



HAL
open science

Méthode de dimensionnement des structures de chaussées : quelle(s) adaptabilité(s) pour les matériaux granulaires alternatifs ?

Adolphe Kimbonguila, Frederic Becquart, Nor Edine Abriak

► To cite this version:

Adolphe Kimbonguila, Frederic Becquart, Nor Edine Abriak. Méthode de dimensionnement des structures de chaussées : quelle(s) adaptabilité(s) pour les matériaux granulaires alternatifs ?. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. hal-01167601

HAL Id: hal-01167601

<https://hal.science/hal-01167601>

Submitted on 24 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Méthode de dimensionnement des structures de chaussées : quelle(s) adaptabilité(s) pour les matériaux granulaires alternatifs ?

Adolphe Kimbonguila Manounou, Frédéric Becquart, Nor-Edine Abriak

Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) – Mines douai GCE, F-59508 Douai, France

E-mail : frederic.becquart@mines-douai.fr

RÉSUMÉ. Dans le cadre du développement durable, les enjeux de préservation des ressources naturelles non renouvelables et de protection de l'environnement conduisent à considérer à part entière les matières premières secondaires granulaires comme un gisement alternatif à l'utilisation des agrégats naturels, notamment en technique routière. La diffusion de ces matériaux alternatifs dans ce domaine reste fondamentalement dépendante de leur niveau de performance technico-environnementale, par référence à celui des matériaux standards classiquement utilisés. On s'intéresse spécifiquement dans ce papier aux critères mécaniques en lien avec le dimensionnement des structures de chaussées. Dans une démarche d'optimisation et de diffusion des granulaires alternatifs en technique routière, une prise en compte effective du comportement mécanique réel (et des sollicitations réelles par ailleurs) s'avère essentielle. Dans ce contexte, cette contribution concourt à démontrer, à l'appui d'une étude de sensibilité spécifique, la nécessité de disposer de modèles en fatigue propres aux matériaux alternatifs, identifiés expérimentalement et permettant de s'affranchir des hypothèses réductrices concernant l'association des paramètres mécaniques des matériaux standards aux granulaires alternatifs. L'étude de sensibilité sur les paramètres empiriques des modèles d'accumulation des déformations permanentes (spécifique aux graves naturelles non liées) et de fatigue (spécifique aux graves naturelles traitées au liant hydraulique) permet d'évaluer leurs influences sur les contraintes admissibles et sur les variations associées d'épaisseur de couche de la structure de chaussée.

ABSTRACT. In the sustainable development context, the challenges of preservation of non-renewable natural resources and environmental protection lead to consider entirely granular secondary raw materials as an alternative resources in the use of natural aggregates, particularly in road engineering. The dissemination of these alternative materials in this field fundamentally remains dependent on their level of technical and environmental performance, in reference to that of standard materials conventionally used. In this paper, we focus on mechanical criteria to related to the design of pavement structures. In an optimization approach and dissemination of alternative granulars in road construction, it is essential to consider the effective mechanical behavior (and real mechanical loads, otherwise). In this context, our sensitivity study contributes to demonstrate the need to have specific fatigue models for alternative materials, identified experimentally and overcoming the simplifying assumptions about assigning unique mechanical parameters for standard and alternative granular materials. The sensitivity study on empirical parameters of the accumulation of permanent deformation and fatigue models (specific to unbound natural gravel and natural gravel bounded with a hydraulic binder respectively) allows assessment their influence on permissible stresses, and resultant variation of layer thickness of the pavement structure.

MOTS-CLÉS : Matière première secondaire granulaire, matériau alternatif, dimensionnement de chaussées, comportement mécanique, déformation permanente, loi de fatigue.

KEYWORDS: Granular secondary raw materials, alternative material, pavements design, mechanical behavior, permanent deformation, fatigue law.

1. Introduction

Le domaine routier est très consommateur de granulats naturels et les matières premières secondaires granulaires tels que les granulats de démolition (béton, briques, etc.), mâchefers d'incinération, laitiers, sédiments, etc. apparaissent dans le domaine de la construction comme des granulaires alternatifs potentiels pour la substitution des ressources non renouvelables. Compte tenu de leurs spécificités en partie dues à leur origine, les caractéristiques intrinsèques des matériaux alternatifs ne rentrent pas le plus souvent dans le cadre normatif en vigueur (la capacité d'absorption et le contenu en matières organiques en sont la parfaite illustration du point de vue physique). L'évaluation pertinente des caractéristiques propres aux granulats alternatifs pour l'usage attendu est ainsi fondamentale. Dans ce cadre, la réflexion globale en recherche doit stratégiquement concourir à faire évoluer le référentiel normatif, les lignes normatives étant à l'origine conçues pour les matériaux standards. A noter qu'un certain nombre de retours d'expériences à l'échelle 1 révèlent le potentiel de valorisation de produits finis incorporant dans leur compositions des granulaires alternatifs, confirmant en première approche d'étude l'aptitude d'utilisation, mais avec un challenge certain se situant au niveau de l'évaluation de la durabilité à court et moyen terme dans l'environnement fonctionnel.

L'objectif de cette communication est de démontrer la nécessité de disposer de modèles prédictifs tirées de l'expérience pour les granulaires alternatifs dans leur environnement fonctionnel, en l'occurrence lié ici au domaine routier. On s'intéresse pour cela aux critères mécaniques en lien avec le dimensionnement des structures de chaussées. A court terme, les tests expérimentaux en laboratoire doivent pouvoir nourrir les guides techniques dans le sens de l'utilisation des matériaux granulaires alternatifs et sur une tonalité moins empirique et de moindre raisonnement par analogie aux standards.

Dans la méthode française de dimensionnement actuelle, le modèle de Burmister décrit la structure de chaussée comme une superposition de couches élastiques linéaires, homogènes et isotropes. Le calcul des valeurs admissibles s'appuie sur le caractère plastique (déformation plastique) des granulaires non traités – noté GNT – et sur le comportement en fatigue des matériaux traités aux liants hydrauliques –noté GTLH– (rupture d'une éprouvette suite à sollicitation à haut nombre de cycles). Ces comportements sont traduits par des lois d'évolution et de cumul de dommage de type Woehler-Miner. De tels modèles d'accumulation des déformations ou d'endommagement par fatigue ne sont pas établis pour les matériaux non standards : les paramètres des matériaux standards leur sont directement affectés. Intuitivement, il semble qu'il ne soit pas illogique de considérer une différence de ces paramètres suivant le cas standard ou alternatif. Dans ce contexte, une première approche pour évaluer l'impact d'une différence au sens précité peut être déclinée sous l'angle d'une étude de sensibilité sur les paramètres empiriques des modèles d'accumulation des déformations permanentes (spécifique aux GNT) et de fatigue (spécifique aux GTLH) affectés aux matériaux standards. Cette approche permet d'évaluer leurs influences sur les contraintes admissibles et sur les variations associées d'épaisseur de couche (cas structure avec couche GNT/cas structure avec couche GTLH). Le progiciel de simulation par éléments finis ABAQUS est utilisé pour déterminer les sollicitations mécaniques dans la structure de chaussée. La sollicitation maximale dans la couche granulaire (non traitée ou traitée) est relevée puis comparée à la sollicitation admissible dans celle-ci. Un calcul numérique incrémental est réalisé en associant ABAQUS et un script PYTHON afin de déterminer l'épaisseur critique de la couche de chaussée qui vérifie le critère d'admissibilité.

2. Dimensionnement rationnel des structures de chaussée

Le dimensionnement routier fait appel à une méthode de calcul de l'épaisseur de la chaussée. Il consiste à évaluer le niveau de sollicitation de la structure et de déterminer les épaisseurs à donner aux différentes couches de la chaussée afin de réduire les contraintes et déformations à des valeurs admissibles pour un trafic donné [SET 94, ALI 03]. Le dimensionnement consiste en la mise en oeuvre d'un système qui, à partir des paramètres d'entrée (trafic, type de structure et de plate-forme) fournit les paramètres de sortie (épaisseurs) recherchés (Figure 1). Les différentes étapes du schéma général de dimensionnement d'une chaussée sont synthétisées ci-dessous [SET 94, BEC 06].

Étape 1 : Choix du type de structure et choix des matériaux et des épaisseurs de couches.

Étape 2 : Calcul des sollicitations maximales générées par le trafic dans les différentes couches. Ces calculs sont réalisés à l'aide de la méthode des éléments finis via le progiciel de calcul ABAQUS. Elles dépendent des propriétés des matériaux constitutifs de la chaussée.

Étape 3 : Calcul des sollicitations admissibles dans les différentes couches. Ces sollicitations admissibles sont calculées à partir des données d'entrée sur le trafic et des différents coefficients.

Étape 4 : Confrontation des (Étape 2) et (Étape 3), entre respectivement les sollicitations maximales générées dans la structure et les sollicitations jugées admissibles.

Étape 5 : Ajustement éventuel des épaisseurs des couches afin de respecter la sollicitation admissible.

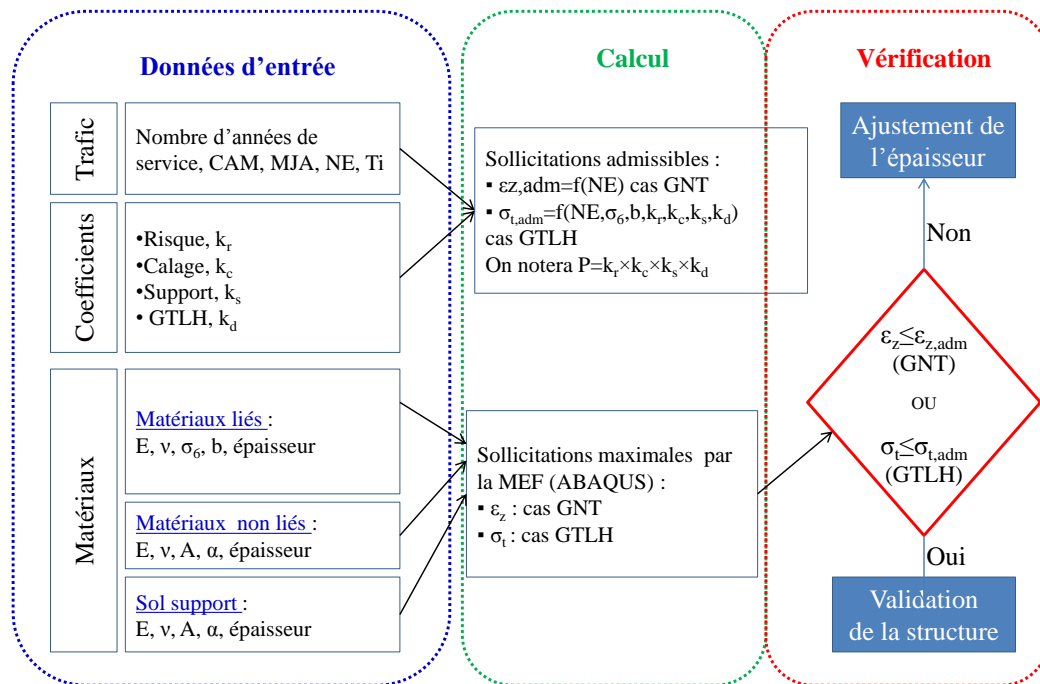


Figure 1. Schéma de dimensionnement d'une structure de chaussée : des données d'entrée jusqu'à la validation de la structure. La description des paramètres peut être trouvée dans la référence [SET 94].

Pour mener notre étude de sensibilité sur les paramètres des modèles d'endommagement afin d'évaluer leurs influences sur les sollicitations admissibles et sur les variations associées d'épaisseur de couche de chaussée, nous définissons deux structures : la première est constituée d'une fondation GNT et la seconde constituée d'une fondation GTLH.

3. Étude de sensibilité liée à la structure avec fondation en graves non traitées (GNT)

3.1. Présentation de la structure de chaussée et des aspects numériques de base

La structure de chaussée (Figure 2) est modélisée en 2D axisymétrique et présente les caractéristiques décrites dans le Tableau 1 ainsi que les conditions aux limites et le chargement appliqué. Pour les calculs, les interfaces entre les couches de matériaux sont supposées parfaitement collées entre elles. Le comportement mécanique pour chacune des couches est considéré comme élastique linéaire, la connaissance du couple (E , ν) est de ce fait suffisante.

Tableau 1. Caractéristiques du cas de la chaussée avec fondation GNT.

Couche	Type de couche	Matériau	E (MPa)	ν (-)	Épaisseur
1	Couche de base	GNT	400	0.35	15 cm
2	Couche de fondation	GNT	125	0.35	variable
3	Plate-forme	Sol Support	50	0.35	5 m

La structure de la chaussée est considérée comme un massif multicouche avec un axe de symétrie vertical, chaque couche est homogène et isotrope. La charge statique est répartie uniformément avec une intensité de 0.662 MPa.

La structure est discrétisée avec des éléments quadrangulaires bilinéaires axisymétriques à quatre noeuds et à intégration réduite avec un seul point de Gauss (élément CAX4R de la librairie d'ABAQUS).

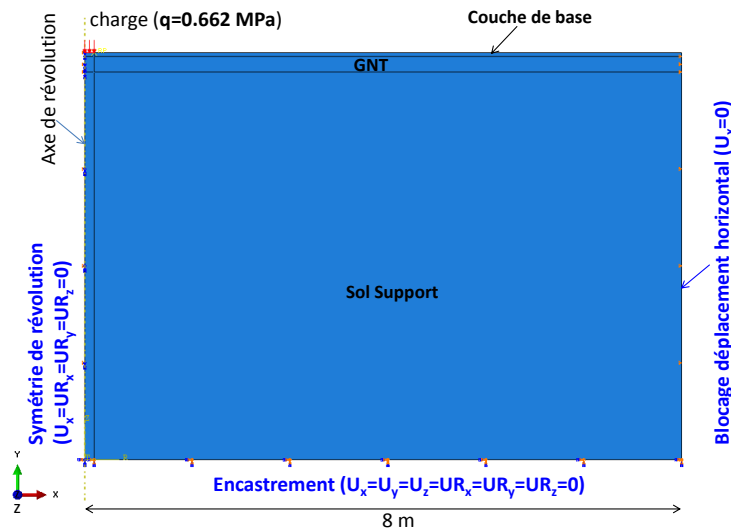


Figure 2. Modèle géométrique de la structure de chaussée.

3.2. Loi d'évolution des déformations permanentes

La déformation verticale admissible $\varepsilon_{z, adm}$ à la surface du sol support est donnée par la relation [1].

$$\varepsilon_{z, adm} = A (NE)^{-\alpha} \quad (1)$$

où A est un paramètre de la loi d'évolution des déformations permanentes pour les sols et matériaux non traités (12000 $\mu\text{d}\text{éf}$ pour une chaussée à fort trafic, 16000 $\mu\text{d}\text{éf}$ pour une chaussée à faible trafic), α est la pente de la loi d'évolution des déformations permanentes pour les sols ou les matériaux non traités ($\alpha = 0.222$).

3.3. Résultats de l'étude de sensibilité cas d'une fondation GNT

La Figure 3a) montre la variation de la déformation verticale ε_z au sommet du sol support en fonction de l'épaisseur de la couche granulaire non traitée. On constate que l'évolution de la déformation axiale ε_z est une fonction puissance de la hauteur de la couche granulaire H . La loi de puissance identifiée à l'aide d'une série de simulations numériques est donnée par la relation [2].

$$\varepsilon_z = A_0 H^{-\tilde{\alpha}} \quad (2)$$

où $A_0 = 0.038 \times 10^{-6}$ est un paramètre qui rend compte de l'amplitude de la déformation verticale, $\tilde{\alpha} = 1.14 \pm 0.002$ est la pente de la loi de puissance et H est l'épaisseur de la couche GNT. A_0 et $\tilde{\alpha}$ ont été déterminées avec une grande précision par une procédure d'ajustement non-linéaire des données numériques issues de quinze simulations par éléments finis. La déformation verticale ε_z à la surface de la couche granulaire (Equation [2]) déterminée par simulation numérique est comparée à la déformation verticale admissible (Equation [1]). En égalant [1] et [2], on peut déterminer une épaisseur critique H_{crit} donnée par la relation [3].

$$H_{crit} = \left[\frac{A}{A_0} (NE)^{-\alpha} \right]^{-1/\tilde{\alpha}} \quad (3)$$

La Figure 3b) montre l'effet du coefficient A du modèle d'endommagement par accumulation des déformations permanentes plastiques (orniérage) sur l'épaisseur de la couche GNT en maintenant la pente de cette loi constante ($\alpha = -0.222$, valeur courante).

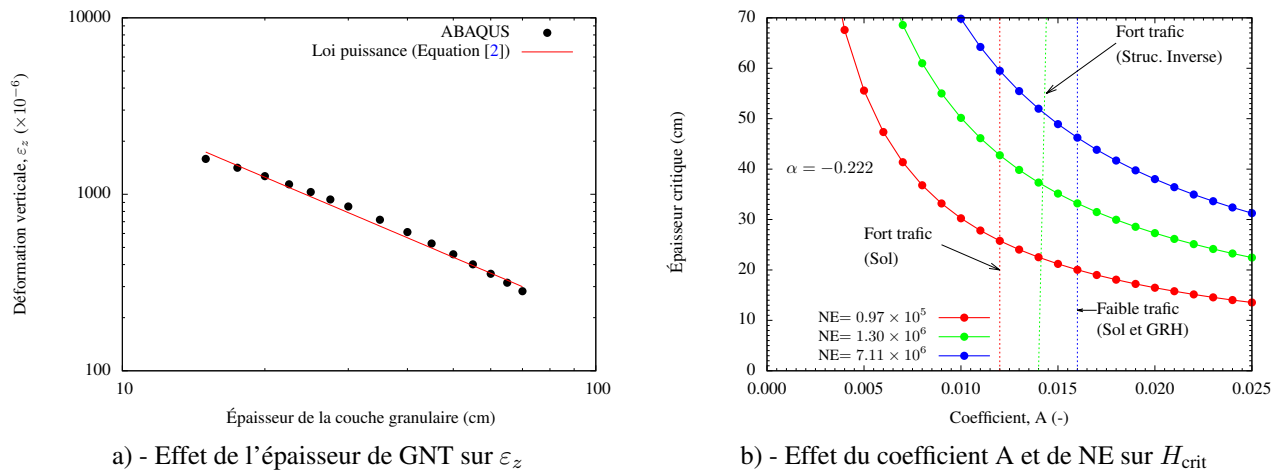


Figure 3. Effets de l'épaisseur de la couche GNT sur la déformation verticale et des paramètres A, NE sur l'épaisseur critique de GNT.

L'épaisseur critique est évaluée pour des valeurs croissantes du nombre de passages de charges roulantes (NE). Pour une déformation permanente donnée, à laquelle on associe une classe de trafic donnée, l'épaisseur critique augmente avec le nombre de passages de charges roulantes. Par exemple, pour une chaussée à fort trafic où la valeur du coefficient A est couramment prise égale à 0.012, l'épaisseur critique de la couche GNT évaluée à partir de la relation [3] vaut 25.78 cm pour $NE = 0.97 \times 10^5$ et passe à 42.74 cm lorsque $NE = 1.30 \times 10^6$ et à 59.5 cm pour $NE = 7.11 \times 10^6$. L'épaisseur de GNT requise pour une chaussée à faible trafic est moins importante que celle qu'il faut assigner à la même couche pour une chaussée à fort trafic. En effet, indépendamment du nombre d'essieux équivalents, considérant une variation du coefficient A de 0.012 à 0.016 (soit 33.33%) pour la même pente de la loi d'évolution de la déformation permanente, une diminution d'épaisseur critique de 22.0% est constatée. Par ailleurs, si nous considérons un sol avec un fort trafic (coefficient A décrivant la déformation permanente pris égal à 0.012), une évolution de la pente passant de la valeur classique de 0.222 à 0.25 conduit à une variation d'environ 47.0% de l'épaisseur critique. Pour la même variation du coefficient décrivant la déformation permanente, la variation de l'épaisseur critique est d'environ 33.0% pour un sol d'une chaussée à faible trafic. On montre ici une influence considérable du couple de paramètres (A, α) sur l'épaisseur optimale de la couche de graves naturelles non traitées. Les épaisseurs critiques déterminées dans des conditions variables sont regroupées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Effets du coefficient A et de la pente α du modèle d'endommagement par cumul de déformation permanente pour les matériaux granulaires non liés (Equation [1]).

Valeurs de l'épaisseur critique, H_{crit} (cm)				Valeurs de l'épaisseur critique, H_{crit} (cm)		
Pente α de la relation [3] maintenue constante : $\alpha = 0.222$				Pente α de la relation [3] variable		
	NE ($\times 10^5$)	NE ($\times 10^6$)	NE ($\times 10^6$)		Faible trafic (A= 16000 μ def) NE= 0.97×10^5	Fort trafic (A= 12000 μ def) NE= 7.11×10^6
A (μ def.)	0.97	1.30	7.11	α (-)		
10000	30.25	50.15	69.82	0.200	16.05	43.88
11000	27.83	46.13	64.22	0.210	17.75	50.40
12000	25.78	42.74	59.50	0.222	20.03	59.50
13000	24.03	39.84	55.47	0.230	21.71	66.47
14000	22.52	37.33	51.98	0.240	24.01	76.33
15000	21.20	35.14	48.92	0.250	26.56	87.66
16000	20.03	33.21	46.23	0.260	29.37	100.68
17000	18.99	31.49	43.84	0.270	32.49	115.62
18000	18.07	29.95	41.69	0.280	35.93	132.78
20000	16.47	27.30	38.01			

4. Étude de sensibilité liée à la structure avec fondation en graves traitées au liant hydraulique (GTLH)

4.1. Présentation de la structure de chaussée

Dans cette partie, par comparaison au cas GNT, la seule différence au niveau de la structure réside dans la considération d'une GTLH pour la couche de fondation et d'un enrobé pour la couche de roulement (Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques de la structure de GTLH.

Couche	Type de couche	Matériau	E (MPa)	ν (-)	Épaisseur
1	Couche de roulement	Enrobés	6000	0.35	5 cm
2	Couche de fondation	GTLH	12000	0.35	variable
3	Plate-forme	Sol Support	100	0.35	5 m

4.2. Modèle d'endommagement par fatigue

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, le critère de dimensionnement est la contrainte horizontale à la base de la couche, $\sigma_{t,adm}$. Le modèle est celui de l'endommagement par fatigue sous sollicitations répétées de traction par flexion exercées par le trafic. La contrainte de traction admissible donnée par la relation [4] dépend du nombre équivalent d'essieux de références correspondantes au trafic poids lourds cumulé sur la durée initiale de calcul retenue (NE), de la contrainte à 10^6 cycles de charge provoquant la rupture (σ_6), de la pente de la droite de fatigue en coordonnées bi-logarithmiques (b) et d'un coefficient correcteur P qui sera maintenu constant tout au long de notre étude.

$$\sigma_{t,adm} = \sigma_6 \times P \times \left(\frac{NE}{10^6} \right)^{-1/b} \quad (4)$$

Dans la référence [SET 94], le couple de paramètres (σ_6, b) est déterminés à partir des essais de fatigue en laboratoire. L'objectif dans cette étude est de cerner l'influence de ce couple de paramètres sur l'épaisseur critique de la couche granulaire traitée aux liants hydrauliques. Ceci revient à faire subir une transformation géométrique à la droite de fatigue soit par translation (Figure 4 a) ou par rotation (Figure 4 b).

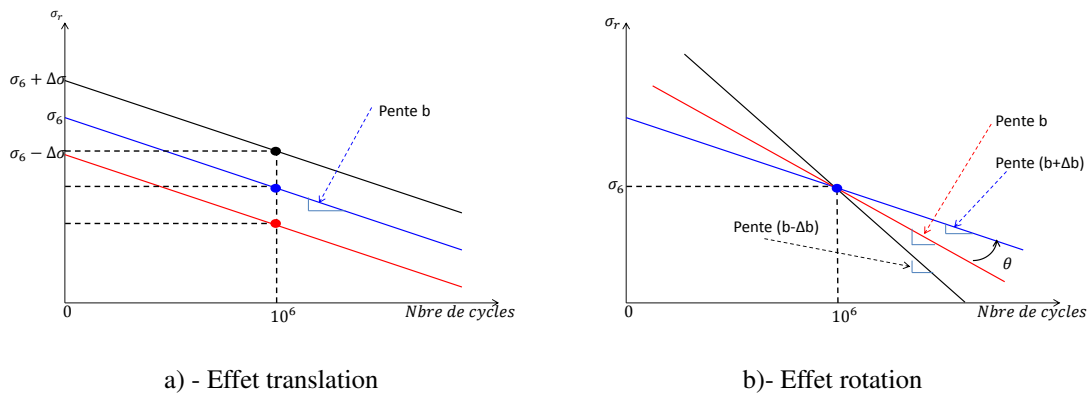


Figure 4. Transformation géométrique de la droite de fatigue par translation et par rotation. a)- translation et b)- rotation autour de la contrainte à 10^6 de cycles.

4.3. Résultats de l'étude de sensibilité du cas d'une fondation GTLH

Pour étudier l'évolution de la contrainte horizontale dans la profondeur de couche GTLH, une épaisseur adimensionnée de la couche de GTLH est définie par $H^* = e/H$, avec H l'épaisseur totale de la couche GTLH et e l'incrément d'épaisseur. La Figure 5 montre l'évolution de la contrainte horizontale σ_t dans l'épaisseur adimensionnée H^* . Environ 60.0% de la GTLH est sollicitée en traction dans la partie basse ($\sigma_t > 0$) et 40.0% de la partie supérieure est sollicitée en compression ($\sigma_t < 0$). La contrainte de traction maximale est observée à la base

de la couche de matériaux traités au liant hydraulique ($H^* = 0$) et augmente avec l'épaisseur totale de la couche H (Figure 5).

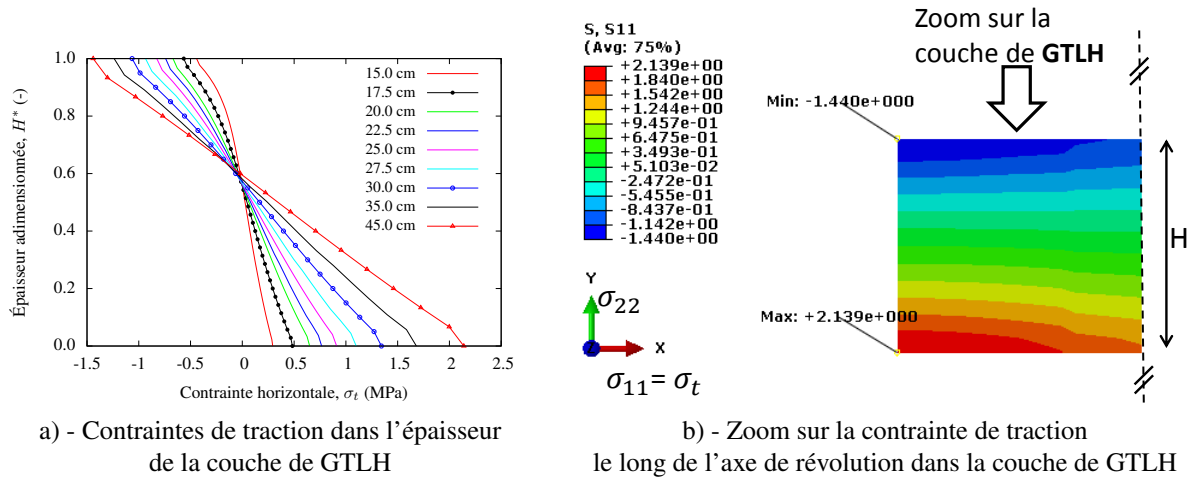


Figure 5. Variation de la contrainte de traction dans l'épaisseur adimensionnée de la couche GTLH.

La Figure 6a) montre l'évolution de la contrainte maximale de traction en fonction de la hauteur de la couche GTLH.

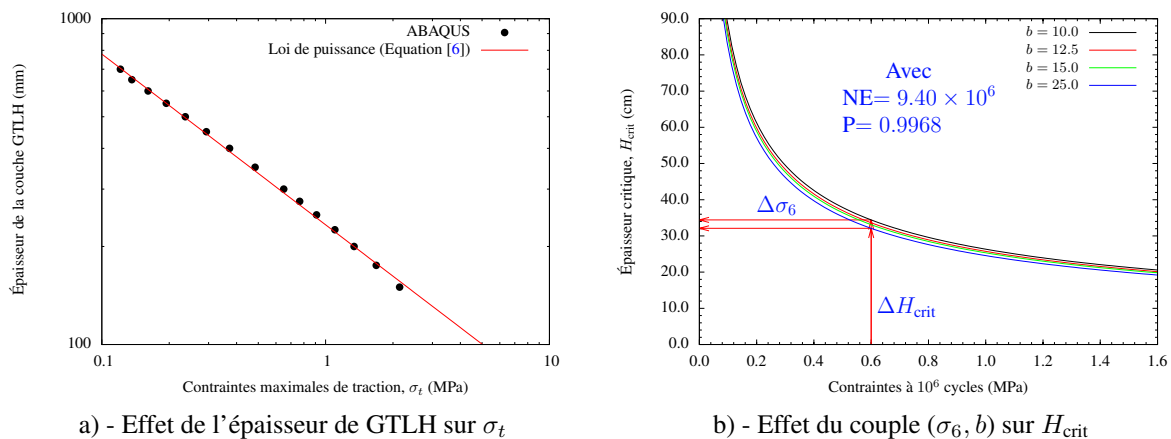


Figure 6. Effets de l'épaisseur de la couche GTLH sur la contrainte maximale de traction et du couple de paramètres (σ_6, b) sur l'épaisseur critique de GTLH.

Naturellement, la contrainte maximale de traction à la base de la couche de granulaire augmente lorsque l'épaisseur de la couche granulaire diminue. La relation entre ces deux grandeurs est régie par une loi de puissance de la forme [5].

$$H = K_0 \sigma_{t,\max}^{-\tilde{b}} \quad (5)$$

où K_0 est une constante du modèle et \tilde{b} est la pente d'écrite par le modèle. Les valeurs de $K_0 = 233,045 \pm 0,9579$ et de $\tilde{b} = 0,524$ ont été déterminées avec une grande précision par la même procédure que dans le cas fondation GNT. Un calcul inverse permet d'exprimer aisément l'évolution de la contrainte maximale de traction $\sigma_{t,\max}$ (ou la contrainte horizontale) en fonction de la hauteur de la couche granulaire H par la relation [6].

$$\sigma_{t,\max} = \left(\frac{H}{K_0} \right)^{-1/\tilde{b}} \quad (6)$$

Ainsi, d'une part, la loi d'évolution de la contrainte de traction maximale à la base de la couche GTLH, fonction de l'épaisseur de celle-ci, est désormais identifiée (Equation [6]). D'autre part, la relation régissant l'évolution la contrainte de traction admissible à la base de la couche GTLH est établie (Equation [4]). Les valeurs des sollicitations maximales dans la couche traitée au liant hydraulique sont ensuite comparées avec celles admissibles des matériaux constitutifs de la chaussée. On peut déterminer une épaisseur critique H_{crit} de la couche granulaire traitée en égalisant les relations [4] et [6] pour aboutir à la relation [7].

$$H_{crit} = K_0 \left[P \times \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^{-1/b} \right]^{-\bar{b}} \quad (7)$$

La Figure 6b) montre la variation de l'épaisseur critique en fonction de la contrainte à 10^6 cycles pour différentes valeurs de la pente de la loi de fatigue du matériau. L'épaisseur critique dépend à la fois de la pente de la droite de fatigue et de la contrainte à 10^6 cycles. Elle diminue avec les augmentations respectives de la pente et de la contrainte relevée à 10^6 cycles de charge provoquant la rupture. Lorsque la contrainte à 10^6 cycles varie de 0.5 MPa à 0.6 MPa (soit une augmentation de 20.0%) pour une pente fixée (faible ou forte pente), on relève un gain d'épaisseur critique de 10.0%. Ce gain d'épaisseur critique de matériaux est plus important, pouvant atteindre jusqu'à 25.0% lorsque la contrainte à 10^6 cycles est augmentée de 50.0% pour une pente donnée. Cependant, on peut observer que pour une évolution de la pente de 10 à 25 (soit un accroissement de 150.0%), celle-ci n'entraîne qu'un gain maximal d'épaisseur critique d'environ 7.0% indépendamment de la valeur de la contrainte à 10^6 cycles dans la gamme examinée dans ce travail. On peut conclure que la variation de la contrainte à 10^6 cycles a une influence nettement plus grande sur l'épaisseur critique de GTLH que la variation de la pente de la droite de fatigue. Différentes épaisseurs critiques de la couche GTLH sont regroupées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Épaisseur critique H_{crit} en fonction de la pente b de la loi de fatigue et de la contrainte à 10^6 cycles.

pente de la loi de fatigue (Equation [7]) b (-)	Valeurs de l'épaisseur critique, H_{crit} (cm)		
	pour $\sigma_6 = 0.5$ MPa	pour $\sigma_6 = 0.6$ MPa	pour $\sigma_6 = 0.75$ MPa
10.0	37.90	34.42	30.32
12.5	37.00	33.62	29.92
15.0	36.42	33.11	29.45
25.0	35.31	32.10	28.55

5. Conclusions

Les résultats de cette étude montrent toute l'importance qu'il faut accorder au choix des valeurs des paramètres utilisés dans les modèles d'endommagement. En effet, une attribution forfaitaire des paramètres par raisonnement comparatif aux standards granulaires peut se traduire par une épaisseur optimisée de couche de chaussée erronée. Il ressort de cette étude de sensibilité des variations importantes d'épaisseurs critiques sensibles à la variation des paramètres des modèles d'endommagement. Il apparaît donc indispensable de disposer de modèles prédictifs identifiés expérimentalement si l'on souhaite rationaliser et optimiser le dimensionnement de structures de chaussées à base de matériaux granulaires alternatifs. Ces résultats doivent être complétés par la prise en compte de l'élasticité non linéaire des granulaires et de l'effet cyclique des sollicitations réellement exercées par le trafic.

6. Bibliographie

- [ALI 03] ALIZÉ, Manuel d'utilisation ALIZÉ-LCPC, version 1.3, 2003.
- [BEC 06] BECQUART F., « Caractérisation du comportement mécanique d'un mâchefer dans la perspective d'une méthodologie de dimensionnement adaptée aux structures de chaussées. », *XXIV^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil – 3^{ème} Prix du Concours Jeunes Chercheurs*, 2006.
- [SET 94] SETRA, Guide technique de conception et dimensionnement des structures de chaussée, SETRA/LCPC, Décembre 1994, p.266.