

## PROJET SEDIASPHALTE

***Livrable 3.2. Expertise et avis sur les procédures de fabrication des matériaux / Essais mécaniques sur éprouvettes (indentations)***



## Table des matières

I.	Objet de cette étape du projet et du présent livrable .....	4
II.	Comportement mécaniques des asphaltes coulés –essais d’indentation .....	4
II.1.	Matériaux et méthodes .....	5
II.1.1.	Matériaux .....	5
II.1.2.	Formulation des mélanges .....	7
II.1.3.	Méthode .....	8
III.	Résultats et discussion .....	8
III.1.	Morphologie .....	8
III.2.	Résistance à la déformation par indentation .....	9
IV.	Fabrication des asphaltes coulés.....	11
IV.1.	Fabrication discontinue en pétrin .....	11
IV.2.	Fabrication continue en malaxeur rapide.....	12
IV.3.	La température de formulation des asphaltes coulés .....	12
IV.4.	Le transport de l’asphalte coulé.....	13
IV.5.	Essais de contrôle de la formulation des asphaltes coulés .....	13
V.	Conclusion de la partie procédures de fabrication des matériaux et caractérisation mécanique (essais d’indentation).....	15
VI.	Références.....	16

## Liste des figures

<i>Figure 1. Analyse granulométrie des granulats.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 2. Analyse granulométrie laser des fillers. ....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 3. Morphologie des asphaltes immergés dans différente solutions. ....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 4. Echantillons d'asphaltes coulés immergés dans les différentes solutions chimiques.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 5. Valeurs de l'Indentation d'asphaltes coulés type AP1.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6. Valeurs de l'Indentation des asphaltes coulés AG1 (à droite) et AS1 (à gauche).....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 7. Fabrication en pétrin discontinue.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 8. Fabrication continue en malaxeur rapide. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 9. Malaxeur à axe vertical (à droite) - Malaxeurs à axe horizontal (à gauche). ....</i>	<i>13</i>

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1. Caractéristique du bitume utilisé dans les formulations des asphaltes coulés.....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 2. Préparation de solution chimique. ....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 3. Formulation des asphaltes coulés. ....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 4. Plage d'indentation des différentes formulations d'asphaltes coulés. ....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 5. Résultat indentation des formulations des différentes formulations d'asphaltes coulés.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 6. Températures maximales de malaxage des asphaltes coulés. ....</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 7. Essais de contrôle des asphaltes coulés.....</i>	<i>14</i>

## **I. Objet de cette étape du projet et du présent livrable**

Cette troisième étape a été consacrée à la formulation en laboratoire de différents mélanges (pour les 6 applications cibles), sur la base des sédiments retenus et caractérisés lors de la première et la seconde étape. Les matériaux formulés ont été caractérisés sur la base des cahiers des charges correspondant à chaque application cible.

Dans cette étape, une étude de pré-formulation des asphaltes d'étanchéités à base de sédiments a été réalisée (Livrable L3.1/partie scientifique). En fonction des résultats de caractérisation, une optimisation du taux de sédiments à introduire dans les formulations a été définie. En effet, l'optimisation du taux de sédiments dans les formules dépendait, de leurs caractéristiques physiques (granulométrie, masse volumique et compacité), et aussi de leurs caractéristiques chimiques (interaction éléments chimiques avec la matrice d'asphalte). Pour le premier point, le Modèle d'Empilement Compressible sera utilisé dans le but d'optimiser le squelette granulaire des mélanges, sans et avec les 5 sédiments retenus.

Au total, 18 formulations seront réalisées. Pour chaque application il y aura une formulation avec sédiment brut, une formulation avec sédiment traité et une formulation sans sédiment (témoin).

Pour chaque application retenue des éprouvettes seront confectionnées en laboratoires. Ces échantillons feront l'objet de campagnes de caractérisation mécanique et d'un suivi des paramètres environnementaux et de durabilités, fonction des cahiers de charge correspondant à chaque application.

Lors de cette étape Nord Asphalte a réalisé des essais d'indentation sur des éprouvettes type galettes selon la norme française en vigueur. Ceci afin de donner un avis technique concernant les formulations et les procédures de fabrications des matériaux.

## **II. Comportement mécaniques des asphaltes coulés –essais d'indentation**

Les asphaltes coulés d'étanchéités sont utilisés avec des quantités importantes dans diverses applications tels que, l'étanchéité des bâtiments, trottoirs, jardins, caniveaux, les bassins et réservoir d'eau, les ponts et aussi dans les revêtements des sites industriels et d'autres comme décrit dans la bibliographie. Généralement les désordres dans les matériaux asphaltique sont dus à l'humidité ou leurs contacts avec les milieux agressifs tels que les acides qui peuvent être générés par les produits corrosives dans les milieux industriels ou dans les locaux d'élevages des bovins par exemple. Aujourd'hui, peu de recherches sont référencés concernant l'étude du comportement de l'asphalte coulé face aux agressions extérieures. Le but du présent chapitre est d'étudier les effets des milieux agressifs (acides et alcalins) sur la matrice d'asphalte coulé à base de filler sédiment (ASL).

Trois type d'asphalte ont été formulé, il s'agit de l'asphalte coulé pur (AP1) dont le filler et le sable 0/2 sont les seuls agrégats rentrant dans ce type de formulation. Ce type d'asphalte coulé est utilisé dans les premières couches pour des applications d'étanchéité de toitures terrasses, cuvelages et réservoirs et aussi dans les planchers intermédiaires.

L'asphalte coulé sablé (AS1) qui présente la deuxième couche complexe après l'application de (AP1) et dont les agrégats utilisés dans ce type de matériaux sont le filler et les sables 0/2 et 0/4, la dernière application est l'asphalte coulé gravillonné (AG1) qui est utilisé comme protection de l'étanchéités des toitures terrasses inaccessibles destinées à la retenue temporaire des eaux pluviales ainsi celle des jardins. Cette application utilise comme matériaux le filler, le sable 0/4/ et le porphyre.

## II.1. Matériaux et méthodes

### II.1.1. Matériaux

- **Granulats**

Dans ce chapitre les matériaux rentrent dans la formulation des trois types d'asphalte coulé d'étanchéités (AP1), (AS1) et (AG1) sont le filler calcaire fourni par la compagnie Carbocia et les fillers sédiments nommés ASL brut et ASLT (traité à la chaux vive). Les fillers ont la granulométrie inférieures à 125 $\mu$ m. Un sable roulé 0/2mm, un autre semi concassé 0/4mm, et du porphyre 2/6mm. Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats par tamisage présentés dans la figure 1. Le filler calcaire et le filler sédiment brut et traité à la chaux sont présentés dans la figure 2.

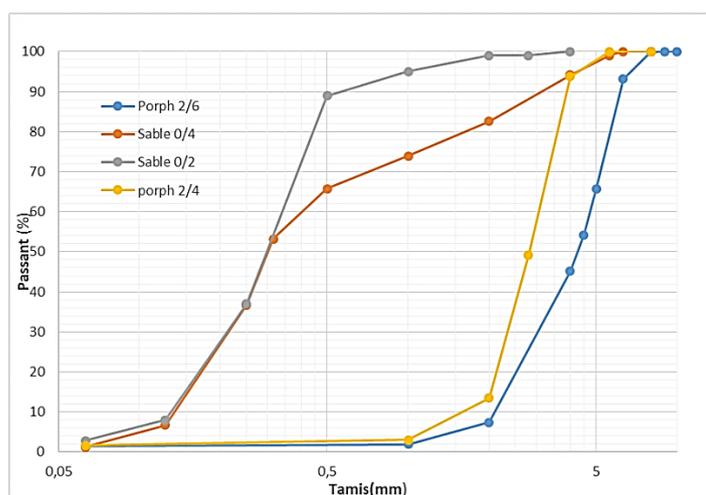


Figure 1. Analyse granulométrique des granulats.

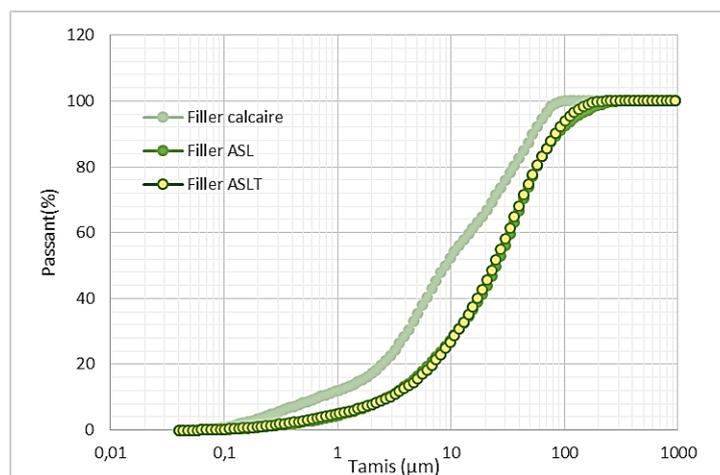


Figure 2. Analyse granulométrique laser des fillers.

## • Bitume

Le bitume utilisé est un bitume de qualité standard « 35/50 Nybit 40 » destiné à la production des asphaltes coulés. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 1 résume les propriétés rhéologiques du bitume Nybit 40 conformément à la norme EN 12591 ainsi qu'aux spécifications définies par Nynas.

Tableau 1. Caractéristique du bitume utilisé dans les formulations des asphaltes coulés.

Propriété	norme	Unité	[Min- Max]
Bitume type			35/50
Pénétration à 25 C°	EN 1426	0,1mm	35,0-50
Point de ramollissement (méthode anneau et bille)	EN 1427	C°	50,0-58
Masse variation	EN 12607-1	%	0.5
Point de ramollissement augmenté	EN 1427	C°	8.0
Pénétrabilité restant à 25C°	EN 1426	%	53,0
Viscosité dynamique à 60C°	EN 12596	Pa,s	225,0
Viscosité cinématique à 135C°	EN 12595	mm <sup>2</sup> /s	370,0
Point de rupture de Fraas	EN 12593	C°	240
Densité	EN 15326	g/cm <sup>3</sup>	1,0-1.1
Solubilité	EN 12592	%	99,0

## • Solutions chimiques

Deux solutions ont été préparées pour cette étude ; une solution acide (solution H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/HNO<sub>3</sub>/eau, pH = 2), solution alcaline (solution NaOH, pH = 12). L'eau déminéralisée a été utilisées comme essai de référence. Les dosages sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2. Préparation de solution chimique.

Type	pH	Solutions
Milieu référence	PH=7	Eau déminéralisée
Milieu acide	PH=2	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et HNO <sub>3</sub> (9 :1) mol
Milieu alcaline	PH=12	NaOH

### II.1.2. Formulation des mélanges

Les formulations des trois types d'asphaltes coulés d'étanchéités sont présentées dans le tableau 3. Les pourcentages des constituants correspondent aux de cahier de charge des asphalte coulé (fascicule 10) et à la norme européenne des asphaltes d'étanchéité. Le taux de substitution des fillers de sédiments a été fixé à 15 % pour toutes les formulations. Cette valeur a été choisie suivant les résultats du modèle obtenu précédemment.

Tableau 3. Formulation des asphaltes coulés.

Ingrédient	Application		
	AP1(%)	AS1(%)	AG1 (%)
Bitume	22	13.5	12
Filler calcaire	34	23.8	23.8
Filler sédiment ASL	6	4.2	4.2
Sable 0/2	38	-	-
Sable 0/4	-	39	30
Porphyre 2/4	-	19.5	-
Porphyre 2/6	-	-	30

### II.1.3. Méthode

Les échantillons d'asphalte coulés ont été immergés dans les solutions de ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{HNO}_3$ ) (9 :1) mol (pH=2) et NaOH (pH=12), ainsi un échantillon témoins ( $\text{H}_2\text{O}$ ) (pH=7) pendant une durée de 4 mois sans cycle de séchage, à la suite de la période d'immersion les échantillons ont été testés pour évaluer leurs résistances à la déformation par indentation. Les plages admissibles d'indentation pour les trois applications choisit sont présentés dans le tableau 4 **Erreur ! Source d u renvoi introuvable..**

Tableau 4. Plage d'indentation des différentes formulations d'asphaltes coulés.

Application	AP1	AS1	AG1
Plage indentation (1/10) mm	$70 \leq I \leq 100$	$7 \leq I \leq 20$	$20 \leq I \leq 50$

## III. Résultats et discussion

### III.1. Morphologie

La figure 3 présente la texture des asphaltes coulés immergées dans différentes solutions. D'après les images présentées, il a été constaté que les asphaltes immergés dans l'eau déminéralisée n'ont pas changés de textures au niveau de la surface. Par contre les échantillons immergés dans la solution acide ( $\text{HNO}_3$  et  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) montrent des altérations en surface qui est due principalement à la réaction chimique entre l'acide et les granulats de nature calcaire (**Erreur ! Source du renvoi introuvable. 4**). En effet, le film d'asphalte recouvrant les agrégats minéraux devient mince, ce qui permet à la solution de s'infiltrer dans l'asphalte et conduit à la diminution de la capacité de liaison de bitume-agrégats. Cependant les mélanges en contact avec la solution alcaline (solution de NaOH) montrent une brillance de la surface qui peut être causé par les sels posé sur la surface générée par des réactions de NaOH et d'autres éléments de la solution.



Figure 3. Morphologie des asphaltes immergés dans différente solutions.



Figure 4. Echantillons d'asphaltes coulés immergés dans les différentes solutions chimiques.

### III.2. Résistance à la déformation par indentation

Afin d'évaluer les propriétés mécaniques des échantillons d'asphalte suite à leur immersion dans les différentes solutions, des essais d'indentations ont été effectués. Les résultats d'indentations sont présentés dans le tableau 5. Les indentations des asphaltes immergés dans l'eau ont les valeurs de 92.17 (1/10mm), 12.56 (1/10mm) et 48.78(1/10mm) pour les applications AP1, AS1 et AG1 respectivement, ces valeurs respectent bien les seuils limites de chaque application (figure 5 et 6). En revanche, les asphaltes à base de sédiments bruts enregistrent moins d'indentation que les asphaltes à base de sédiments traités à la chaux. Il a été observé également que les échantillons immergés dans la solution basique de NaOH présentent des résultats presque similaires à celle du témoin. Cette similitude signifie que les mélanges d'asphaltes coulés résistent mieux les milieux alcalins. Contrairement aux échantillons trempés dans le milieu acide, présentent des fausses indentations (jusqu'à 110 (1/10mm) dû à l'altération de la couche superficielle de l'échantillon (AP1) passe à 92(1/10mm) pour la référence (H<sub>2</sub>O). Cette fausse augmentation a été enregistrée dans toutes les applications. Les asphaltes à base des sédiments traités à la chaux sont les plus affectés par la solution acide à cause de la réaction de l'acide avec de la chaux qui conduit à l'altération de la surface.

Tableau 5. Résultat indentation des formulations des différentes formulations d'asphaltes coulés

Type asphalte	Indentation (1/10mm)								
	AP1			AS1			AG1		
Traitement	R	B	T	R	B	T	R	B	T
NaOH	93,08	71,89	73,12	13,25	8,14	9,78	47,09	33,82	37,22
HNO <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	110,64	80,45	79,58	16,75	9,36	10,48	59,12	43,51	47,17
H <sub>2</sub> O	92,17	73,71	76,45	12,56	8,34	9,35	48,78	32,17	35,32

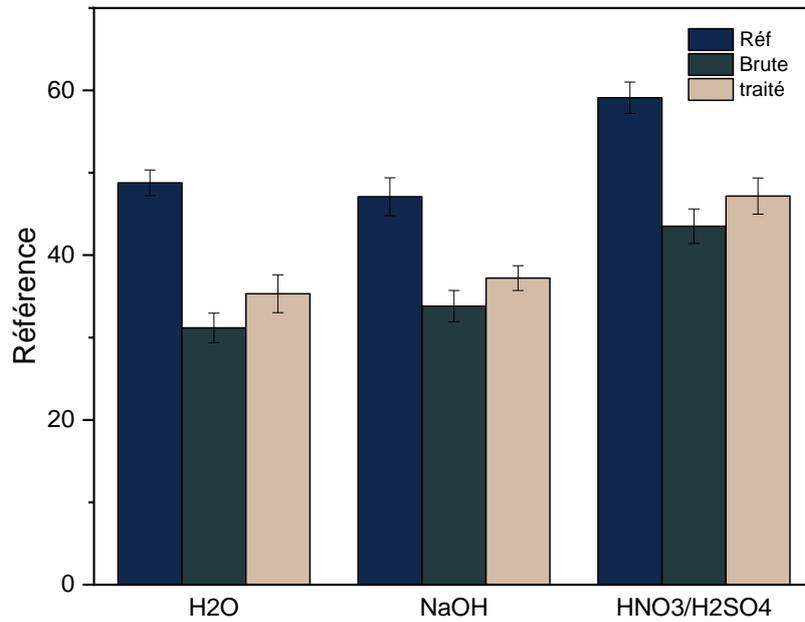


Figure 5. Valeurs de l'Indentation d'asphaltes coulés type AP1.

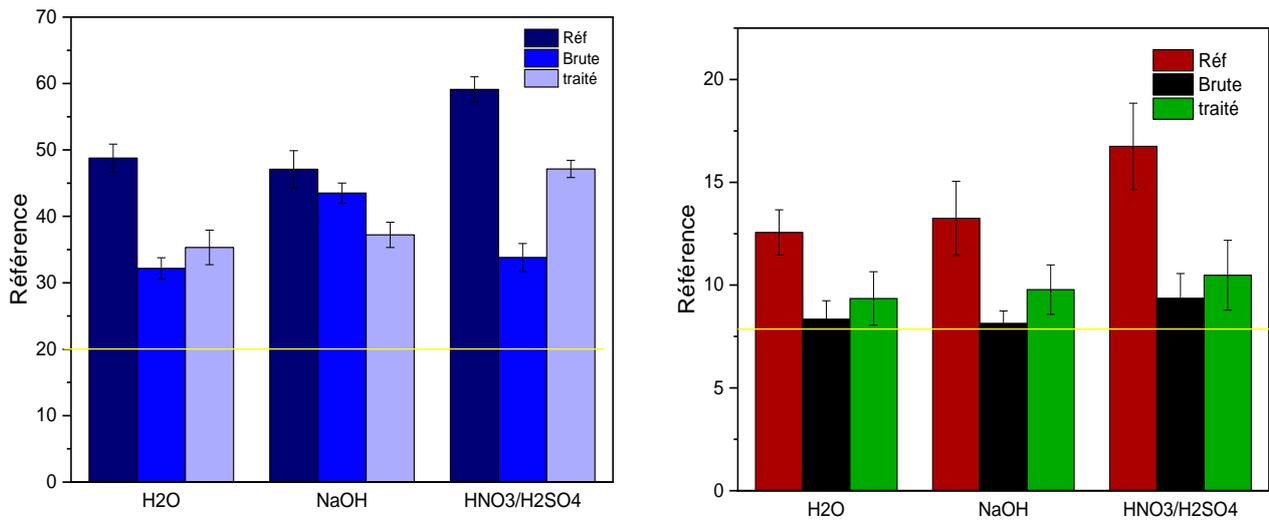


Figure 6. Valeurs de l'Indentation des asphaltes coulés AG1 (à droite) et AS1 (à gauche).

## IV. Fabrication des asphaltes coulés

La procédure de fabrication des AC est une étape importante afin d'avoir un bon mélange. Les quantités en granulats et en liant doivent être mélangées et associées suivant des exigences spécifiques en fonction des applications. Aussi, la durée du malaxage doit être parfaitement homogène. Aujourd'hui il existe des installations spécifiques pour effectuer la fabrication/formulation des asphaltes d'étanchéité. Les équipements de cette installation sont :

- Sécheur pouvant porter les granulats à haute température
- Dispositif de stockage calorifugé
- Dispositif de dosage et d'introduction des granulats et du liant
- Dispositif d'introduction des additifs
- Malaxeur à double enveloppe chauffée.

On distingue deux types de fabrication de l'asphalte coulé en usine, il s'agit de la fabrication discontinue et continue.

### IV.1. Fabrication discontinue en pétrin

Dans ce type de fabrication on peut utiliser la poudre d'asphalte naturel et notamment le bitume de pétrole, dans le cas d'instruction de la poudre d'asphalte naturel, il faut respecter l'ordonnance de versement sachant que le bitume d'ajout est le premier qui doit être introduit dans le pétrin (figure 7), ils viennent ensuite la poudre d'asphalte, le sable et les porphyres dans des proportions spécifiques à la formulation appliquée, le processus de fabrication dure quelques heures (de 4 à 8h en fonction de l'humidité des composants).

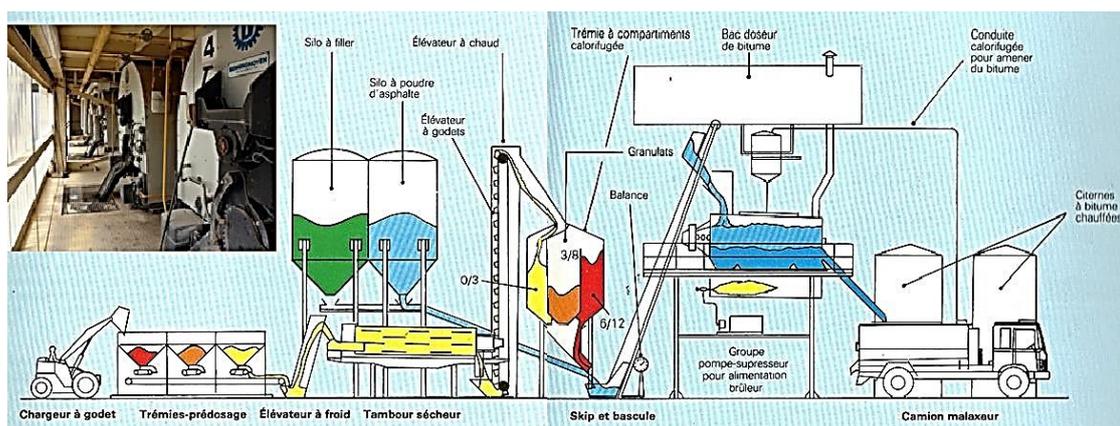


Figure 7. Fabrication en pétrin discontinue.

## IV.2. Fabrication continue en malaxeur rapide

Dans ce type de malaxage, seul l'opération de malaxage diffère (figure 8) et dure environ deux minutes, mais ne convient pas à la poudre d'asphalte. En effet, le type de malaxeur est le même que celui utilisé pour la production des enrobés, de plus un malaxage complémentaire dans les camions porteurs est nécessaire et même obligatoire avant la mise en œuvre.

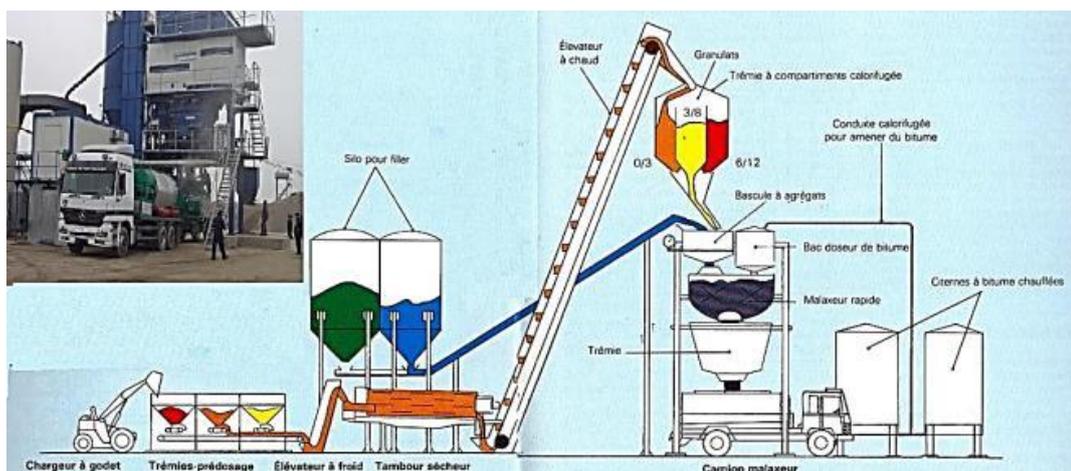


Figure 8. Fabrication continue en malaxeur rapide.

## IV.3. La température de formulation des asphaltes coulés

Selon la norme NF EN 12970, la température maximale de malaxage varie selon le type d'asphalte coulé en lien avec le grade de bitume utilisé. Les températures de malaxage des mastics coulés et asphaltes coulés sont présentés dans le tableau 5. Pour l'asphalte coulé fabriqué avec le bitume de grade 35/50 une température maximale est de 230°C. Les limites de température de malaxage ne doivent pas dépasser les seuils afin d'éviter la perturbation des propriétés mécaniques et rhéologiques des bitumes. En effet, un déséquilibre dans les températures de fabrication des AC peut engendrer une oxydation du liant (bitume), ce qui peut induire la dégradation des produits finaux (AC).

Tableau 6. Températures maximales de malaxage des asphaltes coulés.

Grade de liant (pénétrabilité en 1/10 mm)	Mastic d'asphalte coulé (C°)	Asphalte coulé à gros granulats (C°)
50/70	220	240
40/60	230	240
35/50	230	250
30/50	230	250
30/45	230	250
20/30	240	250
10/20	240	250
Asphalte naturel	240	250

#### IV.4. Le transport de l'asphalte coulé

Le transport des AC formulés, de l'usine jusqu'au chantier, est assuré par des camions malaxeurs modernes spécifiques, qui peuvent maintenir la température du mélange. Les camions ont une capacité qui varie de 6 à 22 tonnes. On distingue deux types camions malaxeurs, le premier est à axe horizontal (figure 9-à gauche) et le malaxeur à axe vertical et qui présente l'avantage d'effectuer les maintenances par le haut. Les malaxeurs à axe vertical (figure 9-à droite) exigent une orientation judicieuse des palettes pour diminuer le risque de décantation du matériau.



Figure 9. Malaxeur à axe vertical (à droite) - Malaxeurs à axe horizontal (à gauche).

#### IV.5. Essais de contrôle de la formulation des asphaltes coulés

Le tableau ci-dessous résume les paramètres clés pour la formulation et la fabrication des asphaltes coulés. A chaque étape de fabrication des asphaltes coulés des essais de contrôles et de vérification sont réalisés (tableau 7).

Principalement un contrôle spécifique est requis pour s'assurer du maintien de la température tout au long du process de formulation et de transport. Il est aussi indispensable de vérifier la stabilité du comportement mécanique des formulations à travers des essais d'indentation après la phase de formulation et après le transport jusqu'au lieu d'application de l'AC. Tous ces essais sont réalisés aux normes européennes en vigueur.

Tableau 7. Essais de contrôle des asphaltes coulés.

<b>FABRICATION</b>			
<b>ASPHALTE</b>	Température Malaxage  Indentation  Extraction	Spécifications Indicateur de rotation NF EN 12697- 21 NF EN 12697- 20  NFEN 12697-1	Permanent Permanent  Fin de chaque fabrication et en cas de correction
<b>TRANSPORT</b>			
<b>ASPHALTE</b>	Température  Température / Rotation	En usine  En cours de route	Au chargement En permanence ou au minimum toutes les 2 heures
<b>MISE EN OEUVRE</b>			
<b>SUPPORT</b>	Contrôle visuel	---	Au début et au cours Travaux
<b>Liaison avec le support</b>	Contrôle visuel	---	Permanent
<b>ASPHALTE</b>	Température  Epaisseur/Planéité Indentation	Spécifications  Spécifications NF EN 12697- 21/21	Au démarrage et régulièrement Permanent Retour chantier : un prélèvement mini.

## **V. Conclusion de la partie procédures de fabrication des matériaux et caractérisation mécanique (essais d'indentation)**

- Les fillers sédiments bruts ont un meilleur comportement dans les milieux acides. Ces résultats sont dus principalement à la minéralogie des sédiments, qui sont composés principalement de silice,
- Altération importante de la surface des échantillons exposés au milieu acide pour l'échantillon témoin et ceux de sédiments traités à la chaux dus probablement aux teneurs élevés des carbonates dans ces fillers,
- Les échantillons d'asphalte coulé résistent bien aux milieux alcalins et gardent un état de surface sans aucune altération,
- Les indentations des échantillons misent dans l'eau préserve leur propriétés mécaniques initiales et gardent également un état de surface sans aucune altération.

## VI. Références

- [1] C. Alzieu, “Dragages et environnement marin,” *Rapp. IFREMER*, p. 223, 1999.
- [2] V. A. Berteau I, Martin S, “Le curage des cours d’eau et les élémentstraces toxiques,” *Le Courr. l’environnement l’INRA*, vol. 20, pp. 27–35, 1993.
- [3] Vincent DUBOIS, “Mémoire de thèse intitulé Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins – Valorisation en technique routière Présenté par Vincent DUBOIS Pour l ’ obtention du grade de Docteur de l ’ Université d ’ Artois,” 2006.
- [4] “Le réseau navigable et portuaire en bassin de navigation Nord - Pas-de-Calais 2018.” [Online]. Available: [http://www.nordpasdecals.vnf.fr/IMG/pdf/pages\\_de\\_observ\\_transport\\_fluvial\\_2017\\_p5.pdf](http://www.nordpasdecals.vnf.fr/IMG/pdf/pages_de_observ_transport_fluvial_2017_p5.pdf).
- [5] P. Scordia, “Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers To cite this version : HAL Id : tel-00339371 Délivrée par,” 2008.
- [6] M. Amar, M. Benzerzour, J. Kleib, and N. E. Abriak, “From dredged sediment to supplementary cementitious material: characterization, treatment, and reuse,” *Int. J. Sediment Res.*, vol. 36, no. 1, pp. 92–109, 2021, doi: 10.1016/j.ijsrc.2020.06.002.
- [7] S. Brakni, N. E. Abriak, and P. Grégoire, “Valorisation de boues de dragage maritime en granulats artificiels en vue de stabiliser l ’ érosion littorale,” *25ème rencontres l’AUGC, 23-25 mai 2007 à Bordeaux*, p. 8, 2007.
- [8] C. S. Burke, E. Salas, K. Smith-Jentsch, and M. A. Rosen, “Measuring macrocognition in teams: Some insights for navigating the complexities,” *Macrocognition Metrics Scenar. Des. Eval. Real-World Teams*, pp. 29–43, 2012, doi: 10.1201/9781315593173-4.
- [9] K. Mirković, N. Tošić, and G. Mladenović, “Effect of Different Types of Fly Ash on Properties of Asphalt Mixtures,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/8107264.
- [10] V. Sharma, S. Chandra, and R. Choudhary, “Characterization of fly ash bituminous concrete mixes,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 12, pp. 1209–1216, 2010, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000125.
- [11] R. Mistry and T. K. Roy, “Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt,” *Perspect. Sci.*, vol. 8, pp. 307–309, 2016, doi: 10.1016/j.pisc.2016.04.061.

- [12] E. G. Bautista, J. Flickinger, R. Saha, I. Flores-Vivian, A. F. Faheem, and K. Sobolev, “Effect of Coal Combustion Products on high temperature performance of asphalt mastics,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 572–578, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.022.
- [13] B. S. Yoo, D. W. Park, and H. V. Vo, “Evaluation of Asphalt Mixture Containing Coal Ash,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, no. 1997, pp. 797–803, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.027.
- [14] Ş. Sargin, M. Saltan, N. Morova, S. Serin, and S. Terzi, “Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 390–397, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.029.
- [15] U. Rongali, G. Singh, A. Chourasiya, and P. K. Jain, “Laboratory Investigation on Use of Fly Ash Plastic Waste Composite in Bituminous Concrete Mixtures,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 104, pp. 89–98, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.101.
- [16] R. Romastarika *et al.*, “Effect of black rice husk ash on the physical and rheological properties of bitumen,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1875, no. August, 2017, doi: 10.1063/1.4998383.
- [17] R. Kushwaha, “Effect of Rise Husk Ash as Mineral Filler in Mastic Asphalt,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 3515–3522, 2018, doi: 10.22214/ijraset.2018.3736.
- [18] S. Wu, J. Zhu, J. Zhong, and D. Wang, “Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 6, pp. 2883–2887, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.040.
- [19] F. Wagaw, P. Emer, T. Quezon, and A. Geremew, “Evaluation of the Performance of Brick Dust as a Filler Material for Hot Asphalt Mix Design : A Case Study in Jimma Zone,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 3, pp. 64–72, 2018, doi: 10.9790/1813-0703026472.
- [20] M. A. Kadhim *et al.*, “Evaluating the Cracking Performance Indices of Half-Warm Mix Asphalt Comprising Waste Glass,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, no. 0123456789, 2021, doi: 10.1007/s42947-021-00087-1.
- [21] A. Simone *et al.*, “Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 20, no. 3, pp. 592–607, 2019, doi: 10.1080/14680629.2017.1407818.
- [22] M. Saltan, B. Öksüz, and V. E. Uz, “Use of glass waste as mineral filler in hot mix asphalt,” *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 271–277, 2015, doi: 10.1515/secm-2013-0135.
- [23] G. G. Al-Khateeb, T. S. Khedaywi, and M. F. Irfaeya, “Shear properties of waste glass-

- asphalt mastics,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 307–314, 2019, doi: 10.1007/s42947-019-0037-9.
- [24] M. Baby *et al.*, “Laboratory Study on Using Waste Glass as Filler in Bituminous Mixes,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 7, pp. 1333–1337, 2017.
- [25] J. Choudhary, B. Kumar, and A. Gupta, “Utilization of Waste Glass Powder and Glass Composite Fillers in Asphalt Pavements,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2021, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1155/2021/3235223.
- [26] FOUCAULTE.A & RAOULT.JF, *Dictionnaire de géologie éd. Masson*. 1980.
- [27] Jacques BEAUCHAMP, “sediment et roches sédimentaires,” 2013.
- [28] online available, “Sédiment de dragage.”
- [29] G.SHNEIDER, “Boue de curage des cours d’eau .Le courrier de l’environnement de l’INRA,” vol. 43, pp. 146–147, 2001.
- [30] X. Tang, M. Wu, X. Dai, and P. Chai, “Phosphorus storage dynamics and adsorption characteristics for sediment from a drinking water source reservoir and its relation with sediment compositions,” *Ecol. Eng.*, vol. 64, pp. 276–284, 2014, doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.01.005.
- [31] P. H. I. C. Aracterisation, D. E. S. Sediments, E. T. Qualite, M. Lydia, M. D. Fecteau, and R. Galvez-cloutier, “Équipe de travail Université Laval,” 2014.
- [32] G.SHNEIDER, “Boue de curage des cours d’eau .Le courrier de l’environnement de l’INRA,” vol. 43, pp. 146–147, 2001.
- [33] H. A. L. Id, “Etude spectroscopique en conditions hydrodynamiques contrôlées du transfert des espèces organiques à l’ interface minéral / solution Benoît Rusch To cite this version : HAL Id : tel-01748209 soutenance et mis à disposition de l’ ensemble de la Contact ;,” 2018.
- [34] M. AMAR, “Etude Experimentale Et Nuemerique De La Valorisaion Des Sediments De Dragage Dans Les Matrices Cimentaires,” 2017.
- [35] T. N. Thanh, N. Edine, and A. Laboratoire, “Présentée par Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière,” 2009.
- [36] Anne Gosselin, “Protocole d’évaluation de la traitabilité des sédiments, des sols et des boues à l’aide des technologies minéralurgiques,” p. 134, 1999.
- [37] D. Wang, R. Zentar, N. E. Abriak, and X. Weiya, “Determination Des Caracteristiques

- Physiques De Sediments Fins De Dragage,” *Journées Natl. Géotechnique Géologie l’Ingénieur JNGG2010*, pp. 345–352, 2010.
- [38] online available, “water category in the soil.”
- [39] A. Kasmi, “Prétraitement et traitement des sédiments fluviaux en vue d ’ une valorisation en technique routière,” 2014.
- [40] Kribi souhila, “Décomposition des matières organiques et stabilisation des métaux lourds dans les sédiments de dragage Introduction générale,” 2005.
- [41] David COLIN, “valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière,” Caen, 2003.
- [42] Géraldine Sarret, “Biogéochimie structurale du zinc et du plomb par spectroscopie EXAFS : interactions avec des acides humiques, des parois cellulaires de champignon et des lichens,” 1998.
- [43] F. J. Stevenson, *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions, 2nd Edition*. 1994.
- [44] M.MAROT, *Le compost*, François D. 1987.
- [45] M. Benzerzour, M. Amar, and N. E. Abriak, “New experimental approach of the reuse of dredged sediments in a cement matrix by physical and heat treatment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 432–444, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.142.
- [46] Pommier L, “Pistes de valorisations à terre des boues et sédiments de dragage portuaire en France et en Europe,” *Bretagne vivante.*, p. 48, 2011.
- [47] GEODE, “Dragages et immersions en mer et en estuaire. Revue des bonnes pratiques environnementales.,” p. 90, 2018.
- [48] C. Ospar, “Bilan de santé 2000,” 2000.
- [49] “Suivis environnementaux des opérations de dragage et d ’ immersion Guide méthodologique,” 2012.
- [50] M. L. Cazalet, M. Loustau, and C. Caractérisation, “Caractérisation physico-chimique d ’ un sédiment marin traité aux liants hydrauliques : Évaluation de la mobilité potentielle des polluants inorganiques To cite this version : HAL Id : tel-00749917 Thèse Caractérisation physico-chimique d ’ un sédiment ma,” 2012.
- [51] T. Thanh and H. Nguyen, “Stabilisation des sols trait ’ es ` a la chaux et leur comportement au gel Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel,” 2015.

- [52] A. Gouzy and J.-M. Brignon, “Les PolyChloroBiphenyles (PCB). Rapport INERIS,” 2011.
- [53] K. Abbes, L. Bizzozero, K. Jacqueline-boutros, and K. Jean, “Les polychlorobiphényles. Un problème nouveau pour une pollution ancienne,” *Ec. des Hautes Etudes en Santé Publique*, pp. 2009–2010, 2010.
- [54] J.-M. Brignon, “TBT,” pp. 1–18, 2005.
- [55] I. KHEZAMI, “Approche expérimentale de valorisation des sédiments de dragage dans des applications de Génie Civil,” p. 228, 2014.
- [56] R. Achour, “Valorisation et caractérisation de la durabilité d ’un matériau routier et d ’un béton à base de sédiments de dragage,” *Thèse Dr. Univ. Lille*, p. 199, 2013.
- [57] “Rédaction des études d ’ impact d ’ opérations de dragage et d ’ immersion en milieu estuarien et,” 2014.
- [58] C. Mouvet, “BRGM, Test du protocole d’écotoxicologie (critère H14) pour l’évaluation du caractère dangereux de sédiments destinés à une gestion à terre.”
- [59] F. Hennebert, P et Rebischung, “Classification réglementaire des déchets – Guide d’application pour la caractérisation en dangerosité.”
- [60] B. Rp--fr, “Protocole pour l ’ évaluation de l ’ écotoxicité de sédiments destinés à une gestion à terre Rapport final,” 2012.
- [61] C. Mangeant, “Dragages et gestion des sédiments.”
- [62] N. F. En *et al.*, “2- Valeurs limites pour le contenu total des paramètres organiques,” no. i, 2003.
- [63] UNICEM, “PARUTION DES CHIFFRES CLÉS 2018,” *UNICEM*, 2018.
- [64] H. Azrar, “Contribution à la valorisation des sédiments de dragage portuaire : technique routière , béton et granulats artificiels,” 2014.
- [65] E. Rozière, M. Samara, A. Loukili, and D. Damidot, “Valorisation of sediments in self-consolidating concrete: Mix-design and microstructure,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.080.
- [66] A. ZRI, “Mise en place d’une nouvelle approche de formulation d ’ une matrice cimentaire à base de sable de dr agage : application aux bétons de sables et granulats,” p. 196, 2010.
- [67] “Ballastière d ’ Yville-sur-Seine : retour à la nature.”

- [68] “viasphalt-bt-et-tbt-rgra-juillet-aout-2013.pdf.” .
- [69] “NF EN 12970 Asphalte coulé pour étanchéité Définitions, spécifications et méthodes d’essai.”
- [70] P. Rode and H. Veerman, “The Mastic Asphalt Industry – A Global Perspective Final version IMAA / HSE Working Group March 2013 The Mastic Asphalt Industry – A Global Perspective,” no. March, 2013.
- [71] “STRRES – 7 février 2017 Réparation de l’étanchéité des Ouvrages d’Art en asphalte coulé,” 2017.
- [72] “Toiture parking et ouvrages d’art.”
- [73] “RÉPARATIONS À L’ASPHALTE COULÉ.” [Online]. Available: <http://www.mobilmat.be/fr/reparations-a-l-asphalte-coule/>.
- [74] “piste cyclable à l’asphalte coulé.” [Online]. Available: [https://pumptechnics.pmg.be/fr/dossier/MISbe1804A05\\_00](https://pumptechnics.pmg.be/fr/dossier/MISbe1804A05_00).
- [75] “Norme européenne Bitume et liant bitumineux-Terminologie .pdf.” .
- [76] M. Bilski, “Natural asphalts – properties and use,” *Arch. Inst. Inżynierii Lądowej*, vol. 27, no. February, pp. 25–36, 2018, doi: 10.21008/j.1897-4007.2018.27.02.
- [77] E. J. Moore, “U . S . Geological Survey Professional Paper 1228-E Availability of Books and Maps of the U . S . Geological Survey,” 1992.
- [78] 1929- Yen, T. F. (Teh Fu), 1927- | Chilingar, George V., *Bitumens, asphalts, and tar sands*. 1978.
- [79] E. Y. H. Chen, *A global perspective THE BITUMEN INDUSTRY*, vol. 10, no. 2. 2000.
- [80] R. N. Hunter and J. Read, *The Shell bitumen handbook*. 2003.
- [81] J. G. Speight, “Petroleum asphaltenes - Part 2: The effect of asphaltenes and resin constituents on recovery and refining processes,” *Oil Gas Sci. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 479–488, 2004, doi: 10.2516/ogst:2004033.
- [82] L. Groupement, “Numéro spécial 1,” *Bitume.info*, pp. 1–35, 2005.
- [83] J. Eyssautier *et al.*, “Caractérisation et Modélisation des Asphaltènes en Conditions Réactionnelles d ’ Hydrotraitement To cite this version : Thèse,” 2012.
- [84] W. Pauchet, “Les revêtements à base de bitume et d ’ asphalte TBA1907 – Les revêtements

- à base de bitume et d'asphalte," vol. 33, no. 0, 2018.
- [85] "Norme 1427 Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode Bille et Anneau."
- [86] "NF EN 12593 Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de fragilité Fraass."
- [87] M. S. Mamlouk and J. P. Zaniewski, *Materials for Civil and Construction Engineers*. 2011.
- [88] "NF EN 13302 Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la viscosité dynamique des liants bitumineux à l'aide d'un viscosimètre tournant."
- [89] "NF EN 12970 Déc 2000 Asphalte coulé étanchéité - Définitions, spécifications et méthodes d'essai - Version allemande EN 12970:2000." .
- [90] P. Administratives and E. T. T. Communes, "CAHIER DES CHARGES DE L'OFFICE DES ASPHALTES FASCICULE 10 PRESCRIPTIONS ADMINISTRATIVES ET TECHNIQUES COMMUNES," 2012.
- [91] "la fabrication L'asphalte coulé." [Online]. Available: <https://www.asphaltes.org/fabrication/>.
- [92] "la fabrication L'asphalte coulé." .
- [93] ENVISAN NV, "Travaux ENVIRONNEMENTAUX," 2013.
- [94] S. Chimie, T. Glachet, and M. X. Franck, "THÈSE Pour obtenir le diplôme de doctorat synthèse de NH-sulfoximines et de 3H-diazirines Présentée et soutenue par," no. Umr 6614, 2019.
- [95] "UTILISATION DU GÉOTUBE DANS LA DÉSHYDRATATION DE BOUE, FRANCE."
- [96] "fonctionnement des Geo-tube." [Online]. Available: <https://www.geoace.com/fr/products/Sacs%2C-tubes-et-conteneurs-en-géotextile/ACETube®-pour-système-d%27assèchement>.
- [97] M. Miraoui, "Mise en œuvre d'une démarche de prétraitement et de traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil," *Thèse Dr. Univ. des Sci. Technol. Lille 1*, p. 255, 2010.
- [98] W. Water, "Presse à Vis HUBER Q-PRESS ® Performances :"
- [99] "fonctionnement de la désydratation centrifuge."
- [100] M. Ahmad, "Valorisation des boues de dragage - Application: Port autonome de

- Dunkerque,” pp. 1–104, 2002.
- [101] F. Agostini, F. Agostini, and E. Centrale, “Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins To cite this version : HAL Id : tel-00119833 Inertage et valorisation des sédiments de dragage marins,” 2006.
- [102] Ahmed ZERAOUI, “Approche opérationnelle pour une gestion durable des sédiments de dragage dans des filières de génie civil.”
- [103] S. G. (SG) Doriane Delanghe (DD), “NF P94-048 détermination de la teneur en carbonate,” 2018.
- [104] “NF P94-048 Détermination de la teneur en carbonate.pdf.” .
- [105] J. Goupy and L. Creighton, “Introduction aux plans d ’ expériences 3.”
- [106] A. el M. Safhi, “Valorisation des sédiments de dragage dans des bétons autoplaçants : optimisation de la formulation et étude de la durabilité.,” p. 170, 2020.
- [107] Ti, “Plans d ’ expériences,” *Tech. l’Ingénieur*, vol. 33, no. Version 16, pp. 1–26, 2016.
- [108] “Scheffe Mix Models.” [Online]. Available: <https://www.statease.com/docs/v11/contents/mixture-designs/scheffe-mix-models/>.
- [109] H. Taherkhani and S. Vahabi Kamsari, “Evaluating the properties of zinc production wastes as filler and their effects on asphalt mastic,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, p. 120748, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120748.
- [110] “NF EN ISO18757 Determination of specific surface area of ceramic powders by gas adsorption using the BET method.” .
- [111] V. Antunes, A. C. Freire, L. Quaresma, and R. Micaelo, “Effect of the chemical composition of fillers in the filler-bitumen interaction,” *Construction and Building Materials*, vol. 104, pp. 85–91, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.042.
- [112] V. Antunes, A. C. Freire, L. Quaresma, and R. Micaelo, “Influence of the geometrical and physical properties of filler in the filler-bitumen interaction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 76, pp. 322–329, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.008.
- [113] H. U. Bahia, “Test Methods and Specification Criteria for Mineral Filler Used in HMA Research Team – NCHRP Project 9-45 • Results are based on NCHRP Project :,” 2011.
- [114] P. S. Kandhal, C. Y. Lynn, and F. Parker, “Characterization tests for mineral fillers related to performance of asphalt paving mixtures,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1638, pp. 101–110, 1998,

doi: 10.3141/1638-12.

- [115] A. F. Faheem, H. U. Bahia, S. H. Yang, and I. Al-Qadi, “Evaluation of Rigden fractional voids test method and the relation to mastic viscosity,” *Asph. Paving Technol. Assoc. Asph. Paving Technol. Tech. Sess.*, vol. 79, pp. 1–25, 2010.
- [116] “The Use of Standards for Hot Mixtures (Se’ tra, 2008).”
- [117] “EN 13043 Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels.” .
- [118] “NF EN 12697-35 Malaxages bitumineux.pdf.” .
- [119] “Entreprise Nord asphalte.” [Online]. Available: <http://www.nordasphalte.fr/>.
- [120] F. HAMOUCHE, “Influences des matières organiques sur les propriétés physiques et le comportement mécanique des sédiments de dragage en vue d’une valorisation dans les travaux publics,” 2018.
- [121] T. Ch, “Rapport technique / domaine des travaux spéciaux Contenu : Asphalte coulé ( étanchéité de pont ),” pp. 1–8, 2017.
- [122] F. Doucet and B. Auger, *Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des Transports du Québec*. 2009.
- [123] M. N. Modélisation, “Modélisation numérique discrète des matériaux bitumeux To cite this version : HAL Id : tel-01591067 Spécialité : Génie Civil Minh-Duc NGUYEN,” 2017.
- [124] J. Di Benedetto, H. & Corté, “Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges bitumineux.,” *Hermès Lavoisier*, 2005.
- [125] Q. T. Nguyen, M. L. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, E. Chailleux, and T. T. N. Hoang, “Nonlinearity of bituminous materials for small amplitude cyclic loadings,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 20, no. 7, pp. 1571–1585, 2019, doi: 10.1080/14680629.2018.1465452.
- [126] H. Di Benedetto, M. N. Partl, L. Francken, C. D. La Roche, and S. André, “Stiffness testing for bituminous mixtures. RILEM technical committes 182-PEB performance testing and evaluation of bituminouss materials,” *Mater. Struct.*, vol. 34, no. March, pp. 66–70, 2001.
- [127] F. Doucet and B. Auger, *Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des Transports du Québec*. 2009.
- [128] A. Subhy, “Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 28–45, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.147.

- [129] G. Tan, W. Wang, Y. Cheng, Y. Wang, and Z. Zhu, “Establishment of complex modulus master curves based on generalized sigmoidal model for freeze-thaw resistance evaluation of basalt fiber-modified asphalt mixtures,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 8, 2020, doi: 10.3390/POLYM12081698.
- [130] J. Zhang, C. Sun, P. Li, M. Liang, H. Jiang, and Z. Yao, “Experimental study on rheological properties and moisture susceptibility of asphalt mastic containing red mud waste as a filler substitute,” *Construction and Building Materials*, vol. 211, pp. 159–166, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.252.
- [131] S. Coutant, A. Bruel, F. Gervais, J.-M. Lagel, J.-L. Ménard, and J. M. Philippe, “L’asphalte pour les aires d’exercice des bovins.” p. 38, 2018.
- [132] C. Gorkem and B. Sengoz, “Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2227–2236, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.001.
- [133] F. Xiao and S. N. Amirkhanian, “Laboratory investigation of moisture damage in rubberised asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 319–328, 2009, doi: 10.1080/10298430802169432.
- [134] L. Struble, W. Buttlar, and A. Apeageyi, “Investigation of Alkali-Silica Reaction in asphalt mixtures exposed to potassium acetate deicing solution,” *Adv. Test. Charact. Bitum. Mater.*, pp. 463–476, 2009, doi: 10.1201/9780203092989.ch45.

