

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Étude de l'incidence du comportement réel des matériaux non liés (GNT et sols) sur le dimensionnement des chaussées à faible trafic

Auteur(s) / Organisme(s) :

Patricia MAILLARD-NUNES - Egis

Liliana DUCA - Egis

Thème de rattachement :

Thème 1 – Mécanisme de dégradations

1.2 – Sols supports et chaussées souples

DVDC/R/045

N° lettre de commande LC/21/DVDC/133

22/12/2023

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	4
2 Introduction	5
2.1 Composition du document	5
3 Comportement mécanique des matériaux non liés et sols supports	6
3.1 Définition des graves non traitées et des sols et rôle dans les structures souples.....	6
3.2 Interactions de type cohésif au sein des milieux granulaires humides.....	8
3.3 Détermination du module réversible par l'essai triaxial	9
3.3.1 Influence des paramètres d'état	11
4 Étapes du projet	14
4.1 Choix des Matériaux	15
4.2 Modélisations	24
4.2.1 Résultats des modélisations.....	25
5 Conclusion	32
6 Références Bibliographiques	35
7 Annexes – Calculs Alizé	36
7.1 GNT Maraîchère.....	36
7.2 GNT Saint Agnant.....	37
7.3 GNT La Fare.....	38
7.4 Latérite.....	39
7.5 Sable de Missillac.....	40
7.6 Sable de l'Ennerie	41

Tables des illustrations

FIGURE 1 - Structure typique d'une structure de chaussée souple (extrait Manuel de Dimensionnement de chaussées à faible trafic - IDRRIM/CEREMA 2020)	6
FIGURE 2 Allure typique des résultats de l'Essai Proctor [HABIBALLAH, 2005]	8
FIGURE 3 Différents états de l'eau dans le sol [HABIBALLAH, 2005]	9
FIGURE 4 Schéma des types de cohésion de milieux granulaires humides [HABIBALLAH, 2005]	9
FIGURE 5 - Schéma d'un appareil triaxial	10
FIGURE 6 - Graphique Déformation permanente caractéristique pour quatre natures pétrographiques de granulats [Hornych et al, 1998]	11
FIGURE 7 Influence de la teneur en eau sur le module réversible de trois GNT de nature différente, d'après HORNYCH et al (1998)	12
FIGURE 8 - Influence de la teneur d'eau sur le comportement d'une chaussée instrumentée (Gidel, 2001)	12
FIGURE 9 - Sable de Missillac - Graphique Ec x teneur en eau	15

FIGURE 10 – Sable de l’Ennerie Graphique Ec x teneur en eau	16
FIGURE 11 GNT1 0/20 - Calcaire Dur W_{OPM} 5,30% Graphique Ec x teneur en eau	16
FIGURE 12 GNT 0/20mm calcaire tendre W_{OPM} 5,5% - Graphique Ec x teneur en eau	17
FIGURE 13 GNT3 0/10 Microgranite W_{OPM} 6,2% - Graphique Ec x teneur en eau	17
FIGURE 14 GNTb 0/20 Maraîchère Gneiss –(Lot 1 et Lot 2) Graphique Ec x teneur en eau	18
FIGURE 15 GNTb 0/20 Saint Agnant - Graphique Ec x teneur en eau	18
FIGURE 16 GNTb 0/20 La Fare W_{OPM} 3.0% - Graphique Ec x teneur en eau.....	19
FIGURE 17 – Graphique Granulométrie - Latérite Lot1 et Lot3	20
FIGURE 18 - GNTb 0/20 Latérite Lot 1 (W_{opm} – 11.50%) et Lot 3 (W_{opm} – 9.66%) - Graphique Ec x teneur en eau	20
FIGURE 19 - Synthèse - Durée de vie - GNT Maraîchère	25
FIGURE 20 - Graphique de Synthèse - Durée de vie – GNT Saint Agnant.....	26
FIGURE 21 - Synthèse - Durée de vie - GNT La Fare	28
FIGURE 22 - Synthèse - Durée de vie – Latérite	29
FIGURE 23 - GNT Maraîchère - Teneur en eau de référence – 6,6%	36
FIGURE 24 - GNT Maraîchère - Teneur en eau de référence – 7%	36
FIGURE 25 - GNT Maraîchère - Teneur en eau de référence – 5,7%	36
FIGURE 26 – GNT Saint Agnant - Teneur en eau de référence – 7,2%	37
FIGURE 27 – GNT Saint Agnant - Teneur en eau– 8,1%	37
FIGURE 28 – GNT Saint Agnant - Teneur en eau – 6,3%	37
FIGURE 29 GNT La Fare - Teneur en eau de référence – 3,13%	38
FIGURE 30 GNT La Fare - Teneur en eau– 3,8%	38
FIGURE 31 GNT La Fare - Teneur en eau– 2,88%	38
FIGURE 32 Latérite - Teneur en eau de référence – 11,68%	39
FIGURE 33 Latérite - Teneur en eau– 7,7%.....	39
FIGURE 34 Latérite - Teneur en eau– 12,1%.....	39
FIGURE 35 Sable de Missillac - Teneur en eau de référence – 8,8%.....	40
FIGURE 36 Sable de Missillac - Teneur en eau de 10,93%	40
FIGURE 37 Sable de Missillac - Teneur en eau de 11,4%	40
FIGURE 38 Sable de l’Ennerie - Teneur en eau de référence – 7,8%	41
FIGURE 39 Sable de l’Ennerie - Teneur en eau – 9,3%	41
FIGURE 40 Sable de l’Ennerie - Teneur en eau – 11,2%.....	41
TABLEAU 1 - Qualité du drainage selon le guide AASHTO (1993).....	13
TABLEAU 2 - Valeurs de drainage mi selon le guide AASHTO (1993)	13
TABLEAU 3 - Synthèse des matériaux retenus (teneur en eau x Ec)	22
TABLEAU 4 - Tableau de synthèse durée de vie - GNT Maraîchère	25
TABLEAU 5 - Synthèse durée de vie - GNT Saint Agnant.....	26
TABLEAU 6 - Synthèse durée de vie - GNT La Fare	27
TABLEAU 7 - Synthèse durée de vie - Latérite.....	29
TABLEAU 8 - Synthèse durée de vie - Sable de Missillac	30
TABLEAU 9 - Synthèse durée de vie - Sable de l’Ennerie.....	31

1 Résumé

Résumé en français

Le présent rapport a été élaboré dans le cadre du Projet National DVDC. Il contribue aux travaux réalisés dans le sous thème PR1-2 Sols supports et chaussées souples du thème 1 du projet national sur les mécanismes de dégradation des chaussées.

Ce document présente les résultats de l'analyse de l'incidence du comportement de certains matériaux granulaires, vis-à-vis de leur taux d'humidité, sur la durée de vie de la chaussée. Les critères sont les suivants :

- ▶ Impact de la qualité des matériaux granulaires en couche de base et de fondation.
- ▶ Impact de la qualité de portance des plates-formes ;

La première partie du document décrit le fonctionnement des matériaux granulaires en présence d'eau et, par conséquent, l'évolution des leurs caractéristiques mécaniques.

La deuxième partie est consacrée à la description des matériaux granulaires sélectionnés en fonction des résultats des essais triaxiaux réalisés au laboratoire de l'Université Gustave Eiffel à Nantes (2 GNT, 1 latérite et sables).

Suite à la sélection des matériaux, en fonction du couple teneur en eau x module, ils sont intégrés à une structure souple, modélisée à l'aide du logiciel Alizé. La modélisation a pour but de définir l'impact de la teneur en eau sur la durée de vie de la structure de référence initialement égale à 20 ans.

Mots-clés : teneur en eau, chaussée à faible trafic, modélisation, sols, matériaux granulaires

Abstract

Keywords: moisture ratio, flexible pavement, modeling, subgrade, granular materials

2 Introduction

Ce rapport a comme objectif l'étude du comportement des matériaux granulaires non liés (GNT et sols) et leurs incidences sur le dimensionnement des chaussées à faible trafic.

Cette étude vise à mettre en évidence l'impact de l'état hydrique des matériaux faisant l'association entre une teneur en eau élevée et un mauvais drainage (matériaux longtemps en contact avec l'eau) et une faible teneur en eau liée à une éventuelle sécheresse. Cela doit permettre également d'évaluer l'étendue de ces variations dans le cas où les données seraient disponibles.

Le plan d'expérience proposé est donc le suivant :

- ▶ **Choisir une structure type pour les chaussées à faible trafic en prenant en compte les variations de module (défini à l'essai triaxial) en fonction de l'état hydrique des matériaux.** Le nombre de teneurs en eau est défini par les éléments fournis par les essais triaxiaux.
- ▶ **Calculer la durée de vie pour chaque groupe de matériaux** : deux types de GNT, un type de latérite et un ou deux sables (comme sol support);
- ▶ **Les matériaux retenus seront sélectionnés parmi ceux dont les résultats des essais triaxiaux sont disponibles à l'Université Gustave Eiffel** :
 - GNT étudiées dans le cadre de DVDC d'autres GNT dont les caractéristiques sont connues ;
 - Latérite (étudiée dans le cadre de la rédaction du Catalogue du Sénégal)
 - Sol support du Manège de Fatigue (Sable de Missillac et Sable de l'Ennerie)

Ce choix a été fait en concertation avec l'Université Gustave Eiffel, dans le but d'avoir des échantillons avec une caractérisation complète sans multiplier inutilement le nombre de matériaux.

Suite à l'analyse de la durée de vie de chaque groupe de structures, il sera possible d'avoir la tendance du comportement des matériaux en fonction de la sensibilité aux variations de teneur en eau.

2.1 Composition du document

Le présent document est structuré de la manière suivante :

- ▶ La première partie de ce rapport présente un rappel bibliographique du fonctionnement des matériaux granulaires en présence d'eau.
- ▶ La deuxième partie présente :
 - L'analyse des résultats des essais triaxiaux des matériaux, mis à notre disposition, pour ensuite sélectionner les matériaux à modéliser,
 - La description des hypothèses de dimensionnement de la structure de référence,
 - La présentation du plan d'expérimentation.
- ▶ La troisième partie correspond à la présentation des résultats de la modélisation et des conclusions issues de l'analyse.

3 Comportement mécanique des matériaux non liés et sols supports

3.1 Définition des graves non traitées et des sols et rôle dans les structures souples

Les “sols” sont des matériaux naturels (classes A, B, C et D selon le **GTR**), constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l’action d’un courant d’eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables : des argiles aux blocs. Les sols sont de nature et d’origine géologique diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, sols résiduels. Les sols résiduels sont formés sur place par un processus d’altération physicochimique des roches (exemple : arènes granitiques, latérites...). Les sols sont caractérisés par leur granularité, leur argilosité et leurs caractéristiques mécaniques telles que la résistance aux chocs (Los Angeles) et la résistance à l’usure (Micro Deval).

Les **graves non-traitées** sont des matériaux granulaires élaborés, très souvent, par un mélange de roches naturelles et d’eau sans ajout de liants. Elles peuvent être de Type A ou de Type B. Le type A est obtenu en une seule fraction sans avoir besoin d’eau et le type B est constitué du mélange d’au moins deux fractions granulométriques distinctes, dans des proportions bien définies et qui sont malaxées et humidifiées en centrale. Les graves Type A et Type B1 présentent une compacité à l’optimum de 80% et la Type B2 présente une compacité optimale de 82%.

La norme NF EN 13285 désigne six types de GNT en fonction de la granulométrie (de 0/14mm à 0/31,5mm), de la teneur en fines, des dimensions maximales et des caractéristiques intrinsèques.

L’expérimentation qui sera décrite dans les prochains chapitres se concentre sur le rôle des matériaux non liés, GNT et sols, sur les performances des chaussées souples. La figure ci-dessous (extrait du Guide de Chaussées à Faible Trafic) illustre une structure typique d’une Chaussée souple :

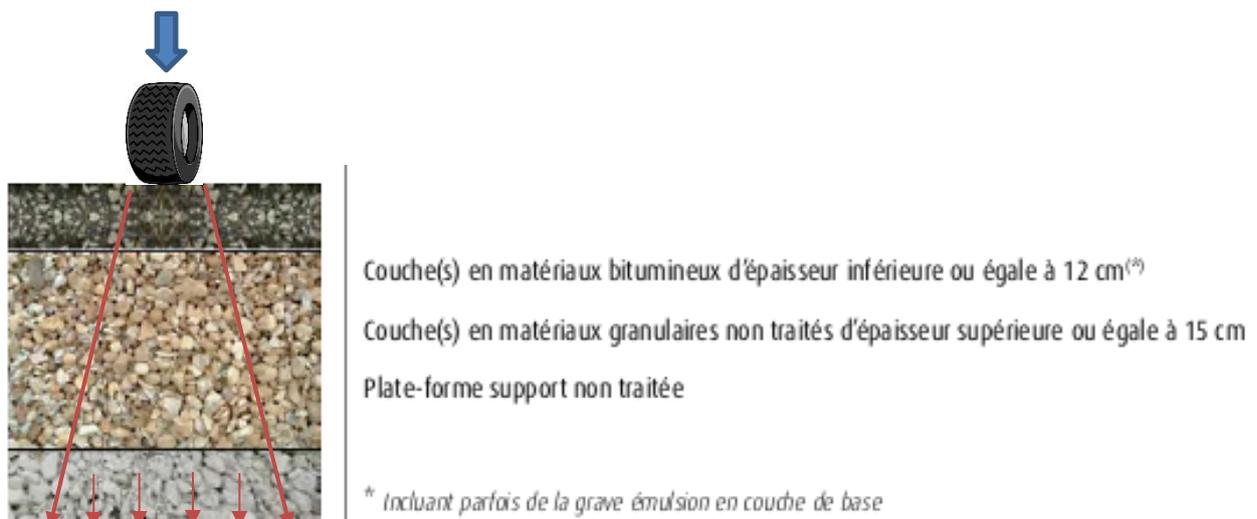


FIGURE 1 - Structure typique d'une structure de chaussée souple (extrait Manuel de Dimensionnement de chaussées à faible trafic - IDRRIM/CEREMA 2020)

Compte tenu de la faible rigidité des matériaux non liés constituant la couche d'assise, les charges sont peu dissipées tout au long de l'épaisseur de la chaussée dont le composant dimensionnant est la déformation verticale au sommet de la plateforme (Notée : ϵ_z).

3.2 Interactions de type cohésif au sein des milieux granulaires humides

Le comportement mécanique des matériaux non-traités et des sols est très dépendant de leur origine minéralogique et des dimensions des particules. Ces dernières ont une influence non négligeable lors du contact avec l'eau, notamment en ce qui concerne la cohésion entre les particules.

Avant de se consacrer à la détermination du module des GNT et des sols, il est important de comprendre le mécanisme de cohésion de ces matériaux en présence d'eau.

L'eau est un paramètre très important dans le processus de compactage des matériaux non liés. Le compactage consiste à améliorer les caractéristiques mécaniques de ces matériaux en les densifiant par l'application d'une énergie mécanique. Depuis les études menées par Proctor dans les années 30, il est connu que le compactage dépend de trois paramètres principaux : la teneur en eau, l'énergie de compactage et de la nature du matériau.

La figure ci-après représente une courbe typique de l'essai Proctor :

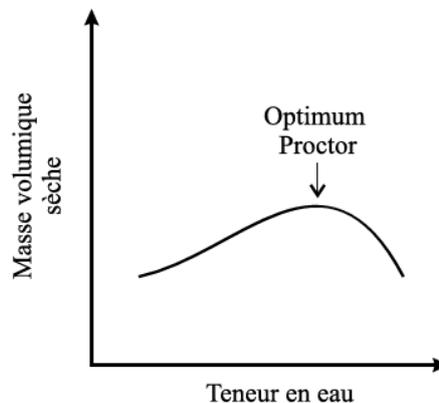


FIG. 1.2 – Allure typique d'une courbe de compactage. L'optimum Proctor correspond à la teneur en eau qui permet d'obtenir la masse volumique sèche maximale, pour un sol donné, un mode de compactage et une énergie de compactage donnés.

FIGURE 2 Allure typique des résultats de l'Essai Proctor [HABIBALLAH, 2005]

La courbe de compactage met en évidence l'importance de la teneur en eau sur l'efficacité du compactage et par conséquent sur la portance finale obtenue.

Les variations de teneur en eau peuvent provoquer des phénomènes de retrait ou de gonflement et fragiliser les matériaux. Ce qui engendre souvent des dommages dans la structure de chaussée liés aux tassements et aux affaissements qui s'en suivent. Les phénomènes de gel/dégel ont également des effets sur la teneur en eau des matériaux.

À retenir également que l'action de l'eau est aussi dépendante de la porosité et de l'interaction des grains. D'où l'importance de définir la teneur optimale pour laquelle l'eau aide à la cohésion des particules, jouant un rôle de ciment sans pour autant les saturer. Cet état est illustré par la figure 1.3 (c) présentée ci-après :

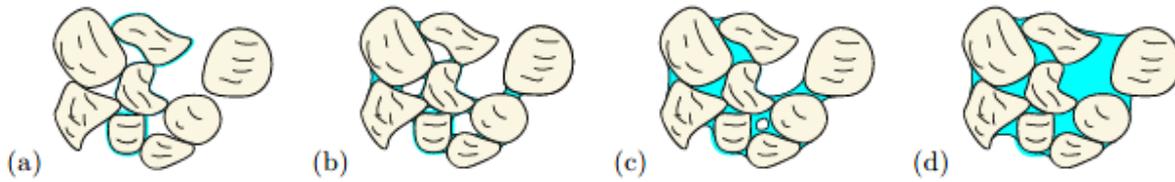


FIG. 1.3 – Représentation schématique des différents états de l'eau dans un sol : (a) régime hygroscopique, (b) régime pendulaire, (c) régime funiculaire, (d) saturation.

FIGURE 3 Différents états de l'eau dans le sol [HABIBALLAH, 2005]

Les types de cohésion possibles dans les milieux granulaires sont multiples. Ils peuvent être de nature physique, électrique ou chimique, comme l'illustre la figure suivante :

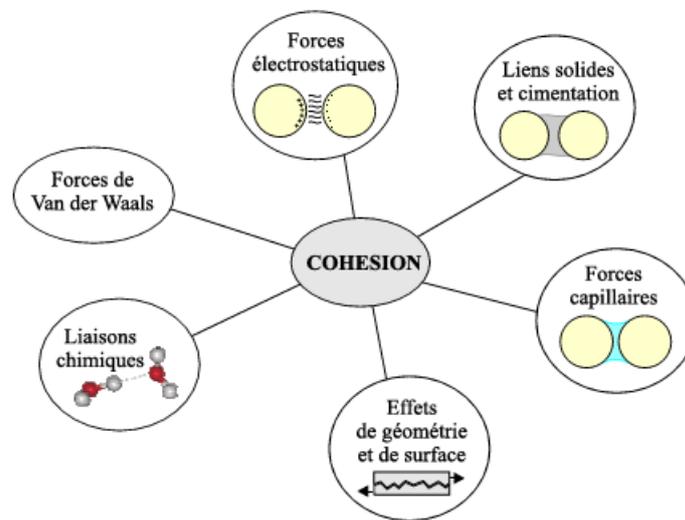


FIG. 1.8 – Illustration synthétique des mécanismes de cohésion au sein des milieux granulaires humides.

FIGURE 4 Schéma des types de cohésion de milieux granulaires humides [HABIBALLAH, 2005]

Un exemple de cimentation chimique est le cas des latérites, dont la cohésion est due à la présence de l'oxyde de fer qui avec l'eau forme un liant entre les particules. Dans les GNT, il y a effectivement une combinaison entre la formation d'un liant entre l'eau et les particules fines ainsi que des effets de géométrie et de surface.

3.3 Détermination du module réversible par l'essai triaxial

Les caractéristiques mécaniques des matériaux non liés et des sols sont déterminées par l'intermédiaire du module réversible. L'essai couramment utilisé pour la détermination du module est l'essai triaxial dont le schéma est présenté ci-après :

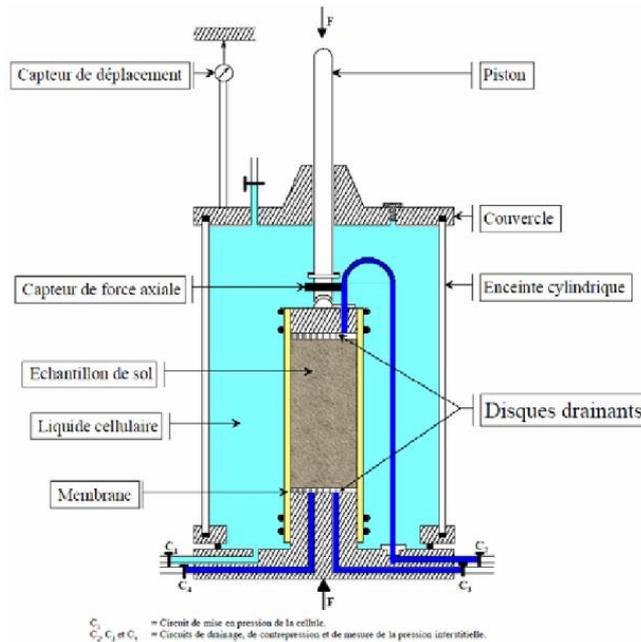


FIGURE 5 - Schéma d'un appareil triaxial

La procédure de l'essai pour les GNT et les sols est définie dans la norme NF P 13396-7 (2004).

Le principe de l'essai triaxial cyclique consiste à soumettre une éprouvette de matériau granulaire non traité à des chargements cycliques, simulant les contraintes existant dans une couche d'assise de chaussée, et à mesurer les déformations axiales et radiales de l'éprouvette produites par ces chargements. L'essai est réalisé sur des matériaux compactés, non saturés à une densité et une teneur en eau proches de l'optimum Proctor.

Deux méthodes de chargements sont possibles :

- ▶ Méthode A (pression de confinement variable) : contrainte axiale et pression de confinement cycliques, variant en phases ;
- ▶ Méthode B (méthode simplifiée) : contrainte axiale cyclique et pression de confinement constante

La norme NF EN 13286-7 décrit trois méthodes d'essai différentes :

- ▶ Essais triaxiaux monotones, pour la détermination de la droite de rupture des matériaux ;
- ▶ **Essais pour l'étude du comportement réversible** (dynamique) :
 - Phase de conditionnement : 20000 cycles de chargement, suivie par des chargements courts (100 cycles) suivant différents chemins de contraintes q/p (taux de cisaillement)
- ▶ Étude des déformations permanentes (procédure par paliers) : chaque éprouvette est soumise à plusieurs chargements successifs, à un grand nombre de cycles, avec de niveaux de contraintes croissants (à q/p constant).

Le type d'essai utilisé pour la détermination des performances mécaniques des matériaux est celui qui permet l'étude de leur **comportement réversible** :

- ▶ Le conditionnement initial peut être assimilé aux sollicitations que subit le matériau lors de la mise en œuvre et du trafic de chantier et sert à stabiliser les déformations permanentes du matériau et obtenir un comportement réversible.

- ▶ Le module caractéristique déterminé correspond au module sécant (E_c) pour des contraintes $p = 250\text{kPa}$ et $q=500\text{kPa}$
- ▶ La résistance aux déformations permanentes est déterminée par le paramètre A_{1c} , de la loi d'évolution des déformations permanentes, [Hornych *et al*, 1998] déterminé pour w (teneur en eau) = $W_{opm}-2\%$ et $\rho_d = 0.97 \times \rho_{dOPM}$:

$$\varepsilon_1^p(N) = A_1 \left[1 - \left(\frac{N}{100} \right)^B \right] \quad (1)$$

avec :

$$\varepsilon_1^p(N) = \varepsilon_1^p(N) - \varepsilon_1^p(100) \quad (2)$$

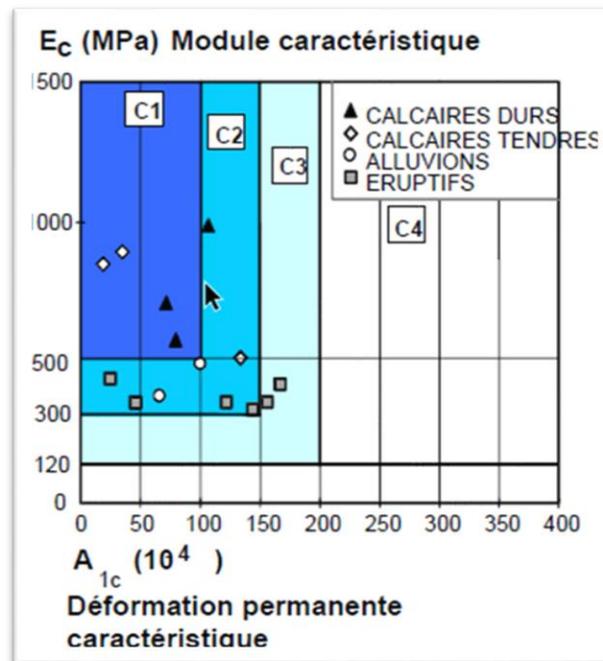


FIGURE 6 - Graphique Déformation permanente caractéristique pour quatre natures pétrographiques de granulats [Hornych *et al*, 1998]

Le comportement réversible représente le comportement au cours d'un cycle de chargement donné. **Les résultats obtenus avec cette procédure** peuvent être utilisés pour déterminer les valeurs de module d'élasticité des matériaux pour différents niveaux de contraintes, ou pour caler des paramètres de modèles élastiques non linéaires. Les modules caractéristiques déterminés sont ceux **utilisés dans les méthodes de calculs de dimensionnement des chaussées**.

3.3.1 Influence des paramètres d'état

Les paramètres d'état sont primordiaux dans l'appréciation des caractéristiques des matériaux granulaires, dont dépendent leurs performances dans les structures de chaussée et pour évaluer les valeurs à prendre en compte dans les calculs de dimensionnement. C'est pour cela que la teneur en eau conjuguée avec la nature minéralogique des granulats joue un rôle essentiel dans la conception des structures de chaussée.

Balay et al (1998) ont présenté l'incidence de la teneur en eau sur le comportement résilient de trois GNT avec des caractéristiques minéralogiques et des duretés différentes. Suite à cette

expérimentation, il a été mis en évidence, par exemple, que des GNT issues de deux types de roches calcaires (l'une dure et l'autre tendre) présentaient des sensibilités à l'eau très différentes. Une GNT issue d'un microgranite a été également évalué. **En conclusion, les auteurs ont constaté que le module résilient diminue avec le degré de saturation et que cette diminution est accentuée quand la teneur en eau s'approche de l'optimum Proctor :**

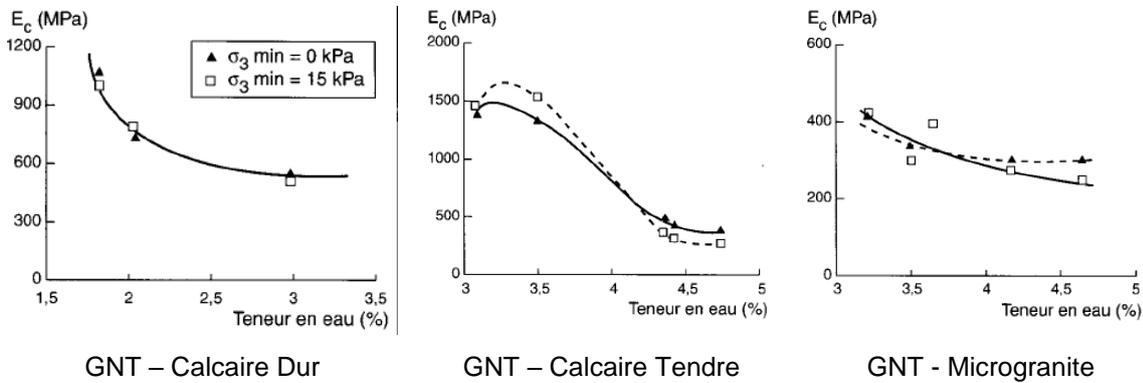


FIGURE 7 Influence de la teneur en eau sur le module réversible de trois GNT de nature différente, d'après HORNYCH *et al* (1998)

Comme présenté précédemment concernant les interactions cohésives, une augmentation de la saturation implique un accroissement de l'effet lubrifiant de l'eau. Il en découle une augmentation de la déformation et en conséquence cela entraîne une diminution du module résilient. Selon Dawson *et al* (1996), la succion (pression interstitielle négative) de l'eau modifie l'interaction entre les grains. Elle renforce la cohésion entre les grains, et cette cohésion diminue avec l'augmentation de la teneur en eau. Cela peut se traduire par un « seuil » à partir duquel le module résilient diminue avec la teneur en eau.

Il est également important de connaître l'effet du degré de saturation sur le comportement à long terme, notamment pour prévoir l'effet de cette saturation sur les performances globales de la chaussée. **Il est même plus judicieux de parler de variations de teneur en eau que de saturation uniquement.**

Une autre étude approfondie a également été menée par Gidel (2001) dans laquelle une chaussée a été instrumentée avec des capteurs, sous un trafic réel, de façon à faire un suivi des déformations lors de la circulation, associé à un suivi de la teneur en eau, pendant une période de 6 mois. Sur le graphique présenté ci-après, on observe que, pendant la période de forte pluviométrie, la déformation permanente a fortement augmenté et inversement, le module d'élasticité a décré :

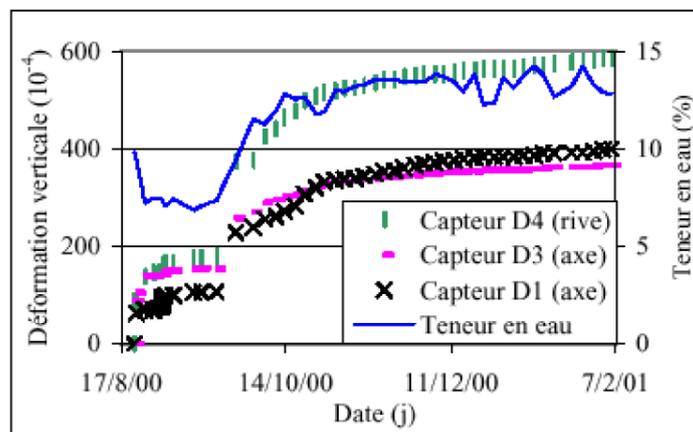


FIGURE 8 - Influence de la teneur d'eau sur le comportement d'une chaussée instrumentée (Gidel, 2001)

Une autre approche, plus directe, de l'incidence de la teneur en eau sur le comportement des matériaux granulaires est proposée par la méthode AASHTO. Cette méthode inclut dans le dimensionnement des chaussées un coefficient de drainage (m_i) pour déterminer l'épaisseur nécessaire pour la couche de base et pour la couche de fondation en matériaux non liés, dont la portance peut être modifiée par l'infiltration des eaux de ruissellement ou des eaux provenant de la nappe phréatique. Ce coefficient a pour fonction de corriger les coefficients structuraux en vue de tenir compte de la capacité des couches à drainer l'eau. Le coefficient de drainage varie donc suivant la perméabilité du matériau, la porosité effective, les pentes et les distances à drainer ainsi que les épaisseurs des couches. Son choix est basé sur le temps nécessaire pour drainer 50% de l'eau libre dans la fondation et la sous-fondation.

La méthode AASHTO combine l'utilisation des deux tableaux suivants pour déterminer la valeur m_i . La qualité du drainage est à déterminer selon l'importance de la route à dimensionner et la zone climatique du projet.

TABLEAU 1 - Qualité du drainage selon le guide AASHTO (1993)

Qualité du drainage	Temps nécessaire pour drainer l'eau
Excellente	2 heures
Bonne	1 jour
Moyenne	1 semaine
Mauvaise	1 mois
Très mauvaise	Plus que 1 mois

Le tableau suivant propose les valeurs de drainage m_i pour les chaussées souples selon le pourcentage de temps pendant lequel la structure de la chaussée serait normalement exposée à des niveaux d'humidité approchant la saturation, conformément au tableau 2.4 du guide AASHTO.

TABLEAU 2 - Valeurs de drainage m_i selon le guide AASHTO (1993)

Qualité du drainage	Pourcentage du temps pendant lequel la chaussée est exposée à un niveau hydrique proche de la saturation			
	< 1%	1-5%	5-25%	> 25%
Excellente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bonne	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Moyenne	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Mauvaise	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Très mauvaise	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.60

Par exemple, la valeur de $m_i = 1$ ne signifie pas la même chose dans un environnement plutôt sec (moins de 18 jours de saturation) que dans une région où cette situation est plus courante (plus de 91 jours de saturation). Dans le premier cas, cette valeur correspond à un mauvais niveau de drainage (eau retirée dans un mois) et dans le second cas, à un bon niveau de drainage, où l'eau est éliminée en une journée.

La Méthode Française de Dimensionnement des Chaussées, en comparaison à la méthode AASHTO, ne prend pas directement en compte la teneur en eau/ le drainage. La conception du drainage dans la Méthode Française consiste à éviter d'avoir de l'eau qui pourrait arriver dans les couches au-dessus de la plateforme par les surlargeurs des couches de chaussées, les drains. L'effet de la variation de la teneur en eau est pris en compte dans la PST avec la notion de portance à long terme. Il est considéré que les dispositifs de drainage sont capables d'évacuer l'eau vers l'extérieur de la chaussée et que les matériaux ne seront pas complètement saturés.

Toutefois, afin de prendre en compte le changement climatique et les éventuelles modifications dans la durée des saisons, le présent rapport propose la prise en compte de ces facteurs, de façon simplifiée, par l'intermédiaire de la modélisation d'une structure souple avec le couple teneur en eau x module des matériaux non liés.

4 Étapes du projet

Le plan de modélisation est basé sur la détermination de la durée de vie d'une chaussée souple en prenant en compte les modules des matériaux en fonction des résultats fournis par le laboratoire de l'Université Gustave Eiffel.

Les étapes du projet sont les suivantes :

- ▶ **Étape 1** : Choix des matériaux : sélectionner parmi ceux dont les résultats des essais triaxiaux sont disponibles à l'Université Gustave Eiffel :
 - **Le recueil des données** a été fait (2 envois pour compléter les données manquantes ; le deuxième envoi de la part de l'UGE a eu lieu le 24/10/22) :
 - 4 types de GNT (afin d'avoir un nombre de calculs cohérents et représentatifs, seules deux GNT seront choisies)
 - Gneiss
 - Calcaire
 - Latérite (étudiée dans le cadre de la rédaction du Catalogue du Sénégal) :
 - Sol support du Manège de Fatigue (Sable de Missillac et Sable de l'Ennerie)
- ▶ **Étape 2** : Choix des critères de sélection des deux GNT et du sol support (2.3 Critère : étendue de la teneur en eau x Ec)
 - **Étape 2.1** : Appliquer le critère de l'étape 3 pour les matériaux disponibles
 - **Étape 2.2** : Production de graphiques pour illustrer le comportement des matériaux
 - **Étape 2.3** : Définition des teneurs et modules à retenir
- ▶ **Étape 3** : Plan de modélisation
 - **Étape 3.1** : Définition de la structure souple à faible trafic
 - Caractère non autoroutier
 - $PF2 / CAM = 0,5 / TCumulé\ 20\ ans = 0,43 \times 10^6\ PL$
 - **Étape 3.2** : Définition de durée de vie de chaque structure
 - Durée de vie de référence : 20 ans
 - Prise en compte des périodes de saturation et de sécheresse sur une période de 10 ans
- ▶ **Étape 4** : Analyse de résultats
 - **Approche** : Définir la perte de durée de vie par rapport à la durée de référence de 20 ans

4.1 Choix des Matériaux

La première étape a consisté à évaluer les éléments envoyés par l'UGE de façon à les représenter par un graphique teneur en eau x E_c .

Ensuite, il a fallu identifier le nombre de valeurs compatibles avec le plan de modélisation :

- ▶ Cas de Référence : 20 ans module de référence (W_{OPN} ou proche pour les sols, W_{OPM} pour les GNT)
- ▶ Cas avec variations de teneur en eau:
 - **Cas 1** (quand l'étendue de données le permet) : cas extrême pour déterminer l'amplitude de l'impact de la teneur en eau mini-maxi
 - Cas 1a : 20 ans avec module correspondant à une teneur immédiatement supérieure à W_{OPN} ou W_{OPM}
 - Cas 1b : 20 ans avec module correspondant à une teneur immédiatement inférieure à W_{OPN} ou W_{OPM}
 - **Cas 2** : simulation de 6 mois de saison pluvieuse et 6 mois de saison de sécheresse
 - Cas 2a : 10 ans avec module de référence et 10 ans avec module correspondant à la teneur immédiatement supérieure à W_{OPN} ou W_{OPM}
 - Cas 2b : 10 ans avec module de référence et 10 ans avec module correspondant à la teneur immédiatement inférieure à W_{OPN} ou W_{OPM}

Dans l'idéal, il serait donc nécessaire d'avoir au moins 5 couples E_c x Teneur en eau :

- ▶ **Module de référence** : E_c avec la teneur W_{OPM} (ou la plus proche)
- ▶ Module **E_c avec la teneur en eau immédiatement inférieure ou supérieure à W_{OPM}**
- ▶ Module **E_c avec la teneur en eau des extrêmes (limite inférieure et/ou supérieure à W_{OPM})**

Les graphiques ci-après présentent les couples et les courbes granulométriques disponibles de chaque matériau analysé :

- ▶ Sols et sables :

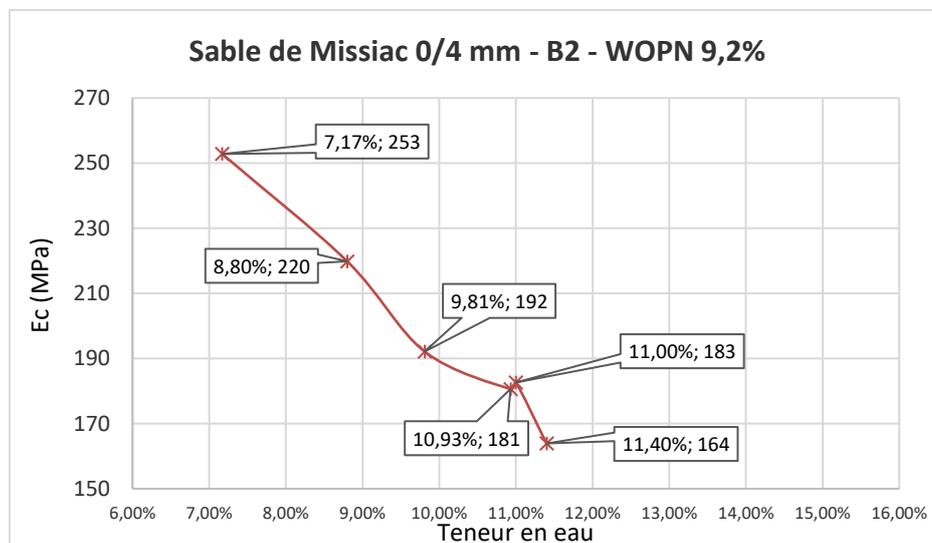


FIGURE 9 - Sable de Missillac - Graphique E_c x teneur en eau

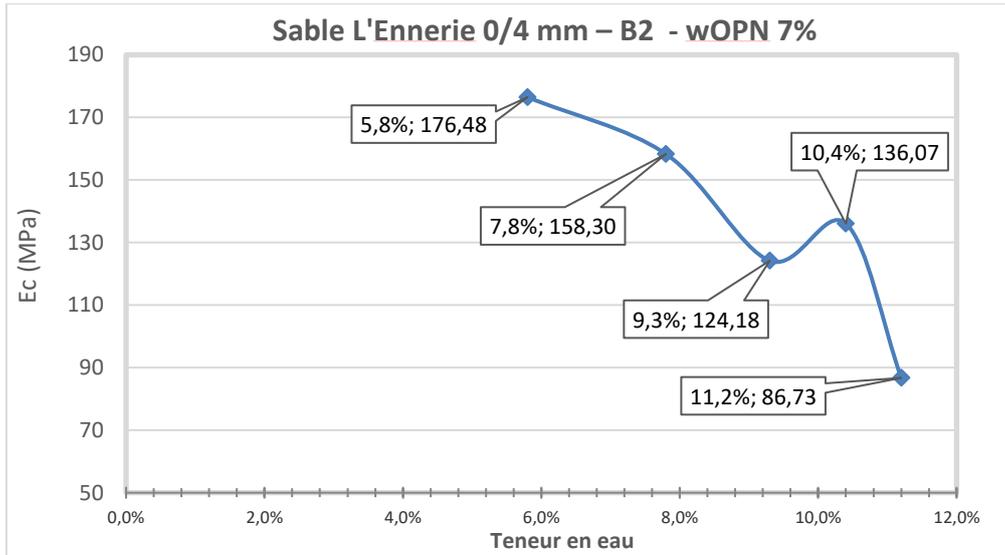


FIGURE 10 – Sable de l'Ennerie Graphique Ec x teneur en eau

► GNT :

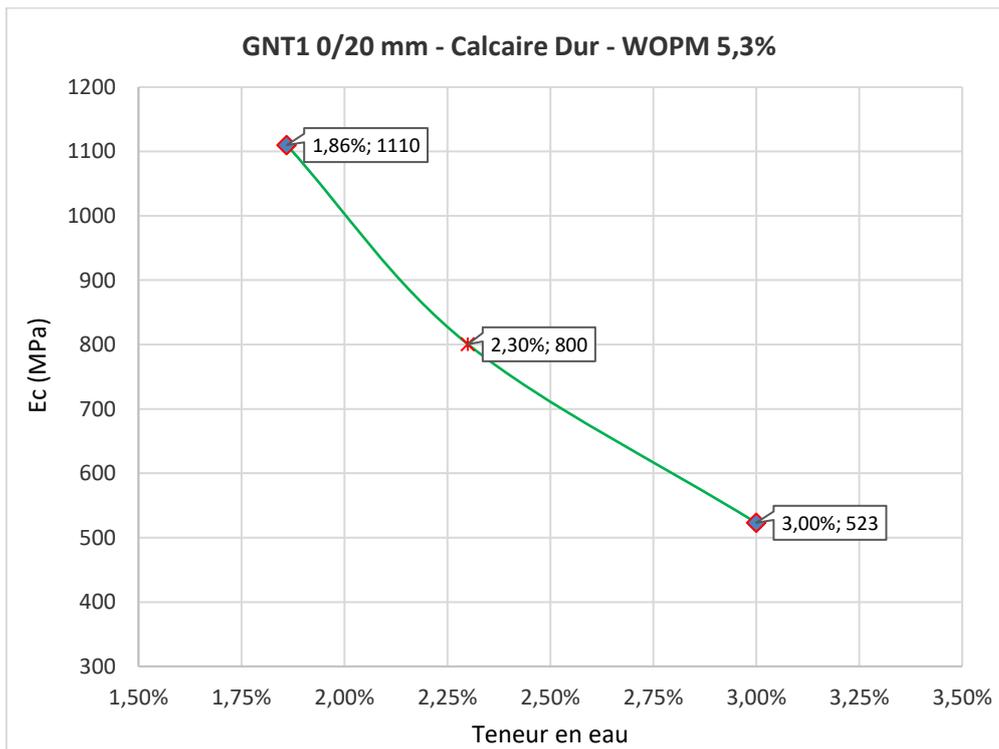


FIGURE 11 GNT1 0/20 - Calcaire Dur W_{OPM} 5,30% Graphique Ec x teneur en eau

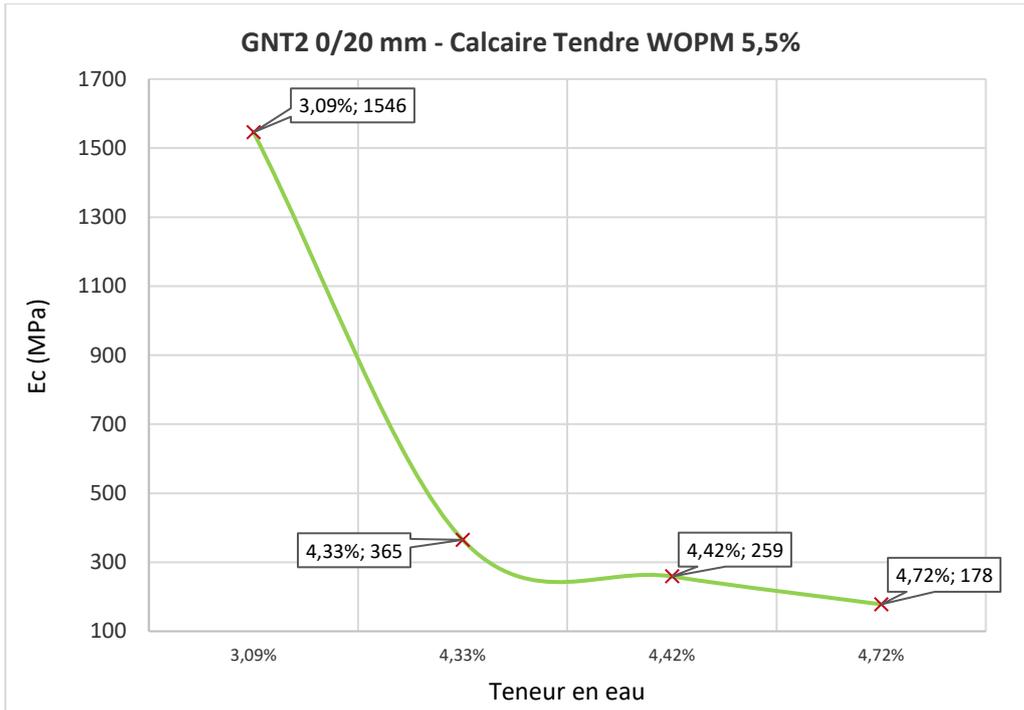


FIGURE 12 GNT 0/20mm calcaire tendre W_{OPM} 5,5% - Graphique Ec x teneur en eau

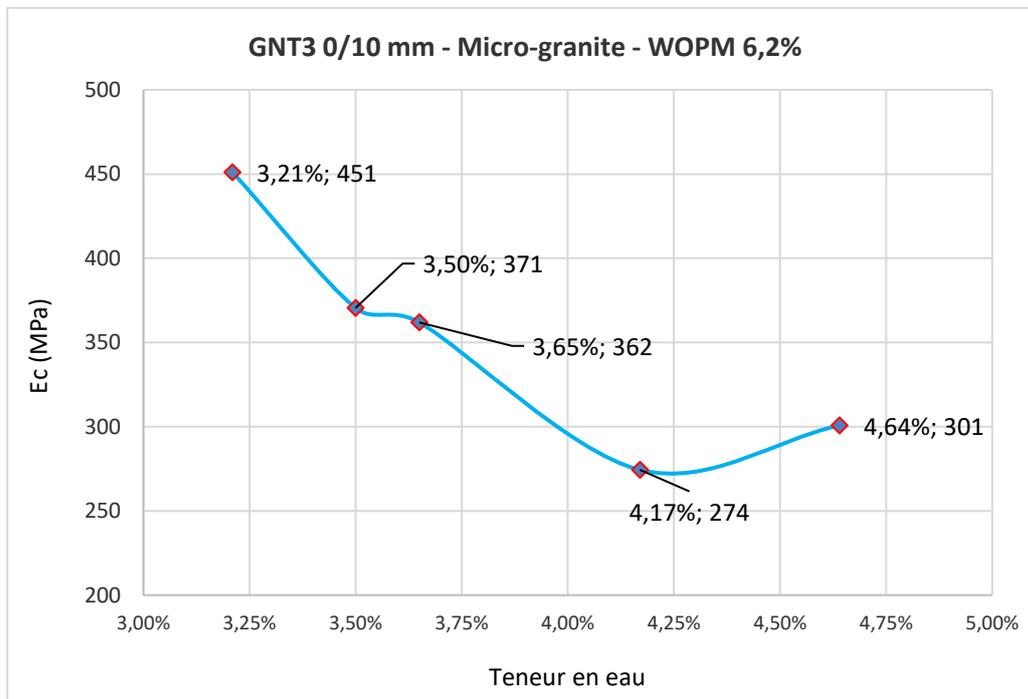


FIGURE 13 GNT3 0/10 Microgranite W_{OPM} 6,2% - Graphique Ec x teneur en eau

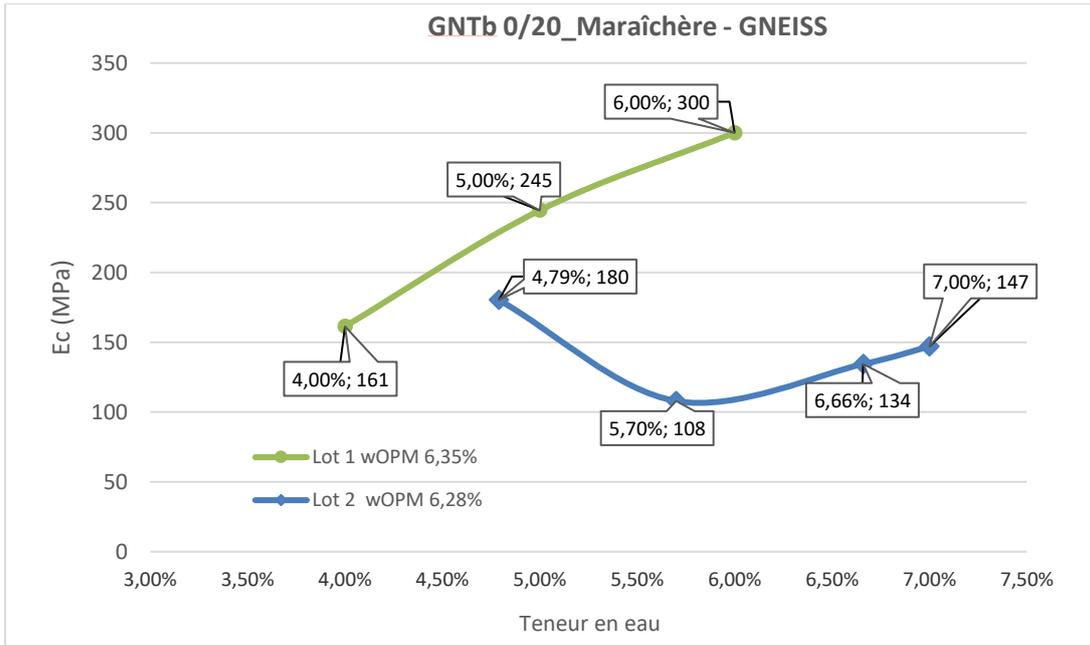


FIGURE 14 GNTb 0/20 Maraichère Gneiss –(Lot 1 et Lot 2) Graphique Ec x teneur en eau

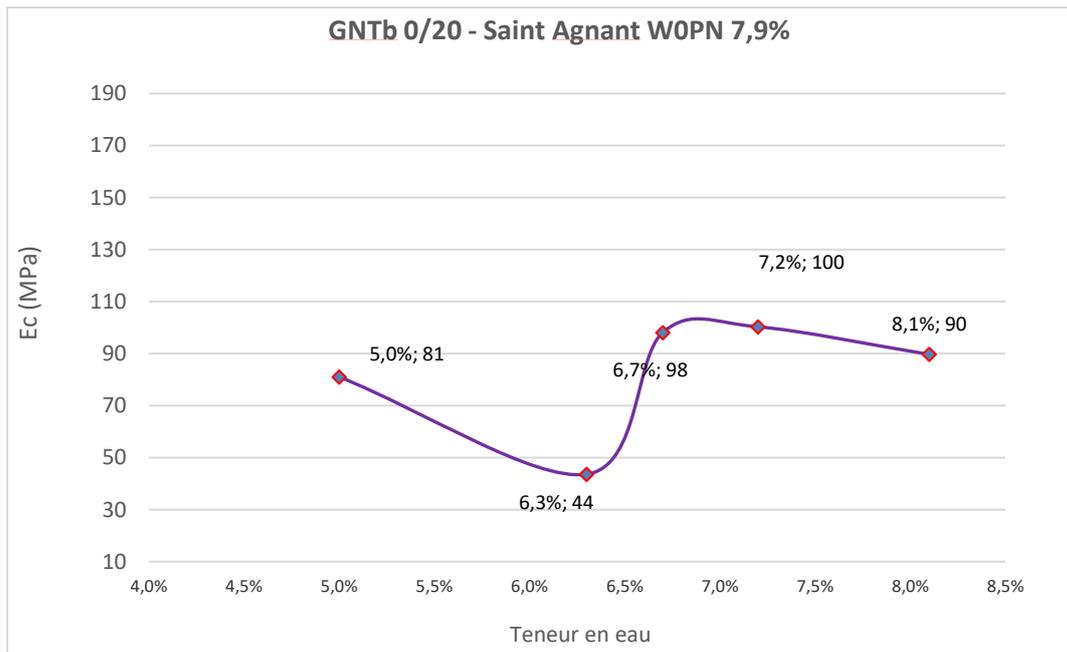


FIGURE 15 GNTb 0/20 Saint Agnant - Graphique Ec x teneur en eau

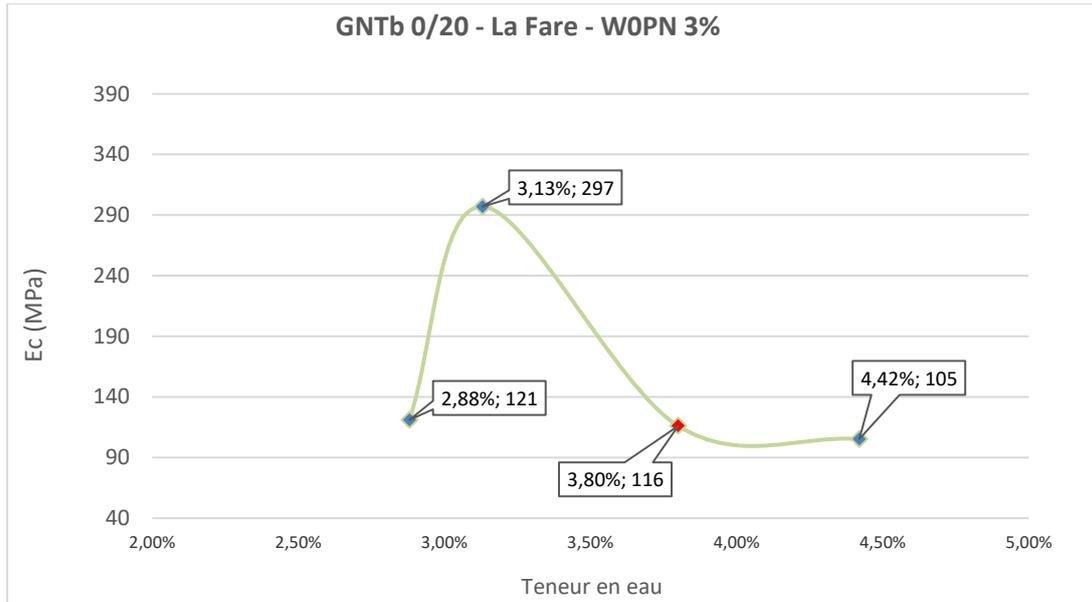


FIGURE 16 GNTb 0/20 La Fare W_{OPM} 3.0% - Graphique Ec x teneur en eau

La GNT b Brefauchet n’a pas pu être retenue à cause du faible nombre d’essais par formule :

Essai	Formule	Teneur en eau réelle	Densité	K _a (MPa)	G _a (MPa)	n	γ	Ec (250/500) (MPa)
Reversible (3.6%) wOPM-2%	30% sable +70% Graviillon	3,50%	2,002	41,2	89,4	0,468	0,696	231
Reversible (4.5%) wOPM-2%	70% sable +30% Graviillon	-	2,082	21,2	53,5	0,307	0,772	154
Reversible (4.5%) wOPM-2%	45% sable +55% Graviillon	4,40%	2,097	16,3	31,5	0,335	0,444	75
Reversible (4.5%) wOPM-2%	45% sable +55% Graviillon	-	2,097	13,5	34,4	0,279	0,418	72
Reversible (4.5%) wOPM-2%	65% sable + 35% Graviillon	4,30%	2,107	22,0	58,8	0,289	0,790	169
Reversible (6%) wOPM-0.5%	70% sable + 30% Graviillon	6,10%	2,084	10,5	27,6	0,240	0,537	66

Deux lots de la latérite testé ont été sélectionnés, lot 1 et lot 3. Les deux lots sont classés, conformément au GTR, comme des sols sableux ou graveleux avec fines appartenant à la sous-classe B5 selon la nature (sables et graves très silteux)

La courbe granulométrique des deux lots, illustrée dans le graphique de la Figure 17, met en évidence la présence des plus gros éléments pour le Lot 3 jusqu’au tamis 0,5 mm, avec un pourcentage de tamisât moins important que celui du Lot 1. À partir de ce tamis la tendance s’inverse et la présence de fines (tamisât au tamis 0,008 mm) est plus importante la latérite pour ce lot par rapport au Lot 1.

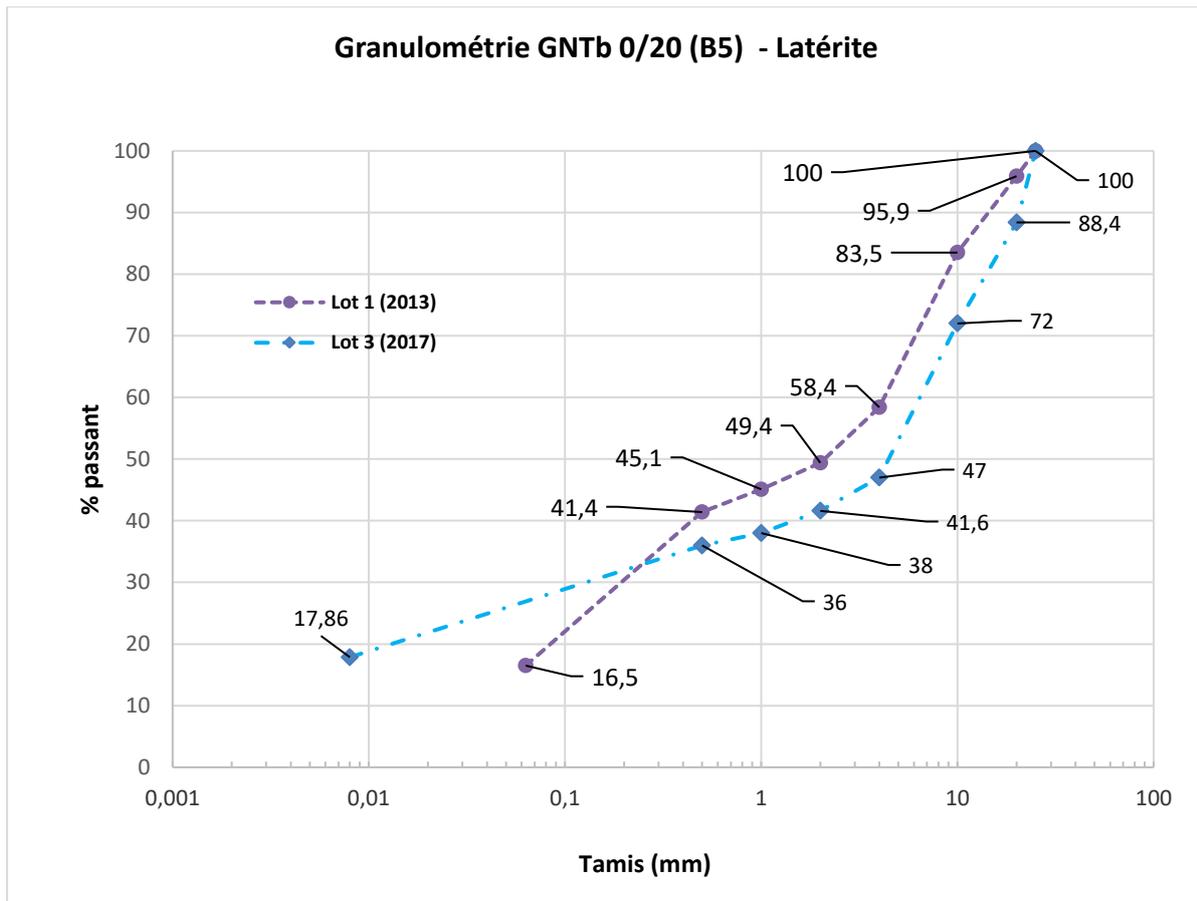


FIGURE 17 – Graphique Granulométrie - Latérite Lot1 et Lot3

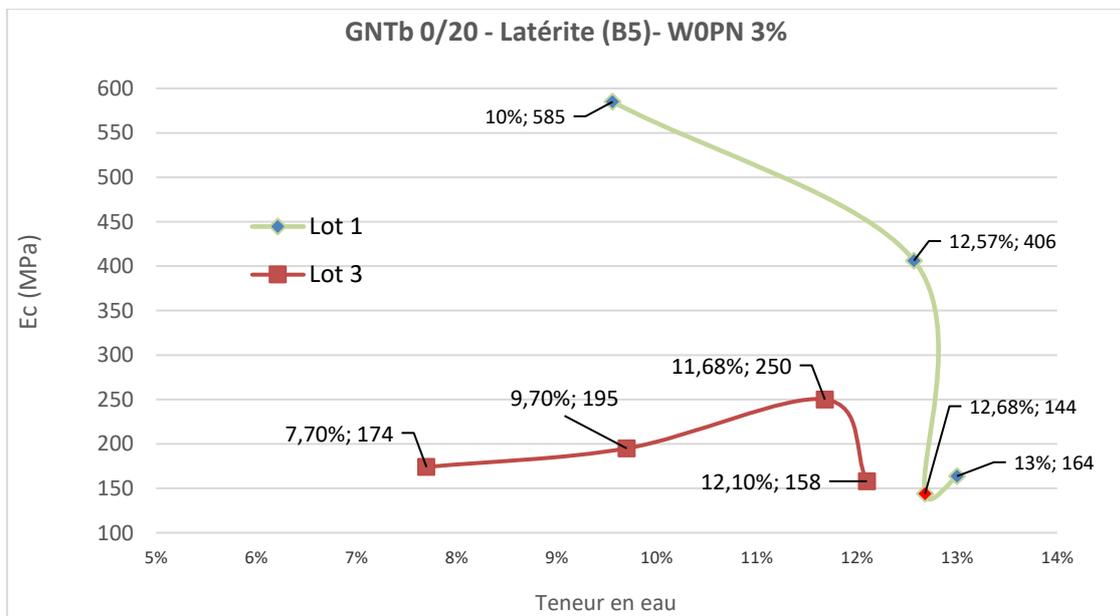


FIGURE 18 - GNTb 0/20 Latérite Lot 1 ($W_{opm} = 11.50\%$) et Lot 3 ($W_{opm} = 9.66\%$) - Graphique Ec x teneur en eau

Suite à l'analyse des résultats des essais triaxiaux réalisés sur les matériaux, les couples Ec x teneur en eau sont présentés dans le graphique ci-après. Pour certains matériaux les résultats n'ont pas pu être exploités. Cela est dû soit par un nombre insuffisant de résultats,

soit par le manque de couples (Ec x teneur en eau) pour la teneur optimale ou pour les teneurs autour de celle-ci.

Basées sur les critères définis précédemment concernant le nombre et cohérence des résultats (valeurs avant et après la teneur optimale ou plus proche), les matériaux retenus et les couples teneur en eau sont présentés dans le tableau ci-après.

TABLEAU 3 - Synthèse des matériaux retenus (teneur en eau x Ec)

Carrière	Nature	W _{OPM}	Teneur en eau	Ec (250/500) (MPa)	Ec réf	Ec retenus	Écart Module par rapport à la référence choisie (MPa)	Ecart Teneur en l'eau par rapport à la référence choisie (%)
<i>Non pris en compte dû à l'absence de données autour de la Wop (soit que inférieures soit que supérieures)</i>	GNT2 0/20 mm Calcaire Tendre	5,50% <i>Seulement des valeurs inférieures à Wopm</i>	3,09%	1546				
			4,33%	365				
			4,42%	259				
			4,72%	178				
	GNT1 0/20 mm Calcaire Dur	5,30% <i>Les valeurs sont trop éloignées de Wopm</i>	1,86%	1110				
			2,30%	800				
			3,00%	523				
	GNT3 0/10 mm Micro-Granite	6,20% <i>Les valeurs sont trop éloignées de Wopm</i>	3,21%	451				
			3,50%	371				
			3,65%	362				
			4,17%	274				
	Maraichère Gneiss	GNT b 0/20 mm Lot 1 <i>Non prise en compte pour l'analyse</i>	6,35% <i>Seulement des valeurs inférieures à Wopm</i>	4,00%	161			
5,00%				245				
6,00%				300				
GNT b 0/20 mm Lot 3 <i>*Valeur aberrante supprimé de l'analyse</i>		6,28%	*4,79%	180				
			5,70%	108		108	-26	-0.96
			6,66%	134	134	108	-26	-0.96
			7,00%	147		147	+13	+0.34

Site internet : www.dvdc.frPlateforme collaborative : www.omnispac.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

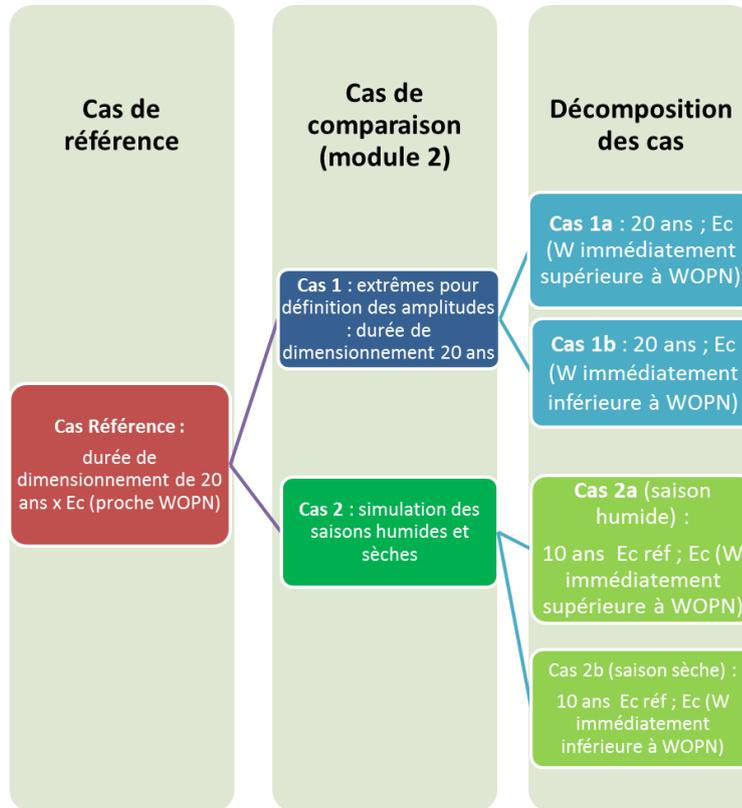
Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Carrière	Nature	W _{OPM}	Teneur en eau	Ec (250/500) (MPa)	Ec réf (+ proche possible de W _{OPM})	Ec retenus	Écart Module par rapport à la référence choisie (MPa)	Ecart Teneur en l'eau par rapport à la référence choisie (%)
Saint Agnant Calcaire	GNT b 0/20 mm	7,90%	5,00%	81				
			6,30%	44		44	-56	-0.9
			6,70%	98				
			7,20%	100	100			
La Fare Calcaire	GNT b 0/20 mm	3,00%	8,10%	90		90	-10	+0.9
			2,88%	121		121	-176	-0.25
			3,13%	297	297			
			3,80%	116		116	-181	+0.67
Latérite (Sénégal)	GNT b 0/20 mm Lot 1	11,50% <i>Peu de cohérence entre les valeurs obtenues</i>	4,42%	105				
			9,56%	585				
			12,57%	406				
			12,68%	144				
	GNT b 0/20 mm Lot 3	9,66% <i>Même si la valeur la plus proche de l'optimal est 9.7%, le point d'inflexion se trouve à 11.68%</i>	7,70%	174		174	-79	-3.98
			9,70%	195	-			
			11,68%	250	250			
			12,10%	158		158	-92	+0.42
Sable de Missillac	B2	9,20%	7,17%	253				
			8,80%	220	220			
			9,81%	192				
			10,93%	181		181	-39	+2.13
			11,00%	183				
Sable de l'Ennerie	B2	7,00%	11,40%	164		164	-56	+2.6
			5,80%	176				
			7,80%	158	158			
			9,30%	124		124	-34	+1.5
			10,40%	136				
			11,20%	87		87	-71	+3.4

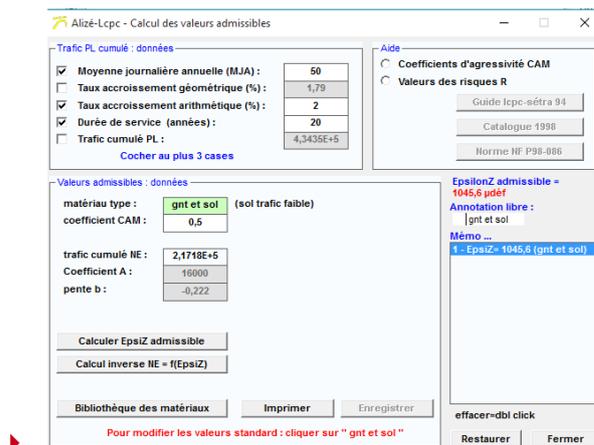
4.2 Modélisations

Le schéma ci-après présente le plan des modélisations :



La structure de référence est rappelée ci-après :

- ▶ Structure souple : BBSG C11 /GNT / PF2
- ▶ CAM = 0.5
- ▶ TC20ans = 0.46 x 10⁶ PL



Dans les calculs, les structures de chaussées et leurs paramètres resteront les mêmes. Le seul paramètre qui subira des modifications sera le module des matériaux.

4.2.1 Résultats des modélisations

Les tableaux ci-après présentent les résultats des modélisations et la durée de vie des structures avec les modules de référence et avec les modules modifiés par les variations de teneur en eau :

4.2.1.1 GNT Maraîchère

TABLEAU 4 - Tableau de synthèse durée de vie - GNT Maraîchère

Teneur en eau réf - 6,6% 134MPa - 20 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm} 20 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	N année calc	Écart Durée de vie 20 ans (années)
5	BBSG CI1						
22,5	GNT						
22,5	GNT						
	PF2	1045,6	2,17E+05	1035,7	2,27E+05	20,74	0,74
Cas 2a Teneur en eau sup (saison humide) -7% 147MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	eza _{adm} 10 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG CI1						
22,5	GNT						
22,5	GNT						
	PF2	1243,5	9,95E+04	1001,1	2,55E+05	23,61	22,2
Cas 2b Teneur en eau inf. (saison sèche) - 5,7% 108MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	eza _{adm} 10 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison sèche)
5	BBSG CI1						
22,5	GNT						
22,5	GNT						
	PF2	1243,5	9,95E+04	1112,3	1,64E+05	15,7	18,2

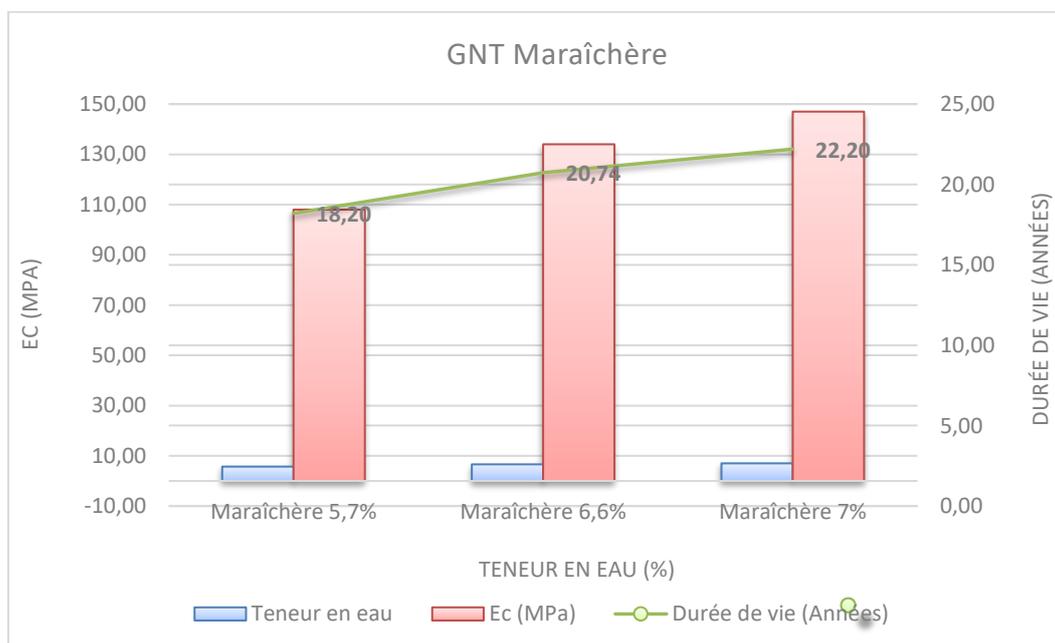


FIGURE 19 - Synthèse - Durée de vie - GNT Maraîchère

Les résultats des calculs pour la GNT Maraîchère ont montré que la teneur en eau a une influence proportionnelle sur le module EC et la durée de vie global de la chaussée, **cela veut dire que pour les trois valeurs analysées la durée de vie augmente avec l'augmentation de la teneur en eau. Cependant, le nombre réduit de valeurs analysées n'est pas suffisant pour affirmer avec certitude cette tendance.**

4.2.1.2 GNT Saint Agnant

TABLEAU 5 - Synthèse durée de vie - GNT Saint Agnant

Teneur en eau réf - 7,2% 100MPa - 20 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm} 20 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	Nbre année calc	Écart Durée de vie 20 ans (années)
5	BBSG CI1						
24,5	GNT						
24,5	GNT						
	PF2	1045,6	2,17E+05	1029,4	2,29E+05	21,23	1,23
Cas 2a Teneur en eau sup (saison humide) - 8,1% 90MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm} 20 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	Nbre année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG CI1						
24,5	GNT						
24,5	GNT						
	PF2	1243,5	9,95E+04	1060,9	2,03E+05	18,9	20,07
Cas 2b Teneur en eau inf. (saison sèche) - 6,3% 44MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm} 20 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	Nbre année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison sèche)
5	BBSG CI1						
24,5	GNT						
24,5	GNT						
	PF2	1243,5	2,17E+05	1208,0	1,13E+05	11,26	16,25

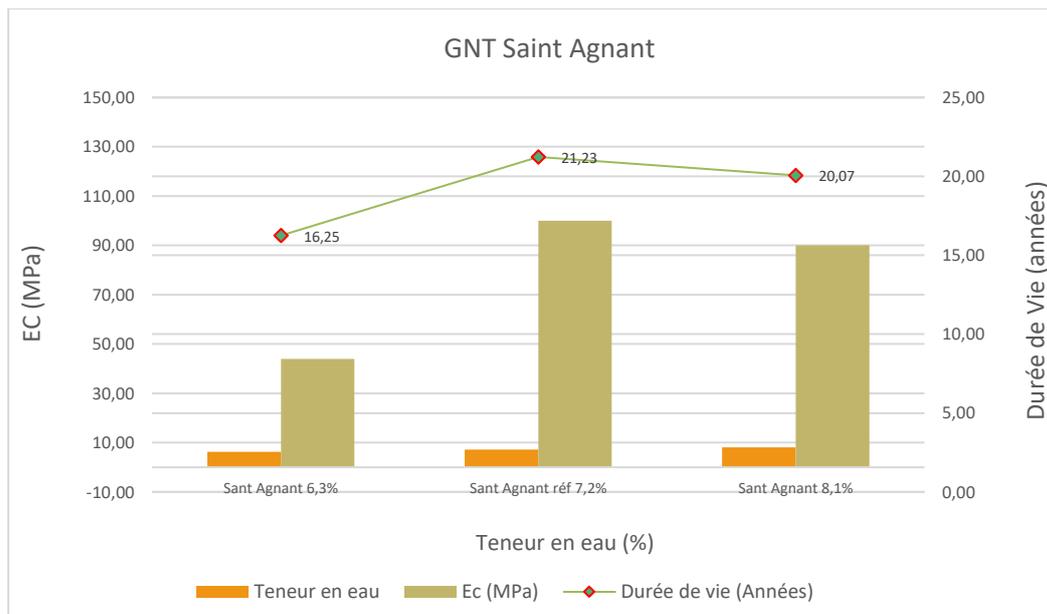


FIGURE 20 - Graphique de Synthèse - Durée de vie – GNT Saint Agnant

Sur la GNT de Saint Agnant, l’augmentation de 0.9% de la teneur en eau a provoqué une baisse de module et par conséquent une perte de plus de 1 an par rapport à la durée de vie de référence. La même valeur de réduction (-0,9%) de la teneur en eau a également provoqué une perte de module, mais plus importante que celle de l’augmentation et elle a été suivie d’une perte de durée de vie supérieure à 4 ans, par rapport à la durée de vie de référence. **Ce qui laisse croire que pour cet essai, la GNT d’origine Calcaire de Saint Agnant est plus sensible à la réduction qu’à l’augmentation de la teneur en eau.**

4.2.1.3 GNT La Fare

TABLEAU 6 - Synthèse durée de vie - GNT La Fare

Teneur en eau réf - 3,13% 297MPa - 20 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm} 20 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	Nbre année calc	Écart Durée de vie 20 ans (années)
5	BBSG CI1						
17	GNT						
17	GNT						
	PF2	1045,6	2,17E+05	1019,6	2,43E+05	22,02	2,02
Cas 2a Teneur en eau sup (saison humide) - 3,8% 116MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm}	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG CI1						
17	GNT						
17	GNT						
	PF2	1243,5	9,95E+04	1173,4	1,29E+06	12,68	17,35
Cas 2b Teneur en eau inf. (saison sèche) - 2,88% 121MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm}	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison sèche)
5	BBSG CI1						
17	GNT						
17	GNT						
	PF2	1243,5	9,95E+04	1441,3	5,12E+04	5,37	13,70

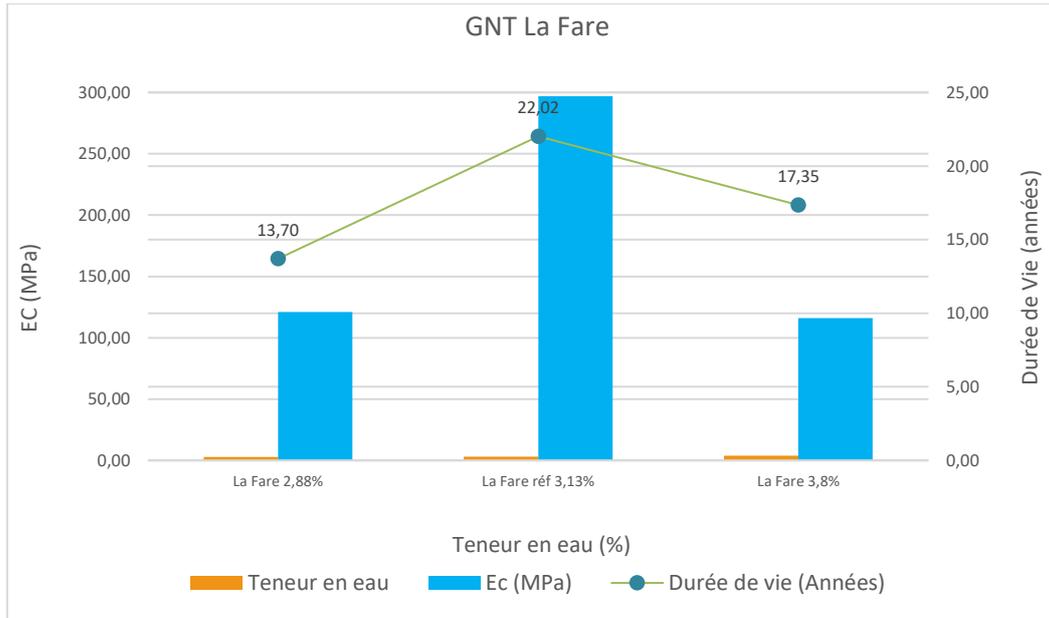


FIGURE 21 - Synthèse - Durée de vie - GNT La Fare

Pour la GNT La Fare, les deux variations de la teneur en eau ont provoqué une baisse de la valeur du module : la baisse plus importante correspond à l’augmentation de la teneur en eau de 0.67%, où le module est passée de 297MPa à 116MPa. La baisse de 0.25% de la teneur en eau et l’augmentation de 0.67% de celle-ci ont eu la même incidence sur la durée de vie, en la réduisant par rapport à la durée de référence. La durée de vie globale est de 17,35 ans pour la teneur en eau de 3.8% et de 13,7 ans pour la teneur en eau de 2.88%. **La GNT La Fare serait donc, selon l’analyse des données disponibles, plus sensible à la baisse de la teneur en eau.**

4.2.1.4 Latérite

Teneur en eau réf - 11,68% 250MPa - 20 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm} 20 ans	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	Nbre année calc	Écart Durée de vie 20 ans (années)
5	BBSG C11						
18	GNT						
18	GNT						
	PF2	1045,6	2,17E+05	1036,8	2,26E+05	20,66	0,66
Cas 2a Teneur en eau sup (saison humide) -12,1% 158MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm}	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	Nbre année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG C11						
18	GNT						
18	GNT						
	PF2	1243,5	9,95E+04	1249,2	9,74E+04	9,81	15,24
Cas 2b Teneur en eau inf. (saison sèche) - 7,7% 174 MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ez _{adm}	NE _{adm}	ez _{sol}	NE _{sol}	Nbre année calc	Durée de vie totale (50% réf + 50% saison sèche)
5	BBSG C11						
18	GNT						
18	GNT						
	PF2	1243,5	9,95E+04	1205,4	1,14E+05	11,36	16,01

TABLEAU 7 - Synthèse durée de vie - Latérite

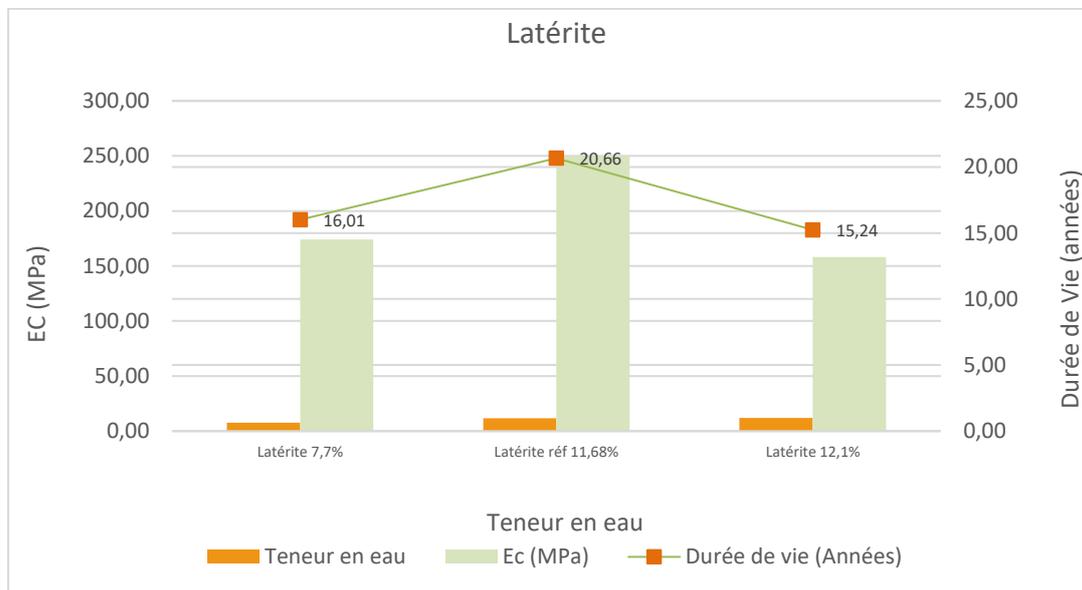


FIGURE 22 - Synthèse - Durée de vie – Latérite

La latérite semble être plus sensible à une augmentation de la teneur en eau puisque l'impact de l'augmentation de seulement 0.42% a engendré une perte de module (- 92 MPa) et de 5,4 ans, alors qu'une réduction de 3.98% de la teneur en eau a provoqué une perte moins importante en module et par conséquent en durée de vie globale (4.6 ans). **La latérite étudiée serait donc plus sensible à l'augmentation de la teneur en eau.**

4.2.1.5 Sable de Missillac

TABLEAU 8 - Synthèse durée de vie - Sable de Missillac

Teneur en eau réf - 8,8% 220MPa - 20 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ϵZ_{adm}	NE projet (20 ans)	ϵZ_{sol}	NE _{sol}	N année calc	Écart 20 ans (années)
5	BBSG CI1						
20	GNT						
20	GNT						
	220 MPa	1045,6	2,17E+05	391,4	1,82E+07	> 20	-
Cas 2a Teneur en eau sup (saison humide) -10,93% 181MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ϵZ_{adm}	NE _{adm}	ϵZ_{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie total (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG CI1						
20	GNT						
20	GNT						
	181 MPa	1243,5	9,95E+04	454,3	9,28E+06	> 20	> 20
Cas 2b Teneur en eau sup (saison humide) - 11,4% 164MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ϵZ_{adm}	NE _{adm}	ϵZ_{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie total (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG CI1						
20	GNT						
20	GNT						
	164 MPa	1243,5	9,95E+04	488,6	6,68E+06	> 20	> 20

Le module de référence a une portance supérieure à 200MPa, ce qui correspond à une Plateforme de classe 4. Les modules pour les autres teneurs en eau (10,93% et 11,4%) correspondent à des portances équivalentes à une PF3. Les données disponibles n’ont permis d’évaluer que l’incidence d’une augmentation de la teneur en eau, restant à évaluer l’incidence sur une baisse de la teneur en eau. Cependant, ces augmentations de 2,13% et de 2,6% n’ont pas eu une incidence significative sur la durée de vie de la chaussée, restant à plus de 20 ans.

4.2.1.6 *Sable de l'Ennerie*

TABLEAU 9 - Synthèse durée de vie - Sable de l'Ennerie

Teneur en eau réf - 7,8% 158MPa - 20 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ϵz_{adm}	NE projet (20 ans)	ϵz_{sol}	NE _{sol}	N année calc	Écart 20 ans (années)
5	BBSG CI1						
20	GNT						
20	GNT						
	158 MPa	1045,6	2,17E+05	501,9	5,92E+06	> 20	-
Cas 2a Teneur en eau sup (saison humide) -9,3% 124MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ϵz_{adm}	NE _{adm}	ϵz_{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie total (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG CI1						
20	GNT						
20	GNT						
	124 MPa	1243,5	1,24E+03	594,6	2,78E+06	> 20	> 20
Cas 2b Teneur en eau sup. (saison humide) - 11,2% 87MPa - 10 ans							
Épaisseur (cm)	Matériaux	ϵz_{adm}	NE _{adm}	ϵz_{sol}	NE _{sol}	N année calc	Durée de vie total (50% réf + 50% saison humide)
5	BBSG CI1						
20	GNT						
20	GNT						
	87 MPa	1243,5	1,24E+03	758,4	9,12E+05	> 20	> 20

Le module de référence du Sable de l'Ennerie correspond à une plateforme de classe 3. Les teneurs en eau modélisées, 9,3% et 11,2 % correspondent respectivement, à des modules de 124MPa (PF3) et 87MPa (PF2qs). Effectivement, l'augmentation de la teneur en eau a baissé le module jusqu'à une PF2qs. Cependant, ces variations en teneur en eau n'ont pas eu d'incidence significative sur la durée de vie de la chaussée, comme pour le sable de Missillac.

Il convient de signaler que, les résultats obtenus lors de la modélisation des sables sont à considérer avec précaution. Par retour d'expérience, lors des essais de plaque les modules mesurés sont très souvent inférieurs à ceux mesurés en laboratoire.

5 Conclusion

Le changement climatique provoque des dérèglements des saisons avec des périodes plus longues ou plus courtes, apportant avec elles des niveaux pluviométriques variables (sécheresses ou périodes d'inondations). Ces changements ont aussi une incidence sur les performances des matériaux utilisés dans la construction routière, dont le comportement est variable en fonction des conditions dans lesquels ils se trouvent.

Dans le cas précis de la présente étude, cela a conduit à étudier les matériaux non liés utilisés en couche d'assise ou en plateforme des chaussées souples.

La présente étude a eu comme objectif principal de mesurer, de façon simplifiée, l'impact de la teneur en eau sur les performances des matériaux non liés utilisés dans la construction routière et par la suite sur la durée de vie globale d'une chaussée construite avec ces matériaux.

Afin de mesurer l'influence de l'eau sur la durée de vie de la chaussée, il a fallu d'abord comprendre le fonctionnement des matériaux granulaires dans différentes conditions de teneur en eau ainsi que l'incidence de l'eau sur leur cohésion.

L'origine pétrographique a également une influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux (GNT et sols), au travers de la dureté et de la porosité des granulats, ainsi que de la sensibilité à l'eau de la fraction fine.

L'approche utilisée dans la présente étude était basée sur la modélisation d'une structure de chaussée souple, à l'aide du logiciel Alizé, avec les conditions de teneur en eau des matériaux disponibles :

- ▶ Structure souple : BBSG CI1 /GNT / PF2
- ▶ CAM = 0.5
- ▶ TC20ans = 0.46×10^6 PL

Le plan de modélisation était le suivant :

- ▶ Cas de référence : 20 ans avec module de référence (W_{OPN} ou proche pour les sols, W_{OPM} pour les GNT)
- ▶ Cas avec variations de teneur en eau :
 - **Cas 1** (quand l'étendue de données le permet) : cas extrêmes pour déterminer l'amplitude de l'impact de la teneur en eau mini
 - Cas 1a : 20 ans avec module correspondant à teneur immédiatement supérieure à W_{OPN} ou W_{OPM}
 - Cas 1b : 20 ans avec module correspondant à teneur immédiatement inférieure à W_{OPN} ou W_{OPM}
 - **Cas 2** : simulation de 6 mois de saison pluvieuse et 6 mois de saison de sécheresse
 - Cas 2a : 10 ans avec module de référence et 10 ans avec module correspondant à la teneur immédiatement supérieure à W_{OPN} ou W_{OPM}
 - Cas 2b : 10 ans avec module de référence et 10 ans avec module correspondant à la teneur immédiatement inférieure à W_{OPN} ou W_{OPM}

L'objectif de ces modélisations était d'évaluer l'impact de la teneur en eau sur la durée de vie des chaussées au travers de son incidence sur le module réversible mesuré à l'essai triaxial des matériaux granulaires non liés utilisés en couches de chaussée ou composant la plateforme. Les GNT et la Latérite (utilisées en couche d'assise) ainsi que les sols (utilisés comme plateforme) choisis sont issus de la base d'essais du laboratoire de Nantes de l'Université Gustave Eiffel. Ils sont listés dans le tableau ci-dessous :

Matériaux	Teneur en eau (%)	Ec (MPa)
GNT Maraîchère 5,7%	5,70	108
GNT Maraîchère 6,6%	6,60	134
GNT Maraîchère 7%	7,00	147
GNT Sant Agnant 6,3%	6,30	44
GNT Sant Agnant réf 7,2%	7,20	100
GNT Sant Agnant 8,1%	8,10	90
GNT La Fare 2,88%	2,88	121
GNT La Fare réf 3,13%	3,13	297
GNT La Fare 3,8%	3,80	116
Latérite 7,7%	7,70	174
Latérite réf 11,68%	11,68	250
Latérite 12,1%	12,10	158
Sable de Missillac réf 8,8%	8,80	220
Sable de Missillac 10,4%	10,40	181
Sable de Missillac 11,93%	11,93	164
Sable de l'Ennerie réf. 7,8%	7,80	158
Sable de l'Ennerie 9,3%	9,30	124
Sable de l'Ennerie 11,2 %	11,2	87

Les résultats des modélisations montrent que :

- ▶ **Pour la GNT Maraîchère :**
 - **L'incidence de la teneur en eau sur le module Ec et la durée de vie globale est directement proportionnelle.** Le module et la durée de vie augmentent avec la hausse de la teneur en eau et la baisse de la teneur en eau provoque une réduction du module et de la durée de vie globale.
 - Une augmentation de 0,4% en teneur en eau provoque un gain d'environ 1,5 ans de durée de vie par rapport à la durée de référence et une réduction de 0,9% engendre une perte de 2,5 ans de durée de vie globale.
- ▶ **Pour la GNT de Saint Agnant :**
 - **L'augmentation de 0.9%** de la teneur en eau provoque une baisse de module et par conséquent une **perte d'environ 1 an par rapport à la durée de vie de référence.**
 - **Une réduction en valeur absolue identique de la teneur en eau a aussi provoqué une perte de module, mais plus importante que celle correspondant à l'augmentation, avec une perte de durée de vie de plus de 4 ans par rapport à la durée de vie de référence. Ce qui laisse croire que pour cet essai, la GNT de Saint Agnant, d'origine Calcaire, est plus sensible à la réduction qu'à l'augmentation de la teneur en eau**
- ▶ **Pour la GNT La Fare :**
 - Les deux teneurs en eau évaluées ont provoqué une baisse du module. Cette baisse était plus importante pour l'augmentation de la teneur en eau de 0.67%, où le module est passé de 297MPa à 116MPa. **La baisse de 0.25% de la teneur en eau et l'augmentation de 0.67% ont eu une incidence équivalente (perte de la durée de vie globale).**
 - **La perte de durée de vie par rapport à la référence est supérieure à 5,5 ans pour la teneur de 3.8% et d'environ 8 ans pour la teneur de 2.88%. Selon cette analyse, la GNT La Fare est plus sensible à la baisse de la teneur en eau.**
- ▶ **La latérite semble être plus sensible à une augmentation de la teneur en eau puisque l'impact de l'augmentation de 0.42% provoque une perte de 5,4 ans, alors**

qu'une réduction de 3.98% de la teneur en eau provoque une perte moins importante, égale à 4,6 ans.

- ▶ **Pour le sable de Missillac** : les données disponibles n'ont permis d'évaluer que l'incidence d'une augmentation de la teneur en eau. Cependant, ces augmentations, de 2,13% et de 2,6% n'ont pas eu une incidence significative sur la durée de vie de la chaussée, qui restent supérieure à 20 ans, comme la durée de vie de référence.
- ▶ **Pour le sable de l'Ennerie** : les teneurs en eau utilisés pour les modélisations, 9,3% et 11,2 %, correspondent respectivement à des modules de 124MPa (PF3) et 87MPa (PF2qs). L'augmentation de la teneur en eau a diminué le module de référence jusqu'à une PF2qs. **Cependant, ces hausses de la teneur en eau, n'ont pas eu d'incidence significative sur la durée de vie de la chaussée, qui reste supérieure à 20 ans, comme pour le sable de Missillac.**

Il convient de signaler que, les résultats obtenus lors de la modélisation des sables sont à considérer avec précaution. Par retour d'expérience, lors des essais de plaque les modules mesurés sont très souvent inférieurs à ceux mesurés en laboratoire.

Le tableau ci-après synthétise les durées de vie résultant des modélisations :

Matériaux	Teneur en eau	Ec (MPa)	Durée de vie (Années)
Maraîchère 5,7%	5,70	108	18,20
Maraîchère 6,6%	6,60	134	20,74
Maraîchère 7%	7,00	147	22,20
Sant Agnant 6,3%	6,30	44	16,25
Sant Agnant réf 7,2%	7,20	100	21,23
Sant Agnant 8,1%	8,10	90	20,07
La Fare 2,88%	2,88	121	13,70
La Fare réf 3,13%	3,13	297	22,02
La Fare 3,8%	3,80	116	17,35
Latérite 7,7%	7,70	174	16,01
Latérite réf 11,68%	11,68	250	20,66
Latérite 12,1%	12,10	158	15,24
Sable de Missillac réf 8,8%	8,80	220	> 20
Sable de Missillac 10,4%	10,40	181	> 20
Sable de Missillac 11,93%	11,93	164	> 20
Sable de l'Ennerie réf. 7,8%	7,80	158	> 20
Sable de l'Ennerie 9,3%	9,30	124	> 20
Sable de l'Ennerie 7,8%	7,80	87	> 20

Il convient de souligner que le nombre de données n'est pas exhaustif. L'étude a toutefois permis d'avoir une première idée de l'effet des variations de teneur en eau. Les résultats montrent que pour les cas étudiés, les écarts de durée de vie peuvent atteindre 8 ans.

Afin de mieux définir la limite de teneur en eau au-delà de laquelle le matériau peut perdre significativement en durée de vie, il faudrait explorer les deux sens de la courbe Ec x teneur en eau de chaque matériau, avec des variations réduites de teneurs en eau, tous les 0.5%, par exemple. Toutefois, pour certains matériaux (GNT), il n'est pas possible d'atteindre des teneurs en eau très supérieures à la teneur en eau OPM dans les essais triaxiaux, à cause du phénomène de ressuage, l'éprouvette perd de l'eau lorsqu'elle est très humide.

6 Références Bibliographiques

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) - Guide for Design of Pavement Structures, 1993

BALAY J., GOMES CORREIA A., JOUVE P., HORNYCH P., PAUTE J.L. (1998) Étude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées - Dernières avancées, Bull. Liaison Labo. des P. et Ch., n° 216, pp 3-18, Juillet - Août 1998.

DAWSON A. R., THOM N.H., PAUTE J.L. (1996) Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition. Flexible Pavements, Proc., Eur. Symp Euroflex 1993, CORREIA A. G., ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 35-45

GIDEL G., BREYSSE D., DENIS A. (2001) Influence de l'état hydrique et des sollicitations routières sur l'évolution du comportement des graves non traitées calcaires utilisées en assise de chaussées. 4ème Congrès français de génie civil, COSS'2001.

Guide Technique GTR - Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) - Fascicule 1 - principes généraux, SETRA/LCPC 2000

HABIBALLAH Taha El Mokhtar (2005) Modélisation des déformations permanentes des graves non traitées - Thèse de Doctorat Université de Limoges, Mars 2005.

Manuel de dimensionnement des chaussées neuves à faible trafic, IDRRIM/CEREMA, 2020

Norme Française - NF EN 13286-7 - Essai Triaxial – Mélanges non traités aux liants hydrauliques, 2004.

SOULIÉ Fabien (2005) Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires - Thèse de Doctorat Université de Montpellier II, 6 Juillet 2005.

7 Annexes – Calculs Alizé

7.1 GNT Maraîchère

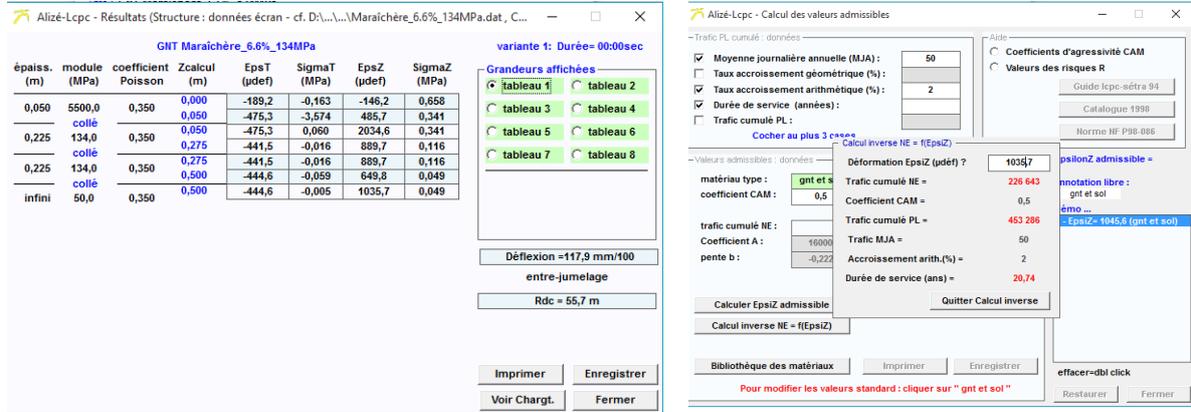


FIGURE 23 - GNT Maraîchère - Teneur en eau de référence – 6,6%

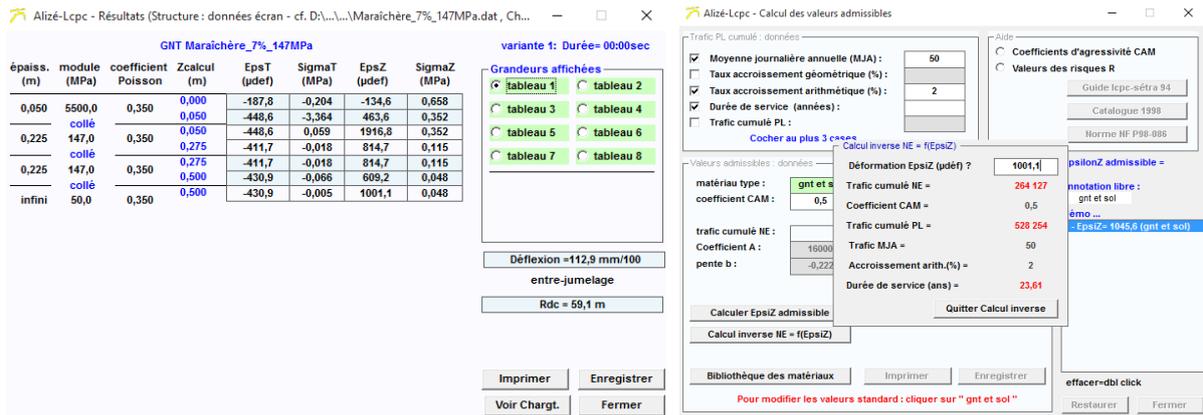


FIGURE 24 - GNT Maraîchère - Teneur en eau de référence – 7%

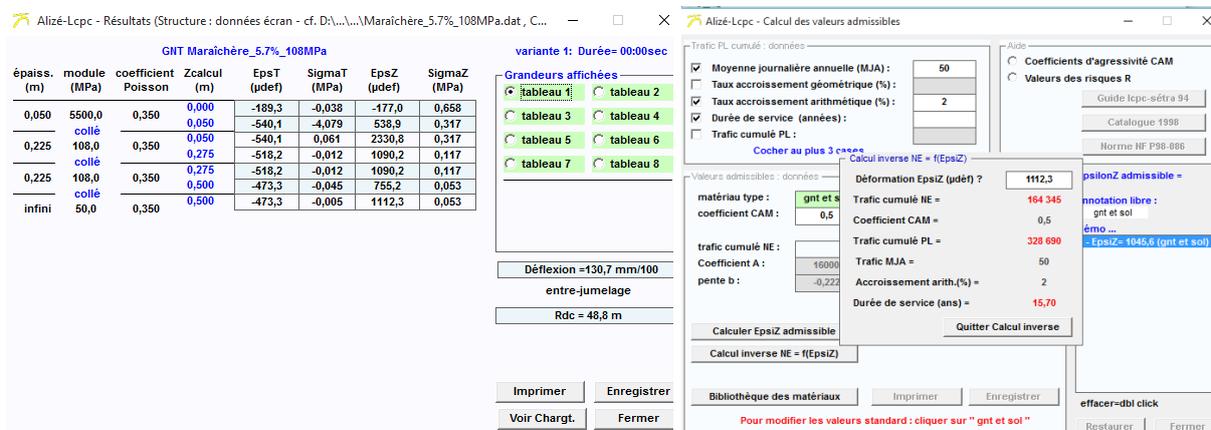


FIGURE 25 - GNT Maraîchère - Teneur en eau de référence – 5,7%

7.2 GNT Saint Agnant

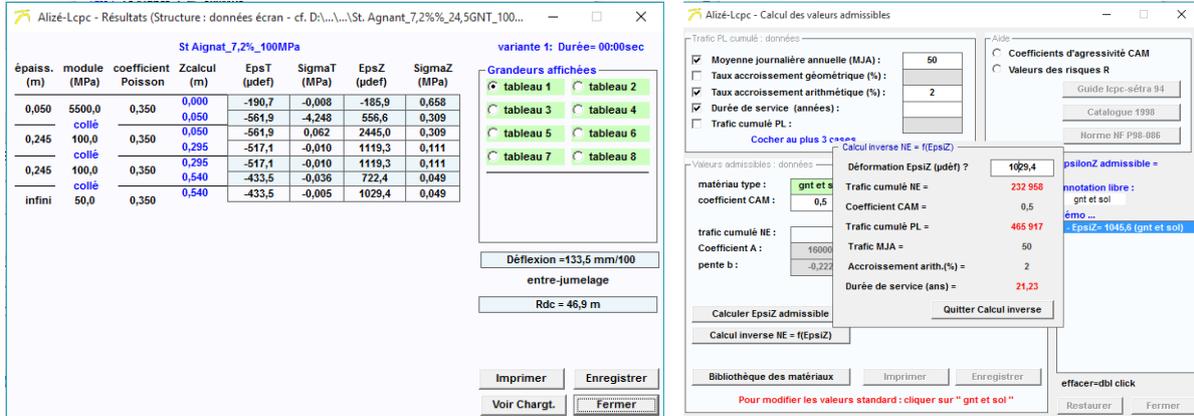


FIGURE 26 – GNT Saint Agnant - Teneur en eau de référence – 7,2%

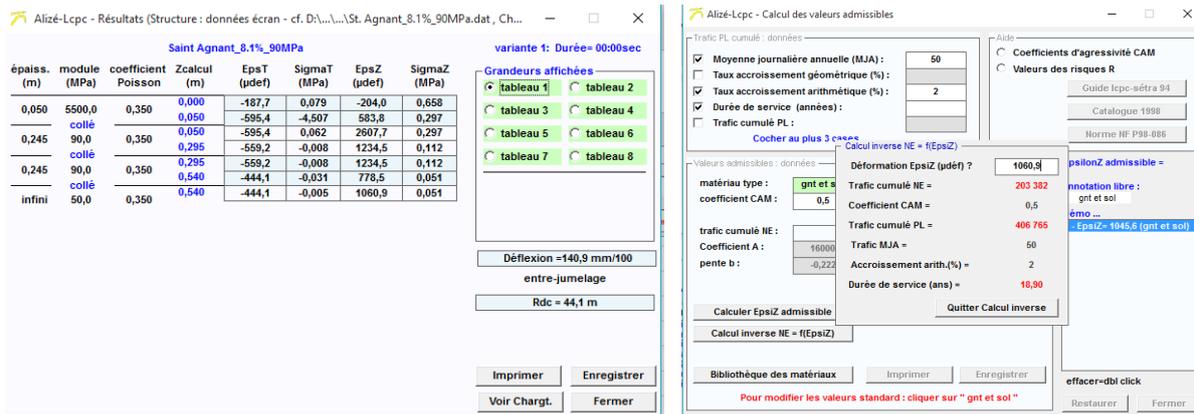


FIGURE 27 – GNT Saint Agnant - Teneur en eau – 8,1%

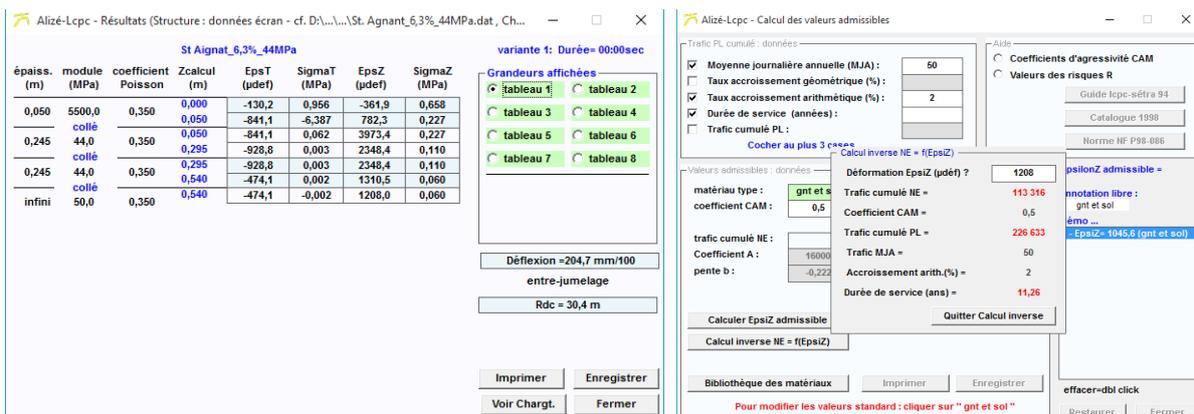


FIGURE 28 – GNT Saint Agnant - Teneur en eau – 6,3%

7.3 GNT La Fare

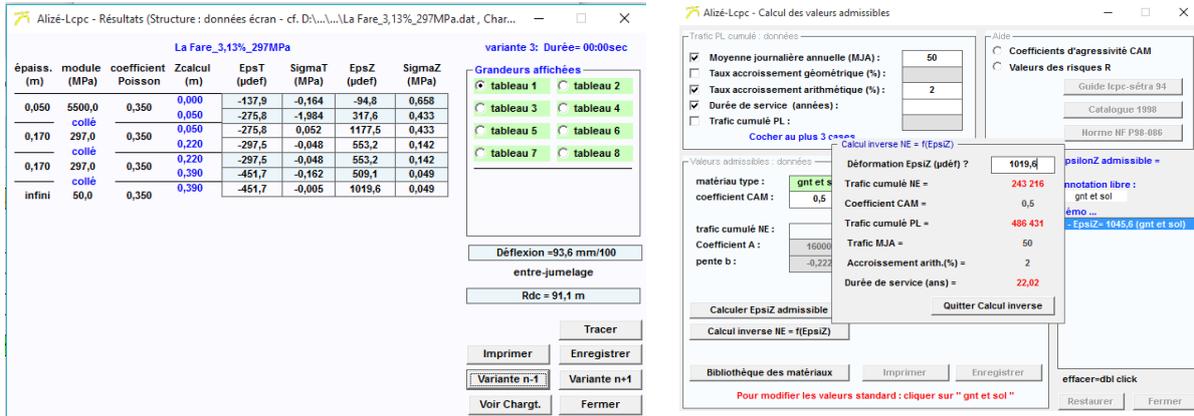


FIGURE 29 GNT La Fare - Teneur en eau de référence – 3,13%

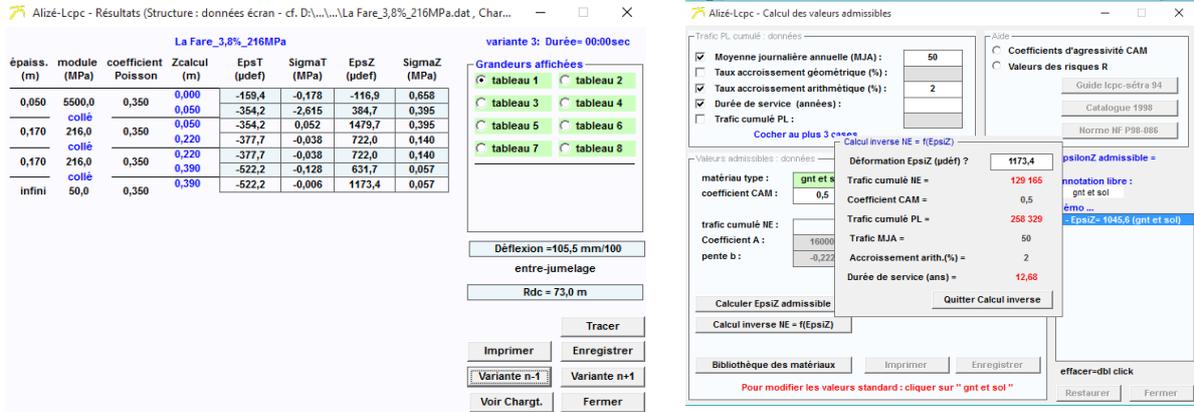


FIGURE 30 GNT La Fare - Teneur en eau – 3,8%

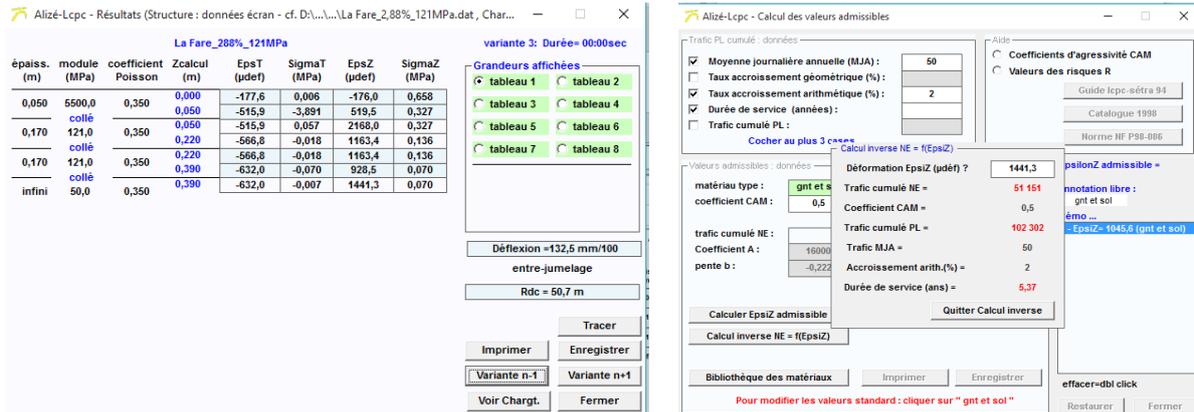


FIGURE 31 GNT La Fare - Teneur en eau – 2,88%

7.4 Latérite

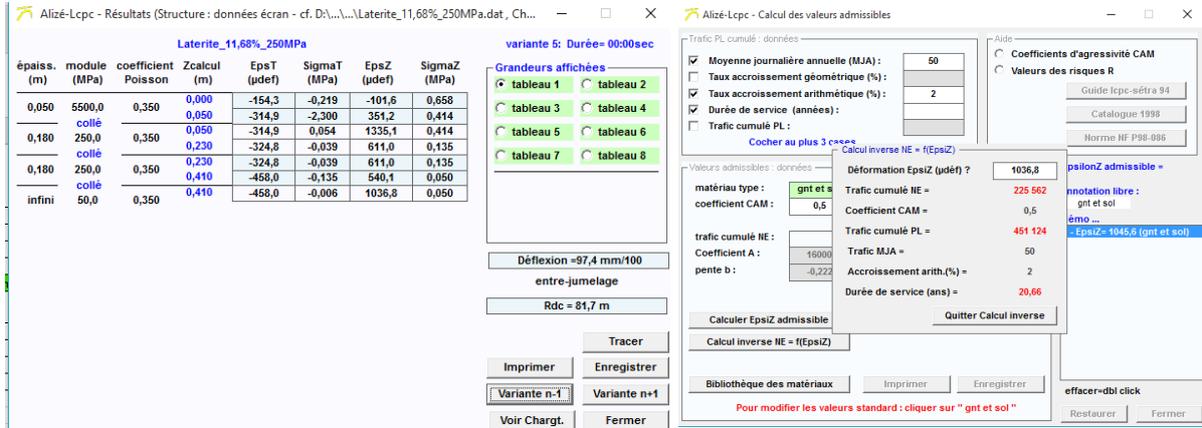


FIGURE 32 Latérite - Teneur en eau de référence – 11,68%

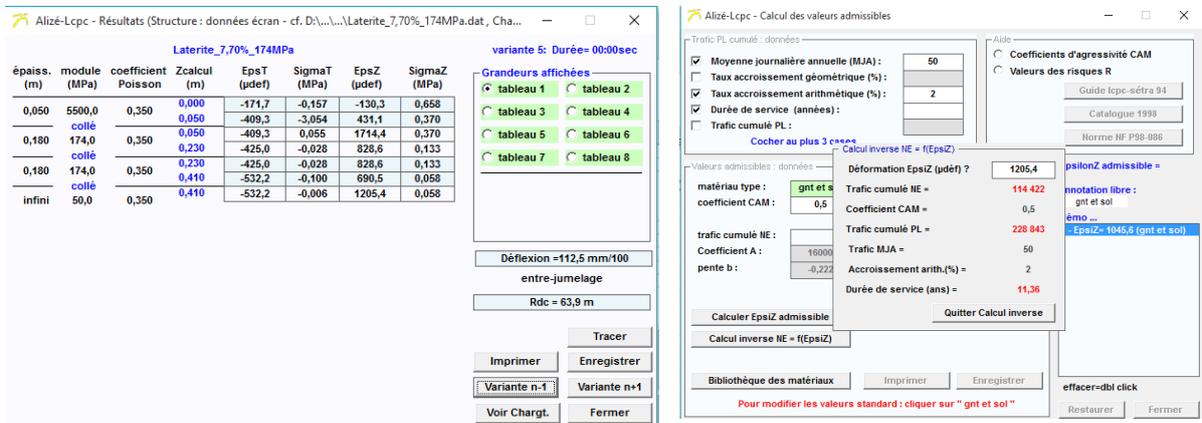


FIGURE 33 Latérite - Teneur en eau – 7,7%

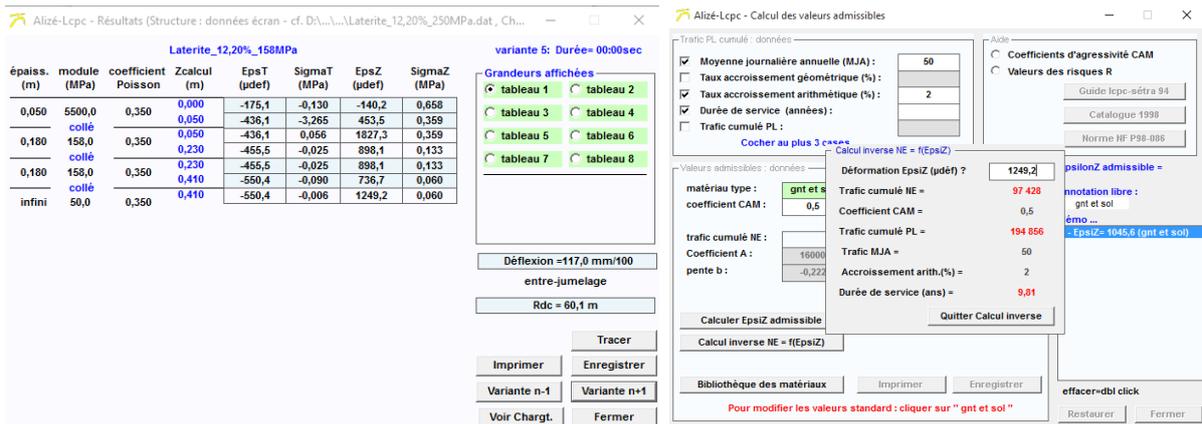


FIGURE 34 Latérite - Teneur en eau – 12,1%

7.5 Sable de Missillac

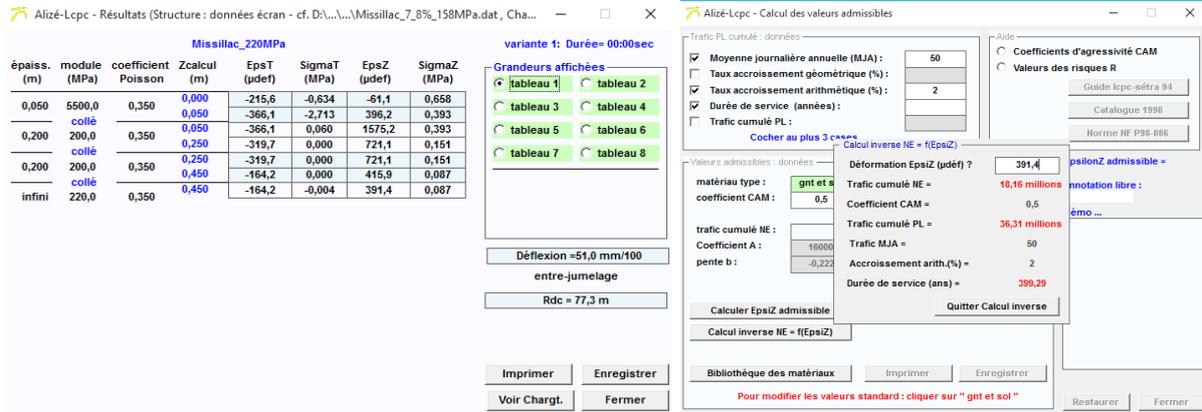


FIGURE 35 Sable de Missillac - Teneur en eau de référence – 8,8%

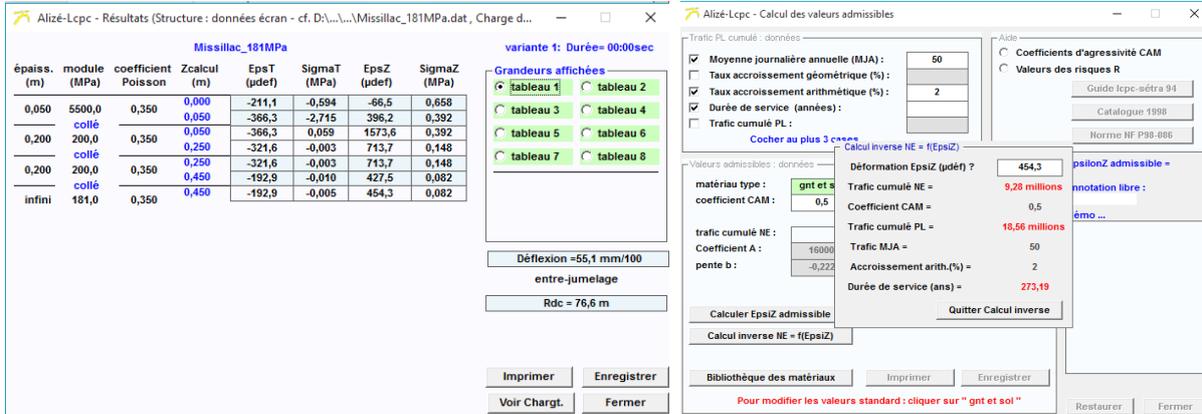


FIGURE 36 Sable de Missillac - Teneur en eau de 10,93%

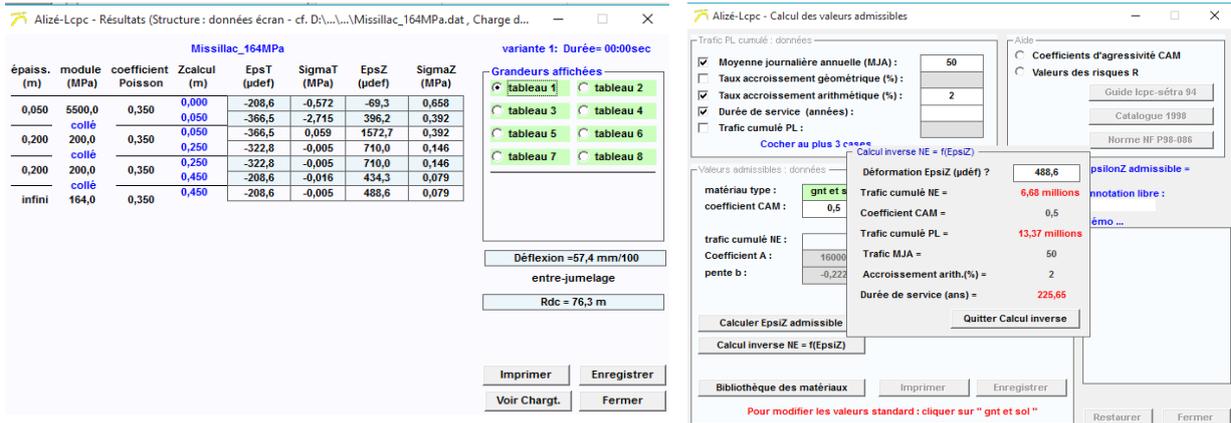


FIGURE 37 Sable de Missillac - Teneur en eau de 11,4%

7.6 Sable de l'Ennerie

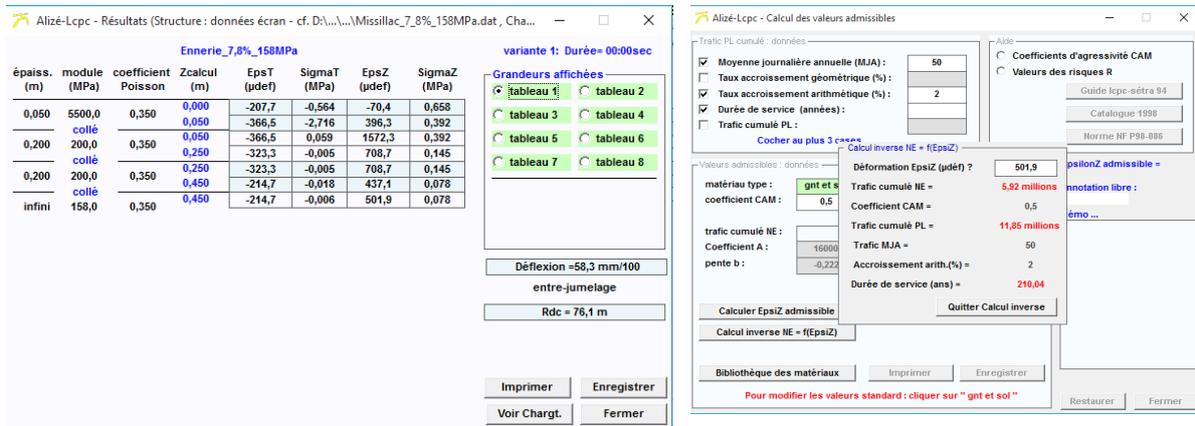


FIGURE 38 Sable de l'Ennerie - Teneur en eau de référence – 7,8%

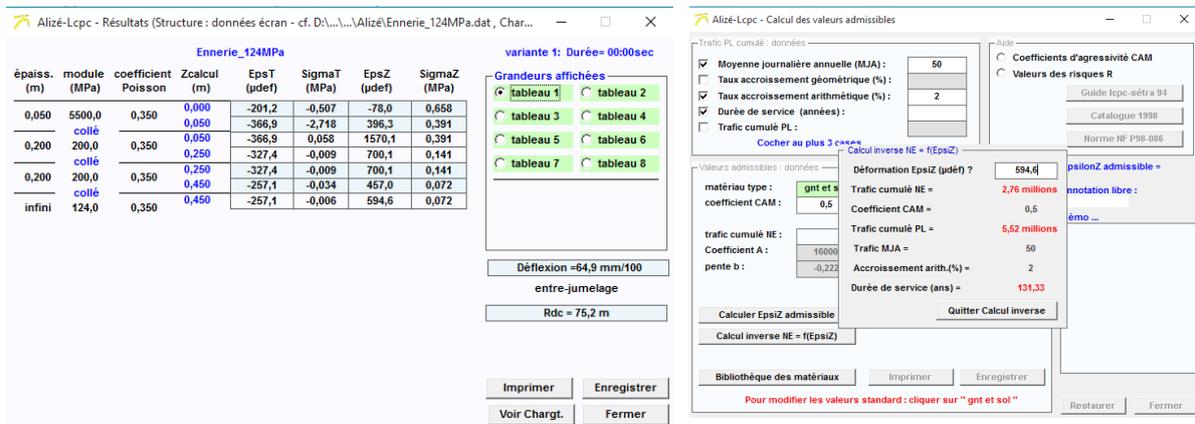


FIGURE 39 Sable de l'Ennerie - Teneur en eau – 9,3%

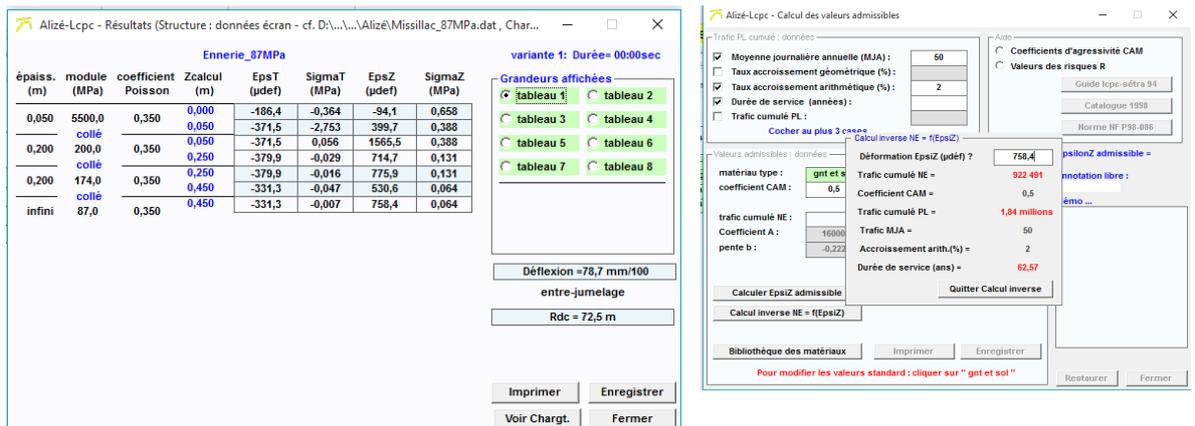


FIGURE 40 Sable de l'Ennerie - Teneur en eau – 11,2%