce premier travail sur les données raster en amena un autre : peser le sel répandu par les saleuses à partir de photos prises dans des conditions normées, étude faite à la demande de Didier Giloppé du CETE Normandie-Centre. Puis le LRR me demanda de rechercher les fissures dans les photos de chaussées, afin de soulager les opérateurs manuels (et visuels !) de l'application IQRN. Ces expériences me convainquirent que l'œil est le meilleur outil permettant d'extraire l'information d'une image. Sa capacité de synthèse est exceptionnelle. Les algorithmes peuvent, dans certaines conditions, obtenir des résultats intéressants. Par exemple à partir des MNT, qui ne sont pas une information brute mais une information très structurée, résultat de procédures élaborées.

Je travaille depuis 2015 en photogrammétrie : cette technique permet d'obtenir des nuages de points 3D à partir de simples photos. Ces nuages peuvent ensuite être projetés en MNT, c'est-à-dire une donnée structurée et robuste dont il est possible d'extraire des informations de niveau supérieur.

1.2 Vision

En septembre 2017 des collègues me présente la planche d'essai « compactage du ballast » du CER. Cette planche, de 15 m par 3 m environ, est divisée en 3 parties, séparées par des marques orangées : une partie est restée foisonnée, et 2 ont été compactées, légèrement pour l'une, sérieusement pour l'autre. L'étude de cette planche consiste à trouver un moyen permettant de distinguer ces 3 états. Trois méthodes seront étudiées : acoustique, sismique, électromagnétique.

Observant la planche, à l'œil, l'apparence des 3 zones est sensiblement différente : une analyse d'image doit retrouver ces différences. D'autant plus que la photogrammétrie permet d'obtenir un MNT ! L'idée jaillit d'utiliser cette technique et d'aborder la question via une quatrième méthode : la photogrammétrie !

1.3 Conversation ferroviaire

Au retour de la réunion annuelle de la communauté métier informatique (CM15) de novembre 2017 je rencontre Christophe Descatoire, directeur du DERDI dont fait partie le CER. Dans le train Paris-Rouen je lui expose mon idée d'utiliser la photogrammétrie pour l'étude sur le compactage du ballast et lui suggère d'utiliser la cadre des API permettant

¹ Un glossaire des termes technique se trouve en fin du rapport. Il comporte 4 parties : Photogrammétrie, statistique, logiciels et sigles.

² Hubert Caplet de la DIREN Basse-Normandie.

d'étudier des innovations autofinancées par le CEREMA. Il comprend l'intérêt de cette recherche et adhère au projet d'API.

1.4 API (Actions de Partenariat et d'Innovation)

Le projet est rédigé puis soumis en janvier 2018 à l'instance idoine et acceptée en avril 2018. Un financement de 120 k€, sur 2018 et 2019, réparti entre le CER et le LRR nous est attribué. L'API se concrétise dans le cadre d'affaire SIGMA C18RE0007. Les documents relatifs sont en annexe.

2 Prémisses

2.1 Premier passage

Le CER a construit pour son étude une planche d'essai d'environ 15 mètres de long et 3 mètres de large. Cette planche est divisée en 3 zones : une zone foisonnée, une zone semi-compactée et une zone compactée.

La contrainte concernant cette planche est l'interdiction de « marcher » dessus. Aussi les premières photos sont-elles prises du bord, soit à bout de bras, soit monté sur une échelle, mais de biais, car il est impossible d'obtenir une vue de dessus.

La photogrammétrie laisse apparaître de vastes zones « blanches ». En effet il est nécessaire qu'un même point soit présent sur plusieurs photos pour apparaître sur le nuage 3D construit par le programme de photogrammétrie. Or la vue de côté fait que le ballast lui-même se fait masque, que les creux sont peu visibles, que les photos prises d'un côté ne « voient » pas la même scène que les photos prises de l'autre côté.



Figure 1: le photographe sur son échelle

2.2 Passage à niveau

Le niveau de l'étude s'accroît positivement via l'instrumentation développée par le CER pour une étude menée en parallèle sur un passage à niveau. Pour cette étude, à base de photogrammétrie, le CER met au point un appareillage de prise de vue adapté : une barre horizontale montée sur un véhicule portant 6 appareils photos. Cet appareil peut-être déporté et placé au-dessus de la planche de ballast alors que le véhicule roule à côté.

Cette fois les photos permettent d'obtenir des nuages de points corrects, où les zones non représentées, lacunaires, sont un faible pourcentage de la planche. En sélectionnant la partie centrale, la mieux couverte par les 6 appareils photos, la perte d'information est négligeable.



Figure 2: La rampe auto-portée portant 6 appareils photos

2.3 De la photo au nuage de points, puis au MNT

Afin d'évaluer le niveau de compactage du ballast nous ne disposerons que de photographies représentant la surface. Cependant la photogrammétrie permet d'obtenir un nuage de points en 3 dimensions (3D) de cette surface avec une excellente précision, de l'ordre du mm dans chacune des 3 dimensions. Ce modèle en nuage de points peut être transformé en maillage régulier par des algorithmes qui respectent la géométrie naturelle du terrain. On obtient ainsi un MNT, équivalent d'un raster : une grille régulière représentant la surface et portant une information en chaque nœud de la grille : dans notre étude il s'agit de la composante en z de la géométrie : l'altitude du nœud.

Que ce soit à partir du nuage de points ou du MNT la valeur que nous étudierons est la hauteur³ du ballast en chaque point, l'altitude, le « Z ».

³ L'altitude de référence étant arbitraire, les valeurs de Z ne sont que relatives. Aussi le modèle doit être

3 Indicateurs

3.1 Statistiques basiques

Soit un ensemble de valeur : pour le synthétiser nous disposons d'outils statistiques. Les plus simples sont les valeurs synthétiques basiques suivantes :

- moyenne
- médiane
- écart-type
- étendue

Ces valeurs sont calculables sans ambiguïté et sont dans l'unité de la mesure.

Le mode est aussi une statistique intéressante : c'est la valeur la plus représentée dans l'ensemble des valeurs, ou pour des sous-ensembles distincts ;

Si la variable mesurée est continue le mode nécessite une répartition en classes de la population. La valeur dépendant des limites de classes retenues. Il est intéressant car s'il est multiple alors il indique que les valeurs étudiées sont probablement le résultat d'un mélange de plusieurs populations⁴.

3.2 Histogramme

Une représentation synthétique courante d'un ensemble de valeurs est l'histogramme.*

Il représente graphiquement la répartition des fréquences des valeurs, préalablement réparties en classes.

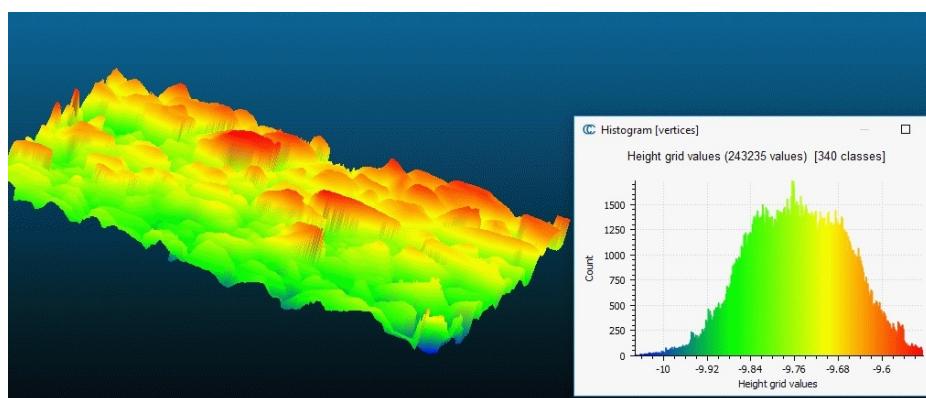


Figure 3: Histogramme : exemple

Plus visuel et plus riche d'informations que les indicateurs statistiques basiques il consiste en une « forme » qui peut être approchée par une fonction continue ou une loi statistique. Le test de Kolmogorov-Smirnov permet de tester l'ajustement de deux « formes ». Par

mis « à plat » localement pour calculer une tortuosité non biaisée..

4 Les présentations en histogrammes visualisent les modes : voir l'exemple ci-dessous.

exemple le test permet de tester si un histogramme est ajusté à une loi normale.

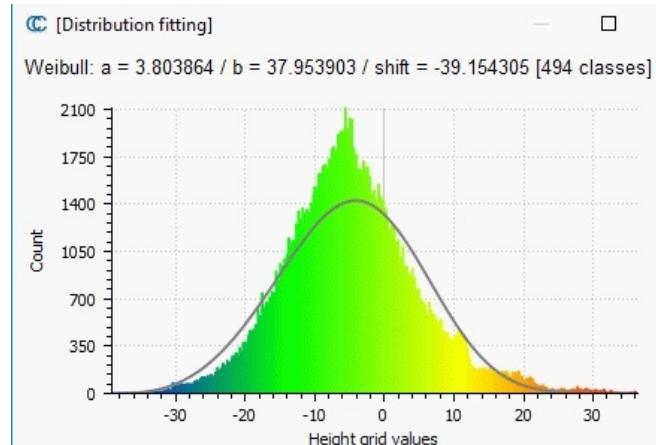


Figure 4: Histogramme et loi normale

Nous utiliserons l'histogramme des « z⁵ » et des valeurs de la tortuosité sur chaque zone.

Lorsque l'histogramme est bimodal, comme ici pour les « z » d'une zone foisonnée, il fait apparaître les mélanges de 2 populations : ici les creux et les bosses.

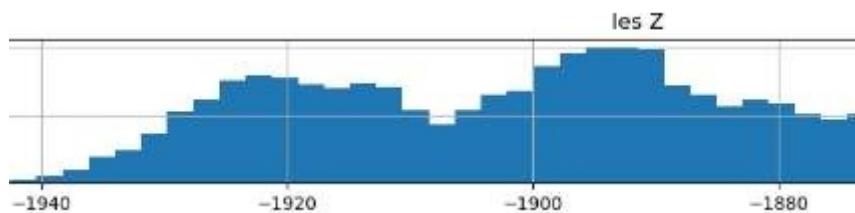


Figure 5: Histogramme bimodal, met en évidence un mélange probable de populations

3.3 Tortuosité : Pourquoi ?

Il nous faut un indicateur synthétique caractérisant l'état plus ou moins « compact » de la surface. A vue d'œil les parties compactées comportent moins d'aspérités, les creux et les bosses sont moins prégnants. Le parcours de la surface en ligne droite et en suivant la géométrie des cailloux semble plus « court » que sur la partie restée foisonnée. Un indicateur mesure ce rapport : la tortuosité. Il est défini entre 2 points pris la même droite d'un MNT par la formule :

$$T = DS / DC \quad (1)$$

T = tortuosité

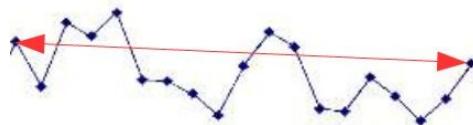
DS = distance parcourue pour aller d'un point à l'autre en suivant la surface

DC = distance directe entre les 2 points

5 Z est l'altitude calculée par photogrammétrie pour le nuage de points, interpolée pour le MNT.

Du fait de sa définition T est toujours supérieure ou égale à 1.

T est une grandeur sans dimension.



$$DC = \text{longueur en suivant la surface} = 103$$

$$DS = \text{longueur en ligne droite} = 69$$

$$\text{Tortuosité} = 103/69 = 1.49$$

Figure 6: Tortuosité : illustration

Cet indicateur synthétise la géométrie de la surface.

Cet indicateur présente 2 caractéristiques intéressantes :

1) Il est indépendant de l'unité utilisée pour la mesure des longueurs, car il s'agit d'un rapport entre 2 distances.

2) Il permet de déceler les anisotropies de surface. Si la surface étudiée est anisotope la valeur de la tortuosité dépend de la direction de la mesure.

Un calcul de tortuosité n'est pas disponible directement sur le nuage de points obtenu par photogrammétrie : en effet le parcours sur la surface « en ligne droite » nécessite la présence de points alignés suivant une direction, ce qui n'est pas assuré par le nuage. Un modèle numérique de terrain, MNT, permet d'interpoler des altitudes suivant une grille régulière à mailles carrées. Cette grille présente des points alignés permettant de calculer facilement la tortuosité en suivant les parallèles aux axes de la grille.

L'indicateur T est local : il est calculé entre 2 points. Pour obtenir un indicateur « surfacique » nous calculerons 200 valeurs de T orientées suivant l'axe des x du MNT et nous calculerons la médiane⁶ de ces 200 valeurs. Puis suivant l'axe des y du MNT. Ces 2 valeurs nous fourniront un indicateur pour chacune des 3 zones.

Voir en annexe une présentation plus détaillée sur la tortuosité.

⁶ La médiane est retenue car elle est moins sensible aux valeurs extrêmes que la moyenne.



Figure 7: Histogramme des 200 valeurs de tortuosités : exemple

4 Méthodologie

4.1 Le cadre de l'expérimentation

- une planche d'essai composé d'un ballast réparti en 3 zones repérées, comportant des niveaux progressifs de compactage du ballast : ballast foisonné, ballast semi-compacté, ballast compacté ;
- Le ballast de la planche d'essai est constitué de cailloux en gros parallélépipédiques, de dimensions caractéristiques de dimensions 5cm*4cm*2cm pour les petits, 7cm*5cm*3cm pour les moyens et 8cm*6cm*4cm pour les gros.



Figure 8: Ballast avec règle de 40 cm

4.2 Acquisition des données : prise de vue et nuage de points 3D

- un protocole de prise de vues permettant d'acquérir des photographies de l'ensemble de la planche d'essai
- un outil de photogrammétrie fournissant un nuage de points en 3 dimensions de la surface de la planche d'essai.

4.3 La base de référence des tests

- Pour chacun des 3 niveaux de compactage nous extrayons du nuage de points global un sous-ensemble homogène de taille suffisante.
- Sur chacun des 3 sous-ensembles nous calculons les indicateurs retenus, indicateurs de référence, et les mémorisons.

4.4 Le test

- Le test consiste à acquérir les données sur la zone que l'on souhaite qualifiée en suivant la procédure indiquée au point 4.2.
- Un sous-ensemble du nuage obtenu sera ensuite déterminé, les indicateurs calculés sur ce nuage et testés par rapport aux indicateurs de référence des 3 niveaux de compactage.
- Pour chaque indicateur le test sera le test non-paramétrique de Kolmogorov-Smirnov permettant d'évaluer la proximité de 2 fonctions de répartition. Une p-value est affectée à chaque test, permettant simplement de décider de l'appartenance, ou non, de la zone testée à une catégorie de compactage.

5 Dans la pratique

5.1 Planche d'essai

La planche d'essai est préparée pour un type de ballast donné et 3 niveaux de "compactage" sont réalisés sur 3 parties délimitées par des tracés orange. Pour la présente étude il s'agit de la planche d'essai réalisée par le CER en 2017. Elle est globalement orientée Nord-Sud. Le côté ouest est bordé par un talus.



Figure 9: la planche en cours de compactage, vue du sud

Schéma de la planche :

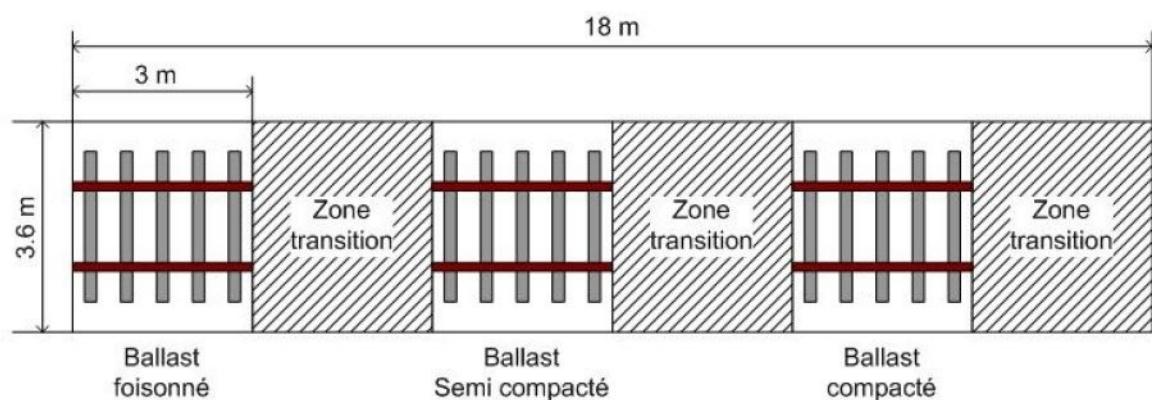


Figure 5 : Schéma de la structure d'essais - vue de dessus

Figure 10: Plan de la planche

Vue d'un nuage de la planche complète⁷ :

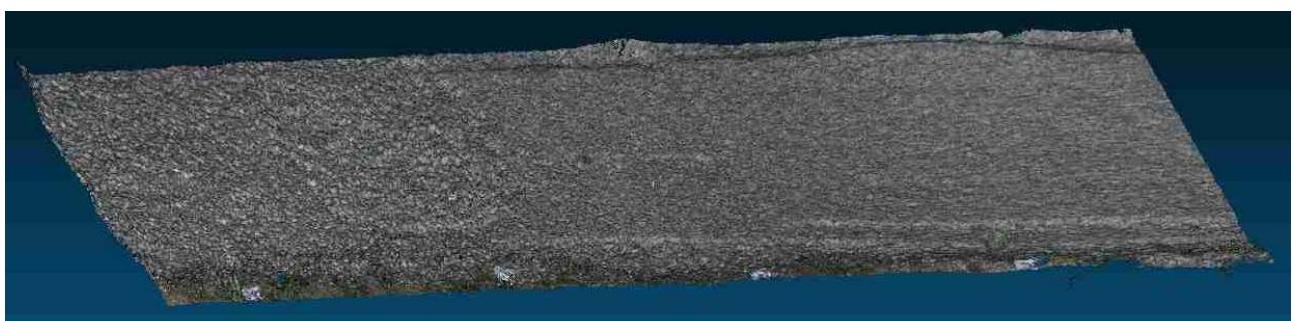


Figure 11: le nuage 3D de la planche : on distingue la zone foisonnée à gauche

⁷ les fichiers Projet1-CER-03-11-2017-metric – CloudSegment.ply et Projet1-CER-14-11-2017-metric-rot-x-y – CloudSegment.ply ont été obtenu par Photoscan.

Un tracé orange est positionné en Y = -98 et Z = -16 en coordonnées natives. Une fois appliquée la métrique millimétrique les coordonnées deviennent : Y = -11 760 et Z = -1920.

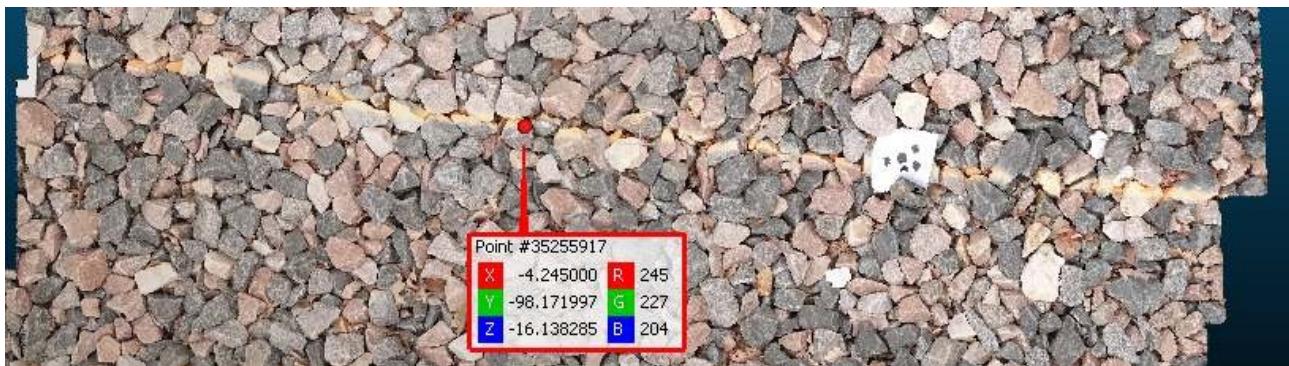


Figure 12: Vue 3D de la marque séparant les zones semi-compactée (en haut) et foisonnée

La séparation compactée/semi-compacté est marquée par un tracé orange positionné en Y = -8 et Z = -10 en coordonnées natives. Une fois appliquée la métrique millimétrique les coordonnées deviennent : Y = -960 et Z = -1200.

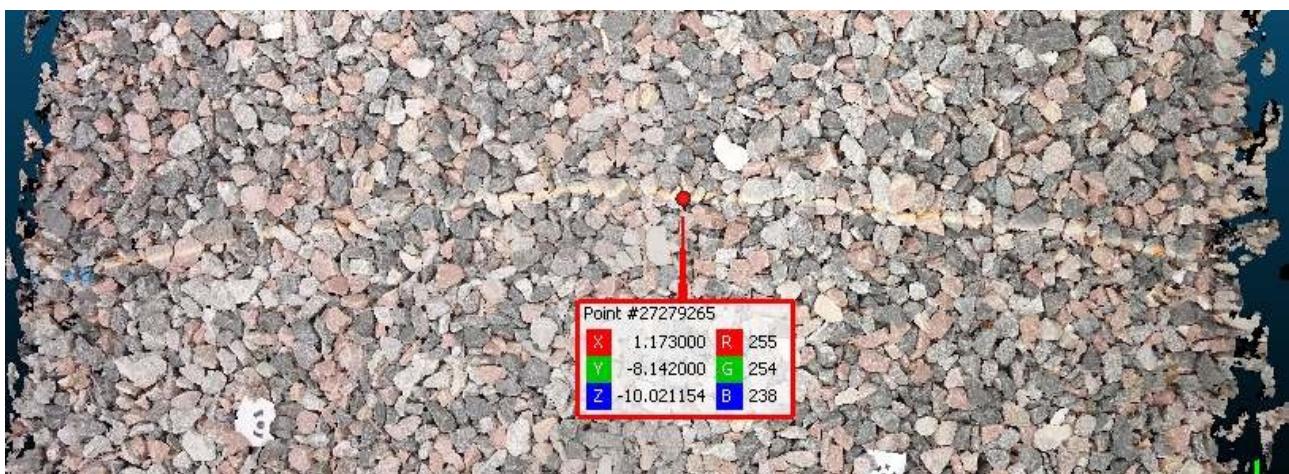


Figure 13: Vue 3D de la marque séparant les zones compactée (en haut) et semi-compactée.

La planche est constituée de ballast dont les dimensions caractéristiques sont centimétriques :

Longueur : de 5 à 10 cm

largeur : de 4 à 6 cm

épaisseur : de 2 à 4 cm

Pour des raisons de préservation de l'état de la planche il n'est pas autorisé de la piétiner, ce qui a contraint les conditions de prise de vue :

- soit à être effectuées depuis les bords de la planche, la vue en biais impliquant

alors des masques de visibilité

- soit à fabriquer une rampe porteuse de l'appareil photo afin d'obtenir des prises de vue depuis la verticale, sans masque de visibilité



Figure 14: Nuage obtenu à partir de photos prises en biais et montrant les vides des zones masquées

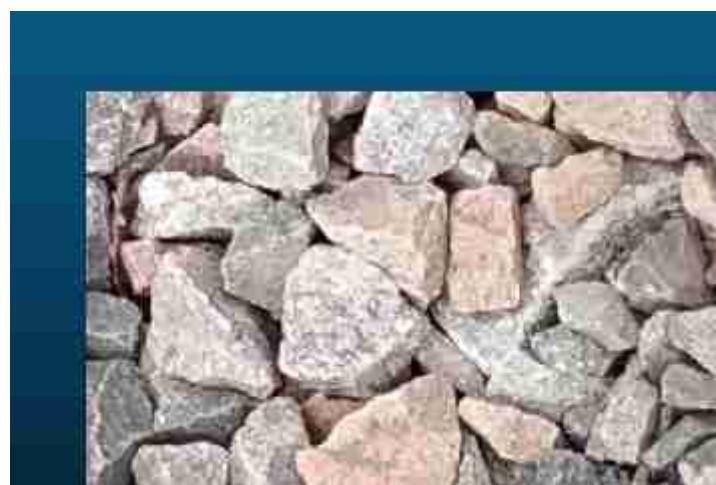


Figure 15: Nuage obtenu par des photos prises « du dessus » : il n'y a pas de zones « vides »

5.2 Prises de vue

Pour la présente étude 3 séquences de prises de vue ont été effectuées :

- 2 séries de prise de vue manuelles le 25 octobre 2017 vers 14h appareil Canon

EOS 70D (2736×1824 pixels) :

- une prise de vue à partir d'une échelle surplombant la planche (côté ouest)
 - une prise de vue à pied du bord de la planche (côté est)
-
- une série de prises de vue manuelle le 5 août 2018 du bord de la planche avec un appareil photo Panasonic DMC-XS1 4608×3456 pixels
 - une série de prises de vue automatisée le 8 mars 2019 par une rampe, portant 6 appareils photos, tractée par un véhicule circulant à côté de la planche d'essai. Les appareils sont des SONY DSC RX0 4800×3200 pixels.

Les fichiers obtenus sont de type « JPEG ».

Après examen des photographies obtenues il est apparu :

- que le nombre de photos prises le 25 octobre 2017, 53, est insuffisant pour un résultat satisfaisant sur toute la zone.
- Que l'état de surface de la planche d'essai était perturbé en 2018 par la présence de nombreuses feuilles mortes et que le nombre de photos n'est que de 49.



Figure 16: présence de feuilles mortes sur les photos du 5 août 2018

Les photographies retenues pour l'étude sont donc celles prises le 8 mars 2019. Chaque appareil photos a enregistré 260 clichés, soit 1560 photos. Un nuage de point 3D a été obtenu par le logiciel MicMac en exploitant les 260 photos prises par un seul des 6 appareils photos de la rampe,



Figure 17: Zoom extrait de la photo DS106338 prise le 8 mars 2019

Sur la photo ci-dessus le diamètre du cercle extérieur de la cible est de 3 cm. L'épaisseur du trait du cercle est de 0,5 mm..

5.3 Outils de photogrammétrie

L'outil de photogrammétrie utilisé pour générer les nuages de point est soit l'outil libre de l'IGN MicMac (et son interface graphique AperoDeDenis) soit Photoscan (outil propriétaire de la société Agisoft, rebaptisé MetaShape fin 2018). Les résultats obtenus par les 2 outils sont équivalents en termes de densité de points et de qualité de résultat.

Les fichiers obtenus sont de type nuage de points « PLY ».

5.4 Le nuage de point dense

Le nuage sélectionné pour l'étude est un nuage dense obtenu par photogrammétrie sur des photographies prises le 8 mars 2019. Le dispositif de prise de vue est constitué d'une rampe portant 6 appareils photos et fixée sur un véhicule. Le véhicule longe la planche d'essai, maintenant la rampe au-dessus de la planche d'essai. Les appareils sont situés au-dessus de la planche, supprimant ainsi les parties masquées lorsque la photo est prise du bord. Les 6 appareils SONY DSC RX0 prennent chacun 260 photos. Chaque photo fait 4800×3200 pixels soit 15 millions de pixels. La planche est ainsi décrite par 1560 photographies et 24 milliards de pixels pour 45m² de surface : soit environ 500 pixels par mm². Nous décidons de n'exploiter les photographies que d'un seul appareil, la qualité des images restant satisfaisantes.

Le nuage dense obtenu par le logiciel micmac comporte environ 204 millions de points pour une surface de 37 m² soit 5,5 points au mm². Cette densité, millimétrique, permet une bonne représentation de la surface du ballast dont les caractéristiques sont centimétriques.

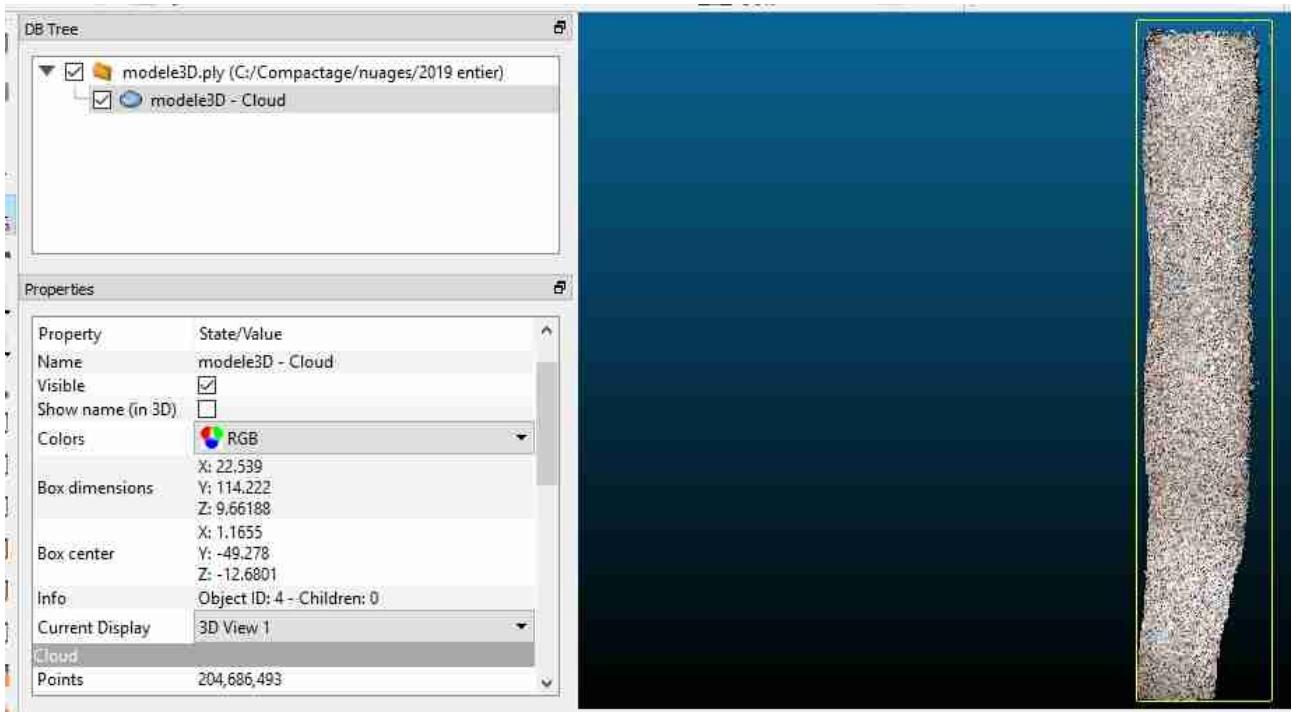


Figure 18: Nuage à l'origine des emprises utilisées dans cette étude : environ 2,6 m par 13m, comptant 204 millions de points

L'absence de repères métriques et altimétriques sur la planche d'essai ne permet pas de caler le nuage obtenu par photogrammétrie. Le nuage de points obtenu présente une pente longitudinale. Cette pente n'est pas le reflet de la planche elle-même qui est globalement horizontale. Cette pente n'affecte pas les caractéristiques géométriques locales de la surface du ballast. Pour les calculs des tortuosités, et des statistiques sur les Z, la pente est supprimée par une mise à plat locale des MNT et des nuages de points utilisés. De même une modification d'échelle est appliquée afin d'obtenir une métrique millimétrique. Le nuage ne comporte pas les extrémités de la planche : les zones compactée et foisonnée ne sont pas couvertes en totalité.

6 Définir une référence

La définition d'une référence consiste à choisir une emprise dans chacune des trois zones de compactage et à calculer les indicateurs pertinents pour chacune. Nous effectuerons ensuite un test statistique afin de déterminer si ces indicateurs sont significativement différents et donc caractérisent bien chaque zone.

Nous choisirons et testerons une emprise dans chaque zone de compactage, ceci afin de vérifier la robustesse du test aux caractéristiques locales particulières de l'emprise choisie.

Les calculs des indicateurs sont effectués par le logiciel Compact Test, construit expressément pour cette étude.

6.1 Transformation effectuée sur chaque emprise

Les emprises de référence sont extraites du fichier Modele3D.ply obtenu par MicMac et son interface CEREMA, AperoDeDenis, le 4 avril 2019.

Les noms des fichiers font apparaître la position de l'emprise au sein du nuage Modele3D.ply. Cette position est en unité du nuage, les X repérant la largeur et les Y la longueur. Les bornes des X sont [-10 ;8] et celles de Y [-106 ;8]. Les coordonnées sont ensuite multipliées par 120 pour obtenir une métrique millimétrique. Le nom du fichier fait apparaître cette transformation.

Ce modèle obtenu d'après 260 photos provenant d'un seul des 6 appareils de la rampe ne présente qu'une partie de la planche d'essai. Son intérêt réside dans la très grande qualité du résultat obtenu : de 1 à 4 millions de points au m² suivant les zones soit de 100 à 400 points au cm².

Après extraction elles sont « misées à plat »⁸, en effet la pente éventuelle de l'emprise serait un artefact qui n'intéresse pas la géométrie locale de la surface. La matrice de passage est présentée pour chaque transformation. L'outil utilisé est Cloud Compare.

Le nuage de point ainsi obtenu est alors transformé en MNT. La maille régulière et carrée du MNT permet le calcul de la tortuosité de la surface. La tortuosité est calculée sur 200 lignes du maillage choisie au hasard, puis moyennée. L'outil utilisé est Compact Test.

6.2 Calcul des indicateurs sur l'emprise compactée

Une première emprise carrée de 360 mm de côté⁹ est extraite de la zone compactée. Elle comporte 1 001 432 points. Une fois « à plat » l'épaisseur est de 45 mm.

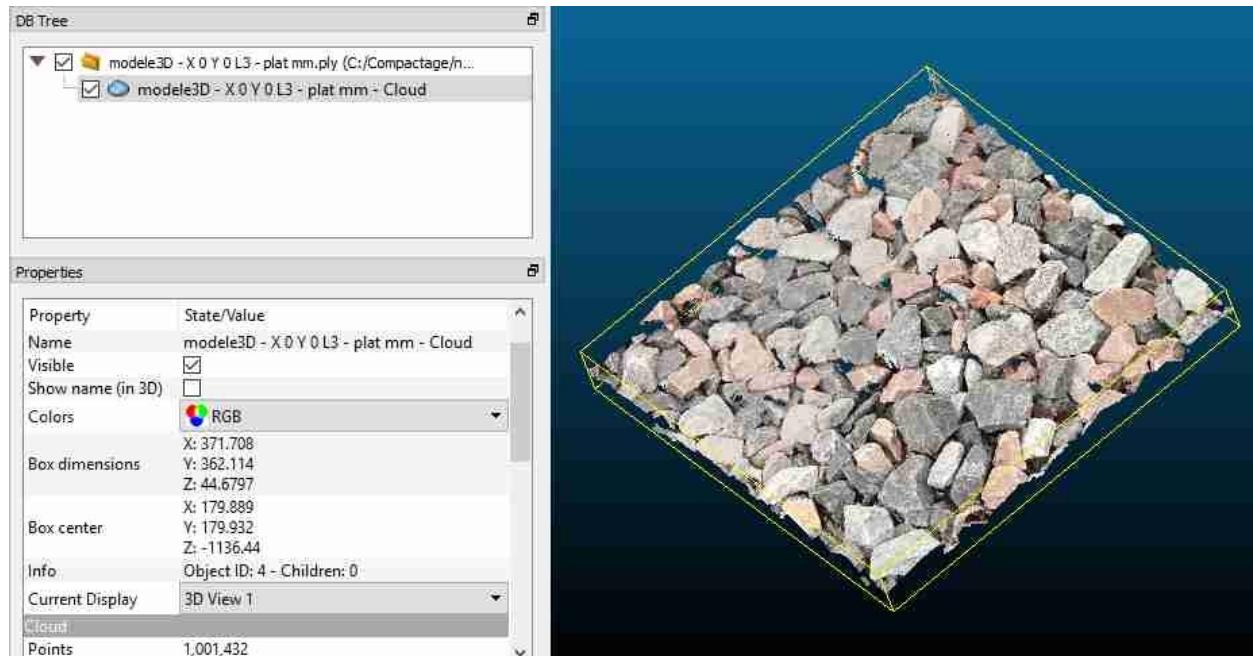


Figure 19: Visualisation de l'emprise « de référence » compactée par Cloud Compare

8 La « mise à plat » est effectuée par Cloud Compare : tools/fit/Plane calcule la matrice de transformation puis cette matrice est recopiée dans Edit/apply transformation et appliquée au nuage de points.

9 Dimension précise indiquée sur la copie d'écran. 1 million de points. Cette dimension paraît être le minimum et peut être augmentée mais non diminuée.

Statistiques sur les valeurs de Z¹⁰, et les 200 valeurs calculées des tortuosités :

```
Statistiques sur les valeurs de Z du fichier  
C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y 0 L3 - plat mm.ply  
  
nombre : 1001432  
moyenne : -1137.0564146591498  
ecartType : 5.832201348940669  
variance : 34.01457257458536  
etendue : 33.358642578125  
asymetrie : -0.14974045051658152  
kurtosis : -0.10906256640720757  
mediane : -1136.8338623046875  
  
-----  
Calcul des tortuosites sur un MNT deduit du sernis de points du PLY  
Le MNT comporte 1.0 maille(s) par point du nuage  
  
tortuosite moyenne transversale : 1.442  
tortuosite moyenne longitudinale : 1.424
```

Figure 20: Statistiques sur les valeurs Z et les tortuosités, emprise compactée

Le logiciel Compact Test exploite ce fichier ply, crée un MNT :

```
PLY vers MNT : Fichier PLY traité:  
C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y 0 L3 - plat mm.ply  
  
Fichier MNT écrit sur disque:  
C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y 0 L3 - plat mm_MNT.txt  
  
mini et maxi sur l'axe des x : -5.965 365.743  
mini et maxi sur l'axe des y : -1.1 360.9886  
Dimension du maillage : 1013 * 987  
Nombre de mailles : 999831  
  
nombre de points dans le fichier ply : 1001432  
nombre de mailles par point du nuage : 1.0  
  
Pas retenu pour le maillage : 0.3666  
  
Nombre de mailles sans valeur calculée : 7726 soit 0 %
```

Figure 21: du nuage vers le MNT – statistiques sur le MNT – emprise compactée

La visualisation des histogrammes des valeurs de Z et des 200 valeurs des tortuosités permet de vérifier la cohérence de la zone :

10 Les valeurs de Z sont écrêtées pour ces calculs : les valeurs extrêmes, les 0,5 % supérieures et 0,5 % inférieures sont ignorés. L'étendue est ainsi plus faible que sur le nuage initial.

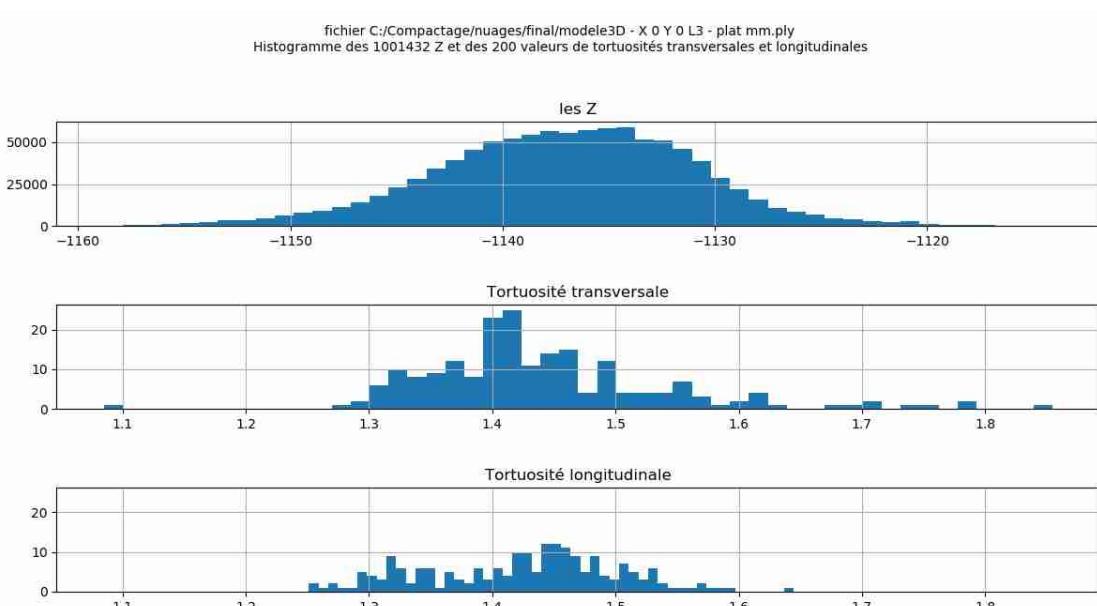


Figure 22:

Les histogrammes des Z et des tortuosités – emprise compactée

Puis Compact Test détaille la tortuosité :

```
Tortuosité sur le fichier MNT : C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y 0 L3 - plat mm_MNT.txt

Nombre de points par maille (en moyenne) = 1.0
Valeur du pas de la maille = 0.3666171452264322
Dimension du maillage = (1015, 989)

-----
Tortuosité sur les transversales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 989

tortuosité moyenne = 1.431
tortuosité médiane = 1.425

tortuosité maxi = 1.806
tortuosité mini = 1.023
variance = 0.0099513273506433
écart type = 0.09975633990199971

-----
Tortuosité sur les longitudinales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 1015

tortuosité moyenne = 1.425
tortuosité médiane = 1.428

tortuosité maxi = 1.624
tortuosité mini = 1.28
variance = 0.006438342080535792
écart type = 0.08023928015963125
```

Figure 23: Statistiques sur les 200 tortuosités calculées : moyenne, médiane, écart type... emprise compactée

Nous retiendrons les tortuosités medianes transversales et longitudinales¹¹ : 1.425 et 1.428

11 Les tortuosités étant calculés sur un échantillon de 200 lignes choisies au hasard les valeurs moyennes et médianes peuvent légèrement varier d'un calcul à l'autre

6.3 Calcul des indicateurs sur l'emprise semi-compactée

Une première emprise carrée, de côté 360 mm est extraite de la zone semi-compactée. Elle comporte 996 834 points et une épaisseur de 79 mm.

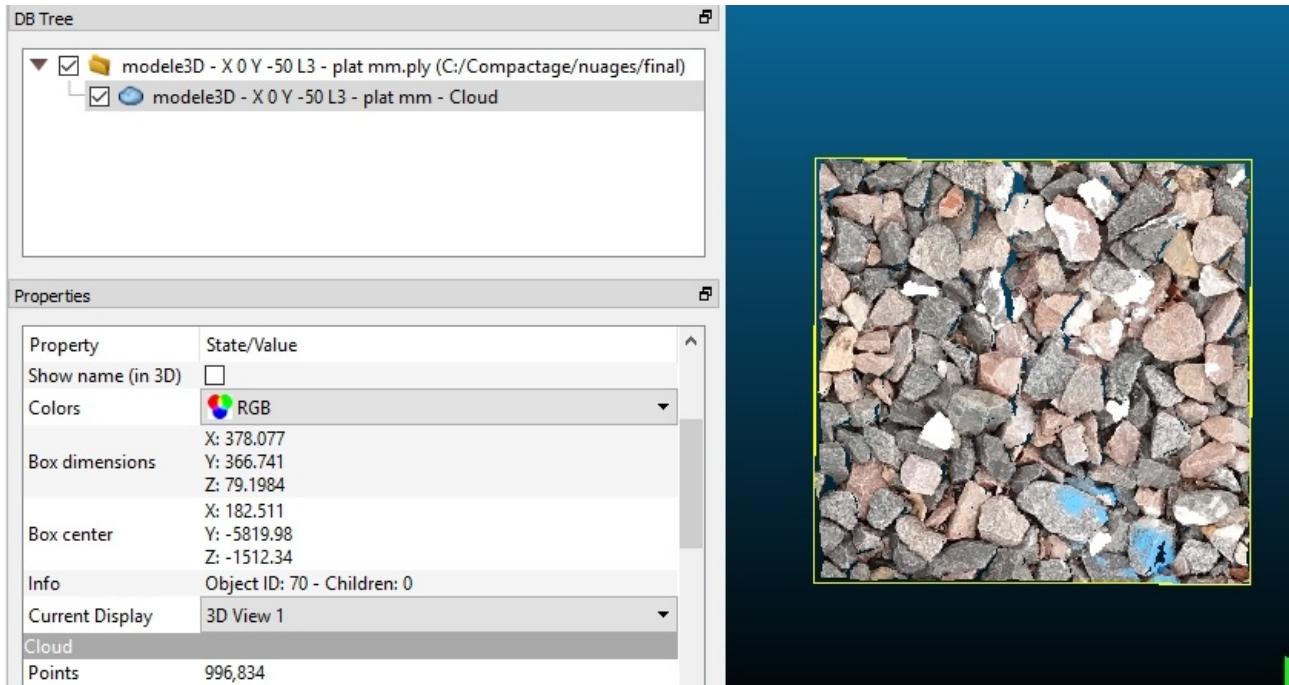


Figure 24: Visualisation de l'emprise semi-compactée par Cloud Compare

Statistiques sur les Z¹² :

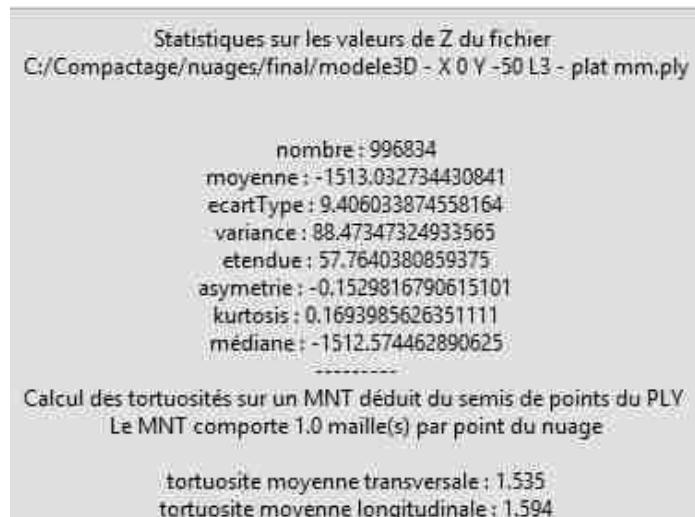


Figure 25: Statistique sur les Z et les tortuosités – emprise semi-compactée

12 Les valeurs de Z sont écrêtées pour ces calculs : les valeurs extrêmes, les 0,5 % supérieures et 0,5 % inférieures sont ignorés. L'étendue est ainsi plus faible que sur le nuage initial.

Création du MNT :

```
PLY vers MNT : Fichier PLY traité:  
C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y -50 L3 - plat mm.ply  
  
Fichier MNT écrit sur disque:  
C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y -50 L3 - plat mm_MNT.txt  
  
mini et maxi sur l'axe des x : -6.5282 371.5492  
mini et maxi sur l'axe des y : -6003.3 -5636.6089  
Dimension du maillage : 1013 * 983  
Nombre de mailles : 995779  
  
nombre de points dans le fichier ply : 996834  
nombre de mailles par point du nuage : 1,0  
  
Pas retenu pour le maillage : 0.373  
  
Nombre de mailles sans valeur calculée : 19588 soit 1 %
```

Figure 26: du nuage vers le MNT – statistiques sur le MNT – emprise !!br0ken!!

histogrammes :

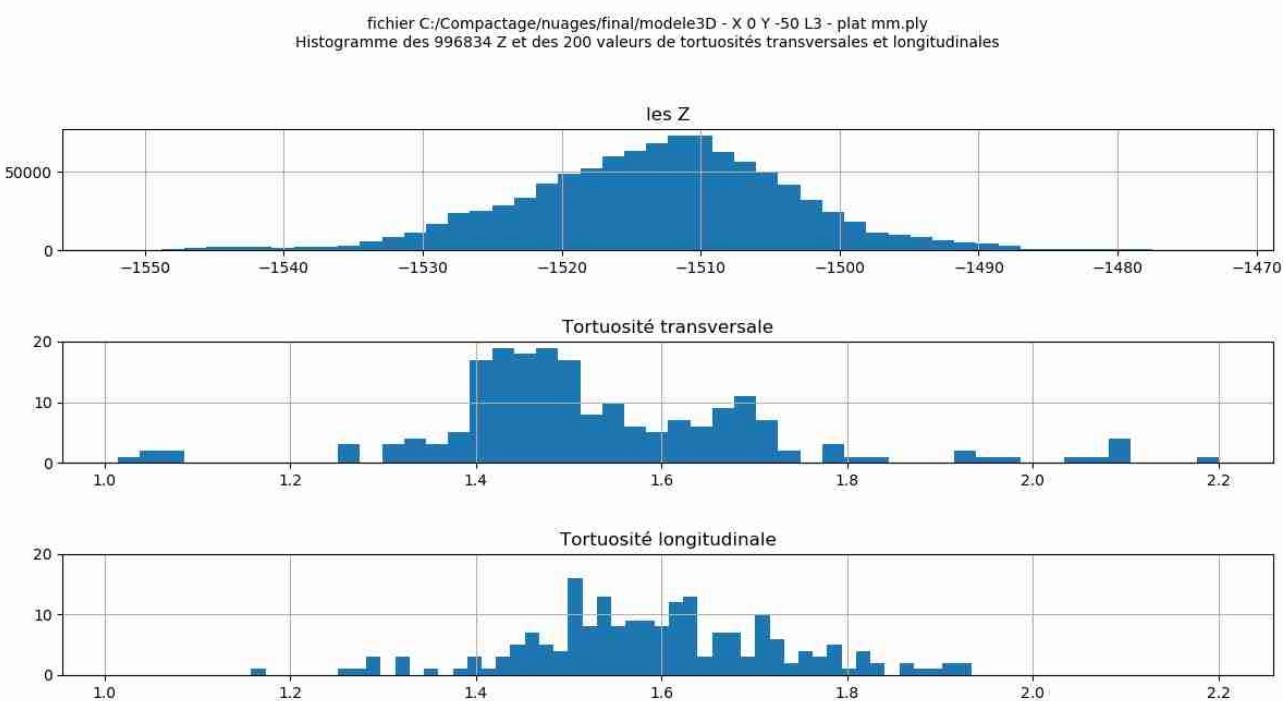


Figure 27: Les histogrammes des Z et des tortuosités - emprise !!br0ken!!

Puis Compact Test détaille la tortuosité :

```
Tortuosité sur le fichier MNT : C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X0 Y -50 L3 - plat mm_MNT.txt

Nombre de points par maille (en moyenne) = 1.0
Valeur du pas de la maille = 0.3729567756526052
Dimension du maillage = (1015; 985)
-----
Tortuosité sur les transversales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 985

tortuosité moyenne = 1.552
tortuosité médiane = 1.502

tortuosité maxi = 2.061
tortuosité mini = 1.122
variance = 0.025971747222052307
écart type = 0.16115752300793254
-----
Tortuosité sur les longitudinales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 1015

tortuosité moyenne = 1.593
tortuosité médiane = 1.58

tortuosité maxi = 2.01
tortuosité mini = 1.225
variance = 0.019177051520806974
écart type = 0.1384812316554376
```

Figure 28: Statistiques sur les 200 tortuosités calculées : moyenne, médiane, écart type... emprise semi-compactée

Pour l'emprise semi-compactée nous retiendrons les tortuosités médianes transversales et longitudinales : 1,502 et 1,580

Nous remarquons une différence significative entre les tortuosités transversale et longitudinale : le ballast n'est pas isotrope.

Les valeurs sont significativement différentes de celles de l'emprise compactée : 1,42.

6.4 Calcul des indicateurs sur l'emprise foisonnée

Une première emprise carrée, de côté 360 mm est extraite de la zone foisonnée. Elle comporte 694 546 points et une épaisseur de 97 mm.

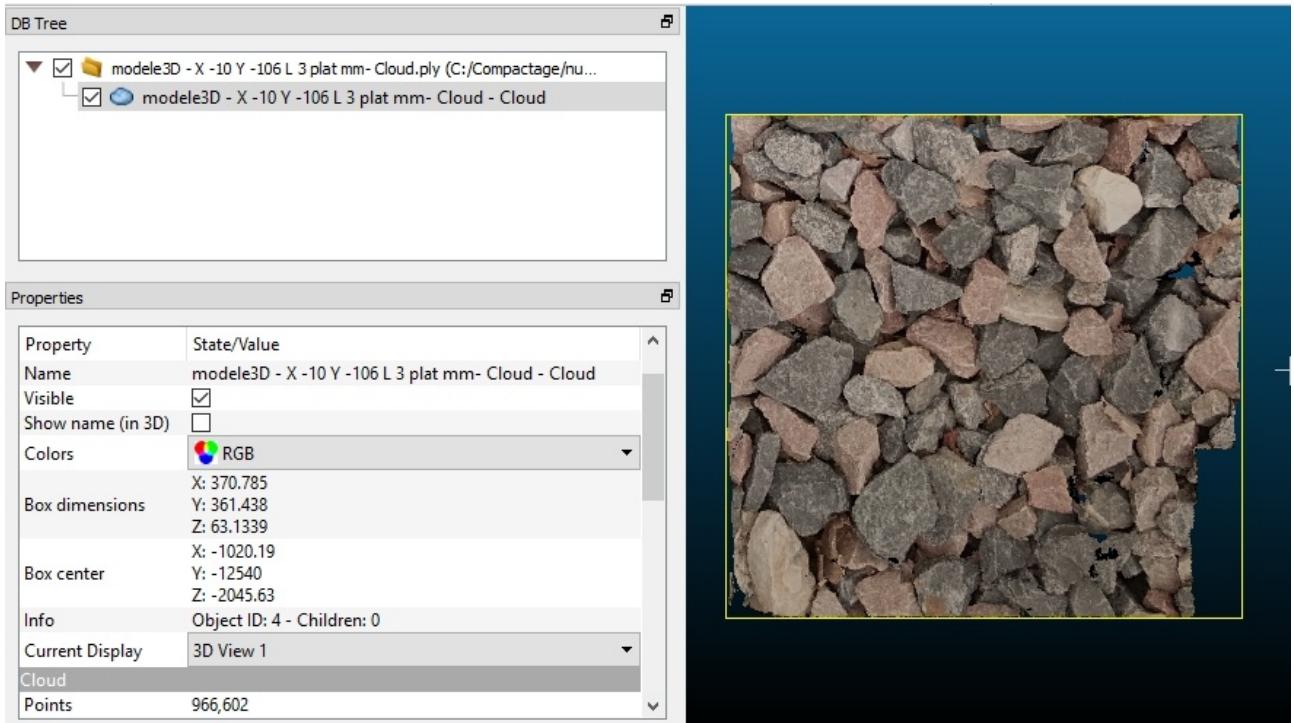


Figure 29: Visualisation de l'emprise foisonnée par Cloud Compare

Statistiques sur les Z¹³ :

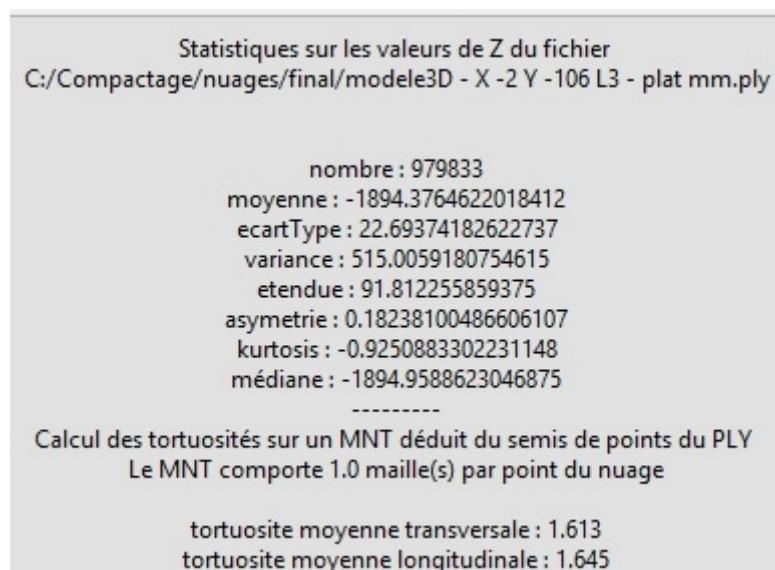


Figure 30: Statistique sur les Z et les tortuosités - emprise foisonnée

13 Les valeurs de Z sont écrêtées pour ces calculs : les valeurs extrêmes, les 0,5 % supérieures et 0,5 % inférieures sont ignorés. L'étendue est ainsi plus faible que sur le nuage initial.

Du nuage vers le MNT :

```
PLY vers MNT : Fichier PLY traité :
C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X -2 Y -106 L3 - plat mm.ply

Fichier MNT écrit sur disque :
C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X -2 Y -106 L3 - plat mm_MNT.txt

mini et maxi sur l'axe des x : -239.76 119.88
mini et maxi sur l'axe des y : -12719.9 -12360.2402
Dimension du maillage : 989 * 989
Nombre de mailles : 978121

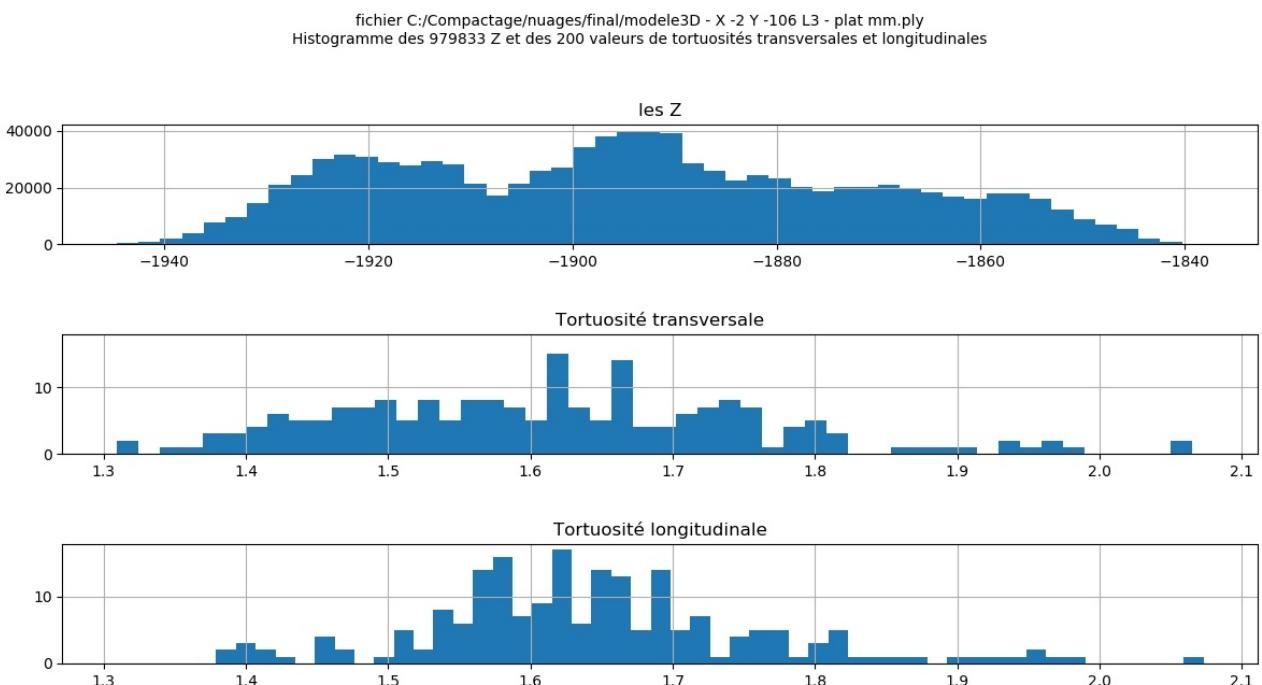
nombre de points dans le fichier ply : 979833
nombre de mailles par point du nuage : 1.0

Pas retenu pour le maillage : 0.3633

Nombre de mailles sans valeur calculée : 10297 soit 1 %
```

Figure 31: du nuage vers le MNT – Statistique sur le MNT
-: emprise foisonnée

Histogrammes :



Les valeurs de Z sont nettement pluri-modales : les creux et les bosses sont distincts. Le compactage fait disparaître cette spécificité de l'emprise foisonnée.

Création du MNT par Compact Test : Calcul de la tortuosité :

```
Tortuosité sur le fichier MNT : C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X -2 Y -106 L3 - plat mm_MNT.txt

Nombre de points par maille (en moyenne) = 1.0
Valeur du pas de la maille = 0.3633220487958391
Dimension du maillage = (991, 991)

Tortuosité sur les transversales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 991

tortuosité moyenne = 1.612
tortuosité médiane = 1.61

tortuosité maxi = 2.04
tortuosité mini = 1.309
variance = 0.02452831772502305
écart type = 0.15661518995622056

Tortuosité sur les longitudinales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 991

tortuosité moyenne = 1.625
tortuosité médiane = 1.618

tortuosité maxi = 2.109
tortuosité mini = 1.37
variance = 0.015470891786089151
écart type = 0.12438203964435199
```

Figure 32: Statistiques sur les 200 tortuosités calculées : moyenne, médiane, écart type... emprise foisonnée

Nous retiendrons les tortuosités médianes transversales et longitudinales : 1.61 et 1.618

6.5 Bilan

Nous retiendrons les valeurs significatives suivantes¹⁴ pour la planche d'essai étudiée :

Bilan	foisonnée	Semi-compactée	compactée
tortuosité transversale	1,61	1,5	1,42
tortuosité longitudinale	1,62	1,58	1,42
tortuosité moyenne	1,615	1,54	1,42
étendue Z	92	58	33
écart type Z	23	9,4	5,8

Tous les indicateurs sont sensibles au compactage : la tortuosité, l'étendue et l'écart type des Z décroissent avec le compactage.

Un test du chi2 sur ce tableau confirme la disparité des valeurs¹⁵ : les 3 entreprises étudiées ne sont pas similaires, au regard de l'étendue et de l'écart type des Z.

14 La tortuosité est sans dimension, les Z sont en mm.

15 En toute rigueur les conditions d'application du test ne sont pas toutes réunies.

L'emprise semi-compactée présente une anisotropie certaine, révélée par la différence très nette des tortuosités transversales et longitudinales : sans doute un effet mécanique du compactage.

6.6 Visualisation d'un profil

Le logiciel Compact Test permet de visualiser un profil horizontal pris au hasard et sa tortuosité. Cela permet à l'utilisateur de contrôler visuellement la validité des données :

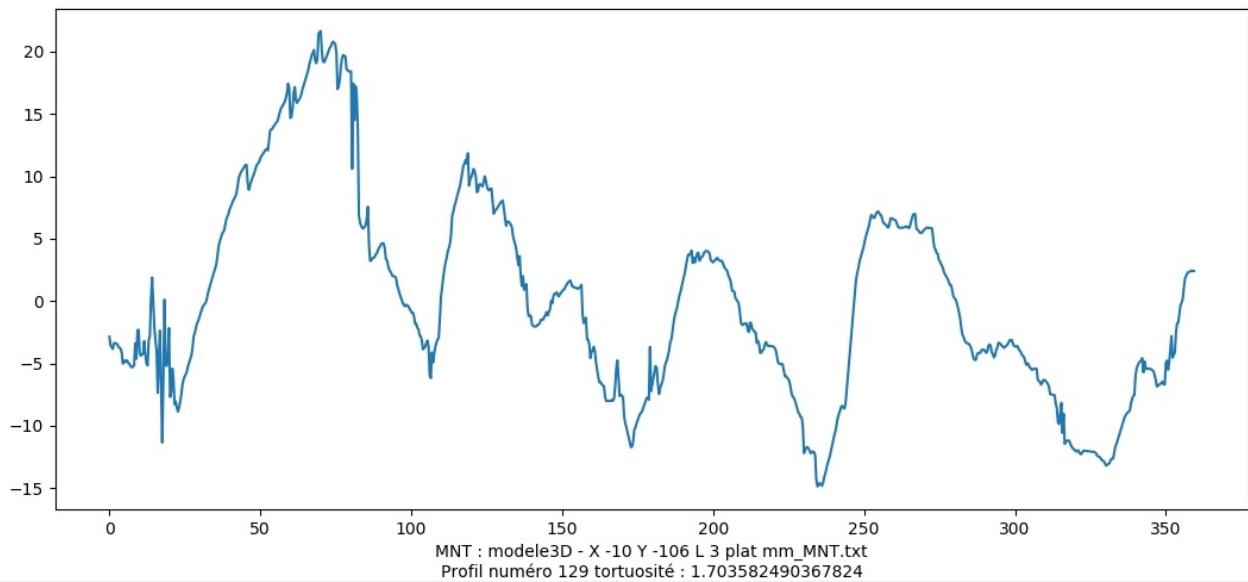


Figure 33: un profil de l'emprise foisonnée

7 Protocole et références

7.1 Protocole

La détermination de l'état plus ou moins compacté d'une zone est relative à un ballast précis, mis en œuvre dans des conditions données, compacté en 3 niveaux différents avec un certain matériel, photographié avec un appareil photo déterminé. C'est l'ensemble de ces circonstances que nous appelons « protocole ». Pour tout protocole nous pouvons choisir, dans chacune des 3 zones de compactage, une emprise qui nous servira par la suite de « référence » pour ce niveau de compactage. Ces 3 zones de références seront comparées à chaque emprise à tester pour en déterminer le niveau de compactage.

Pour cette étude nous avons créé le protocole « Planche CER avril 2019 ».

7.2 Références

Nous avons choisi une emprise dans chacune des 3 zones de la planche d'essai : compactée, semi-compactée, foisonnée. Ces emprises deviennent nos références. Pour déterminer l'état d'une zone quelconque de la planche nous comparons la valeur des indicateurs avec celles des références, valeurs et écart type des Z, tortuosités¹⁶.

Le logiciel Compact Test propose de mémoriser les 3 emprises de références dans un « protocole ». Ce protocole est spécifiquement relatif à :

- un type de ballast
- 3 niveaux de compactages
- une procédure de prise de vue
- une méthode photogrammétrique

Compact Test permet de mémoriser les références pour plusieurs protocoles.

Voici le tableau des références enregistrées pour le protocole « Planche CER avril 2019 » :

Les fichiers des références :	
protocole : Planche CER Photos avril 2019 -- compactage : C -- fichier : C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y 0 L3 - plat mm_MNT.txt	
protocole : Planche CER Photos avril 2019 -- compactage : SC -- fichier : C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X 0 Y -50 L3 - plat mm_MNT.txt	
protocole : Planche CER Photos avril 2019 -- compactage : F -- fichier : C:/Compactage/nuages/final/modele3D - X -2 Y -106 L3 - plat mm_MNT.txt	
Les caractéristiques essentielles des références :	
Planche CER Photos avril 2019 C; métrique : mm; étendue des Z : 33.359; écart type des Z : 5.832 ; tortuosité transversale : 1.424, longitudinale : 1.44	
Planche CER Photos avril 2019 SC; métrique : mm; étendue des Z : 57.764; écart type des Z : 9.406 ; tortuosité transversale : 1.498, longitudinale : 1.592	
Planche CER Photos avril 2019 F; métrique : mm; étendue des Z : 91.812; écart type des Z : 22.694 ; tortuosité transversale : 1.622, longitudinale : 1.636	

Figure 34: Le protocole « Planche CER avril 2019 » et ses références

7.3 Tester un nuage de points pour déterminer son état de surface

Les photos prises sur le ballast seront d'abord transformés par photogrammétrie en un nuage de point. Un sous nuage représentant une emprise de taille raisonnable¹⁷ en sera extrait dans le but d'en déterminer l'état.

Dans le logiciel Compact Test tester ce nuage de points consiste à choisir un protocole. Le test s'enchaîne immédiatement.

Les valeurs de Z du nuage de point seront alors analysées, puis un MNT généré pour calculer les tortuosités. La comparaison sera effectuée avec les 3 emprises de références.

Le rapprochement se fait selon 4 indicateurs, :

- l'écart-type des Z
- l'étendue des Z

16 Voir notes précédentes sur le calcul des tortuosités.

17 Entre 0,1 m², minimum, et 1 m² semble raisonnable.

- la tortuosité transversale
- la tortuosité longitudinale

Le résultat sera affiché et les fonctions de répartition des indicateurs visualisables.

Le test de Kolmogorov-Smirnov donne la probabilité que les emprises de référence et testée proviennent de la même zone de compactage. Cette probabilité est restituée avec les formulations suivantes où XXX est le type de zone de provenance :

- zone XXX certaine
- zone XXX très probable
- zone XXX probable
- la zone testée n'est identifiée avec certitude à aucune des zones de référence, la zone la plus ressemblante est XXX
- La zone testée n'est proche d'aucune des zones de référence.

8 détermination de l'état d'une emprise

8.1 Test 1 : emprise compactée

Pour déterminer dans quel état se trouve une zone dont on recherche le niveau de compactage des photographies seront prises afin d'obtenir le nuage de points en 3 dimensions. Ce nuage sera exploité par la fonction de Compact Test qui le rapprochera, si possible, d'une des 3 zones de référence.

L'emprise testée est une zone compactée proche de la référence :

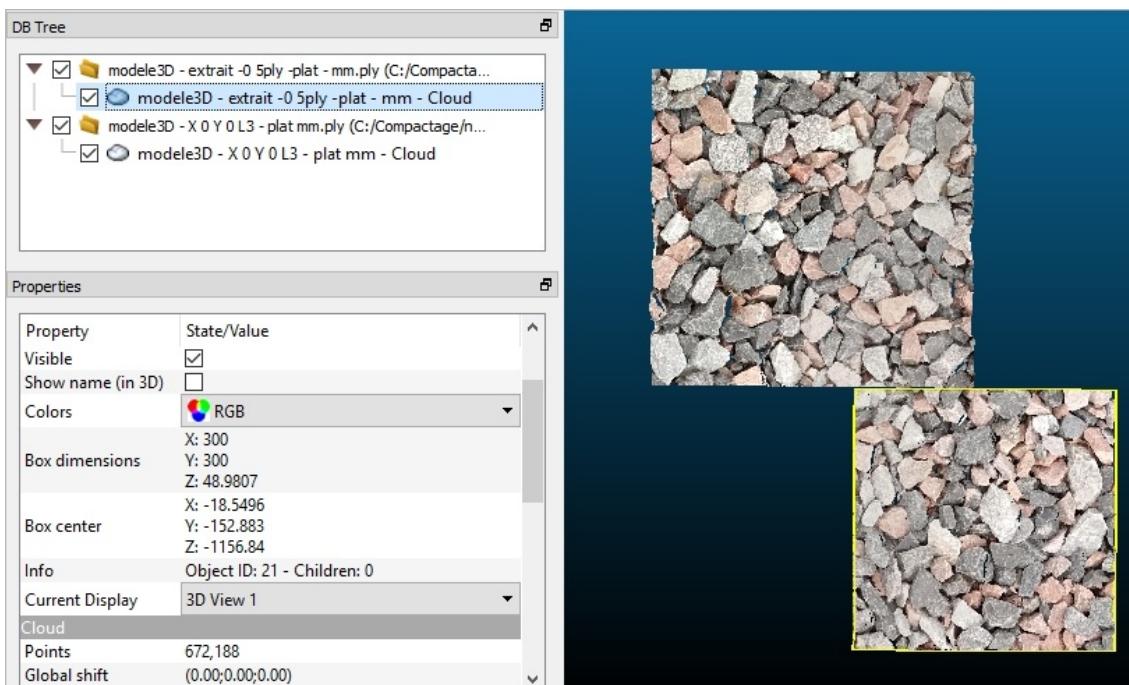


Figure 35:

Premier test : présentation de l'emprise encadrée de jaune, au-dessous de la référence

tortuosités médianes transversales et longitudinales : 1,37 (référence = 1,42)

```
Tortuosité sur le fichier MNT : C:/Compactage/nuages/extraits/modele3d.2009/modele3D --extrait -0.5ply -plat --mm_MNT.txt

Nombre de points par maille (en moyenne) = 1.0
Valeur du pas de la maille = 0.36591126402928076
Dimension du maillage = (821, 821)
-----
Tortuosité sur les transversales ::

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 821

tortuosité moyenne = 1.388
tortuosité médiane = 1.371

tortuosité maxi = 2.075
tortuosité mini = 1.18
variance = 0.019841694082553984
ecart.type = 0.14086054835387368
-----
Tortuosité sur les longitudinales ::

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 821

tortuosité moyenne = 1.392
tortuosité médiane = 1.367

tortuosité maxi = 2.247
tortuosité mini = 1.069
variance = 0.014679546343416875
ecart.type = 0.12115917771022085
```

Figure 36: Calcul des tortuosités sur l'emprise test compactée

Lors du test d'un nuage de points le programme affiche en premier lieu les statistiques sur les valeurs de Z :

```
Statistiques basiques sur les Z
marges supprimées : 0.005
Nombre de classes : 10
    nombre : 672188
    borneMini : 3360
    borneMaxi : 668828
    nombreRetenu : 665468
    moyenne : -1155.5593783120707
    ecartType : 5.972591029381102
    variance : 35.67184360424362
    maxi : -1140.173095703125
    mini : -1173.192626953125
    etendue : 33.01953125
    asymetrie : -0.119399979521546
    kurtosis : -0.29689192301147704
    p_value Kolmogoroff Smirnoff pour une loi normale : : 0.0
    histo : (array([-4626, 19464, 49977, 81304, 116736, 146370, 127166, 74361,
32126, 13338], dtype=int64), array([-1173.19262695, -1169.89067383, -1166.5887207, -1163.28676758,
-1159.98481445, -1156.68286133, -1153.3809082, -1150.07895508,
-1146.77700195, -1143.47504883, -1140.1730957]))
    classeModale : 5
    mediane : -1155.262939453125
    mode : -1155.031884765625
```

Figure 37: Test 1, emprise compactée : statistiques sur les valeurs de Z

puis le résultat des rapprochements effectués avec les valeurs de référence :

Test sur les 3 niveaux de compactage du protocole : 'Planche CER Photos avril 2019'
fichier : C:/Compactage/nuages/extraits modele3d 2009/modele3D - extrait -0 5ply -plat - mm.ply
Au vu des valeurs des tortuosités et de l'étendue et de l'écart type des Z :
la zone testée est une zone Compactée

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les altitudes centrées :
La zone testée n'est identifiée avec certitude à aucune des zones de référence.

La zone la plus ressemblante est la
zone compactée

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les tortuosités transversales :
La zone testée n'est identifiée avec certitude à aucune des zones de référence.

La zone la plus ressemblante est la
zone compactée

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les tortuosités longitudinales :
La zone testée n'est identifiée avec certitude à aucune des zones de référence.

La zone la plus ressemblante est la
zone compactée

Figure 38: Emprise test 1 : résultat des rapprochements avec les références : la zone compactée est reconnue comme la plus probable.

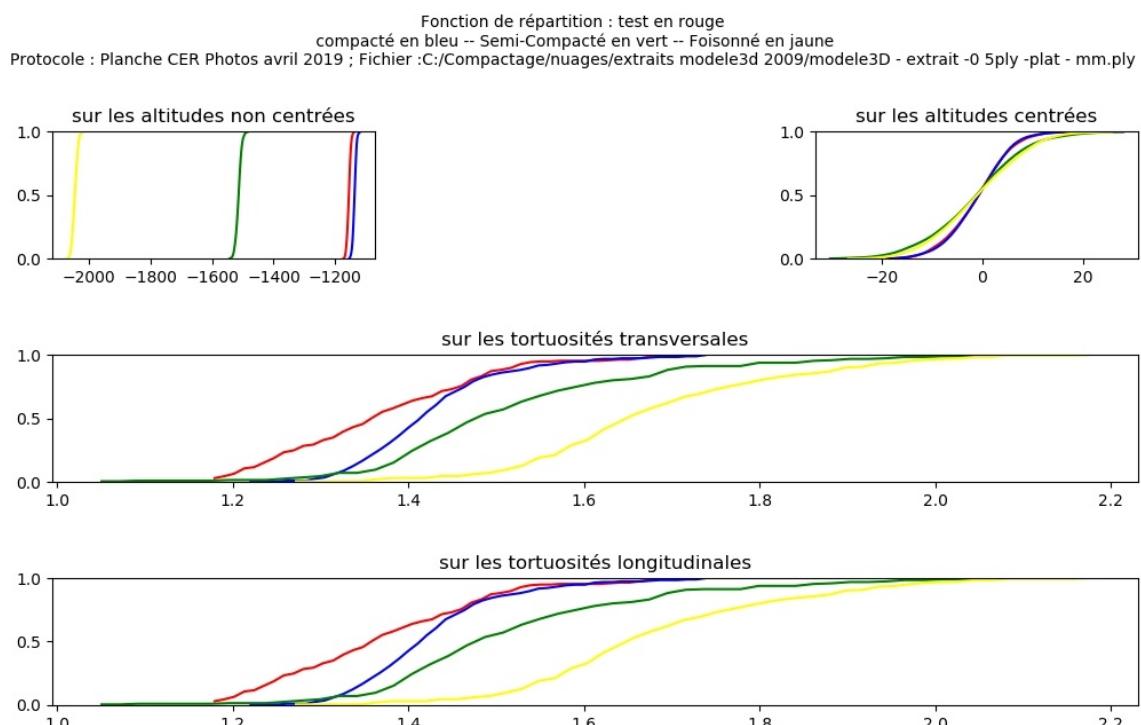


Figure 39: Emprise test 1 : fonctions de répartitions comparées : les tortuosités testées en rouge se rapprochent progressivement de la courbe bleue (emprise compactée)

L'ensemble des éléments de comparaison concordent : l'emprise testée est compactée.

8.2 Test 2 : emprise semi-compactée

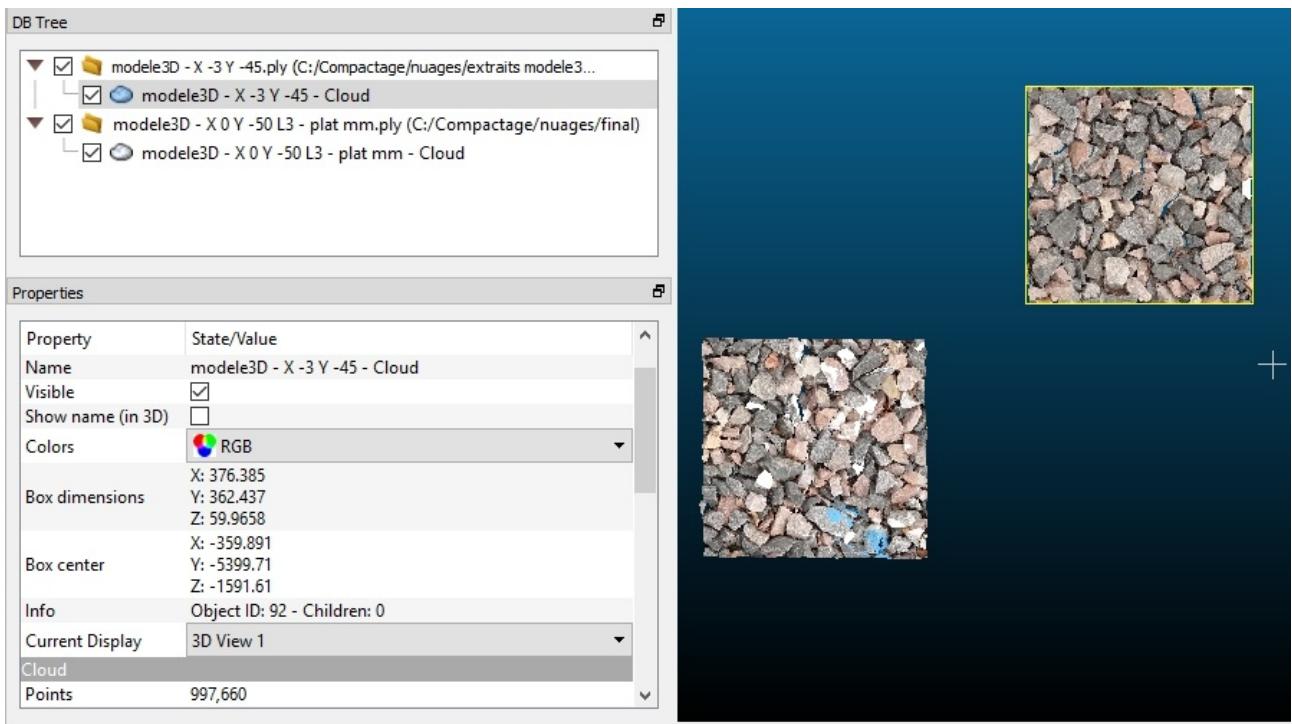


Figure 40: Deuxième test : présentation de l'emprise encadrée de jaune, au-dessus de la référence semi-compactée

Tortuosités calculées : transversale : 1,50 et longitudinale : 1,53

L'anisotropie de la zone de référence semi-compactée est présente (1,50 ; 158).

```
Tortuosité sur le fichier MNT : C:/Compactage/nuages/extraits.modele3d.2009/modele3D -- X -3 Y -45 plat.mm_MNT.txt

Nombre de points par maille (en moyenne) = 1.0
Valeur du pas de la maille = 0.369777895276597
Dimension du maillage = (1019, 982)
-----
Tortuosité sur les transversales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 982

tortuosité moyenne = 1.522
tortuosité médiane = 1.497

tortuosité maxi = 2.477
tortuosité mini = 1.025
variance = 0.03944419018284617
ecart-type = 0.19860561468107132
-----
Tortuosité sur les longitudinales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 1019

tortuosité moyenne = 1.573
tortuosité médiane = 1.527

tortuosité maxi = 2.202
tortuosité mini = 1.321
variance = 0.032640684555181355
ecart-type = 0.18066733117855413
```

Figure 41: Test 2 emprise semi-compactée : calcul des tortuosités

puis le résultat des rapprochements effectués avec les valeurs de référence :

Test sur les 3 niveaux de compactage du protocole : 'Planche CER Photos avril 2019'
 fichier : C:/Compactage/nuages/extraits modele3d 2009/modele3D - X -3 Y -45 plat mm.ply
 Au vu des valeurs des tortuosités et de l'étendue et de l'écart type des Z :
 la zone testée est très probablement une zone Semi compactée

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les altitudes centrées :
 La zone testée n'est proche d'aucune des zones de référence.

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les tortuosités transversales :
 zone semi-compactée probable

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les tortuosités longitudinales :
 zone semi-compactée probable

Figure 42: Emprise test 2 : résultat des rapprochements avec les références : la zone semi-compactée est reconnue avec quasi certitude.

Les fonctions de répartition des Z et des tortuosités confirment la proximité des valeurs des Z et des tortuosités :

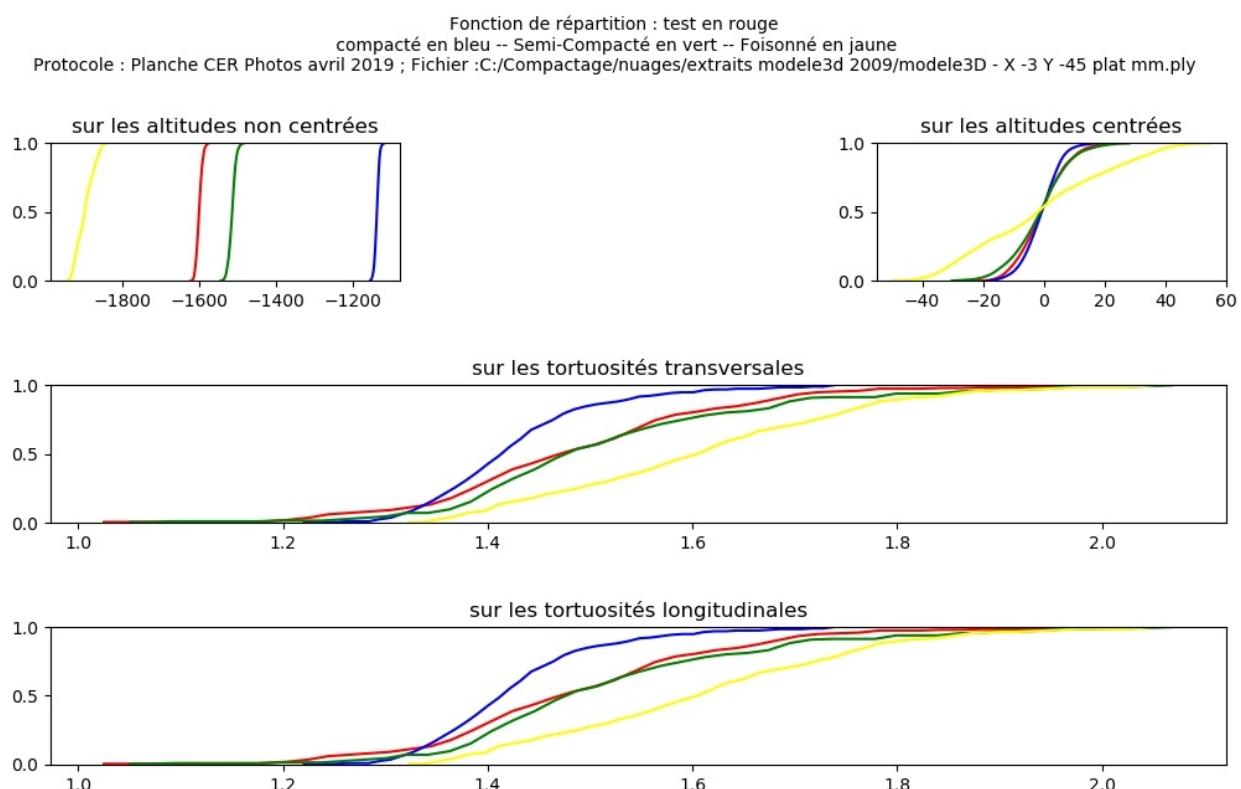


Figure 43: Emprise test 2 : fonctions de répartitions comparées : les courbes testées en rouge sont très proches des courbes vertes,(emprise semi-compactée)

L'ensemble des éléments de comparaison concordent : l'emprise testée est semi-compactée.

8.3 Test 3 : emprise foisonnée

Présentation de l'emprise de référence, foisonnée, et de l'emprise testée :

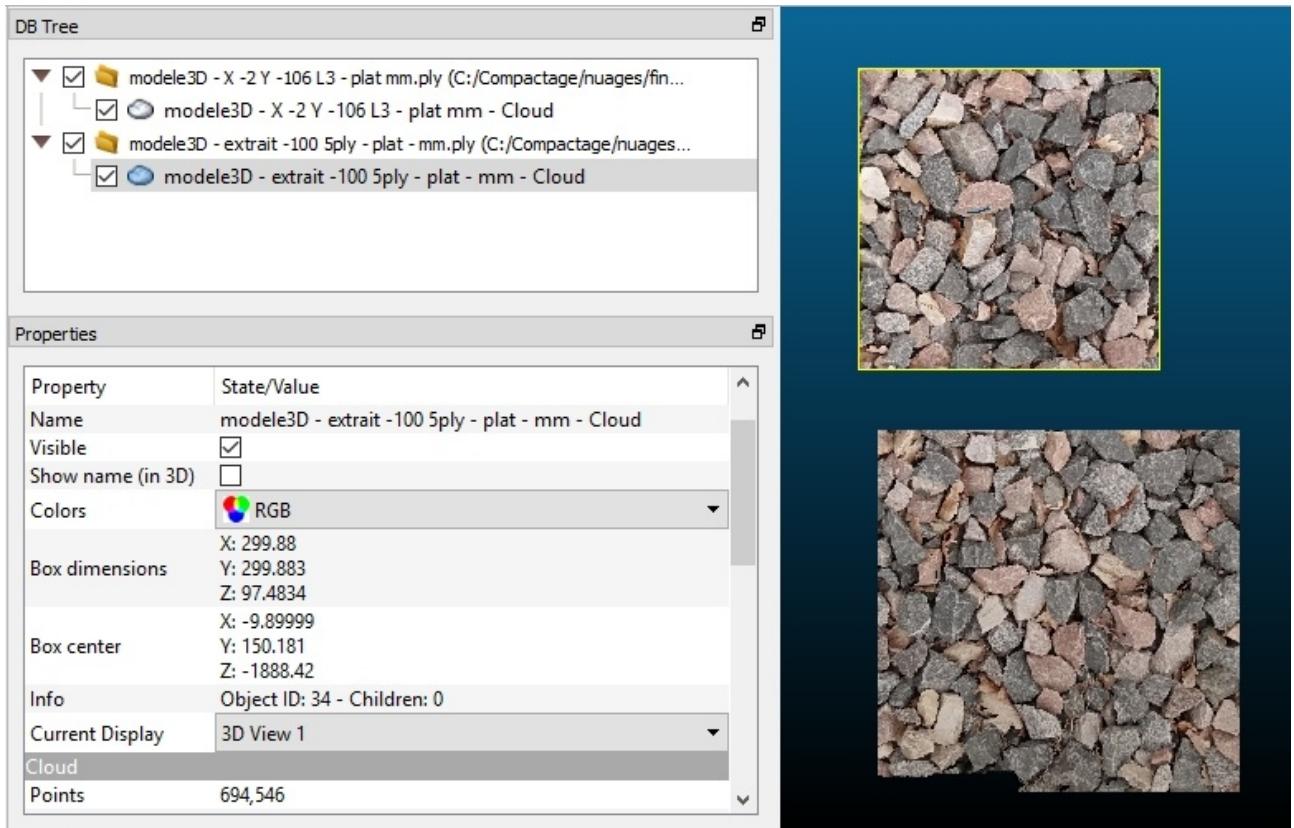


Figure 44: test 3 : présentation de l'emprise encadrée de jaune, au-dessus de la référence foisonnée

Calcul des tortuosités : transversale 1,56 et longitudinale : 1,60

L'anisotropie locale est supérieure à celle de la zone de référence (1,61 ; 1,62)

```
Tortuosité sur le fichier MNT : C:/Compactage/nuages/extraits modele3d 2009/modele3D - extrait -100 5ply - plat - mm_MNT.txt

Nombre de points par maille (en moyenne) = 1.0
Valeur du pas de la maille = 0.3598314537542243
Dimension du maillage = (835, 835)
-----
Tortuosité sur les transversales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 835

tortuosité moyenne = 1.576
tortuosité médiane = 1.56

tortuosité maxi = 2.403
tortuosité mini = 1.327
variance = 0.02740729882359734
écart type = 0.16555149900740054

-----
Tortuosité sur les longitudinales :

Taille de l'échantillon = 200
nombre de points par lignes = 835

tortuosité moyenne = 1.605
tortuosité médiane = 1.597

tortuosité maxi = 2.036
tortuosité mini = 1.404
variance = 0.01158529853498022
écart type = 0.10763502466660292
```

Figure 45: Test 3 emprise foisonnée : calcul des tortuosités

statistiques sur les z :

```
Statistiques basiques sur les Z
marges supprimées : 0.005
Nombre de classes : 10
nombre : 694546
borneMini : 3472
borneMaxi : 691074
nombreRetenu : 687602
moyenne : -1882.7563607370507
ecartType : 19.077053523836035
variance : 363.9339711513049
maxi : -1845.3192138671875
mini : -1929.26416015625
etendue : 83.9449462890625
asymetrie : -0.11727625906075846
kurtosis : -0.9598069600375907
p_value Kolmogoroff Smirnoff pour une loi normale : : 0.0
histo : (array([ 6423, 40746, 70581, 69838, 99858, 89814, 100795, 94177,
    76892, 38478], dtype=int64), array([-1929.26416016, -1920.86966553, -1912.4751709, -1904.08067627,
    -1895.68618164, -1887.29168701, -1878.89719238, -1870.50269775,
    -1862.10820313, -1853.7137085, -1845.31921387]))
classeModale : 6
médiane : -1882.079833984375
mode : -1874.6999450683595
```

Figure 46: test 3 : statistiques sur les z

le résultat des rapprochements effectués avec les valeurs de référence :

```
Test sur les 3 niveaux de compactage du protocole : 'Planche CER Photos avril 2019'
fichier : C:/Compactage/nuages/extraits modele3d 2009/modele3D - extrait -100 5ply - plat - mm.ply
Au vu des valeurs des tortuosités et de l'étendue et de l'écart type des Z :
la zone testée est très probablement une zone Foisonnée

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les altitudes centrées :
La zone testée n'est proche d'aucune des zones de référence.

Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les tortuosités transversales :
La zone testée n'est identifiée avec certitude à aucune des zones de référence.

La zone la plus ressemblante est la
zone foisonnée
Conclusion du test de Kolmogorov-Smirnov sur les tortuosités longitudinales :
La zone testée n'est identifiée avec certitude à aucune des zones de référence.

La zone la plus ressemblante est la
zone foisonnée
```

Figure 47: Emprise test 3 : résultat des rapprochements avec les références : la zone foisonnée est reconnue comme probable.

Rapprochement des fonctions de répartition :

Fonction de répartition : test en rouge
 compacté en bleu -- Semi-Compacté en vert -- Foisonné en jaune
 Protocole : Planche CER Photos avril 2019 ; Fichier :C:/Compactage/nuages/extraits modele3d 2009/modele3D - extrait -100 5ply - plat - mm.ply

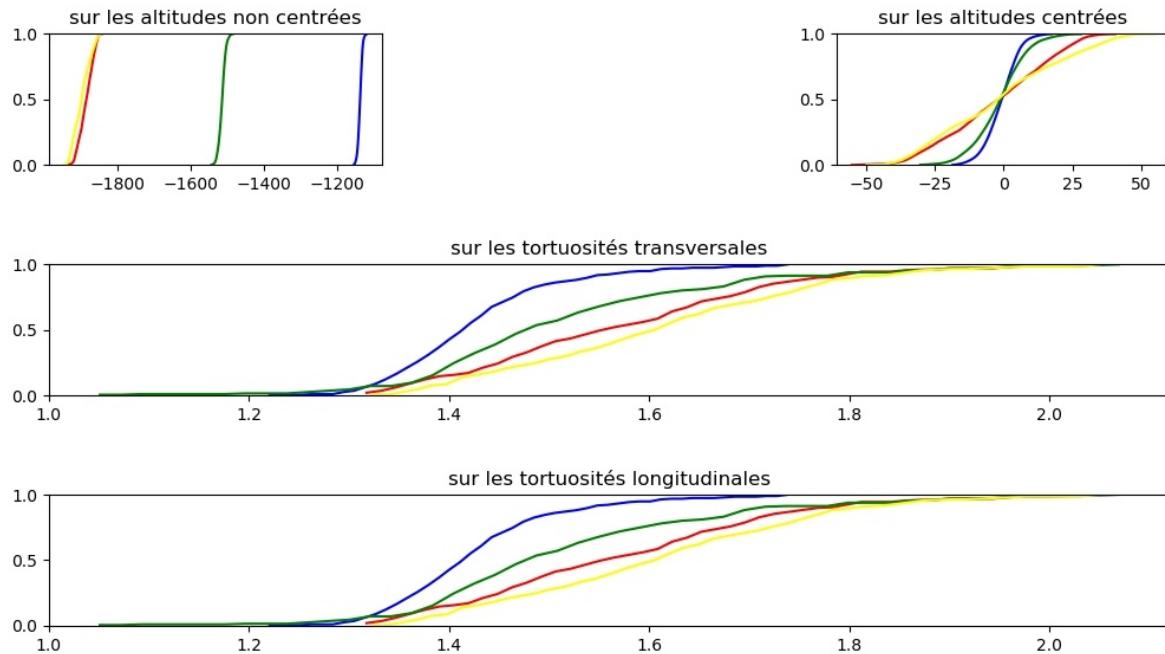


Figure 48: Emprise test 3 : fonctions de répartitions comparées : les courbes testées en rouge sont assez proches des courbes jaunes,(emprise foisonnée)

L'ensemble des éléments de comparaison concordent : l'emprise testée est semi-compactée.

9 Conclusion

Afin de répondre à une commande de RFF le CER a mis en œuvre une planche d'essai composé de ballast ferroviaire divisée en 3 zones traitées différemment :

- une zone laissée en l'état, foisonnée
- une zone « semi-compactée »
- une zone « compactée »

Le challenge consiste à trouver le moyen de décider du niveau de compactage d'une zone quelconque.

La présente étude expérimente le schéma suivant :

- prise de vue photographique de la planche d'essai
- traitement des photos par photogrammétrie pour obtenir un nuage de points représentant la surface en 3 dimensions
- analyse de ce nuage de points pour déterminer des indicateurs de référence corrélés au niveau de compactage de chaque zone
- comparaison des indicateurs d'une emprise donnée avec les indicateurs de référence pour décider du niveau de compactage de l'emprise

Les indicateurs statistiques étudiés sont l'étendue et l'écart type des valeurs de Z du nuage de point et les tortuosités transversales et longitudinales calculées sur un maillage régulier déduit du nuage.

L'étude montre que les indicateurs obtenus par photogrammétrie sont fortement corrélés au niveau de compactage du ballast et déterminent avec robustesse le niveau du compactage effectué sur une emprise donnée.

Ainsi avec un dispositif minimum comportant un appareil photo, trois logiciels libres¹⁸, et une zone de référence, nous déterminons avec une grande robustesse le niveau de compactage des emprises qui nous sont proposées.

Cette expérimentation réalisée à l'échelle 1 par le CER et le Laboratoire Régional de Rouen dans le cadre d'un appel à projet d'innovation du CEREMA est désormais prête à passer le test d'une validation sur un site ferroviaire effectif.

10 Glossaire

10.1 Photogrammétrie

- **Photogrammétrie** : technique qui consiste à exploiter plusieurs photographies d'une même scène pour en extraire un modèle en 3 dimensions sous forme de nuages de points référencés dans l'espace.
- **NUAGE DE POINTS** : ensemble de points positionnés dans un repère XYZ obtenu par photogrammétrie. Le repère est doté d'une métrique dont l'unité peut référer au terrain (par exemple le mètre) et d'un référentiel qui peut être local ou géo-référencé, c'est à dire positionné sur la surface du globe terrestre.
- **NUAGE NON DENSE** : L'exploitation des points homologues permet de positionner les appareils photos dans un espace en 3 dimensions. Puis de positionner chaque point homologue dans cet espace pour obtenir le « nuage non dense ».
- **NUAGE DENSE** : lorsque le nuage non dense est généré la photogrammétrie procède à la densification de ce nuage par référencement des points remarquables mais non homologues présents sur 2 photos. Ce nuage représente le produit final de la photogrammétrie.
- **nuage de points 3D** : chaque point est défini par ses coordonnées X, Y, Z
- **nuage de points 2D et demi** : pour chaque valeur de X, Y il n'y a qu'une valeur de Z ; une orthophoto est en 2D et demi.
- **Points homologues** : la photogrammétrie procède dans un premier temps à la détermination des points homologues présents sur au moins 2 photos. Un point homologue est la représentation sur 2 photos de la même partie du même objet. L'algorithme SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) de D.G. Lowe trouve les points homologues sur 2 photos.
- **MNT** : modèle numérique de terrain. Un MNT est une représentation de la surface d'un terrain en 2 dimensions et demi (2D et demi) : chaque point identifié par des coordonnées x et y porte la valeur de l'altitude en ce point. Il ne s'agit pas d'une représentation 3D car en un point donné il n'y a qu'une seule valeur d'altitude. Il s'agit de la représentation d'une surface globalement « plane ». Un MNT consiste généralement en un maillage du terrain par une grille régulière à mailles carrées. Dans cette étude le « terrain » est constitué par la planche d'essai réalisé en 2016 au CER. Cette planche d'essai est photographiée ; les photos sont exploitées par photogrammétrie pour obtenir des nuages de points 3D. Le maillage du MNT est construit à partir de ces nuages de points.
- **Orthophoto** : photographie, souvent aérienne, rectifiée géométriquement : chaque pixel correspond à une maille d'un MNT.
- **Raster** (anglais) ou **Maillées (français)**: se dit de données présentant une information à chaque intersection d'une grille rectangulaire : les photos et les

images numériques en sont l'exemple le plus courant. Les MNT sont des données maillées.

10.2 Statistique

- **Médiane** : la médiane est la valeur qui sépare un ensemble numérique en deux sous-ensembles de même effectif. Elle est choisie ici comme valeur pour représenter les tortuosités, car elle est insensible aux valeurs extrêmes aberrantes, contrairement à la moyenne. Exemple : la moyenne de [0,0,0,0,100] est 20, la médiane est 0.
- **Mode** : valeur ou classe de valeur la plus représentée.
- **plurimodale** : se dit d'une distribution présentant plusieurs « modes » bien distincts. Cette particularité est généralement due à un mélange de plusieurs sources de valeurs.
- **Test du Chi2** : teste l'hypothèse que des observations diverses proviennent d'une même origine . Ici nous testons si les valeurs de tortuosité et de statistiques sur les Z peuvent provenir d'une même zone.
- **Test de Kolmogorov-Smirnov** : test d'adéquation d'une fonction à une loi donnée. Soit un échantillon de valeurs aléatoires réalisées par la fonction. Le test compare la fonction de répartition de cet échantillon à celle de la loi donnée. Si la fonction suit la loi, alors sa fonction de répartition converge vers celle de la loi ; on montre que cette convergence ne dépend pas de la loi. L'analyse de cette convergence permet de décider de l'adéquation recherchée.

Dans notre étude les lois sont déterminées par les valeurs de Z et des tortuosités calculées sur les emprises de références. Les réalisations de la fonction sont les valeurs correspondantes calculées sur l'emprise testée.

10.3 Logiciels

- **AperoDeDenis** : interface graphique pour le logiciel MicMac de l'IGN, développé par le Cerema.
 - <https://github.com/micmacIGN/InterfaceCEREMA/tree/master/InterfaceCEREMA>
- **CloudCompare** : logiciel libre de visualisation/manipulation des nuages de points, édité par EDF.
 - <http://www.danielgm.net/cc/release/>
- **Compact Test** : logiciel de calcul de la tortuosité d'un MNT, développé par le CEREMA.
 - <https://github.com/Jouin/Denis-Jouin/tree/master>
- **MetaShape** : logiciel de photogrammétrie propriété de la société AGISOFT, autrefois appelé PhotoScan .
- **MicMac** : logiciel de photogrammétrie open source développé par l'IGN.
 - <https://micmac.ensg.eu/index.php/Install>

- **PLY** : format de fichier utilisé pour enregistrer les nuages de points 3D
- **SIGMA** : logiciel de gestion des affaires du Cerema

10.4 Sigles

- **API** : actions de partenariat et d'innovation
- **CETE Normandie-Centre** : Centre d'études technique de l'équipement. Les 8 CETE ont fusionné, devenant le CéREMA le 01/01/2014.
- **CER** : centre d'expérimentation et de recherche, groupe du **DERDI**
- **CéREMA** : centre d'étude et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement : établissement public à caractère administratif créé le 01/01/2014.
- **DERDI** : Département Expérimentation, Recherche, Développement et Innovation, au sein de la **DTer NC**
- **DTer NC** : Direction territoriale Normandie Centre du Cerema
- **IQRN** : Indice Qualité du Réseau National : organisation de moyens visant à qualifier annuellement l'état des routes nationales pour abonder la loi de finance.
- **LRR** : Laboratoire Régional de Rouen, département de la DTer NC
- **RFF** : Réseau Ferré de France, établissement public à caractère industriel et commercial, chargé des infrastructures ferroviaires jusqu'au 31 décembre 2014.
- **SNCF Réseau** est une société anonyme à capitaux publics filiale de la Société nationale des chemins de fer français (SNCF) 3. Elle est chargée de l'exploitation et de l'entretien des infrastructures ferroviaires depuis le premier janvier 2015.

11 Annexes

11.1 API

Deuxième appel à projets et idées d'innovation

Fiche descriptive « Contribution à la détermination de la compacité des milieux granulaires par méthodes non destructives »

Nom de la proposition : Mise au point de méthodes d'auscultation non destructives et innovantes destinées à contribuer à l'élaboration de modèles d'aide à la prédictivité de la maintenance des structures.

Porteur de la proposition de projet :

Ch. DESCATOIRE - CEREMA NC - DERDI

Autres contributeurs Cerema :

CEREMA NC LRR – M Denis Jouin

CEREMA NC CER – Mme Delphine Jacqueline

CEREMA Dtec ITM – M Fabien Pailhol

...

Description sommaire :

La connaissance de la compacité d'une structure est essentielle pour en connaître l'état d'intégrité et sa capacité résiduelle de résistance au regard des sollicitations auxquelles elle est soumise. Cette compacité est actuellement déterminée à l'aide de méthodes destructives suivies d'analyse en laboratoire ou de méthodes nucléaires lourdes et coûteuses à mettre en œuvre. Or il existe aujourd'hui de nombreuses technologies qui méritent d'être explorées qui sont possiblement autant de possibilités de mettre au point une ou des méthodes pouvant se substituer à celles évoquées plus haut : Radars, Lasers, usages des ondes acoustiques ou électromagnétiques mais également les possibilités ouvertes par le traitement d'images telles que la photogrammétrie. Il pourrait en effet y avoir une relation entre l'état apparent d'une structure, sa géométrie ou micro-géométrie, et son état mécanique et c'est ce que nous proposons d'explorer et expertiser.

Le projet se déroulerait ainsi en trois temps :

1- détermination d'un ou de plusieurs indicateurs permettant de caractériser la compacité d'une structure (ballast, ou couches de surfaces d'une chaussée par exemple) en fonction d'un modèle en trois dimensions de cette surface.

2- études comparées de différentes méthodes (en avantages et inconvénients entre autre) d'acquisitions de la mesure « 3D » de la surface et état des connaissances ou expérimentations menées sur ce sujet.

3- construction d'un ou plusieurs démonstrateurs à tester par comparaison aux méthodes traditionnelles afin d'en mesurer la performance.

4- Définir les modalités de test et de suivi. Contribuer à l'élaboration des protocoles de mesures.

Identification du besoin et des bénéficiaires potentiels :

Le besoin est principalement motivé par l'abandon plus ou moins prévisible des moyens d'auscultation nucléaire alors qu'aucun moyen d'investigation aussi efficace n'est à ce jour vraiment disponible. Les principaux bénéficiaires sont de toute évidence les gestionnaires d'infrastructures et les entreprises de travaux publics.

Données nécessaires à l'étude :

L'étude tirera parti d'expérimentation en cours au CER (Rouen) afin de mettre en œuvre les dispositifs à examiner tout comparant les résultats obtenus avec les méthodes en vigueur afin d'en évaluer la pertinence.

Pouvoir disposer d'appareils (a priori fournis hors le cadre de la présente action) nécessaires aux actions à conduire : prises de vues, outils informatiques de traitement d'images, moyens d'analyses.

Points durs à lever :

Quelles sont les relations entre la géométrie apparente d'une structure et son état mécanique (compacité notamment). Préciser les limites de la méthode et comment y remédier.

Compétences ou équipements Cerema nécessaires :

Les ressources suivantes seront sollicitées pour contribuer à cette étude : temps d'ingénierie issue des LRR et du CER à titre principal, en liaison avec la Dtec ITM.

Partenaires ou ressources extérieures mobilisables :

Possibilité de pouvoir associer la SNCF / Entreprise New-Earth (comme ressources).

Identification des livrables :

État de l'art et bibliographie : Liste commentée et hiérarchisée des documents techniques et réglementaires traitant du sujet – recensement et identification des recherches déjà menées.

Rapports d' études et compte rendu sur les manipulations testées.

Fiches méthodologiques : 1 fiche par filière identifiée

Protocole de réalisation des essais

Norme d'essais (si justifié à l'issue des résultats des campagnes d'essais).

Structuration du projet (macro-tâches) :

1. Définition des indicateurs caractérisant la compacité d'une structure.

État des lieux sur les relations géométrie de surface et état mécanique des structures.

2.1 État des connaissances.

Cette partie de l'étude consiste à examiner ce qui a déjà été réalisé ou publié sur le sujet :

- repérage des acteurs
- bibliographie

- retours d'expérience.

2.2 Choix des expérimentations à conduire.

Plusieurs possibilités seront à comparer en fonction de leurs avantages ou inconvénients. Établissement d'une grille d'analyse permettant de déterminer la ou les solutions les plus intéressantes à tester : efficacité et fiabilité des résultats, facilité de mise en œuvre, facilité et rapidité du traitement de l'information, brevetabilité des solutions possibles.

Quelques exemples possibles : images laser, photogrammétriques, scans 3D, infrarouge, applications existantes (androïd/apple...)

Mise en place d'une veille sur ces diverses recherches ou solutions disponible incluant leur évaluation. Constitution d'un réseau d'acteurs concernés (possibilité d'organisation d'un colloque ou d'une journée technique par exemple) par le sujet.

3.1 Réalisation de planches – tests, recueil et analyse critique des mesures obtenues.

Les méthodologies proposées seront ici précisées.

Les expérimentations en cours au Cerema pour d'autres projets constitueront des échantillons de situation favorisant l'étude et les recherches à conduire.

3.2 Tests comparatifs.

Il s'agira ici de comparer les résultats et observations recueillies aux méthodes plus classiques y compris les méthodes destructives. Mise en évidence des avantages et lacunes ou incertitudes.

4.1 Rapport (s) de conclusion.

Bilan et évaluation de la recherche et en cas de résultats encourageants, possibilités de poursuivre afin d'établir les livrables suivants :

4.2 Cahier des charges pour la réalisation d'un démonstrateur.

4.3 Contributions pour la définition des nouveaux protocoles d'essais.

Et propositions quant aux modalités de diffusion ou de commercialisation des solutions retenues.

Quantification des moyens nécessaires :

	Nombre de jours d'intervention							TOTAL HT
Barème	AE	AE1	CE	CE1	DP	DP1	EXP	
Tarif journalier	467	667	667	1006	1006	1402	1402	
Définition des indicateurs caractérisant la compacité d'une structure.				102		5		19082
Etat des connaissances.				73		1		11462
Choix des expérimentations à conduire.				3		3		7224
Réalisation de planches – tests, recueil et analyse critique des mesures obtenues.	15			63		1		20461
Tests comparatifs.	108			55		2		22870
Rapport (s) de conclusion.				57		2		14876
Cahier des charges pour la								

réalisation d'un démons-trateur.								
Contributions pour la définition des nouveaux protocoles d'essais.								
Total général	HT							95975
							TTC	115 170

Option :

Calendrier prévisionnel :

2017 : ? mois à compter de la date de lancement

Liste des pièces jointes

néant à ce stade.

Avis de la (ou des) direction(s) technique ou territoriale concernée(s) :

Avis favorable.

11.2 Plan de la planche d'essai

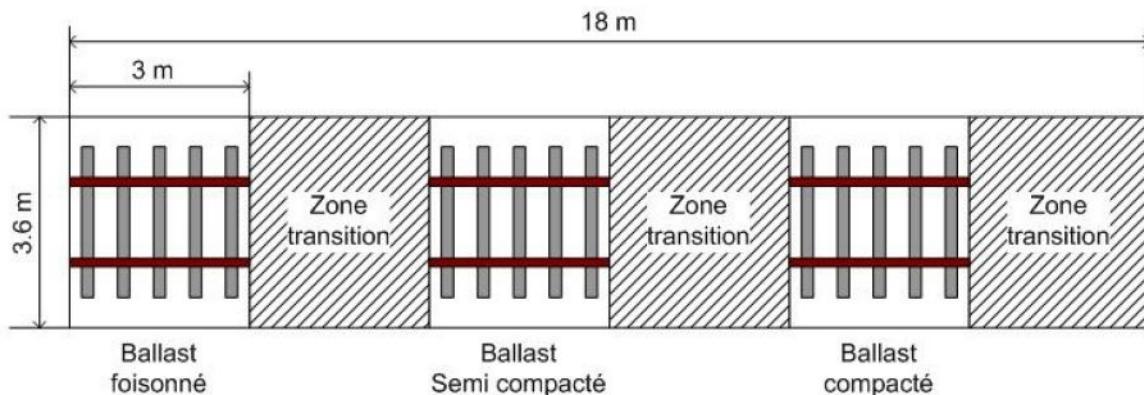


Figure 5 : Schéma de la structure d'essais - vue de dessus

Figure 49: Schéma de la planche d'essai

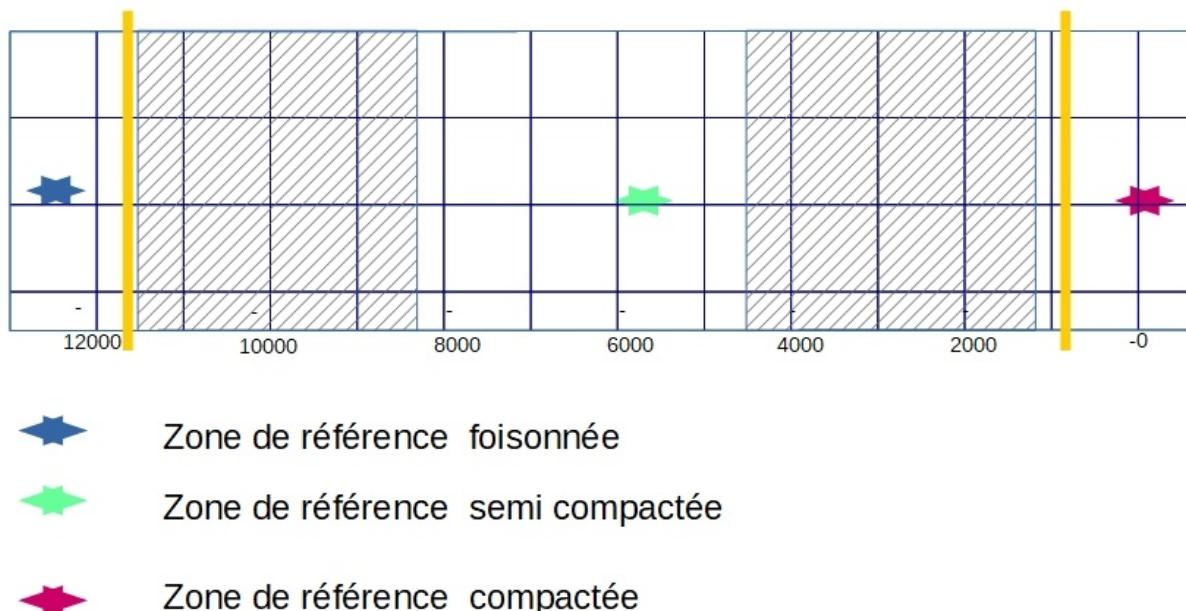


Figure 50: Position des emprises de référence sur la planche

Position longitudinales des zones de référence en unité du nuage :

Foisonné : - 12 540 sur la planche :

ligne orange : - 11 760

Semi compacté : - 5 800

ligne orange : - 960

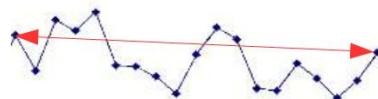
compacté : + 180

11.3 Tortuosités

11.3.1 État de surface

2 exemples pour visualiser l'impact de l'état de la surface sur la tortuosité :

Tortuosité correspondant à une emprise semi-compactée :



$$DC = \text{longueur en suivant la surface} = 103$$

$$DS = \text{longueur en ligne droite} = 69$$

$$\text{Tortuosité} = 103/69 = 1.49$$

Figure 51: Exemple de calcul de tortuosité : profil tortueux, peu compacté

Tortuosité que l'on trouve pour une emprise compactée :



$$DC = \text{longueur en suivant la surface} = 193$$

$$DS = \text{longueur en ligne droite} = 152$$

$$\text{Tortuosité} = 193/152 = 1.27$$

Figure 52: Exemple de calcul de tortuosité : profil aplati, compacté

11.3.2 Anisotropie

La tortuosité décèle les anisotropies, soit un escalier vu à plat et de profil :



Figure 53: Tortuosité d'un escalier ?

Dans le sens perpendiculaire aux marches le profil suivant le MNT sera :

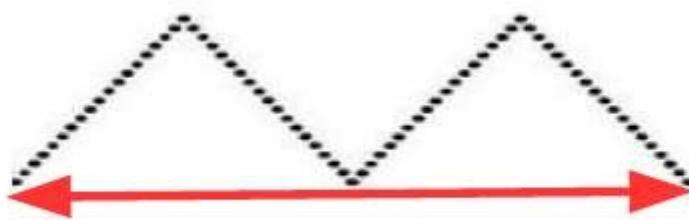


Figure 54: Escalier : Tortuosité suivant le sens montant

Si la hauteur des marches égale celle du giron la tortuosité sera de **1.41¹⁹**.

On remarque que la tortuosité est indépendante de l'échelle : elle sera la même quelle que soit la hauteur de la marche et celle du giron. (24 cm de giron, 24 cm de hauteur par exemple).

Le profil le long d'une marche sera "plat", la longueur directe = la longueur torte, la tortuosité = **1**.

Les tortuosités transverses et longitudinales sont indépendantes et méritent donc chacune d'être calculées.

11.3.3 Influence du maillage du MNT

Par contre lorsque la géométrie de l'objet mesuré est fractale ou très découpée alors la valeur de la tortuosité dépend de la taille de la maille selon laquelle les mesures sont effectuées. Plus la maille sera fine plus la distance cumulée en suivant la géométrie du terrain sera grande et donc la tortuosité augmente.



Figure 55: influence du maillage sur la tortuosité : le maillage noir est plus court que le maillage magenta, plus fin. Les tortuosités varient.

19 $\sqrt{2}$: La longueur torte vaut 4 côtés, la ligne droite rouge vaut 2 diagonales du carré.

Il y a cependant un niveau de maillage tel que les détails les plus fins sont pris en compte. Tout affinement ne fera qu'ajouter des points « en ligne droite » : la taille de la maille n'a plus d'effet sur la tortuosité qui reste constante.

Pour notre étude la qualité des MNT obtenus relativement à la géométrie du ballast cet inconvénient n'interviendra pas. La maille que nous utilisons est de 1 mm maximum alors que les irrégularités du ballast sont supérieures cm.

11.3.4 Prise en compte de la topologie

La tortuosité prend en compte la réalité topologique du terrain, ce qui n'est pas le cas des indicateurs statistiques basiques et de l'histogramme des Z qui ne tiennent compte que de la valeur du « z » sans lien avec sa position dans le voisinage surfacique.

Cette prise en compte « topologique » est complémentaire de l'analyse purement locale des Z et l'analyse des tortuosités apporte une information supplémentaire.

11.3.5 Bilan

Pour toutes ces raisons la tortuosité est un bon indicateur de l'état d'une surface, surtout si elle présente des caractéristiques géométriques anguleuses, ce qui est le cas du ballast.

12 Tables des figures

Index des figures

Figure 1: le photographe sur son échelle.....	6
Figure 2: La rampe auto-portée portant 6 appareils photos.....	7
Figure 3: Histogramme : exemple.....	8
Figure 4: Histogramme et loi normale.....	9
Figure 5: Histogramme bimodal, met en évidence un mélange probable de populations.....	9
Figure 6: Tortuosité : illustration.....	10
Figure 7: Histogramme des 200 valeurs de tortuosités : exemple.....	11
Figure 8: Ballast avec règle de 40 cm.....	11
Figure 9: la planche en cours de compactage, vue du sud.....	13
Figure 10: Plan de la planche.....	13
Figure 11: le nuage 3D de la planche : on distingue la zone foisonnée à gauche.....	13
Figure 12: Vue 3D de la marque séparant les zones semi-compactée (en haut) et foisonnée.....	14
Figure 13: Vue 3D de la marque séparant les zones compactée (en haut) et semi-compactée.....	14
Figure 14: Nuage obtenu à partir de photos prises en biais et montrant les vides des zones masquées.....	15
Figure 15: Nuage obtenu par des photos prises « du dessus » : il n'y a pas de zones « vides ».....	15
Figure 16: présence de feuilles mortes sur les photos du 5 août 2018.....	16
Figure 17: Zoom extrait de la photo DS106338 prise le 8 mars 2019.....	17
Figure 18: Nuage à l'origine des emprises utilisées dans cette étude : environ 2,6 m par 13m, comptant 204 millions de points.....	18
Figure 19: Visualisation de l'emprise « de référence » compactée par Cloud Compare.....	19
Figure 20: Statistiques sur les valeurs Z et les tortuosités, emprise compactée.....	20
Figure 21: du nuage vers le MNT – statistiques sur le MNT – emprise compactée.....	20
Figure 22: Les histogrammes des Z et des tortuosités – emprise compactée.....	21
Figure 23: Statistiques sur les 200 tortuosités calculées : moyenne, médiane, écart type... emprise compactée.....	21
Figure 24: Visualisation de l'emprise semi-compactée par Cloud Compare.....	22
Figure 25: Statistique sur les Z et les tortuosités – emprise semi-compactée.....	22
Figure 26: du nuage vers le MNT – statistiques sur le MNT – emprise !!br0ken!!.....	23
Figure 27: Les histogrammes des Z et des tortuosités - emprise !!br0ken!!.....	23
Figure 28: Statistiques sur les 200 tortuosités calculées : moyenne, médiane, écart type... emprise semi-compactée.....	24
Figure 29: Visualisation de l'emprise foisonnée par Cloud Compare.....	25
Figure 30: Statistique sur les Z et les tortuosités - emprise foisonnée.....	25
Figure 31: du nuage vers le MNT – Statistique sur le MNT :- emprise foisonnée.....	26
Figure 32: Statistiques sur les 200 tortuosités calculées : moyenne, médiane, écart type... emprise foisonnée.....	27
Figure 33: un profil de l'emprise foisonnée.....	28
Figure 34: Le protocole « Planche CER avril 2019 » et ses références.....	29
Figure 35: Premier test : présentation de l'emprise encadrée de jaune, au-dessous de la référence.....	30
Figure 36: Calcul des tortuosités sur l'emprise test compactée.....	31

Figure 37: Test 1, emprise compactée : statistiques sur les valeurs de Z.....	31
Figure 38: Emprise test 1 : résultat des rapprochements avec les références : la zone compactée est reconnue comme la plus probable.....	32
Figure 39: Emprise test 1 : fonctions de répartitions comparées : les tortuosités testées en rouge se rapprochent progressivement de la courbe bleue (emprise compactée).....	32
Figure 40: Deuxième test : présentation de l'emprise encadrée de jaune, au-dessus de la référence semi-compactée.....	33
Figure 41: Test 2 emprise semi-compactée : calcul des tortuosités.....	34
Figure 42: Emprise test 2 : résultat des rapprochements avec les références : la zone semi-compactée est reconnue avec quasi certitude.....	35
Figure 43: Emprise test 2 : fonctions de répartitions comparées : les courbes testées en rouge sont très proches des courbes vertes,(emprise semi-compactée).....	35
Figure 44: test 3 : présentation de l'emprise encadrée de jaune, au-dessus de la référence foisonnée.....	36
Figure 45: Test 3 emprise foisonnée : calcul des tortuosités.....	36
Figure 46: test 3 : statistiques sur les z.....	37
Figure 47: Emprise test 3 : résultat des rapprochements avec les références : la zone foisonnée est reconnue comme probable.....	37
Figure 48: Emprise test 3 : fonctions de répartitions comparées : les courbes testées en rouge sont assez proches des courbes jaunes,(emprise foisonnée).....	38
Figure 49: Schéma de la planche d'essai.....	47
Figure 50: Position des emprises de référence sur la planche.....	47
Figure 51: Exemple de calcul de tortuosité : profil tortueux, peu compacté.....	48
Figure 52: Exemple de calcul de tortuosité : profil aplati, compacté.....	48
Figure 53: Tortuosité d'un escalier ?.....	48
Figure 54: Escalier : Tortuosité suivant le sens montant.....	49
Figure 55: influence du maillage sur la tortuosité : le maillage noir est plus court que le maillage magenta, plus fin. Les tortuosités varient.....	49

*Logo ISO
si certifié*

Cerema XXX

adresse

Tel : 00 00 00 00 00 – Fax : 00 00 00 00 00 – mél : XXXXX.cerema@cerema.fr

www.cerema.fr