

TP 3B : CARACTERISATION DES MATERIAUX BITUMINEUX

TRINOME 10 : BRICE DRAPIEWSKI / GUILLAUME LIBERT / MOHAMED MEKOUI

INTRODUCTION

Les matériaux de chaussée bitumineux sont des mélanges en proportions bien définies de gravillons, de sables et de filler avec un liant bitumineux et éventuellement des additifs. Dans un souci de respect de l'environnement, des nouveaux procédés de fabrication sont apparus. Ce sont des matériaux qui sont enrobés à une température plus basse que celle utilisée pour les enrobés classiques (à chaud). Ils permettent d'obtenir des produits plus facilement recyclables tout en émettant moins de GES. On peut également signaler un gain d'énergie et donc pécuniaire également non négligeable.

Ce TP propose de comparer une méthode de formulation et deux méthodes de fabrication d'enrobé bitumineux, la première classique dite « à chaud » (160 °C) et la seconde à basse température (90 °C). L'enrobé obtenu doit satisfaire les propriétés mécaniques adaptées à une couche de surface d'une chaussée bitumineuse.

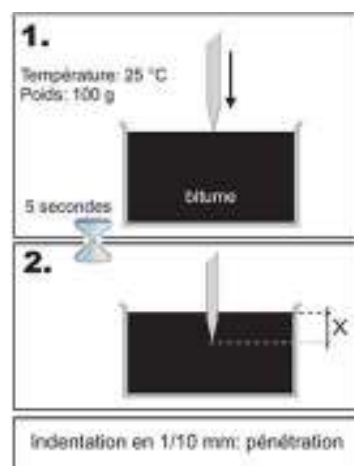
L'étude est composée de 4 grandes phases :

1. Choix des composants minéraux (granulats) et du liant bitumineux
2. Formulation (teneur en liants), de façon à ce que les granulats soient correctement enrobés. Le but est d'assurer la durabilité du mélange et de compacter le matériau sur chantier au pourcentage des vides souhaité
3. Fabrication : méthode « Marshall »
4. Validation de la formulation : mesure du pourcentage des vides (ou compacité) et par un essai mécanique

1. LE LIANT BITUMINEUX ET LES GRANULATS

Les caractérisations traditionnelles et la classification des liants routiers reposent sur un ensemble d'essais normalisés. Etant donné la très grande variation de la consistance des bitumes dans leur domaine d'application et d'usage (entre -40 et 200 °C), chaque essai ne peut être réalisé que sur une partie, voire en un point de la plage des températures.

LA PENETRABILITE

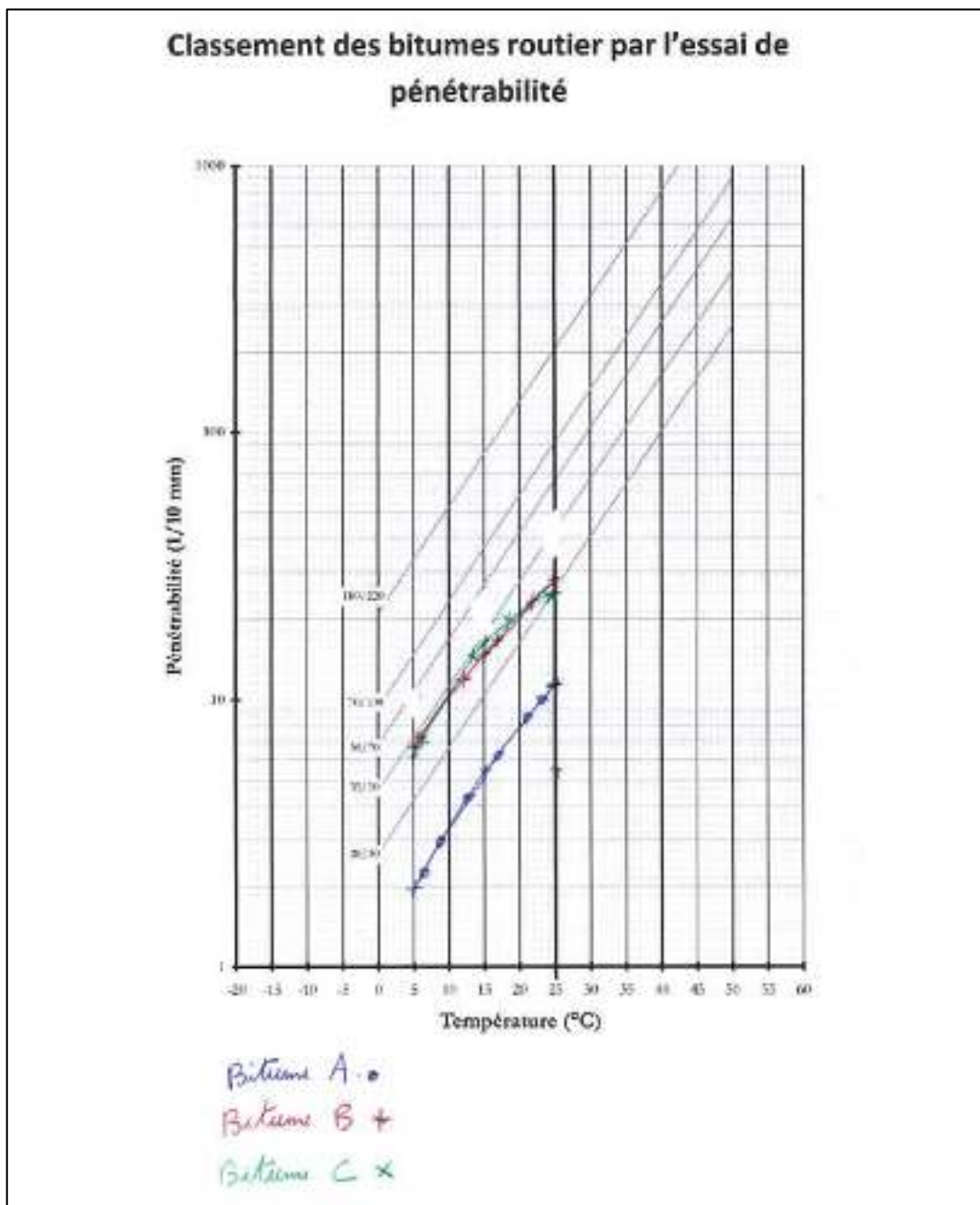


L'essai de pénétrabilité permet d'obtenir une indication de la consistance du liant. En le réalisant à plusieurs températures, la susceptibilité thermique du liant est déterminée.

C'est un essai normalisé qui consiste à enfoncer une aiguille dans le bitume. La charge, le temps de charge et la température sont normalisés (voir schéma ci-contre). La pénétrabilité (pen) est mesurée en 1/10mm.

Pour ce TP, 4 liants bitumineux ont été présélectionnés. Nous avons mesuré la pénétrabilité de ces 4 bitumes aux températures suivantes : 5 °C, 15 °C, 25°C. Voici les courbes d'évolution de la pénétrabilité en fonction de la température.

Graphique des différents résultats obtenus pour chaque bitume :



Tableaux récapitulatifs des essais au pénétromètre :

Bitume A				
Température du bain-marie		5°C	15°C	25°C
Mesures de pénétrabilité	1	7	6	14
	2	1	6	13.5
	3	3	5	12
	Moyenne	2	5.5	13
Classification		Sous la courbe pen=20/30		

: Mesure non prise en compte (poinçonnement)

Bitume B				
Température du bain-marie		5°C	15°C	25°C
Mesures de pénétrabilité	1	6.5	16	28
	2	7	15	28
	3	6	14	27
	Moyenne	6.5	15	25
Classification		2/3 de courbe sur 35/50 1/3 sur la courbe 20/30		
Bitume C				
Température du bain-marie		5°C	15°C	25°C
Mesures de pénétrabilité	1	6	18	26
	2	5	17	25
	3	6	17	24
	Moyenne	6	17	25
Classification		1/2 sur la courbe 35/50 ½ sur la courbe 20/30		

OBSERVATIONS : On remarque qu'il sera difficile d'utiliser un bitume dans la classification recherchée de pen=50/70. Le bitume le plus proche est **le bitume B.**

On remarque que ces résultats sont difficilement exploitables et cela pour plusieurs faits :

- Tout d'abord, les poinçonnements sont nombreux au niveau de la surface de l'échantillon ce qui a parfois provoqué des manipulations longues. Ceci a peut être entraîné un réchauffement prématuré de certains échantillons impliquant des résultats erronés.
- Les échantillons pratiqués sont relativement anciens ce qui a peut-être engendré des modifications des caractéristiques des bitumes testés.

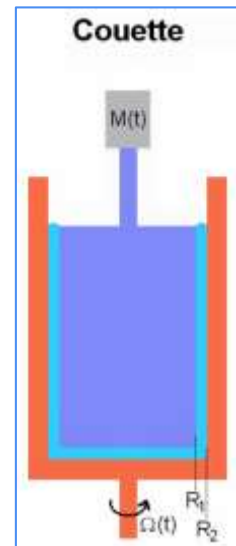
CONCLUSION : Plus la température est importante, plus la pénétrabilité augmente ce qui indique une plus grande souplesse de l'enrobé. La rigidité de l'enrobé est donc une fonction décroissante de la température.

LA VISCOSITE DYNAMIQUE DU BITUME

La viscosité dynamique η est définie comme la propriété d'un fluide d'opposer une résistance à tout déplacement. Elle s'exprime en Pa.s (anciennement en poise, 1 Pa.s = 10 Po) et vérifie l'équation suivante :

$$\tau = \eta * D \quad (\text{Avec } \tau : \text{contrainte et } D : \text{taux de cisaillement})$$

Un rhéomètre permet de mesurer la viscosité dynamique du bitume. Pour ce TP nous utilisons un rhéomètre dont la géométrie est de type Couette : le matériau est cisailé entre deux cylindres coaxiaux, l'un mobile et l'autre fixe comme le montre le schéma ci-contre. Il est équipé d'un capteur de couple M.



Champ de contrainte de cisaillement τ :

$$\text{On a : } \tau = \frac{F}{S}$$

$$\text{Avec : } F = \frac{M}{r}$$

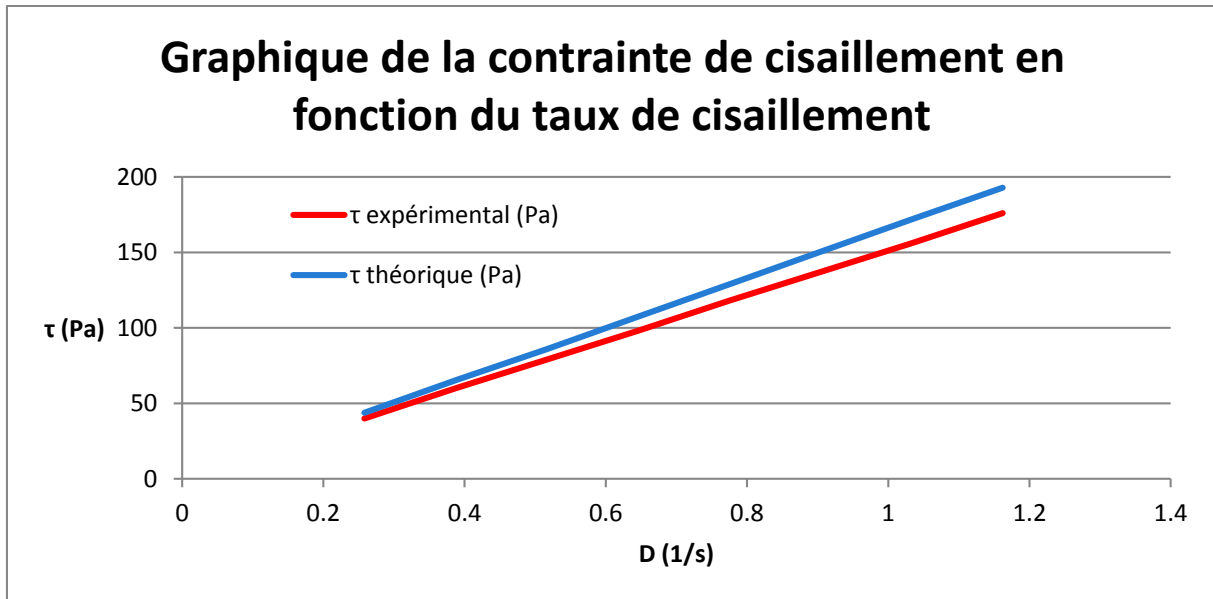
$$\text{D'où : } d\tau = \frac{M}{2 * \pi * h * r^2} dr$$

En intégrant on obtient la valeur moyenne, $\tau_{moy} = \frac{1}{R1.R2} \frac{M}{2 * \pi * h}$ avec $R1 = 22,5\text{mm}$, $R2 = 24,4\text{mm}$ et $h = 67,5\text{mm}$

Voici les valeurs obtenues par calcul et par expérimentation ainsi que le rhéogramme du bitume testé :

v (tour/min)	M (mN.m)	τ expérimental (Pa)	τ théorique (Pa)	D (1/s)	η (Pa.s)	T (°C)
0.2	10.2	40	44	0.2582	154	63.8
0.3	15.2	60	65	0.3873	153	63.9
0.4	20	79	86	0.5164	153	63.9
0.5	25	98	107	0.6455	153	63.9
0.6	30	118	129	0.7746	153	63.9
0.7	35	137	150	0.9036	153	63.9
0.8	40	156	172	1.033	152	63.9
0.9	44.9	176	193	1.162	151	63.9
1	47	184	202	1.291	142.6	63.9

Les essais que nous avons effectués avec le rhéomètre ont été faits à température constante. Ainsi le comportement visqueux du matériau n'est pas modifié par une variation de sa température.



On observe que la courbe expérimentale est très proche de la courbe théorique. L'évolution de la contrainte de cisaillement est linéaire et croissante en fonction du taux de cisaillement D.

Le bitume étudié peut donc être assimilé à un fluide newtonien, en effet sa loi contrainte / vitesse de déformation est linéaire. La pente du rhéogramme est la viscosité dynamique $\eta = 150 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

2. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX

Les composants minéraux constituent environ 95% de la masse d'un enrobé bitumineux (80-85 % du volume). On quantifie une classe granulaire d/D par la taille du plus petit grain d et du plus gros grain D la constituant.

D'après la courbe granulométrique en annexe on obtient les quantités de matériaux suivantes :

Matériau	Proportion	Masse (g)
Sable 0/2	31%	1860
Gravillon 2/6	39%	2340
Gravillon 6/10	27%	1620
Fines	3%	180
	100%	6000

Le liant bitumineux a pour but de former l'interface entre les granulats sous forme d'un film plus ou moins épais. Les propriétés mécaniques et thermiques dépendent du volume de liant introduit dans sa composition.

On approxime la surface spécifique Σ par la formule suivante :

$$100 * \Sigma = 0.17 * G + 0.33 * g + 2.3 * S + 12 * s + 135 * f$$

Avec : G : % gravillon >11 ; g : % gravillon 6/11 ; S : % sable 0.3/6, s : % sable 0.08/0.3 ; f % filler < 0.08
G = 0%, g = 27%, S = 54%, s = 10%, f = 9%

D'où $\Sigma = 14,7 \frac{m^2}{kg}$

On peut obtenir une estimation de la teneur en liant avec la formule expérimentale suivante :

$$P = k * \Sigma \frac{1}{s} = 6\%$$
 Avec $k = 3.5$: module de richesse

Le but des calculs précédents est d'obtenir la quantité de liant à mélanger aux composants minéraux. En calculant la surface spécifique du mélange de minéraux on estime la surface de matériaux à enrober. Ensuite la teneur en liant peut-être calculée, le module de richesse k influe sur la rigidité du bitume obtenu. Plus il est élevé (donc une teneur en liant plus élevée), plus le bitume est souple.

FABRICATION A BASSE TEMPERATURE (EBT®)

Ce type de fabrication présente l'avantage d'être plus économe en énergie et d'émettre moins de GES. Elle est donc plus économique que la fabrication à chaud d'un point de vue financier. Par ailleurs, la santé des ouvriers est sensiblement améliorée car cette technique dégage moins de gaz toxiques.

La fabrication à basse température provoque un effet mousse lors du malaxage qui permet d'enrober plus facilement les granulats.

Dans ce TP, nous avons réalisé un échantillon de bitume avec une teneur en eau $w = 7.5\%$. Pour cela, nous avons prélevé 20% des sables du mélange (372g), puis en ajoutant 27.9g d'eau.

COMPACTAGE

Après le malaxage des minéraux avec le liant, nous avons compacté le bitume obtenu. La méthode utilisée est appelé méthode Marshall. Elle consiste à appliquer 25 coups sur chaque face de l'échantillon à l'aide d'une dame normalisée.

4. VALIDATION

DETERMINATION DE LA COMPACTITE

Après cet exercice de compactage particulier, l'objectif est maintenant de connaître la teneur en vide de notre échantillon. Pour cela, nous devons procéder de la manière suivante :

- Tout d'abord, en s'appuyant sur les valeurs en masse de la formulation de l'enrobé, nous calculerons la masse volumique réelle.
- Dans un deuxième temps, nous effectuerons par simple mesure du dimensionnement de l'échantillon, un calcul de la masse volumique géométrique
- Puis nous terminerons cette partie par un calcul de la masse volumique apparente à l'aide d'un dispositif de balance appliqué au principe d'Archimède

- **Calcul de la masse volumique réelle :**

$$\text{Gravillons} = 2.73 \text{g/cm}^3$$

$$\text{Filler} = 2.7 \text{g/cm}^3$$

$$\text{Sable} = 2.67 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Bitume} = 1.03 \text{ g/cm}^3$$

Calcul des quantités de matériaux en comprenant le bitume :

Matériau	Proportion	Masse (g)
Sable 0/2	28.18%	1860
Gravillon 2/6 (sable)	35.45%	2340
Gravillon 6/10	24.54%	1620
Fines	2.73%	180
Bitume	6%	600
	100%	6600

$$\begin{aligned} \text{Masse volumique réelle} &= 0.2454 \times 2.76 + 0.6363 \times 2.67 + 0.273 \times 2.7 + 0.06 \times 1.03 \\ &= \mathbf{2.51 \text{ Kg/m}^3} \end{aligned}$$

• **Détermination de la teneur en vides géométrique des éprouvettes :**

Afin de déterminer la teneur en vides géométrique, nous calculons tout d'abord le volume des éprouvettes :

$$\text{Hauteur mesurée} = 7.10 \text{ cm} \quad \text{Diamètre de l'éprouvette : } D = 10.16 \text{ cm}$$

$$\text{Soit Volume de l'éprouvette} = \pi \times R^2 \times h = 3.14 \times 5.08^2 \times 7.1 = 575.328 \text{ cm}^3$$

Nous avons pesé au préalable la masse de l'éprouvette : $m = 1228 \text{ g}$

Grace au volume et à la masse, nous pouvons calculer la masse volumique géométrique :

$$\text{Masse volumique géométrique} = \frac{\text{masse de l'éprouvette}}{\text{Volume de l'éprouvette}} = \frac{1228}{575.328} = 2.1344 \text{ kg/m}^3$$

Grâce à la valeur de masse volumique réelle obtenue auparavant, nous pouvons calculer la teneur en vide géométrique :

$$\begin{aligned} \text{Teneur en vides géométrique} &= 100 - \frac{\text{masse volumique géométrique}}{\text{Masse volumique réelle}} \times 100 \\ &= 100 - \frac{2.1344}{2.51} \times 100 = \mathbf{14.96\%} \end{aligned}$$

Observation : On remarque que la teneur en vides géométrique est importante avec un ordre de grandeur de près de 15%.

• **Détermination de la teneur en vides apparente des éprouvettes :**

Le processus opératoire consiste à immerger l'éprouvette dans la paraffine afin d'établir une étanchéité à l'eau. Ensuite, nous pesons l'échantillon dans l'eau afin d'avoir sa pesée en immersion complète.

Une fois la masse obtenue, il est possible de calculer la teneur en vides apparentes grâce au principe d'Archimède : « *Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut et opposée au poids du volume de fluide déplacé ; cette force est appelée "poussée d'Archimède".* »

Donc, d'après ce principe fondamental, la différence de masse trouvée correspond à la masse d'air piégée dans les vides de l'éprouvette.

En ayant pris soin de prendre en considération les surplus de masse et de volume dus à la paraffine, cela nous permet de connaître le volume de l'éprouvette par le principe d'Archimède soit 523 cm³.

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{masse de l'éprouvette}}{\text{Volume de l'éprouvette}} = \frac{1228}{523.567} = 2.3455 \text{ kg/m}^3$$

On peut ainsi calculer la teneur en vides apparentes :

$$\begin{aligned} \text{Teneur en vides apparente} &= 100 - \frac{\text{masse volumique apparente}}{\text{Masse volumique réelle}} \times 100 \\ &= 100 - \frac{2.3455}{2.51} \times 100 = 6.56\% \end{aligned}$$

Observation : On remarque que la teneur en vides apparente est plus de deux fois inférieure à la teneur en vides géométriques.

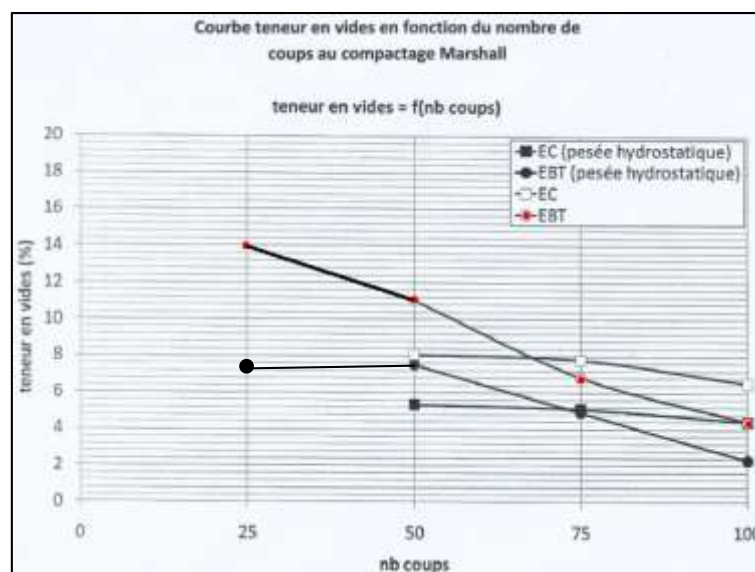
RECAPITULATIF DES RESULTATS DE COMPACITE :

Teneur en vides géométrique et apparente des éprouvettes	
masse volumique réelle (kg/cm ³)	2.51
Nombre de chocs à la dame de Marschall	25 coups
Géométrique	
Hauteur moyenne éprouvette (cm)	7.1
Diamètre éprouvette (cm)	10.16
Masse de l'éprouvette (g)	1228
Volume éprouvette (cm ³)	575.328
Masse volumique géométrique (kg/cm ³)	2.1344
Teneur en vide géométrique(%)	14.96
Apparente	
Masse de l'éprouvette (g)	1228
Masse de l'éprouvette + paraffine (g)	1274
Masse dans l'eau (g)	677.1
Masse de la paraffine (g)	66
Volume de la paraffine (d = 0,9)(cm ³)	73.3
Volume de l'éprouvette + paraffine (cm ³)	596.9
Volume de l'éprouvette	523.567
Masse volumique apparente	2.3455
Teneur en vide apparente (%)	6.56

COMMENTAIRES : On remarque évidemment que les résultats des deux méthodes afin de calculer la teneur en vides sont très différents. La teneur en vide géométrique est deux fois plus grande que l'apparente. Ceci peut s'expliquer pour plusieurs raisons :

- Tout d'abord, lorsque nous faisons l'exercice de calcul du volume d'éprouvette géométrique, la valeur de la hauteur moyenne est faussée par une mauvaise application de la Dame de Marshall et donc une compacité non plane. Une erreur déterminante sur le volume n'est donc pas à proscrire.
- D'autre part, lorsque nous pesons l'éprouvette pour le calcul géométrique, les effets de bord sont pris en compte à contrario de la méthode en immersion. En effet, les vides plus importants sur le contour de l'éprouvette ne sont pas représentatifs de l'ensemble de l'échantillon et fausse grandement le calcul de teneur en vides par une pesée sur simple balance à l'air libre. Cet effet de bord est totalement réduit par la paraffine lors de la méthode en immersion.

Enfin, on peut compléter le graphique suivant qui illustre l'influence de l'énergie de compactage ainsi que de la méthode utilisée (EBT « normal » et par pesée hydrostatique)



CONCLUSION : On préférera nettement la pesée hydrostatique (Archimède) pour mesurer la teneur en vide. Pour des raisons évidentes de manipulation en laboratoire, ces tests existent pour identifier la qualité d'une compacité optimale vis-à-vis d'une formulation particulière. Il est donc préférable pour les laboratoires d'exécuter le test le plus fiable possible qui est celui de l'immersion pour avoir la réelle teneur en vide d'un enrobé mis en œuvre sur le domaine public.

MESURE DU MODULE COMPLEXE

Le bitume est un matériau viscoélastique i.e. son comportement mécanique varie avec les conditions de sollicitations (vitesse, temps de chargement). Il est également thermiquement sensible.

L'essai de pénétrabilité ne permet de déterminer les caractéristiques du bitume que pour une température et un temps de charges définis.

Afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques du matériau Le passage par le formalisme complexe permet d'écrire la relation entre la contrainte et la déformation uniaxiale et sinusoïdale. Le module complexe E^* est le nombre complexe défini comme le rapport entre l'amplitude de la contrainte sinusoïdale de pulsation ω appliquée au matériau et l'amplitude de la déformation sinusoïdale qui en résulte où ϕ est le retard de la déformation de la contrainte.

$$\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \times e^{-i\phi}} = |E^*| \times e^{i\phi}$$

On appelle E^* le **module de rigidité** du bitume. Il se définit comme le rapport suivant :

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

D'après les différents graphiques (représentants chacun une fréquence différente) représentant la force en fonction du temps, nous allons calculer manuellement le module de rigidité $|E^*|$ ainsi que l'angle de retard ϕ .

Pour obtenir le retard en degré, il nous suffira d'utiliser la formule ci-dessous :

$$\phi = \Delta t \times f \times 360^\circ$$

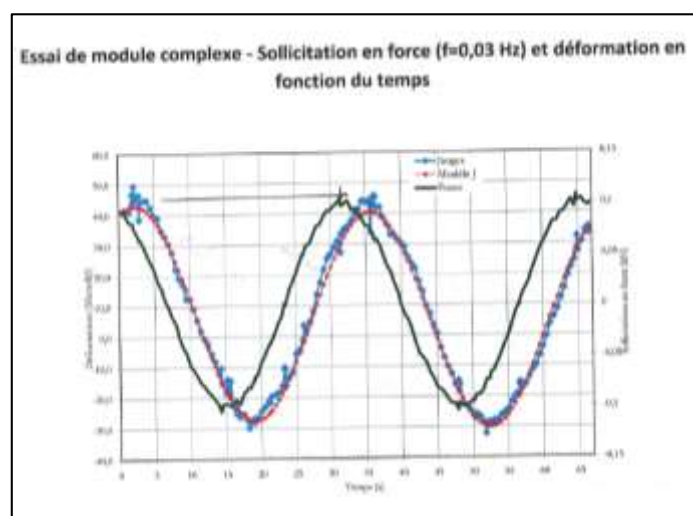
Avec $\Delta T =$ durée du déphasage entre la force et le module J

$f =$ la fréquence de sollicitation

Et le calcul du module de rigidité $|E^*|$ s'effectuera grâce à une lecture graphique de σ_0 et ε_0

Remarque : les graphiques fournissent la force appliquée F en kN, on obtient σ_0 en divisant F par la section de l'éprouvette de diamètre 80mm soit $S = 5,02 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$

➤ **Fréquence=0.03Hz**



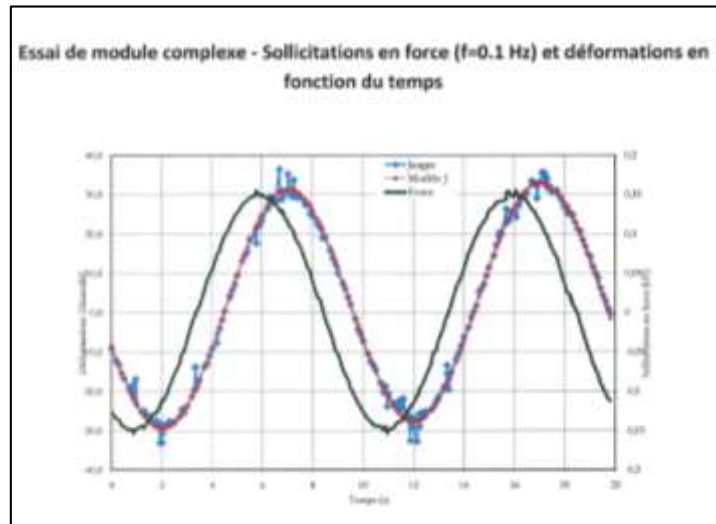
$$\Delta T = 3,04s \quad f = 0.03Hz \quad \text{soit}$$

$$\phi = 3,04 \times 0.03 \times 360^\circ = 32.8^\circ$$

$$F = 0.22 \cdot 10^3 N$$

$$\sigma_0 = 42 kPa \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = 71 \cdot 10^{-6} \quad \text{soit} \quad |E^*| = \frac{42 \cdot 10^3}{71 \cdot 10^{-6}} = 593 MPa$$

➤ Fréquence=0.1Hz



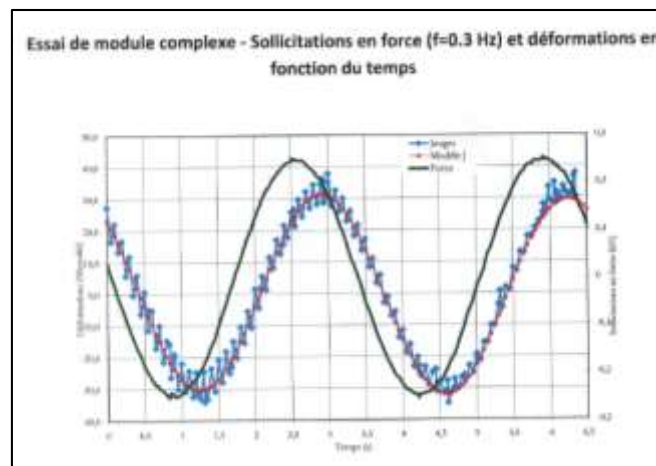
$$\Delta T = 1.13s \quad f = 0.1Hz \quad \text{soit}$$

$$\phi = 1.13 \times 0.1 \times 360^\circ = 40.7^\circ$$

$$F = 0.3 \cdot 10^3 N$$

$$\sigma_0 = 60 kPa \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = 62 \cdot 10^{-6} \quad \text{soit}$$

$$|E^*| = \frac{60 \cdot 10^3}{62 \cdot 10^{-6}} = 963 MPa$$



➤ Fréquence=0.3Hz

$$\Delta T = 0.38s \quad f = 0.3Hz \quad \text{soit}$$

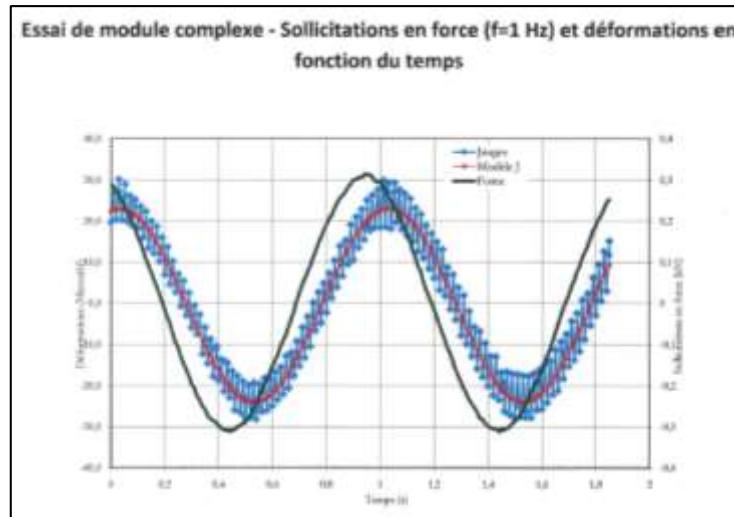
$$\phi = 0.38 \times 0.3 \times 360^\circ = 41.5^\circ$$

$$F = 0.50 \cdot 10^3 N$$

$$\sigma_0 = 100kPa \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = 61 \cdot 10^{-6} \quad \text{soit}$$

$$|E^*| = \frac{100 \cdot 10^3}{61 \cdot 10^{-6}} = 1639 MPa$$

➤ **Fréquence=1Hz**



$$\Delta T = 0.875s \quad f = 1Hz \quad \text{soit}$$

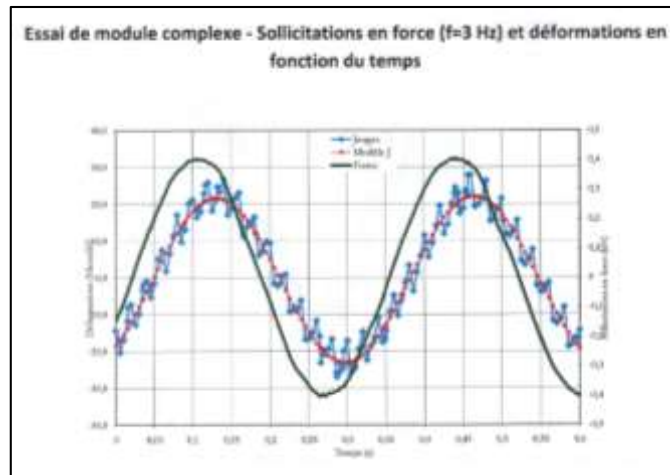
$$\phi = 0.875 \times 1 \times 360^\circ = 31.5^\circ$$

$$F = 0.62 \cdot 10^3 N$$

$$\sigma_0 = 123.kPa \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = 44 \cdot 10^{-6} \quad \text{soit}$$

$$|E^*| = \frac{123 \cdot 10^3}{44 \cdot 10^{-6}} = 2795 MPa$$

➤ **Fréquence=3Hz**



$$\Delta T = 0.023s \quad f = 3Hz \quad \text{soit}$$

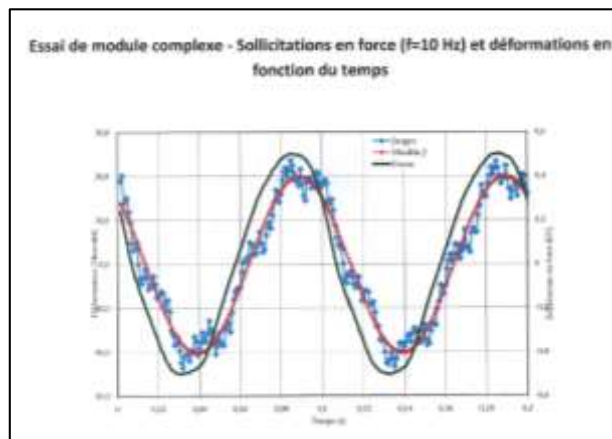
$$\phi = 0.023 \times 3 \times 360^\circ = 24,9^\circ$$

$$F = 0.8 \cdot 10^3 N$$

$$\sigma_0 = 159kPa \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = 44 \cdot 10^{-6} \quad \text{soit}$$

$$|E^*| = \frac{0.8 \cdot 10^3}{44 \cdot 10^{-6}} = 3614 MPa$$

➤ Fréquence=10Hz



$$\Delta T = 0.003s \quad f = 10Hz \quad \text{soit}$$

$$\phi = 0.003 \times 10 \times 360^\circ = 11,6^\circ$$

$$F = 1 \cdot 10^3 N$$

$$\sigma_0 = 199kPa \quad \text{et} \quad \varepsilon_0 = 40 \cdot 10^{-6} \quad \text{soit}$$

$$|E^*| = \frac{199 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^{-6}} = 4974 MPa$$

Synthèse des résultats : Pour un bitume à T=25°C

Fréquence (Hz)	0.03	0.1	0.3	1	3	10
Norme du module complexe (MPa)	593	963	1639	2795	3614	4974
Angle de phase du module complexe (°)	32,8	40,7	41,5	31,5	24,9	11,6

D'autres mesures nous ont été fournies sur ce même type d'éprouvette à plusieurs températures :

Essai de module complexe E^* sur éprouvettes cylindriques

Nom de l'éprouvette	TP 2A
Diamètre de l'éprouvette (mm)	80
Date	03/02/06

<i>Température</i>	<i>20,2</i>					
<i>f (Hz)</i>	<i>0,03</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>1,0</i>	<i>3,0</i>	<i>10,0</i>
Norme du Module complexe (MPa)	1 185	1 894	2 674	3 978	5 308	7 791
Angle de phase du module complexe (°)	33,8	37,4	31,6	26,1	24,4	17,9

<i>Température</i>	<i>10,6</i>					
<i>f (Hz)</i>	<i>0,03</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>1,0</i>	<i>3,0</i>	<i>10,0</i>
Norme du Module complexe (MPa)	3 407	5 035	6 460	8 587	10 048	12 789
Angle de phase du module complexe (°)	23,6	26,2	22,4	17,1	15,1	10,6

<i>Température</i>	<i>0,4</i>					
<i>f (Hz)</i>	<i>0,03</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>1,0</i>	<i>3,0</i>	<i>10,0</i>
Norme du Module complexe (MPa)	9 218	11 074	12 481	15 144	16 936	19 192
Angle de phase du module complexe (°)	18,0	12,4	11,0	10,8	8,2	5,2

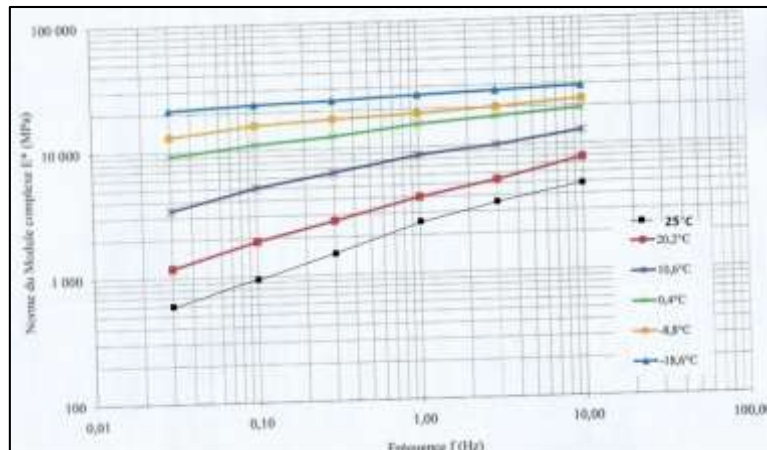
<i>Température</i>	<i>-8,8</i>					
<i>f (Hz)</i>	<i>0,03</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>1,0</i>	<i>3,0</i>	<i>10,0</i>
Norme du Module complexe (MPa)	13 093	15 773	17 180	18 345	20 088	22 763
Angle de phase du module complexe (°)	9,7	3,5	8,6	7,1	6,2	3,0

<i>Température</i>	<i>-18,6</i>					
<i>f (Hz)</i>	<i>0,03</i>	<i>0,1</i>	<i>0,3</i>	<i>1,0</i>	<i>3,0</i>	<i>10,0</i>
Norme du Module complexe (MPa)	21 325	23 049	24 023	25 850	27 181	28 861
Angle de phase du module complexe (°)	7,9	3,6	6,1	4,6	2,7	1,7

Exploitation des résultats :

Courbes isothermes :

- Norme du module complexe E^* en fonction de la fréquence de sollicitation et de la température



Outre les valeurs de module directement utilisables pour les calculs de dimensionnement, la pente des isothermes permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau bitumineux (c'est-à-dire la variation de module avec la vitesse de la sollicitation).

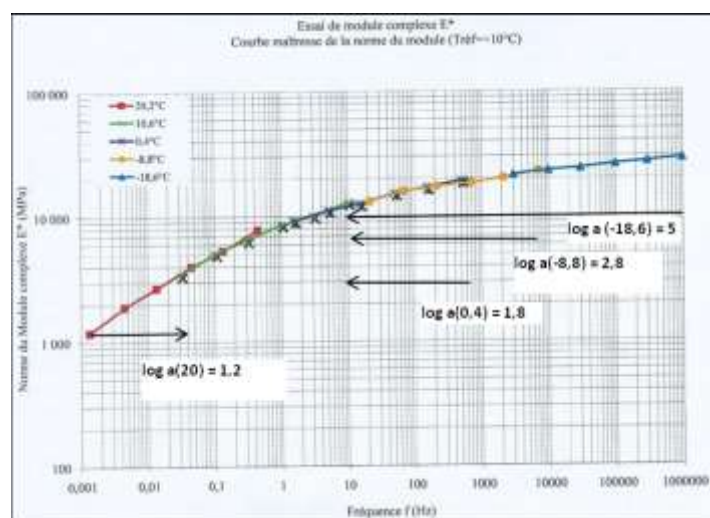
- **Propriété d'équivalence temps-température :**

On remarque, à l'examen de ces courbes, qu'une même valeur de module du matériau peut être obtenue pour différents couples (fréquence, température).

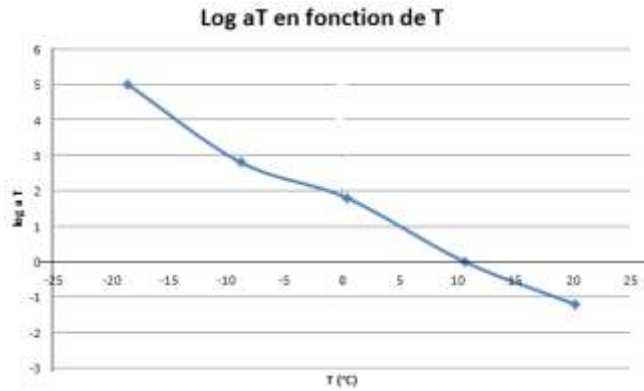
Cette propriété est appelée propriété d'équivalence temps-température. Elle se traduit par l'écriture de $E^*(\omega, T)$ sous la forme $E^*(\omega f(T))$.

Il est possible, en utilisant cette propriété d'équivalence temps-température, de construire une courbe unique ($\log |E^*|$, $\log f$), où f est la fréquence, pour une température de référence (T_R) choisie arbitrairement. Cette courbe est obtenue par translation parallèle à l'axe des fréquences de chaque isotherme par rapport à l'isotherme correspondant à la température de référence jusqu'à superposition des points de même ordonnée.

La courbe ainsi obtenue est appelée **courbe maîtresse**. Elle permet d'obtenir des valeurs de module pour des fréquences inaccessibles par l'expérimentation. Elle est déterminée pour une température T_R de 10°C pour les enrobés. Voici un exemple de courbe maîtresse :



T (°C)	Log(a _T)
-18,6	5
-8,8	2,8
0,4	1,8
T _R = 10,6	0
20,2	-1,2



Le coefficient de translation de l'isotherme T par rapport à l'isotherme T_R de référence choisie est log a_T, tel que E*(ω, T) = E*(ω, a_T, T_R) avec a_{T_R} = 1

Plusieurs formules sont proposées pour représenter log a_T. Les plus utilisées sont :

- la formule dite de WLF obtenue par [William, 1955] :

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_R)}{(T - T_R) + C_2}$$

avec C1 et C2, constantes dépendant du matériau;

T et T_R, températures exprimées en °K.

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_R)}{(T - T_R) + C_2}$$

$$-\frac{1}{\log a_T} = \frac{C_2/T_1}{T - T_R} + \frac{1}{C_2}$$

on trace $-\frac{1}{\log a_T}$ en fonction de $\frac{1}{T - T_R}$
on obtient un nuage de points presque alignés
en effectuant une régression linéaire on obtient :

$$\left. \begin{aligned} C_2 &= 7 \\ \frac{1}{C_1} &= 1/0,0513 = 18 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} C_1 &= 18 \\ C_2 &= 126 \end{aligned}$$

- une équation de type Arrhénius : $\log a_T = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)$

avec δH, énergie apparente d'activation caractérisant le matériau;

R, constante des gaz parfaits;

T et T_R, températures exprimées en °K.

Cependant,

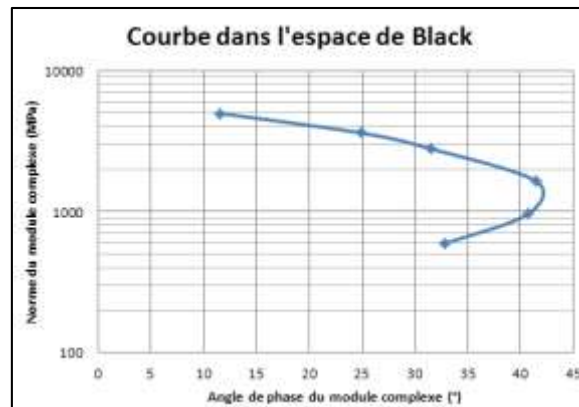
nos valeurs de log a_T sont trop imprécises pour pouvoir déterminer l'énergie apparente d'activation.

Courbe dans l'espace de Black

Cette représentation consiste à tracer le logarithme de la norme du module complexe |E*| en fonction de l'angle de phase correspondant. Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température, les points expérimentaux permettent de définir une courbe unique, caractéristique du matériau testé.

Cette courbe permet de visualiser la zone des modules faibles et en particulier la diminution d'angle de phase pour les hautes températures. Ce phénomène est lié à la présence des granulats dans le

mélange : généralement, pour les bitumes purs, l'angle de phase augmente de façon continue ou tend vers une asymptote avec l'augmentation de température.



La courbe ci-dessus est caractéristique d'un **matériau thermorhéologiquement simple**. Dans l'espace de Black, la norme maximale et l'angle de phase maximal de l'enrobé sont clairement identifiables. De plus, l'angle de phase est plus élevé lorsque le module est faible, c'est-à-dire lorsque la fréquence est faible ou la température est élevée, et inversement. Par contre, l'angle diminue aux faibles valeurs du module lorsque l'impact du comportement élastique des granulats surpasse le caractère viscoélastique du bitume.