

V.1. L'objectif du travail:

L'objectif essentiel de notre travail est d'essayer d'améliorer les performances mécaniques d'un enrobé et plus particulièrement le module par ajout de différentes quantités de PR Plast Module.

Après avoir fait les essais d'identification des constituants, nous avons procédé à la formulation de l'enrobé et sa correction par ajout de PR Plast Module sur la formulation de base. La teneur en PR Plast Module varie de 0.4 % à 1 % par pas de 0.2% ensuite 2 %, et 3%.

Pour tester les différentes formulations, des éprouvettes Marshall puis Duriez ont été confectionnées au laboratoire dans le but de voir l'impact de PR Plast Module incorporé directement dans le squelette granulaire; et d'étudier son influence sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé en les comparant à celles de l'enrobé de base.

Dans tout le travail, on a axé notre étude sur les caractéristiques mécaniques à savoir : la compacité, la résistance mécanique, la tenue à l'eau , le fluage statique et le module.

V.2. Performances des mélanges

Les matériaux et les moules utilisés pour la confection des éprouvettes Marshall et Duriez sont chauffés dans l'étuve à la température de 170 °C avec l'emploi du bitume 35/50. Pour une formulation donnée nous avons pour l'essai:

1-DURIEZ [33]

7 éprouvettes Duriez dont 3 conservées dans l'eau à 18°C pendant 7 jours pour les soumettre à l'essai de compression simple avec immersion, 3 sont conservées à sec et à 18°C pour les soumettre à l'essai de compression simple sans immersion et la 7ème éprouvette est laissée pour mesurer la masse volumique apparente.

Le compactage des éprouvettes Duriez se fait en appliquant sur l'éprouvette confectionnée (*Figure VI.2*) dans le moule (*Figure VI.1*) une pression de 60 KN pendant 5 minutes.



Figure V.1: Moules Duriez



Figure V.2: Éprouvettes Duriez

Les éprouvettes Duriez subissent un essai de compression simple ; Lors de l'écrasement, la machine (presse) est réglée à une vitesse de 1 mm/sec.



Figure V.3: Presse d'écrasement avec éprouvette duriez en place

2-MARSHALL [24]

5 éprouvettes Marshall dont 4 destinées à l'écrasement et la 5ème pour mesurer la masse volumique apparente.

Le compactage des éprouvettes Marshall (*Figure VI.5*) se fait à l'aide de la dame Marshall en appliquant 50 coups sur chaque face de l'éprouvette.



Figure V.4: Moules Marshall



Figure V.5: Éprouvettes Marshall

Les éprouvettes Marshall subissent une contrainte diamétrale jusqu'à rupture. Lors de l'écrasement, la machine (presse) est réglée à une vitesse de 0.86 mm/sec.

Elles sont mises dans le bain Marie à la température de 60°C pendant 30 minutes et elles sont soumises à l'écrasement juste après leur sortie du bain.



Figure V.6: Presse d'écrasement avec éprouvette Marshall en place

3-ESSAI DE MODULE DE RIGIDITE [26]

L'essai de détermination du module complexe en Algérie (CTTP) est un essai de traction indirecte répétée au **NAT**(Nottingham Asphalt Tester)..

Le module (rapport de la contrainte à la déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire. Grâce à l'équivalence temps-température, on trace la courbe maîtresse du module à une température donnée. Cette représentation permet de connaître le comportement du mélange sur un large spectre de temps de charge ou de fréquences. La spécification porte sur le module à 15 °C et une fréquence de 10 Hz ou un temps de charge de 0.02 s.

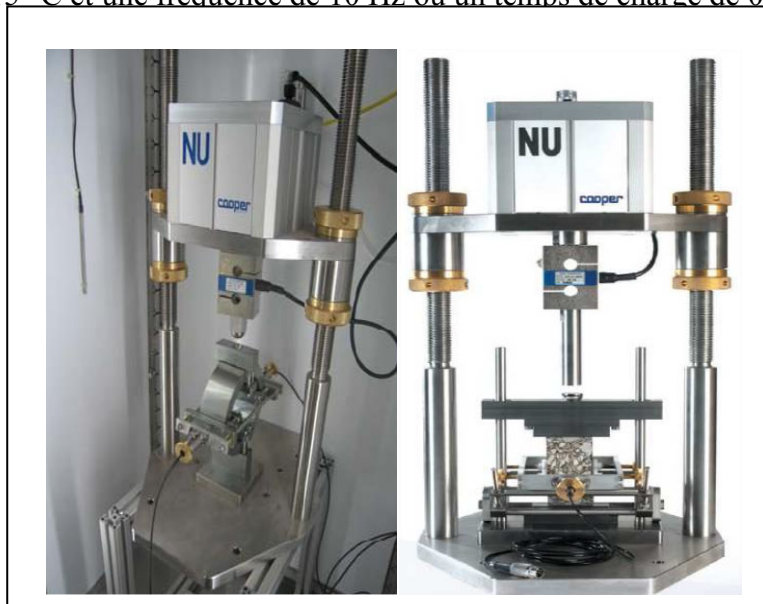


Figure V.7 : appareil pour essai de module de rigidité (NAT).

La rigidité du mélange est déterminée par l'essai de traction uni-axiale sur des éprouvettes cylindriques (éprouvettes Marshall *Figure V.5*).(Placer les éprouvettes dans l'enceinte thermique de l'appareil pendant au moins 4h à la température de l'essai) .

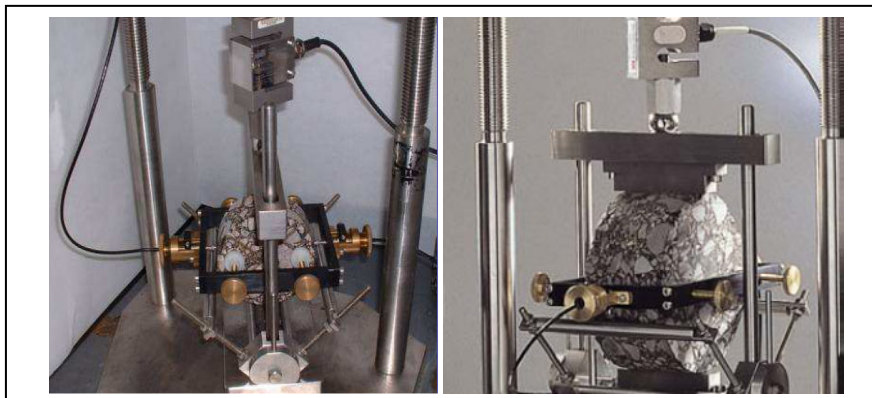


Figure V.8 : Eprouvette cylindrique placée sur l'appareil pour l'essai de module de rigidité (NAT)

V.3. Récapitulatif des résultats et tracé des graphes

Le tableau V-1 est un récapitulatif des performances de l'enrobé avec ajout à différentes teneurs en PR Plast Module (essai MARSHALL et DURIEZ).

Tableau V-1 récapitulatif des résultats (MARSHALL et DURIEZ)

% de PR Plast	TL2+0 %	TL2+0.4%	TL2+0.6%	TL2+0.8%	TL2+1%	TL2+2%	TL2+3%	spécification
Teneur en bitume%	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	5.82	-
Densité apparente	2.35	2.36	2.37	2.38	2.37	2,36	2,37	-
compacité	95.91	96.14	96.55	96.95	96.55	96.32	96.73	92-97
%de vide	4.09	3.86	3.45	3.05	3.45	3.68	3.27	<8
Stabilité (KN)	10.53	10.85	12.14	13.91	15.17	15.08	15.05	≥10.5
Fluage (mm)	3.64	3.3	2.63	2.04	1.84	1.91	1.95	≤4
Quotient marshall	3.22	3.28	4.61	6.81	8.244	7,89	5.01	-
Rsec (KN)	7.57	10.02	10.14	12.15	14	13.91	14.31	-
Rimm (KN)	6.35	8.53	8.92	10.52	12.07	12	12.2	-
Tenu à l'eau Rimm/Rsec	0.84	0.85	0.87	0.86	0.86	0.86	0.85	>0.75

Rappels: Les caractéristiques mécaniques des enrobés sont déterminées au moyen de l'essai Marshall et Duriez. On mesure :

la stabilité Marshall : (résistance à l'écrasement diamétral entre mâchoires à la température de 60°C, et à vitesse constante de 0.85 mm/s),

Le fluage Marshall : (déplacement enregistré au moment de la rupture),

Le % de vide : Cette dernière caractéristique est donnée par la formule (V-1).

$$V\% = 100 [1 - (MVA / MVR)] \dots \dots \dots (V-1)$$

MVA masse volumique apparente est déterminée par le rapport entre la masse de l'échantillon et son volume apparent

MVR masse volumique réelle peut être calculée à partir des masses volumiques des composants obtenues

$$MVR = \frac{100}{\frac{\%G_1}{\rho g_1} + \frac{\%G_2}{\rho g_2} + \dots + \frac{\%G_n}{\rho g_n} + \frac{tl_{int}}{\rho b}} \dots \dots \dots (V-2)$$

où % G_i sont les pourcentages des fractions granulaires et ρg_i leurs masses volumiques, tl_{int} le teneur en liant et ρb leurs masses volumiques

la tenue a l'eau : un rapport de stabilité mécanique (R_{imm}/R_{sec}) obtenu d'un lot d'éprouvettes d'enrobés conservées pendant 7 jours à la température ambiante

Le tableau V-2 est un récapitulatif des performances de l'enrobé avec ajout à différentes teneurs en PR Plast Module (essai de Module NAT).

Tableau V-2 résultats de module de rigidité avec des différentes teneurs en PR Plast

	% de PR Plast	TL2+0 %	TL2+0.4%	TL2+0.6%	TL2+0.8%	TL2+1%	TL2+3%	Spécification
Moyenne	Charge vertical (KN)	4.6	4.64	4.56	4.54	4.49	4.59	-
	effort horizontal(KPa)	446.9	478.1	468.1	451.2	460.9	456.6	-
	Déformation horizontal (micron)	4.5	4.5	4.3	3.9	3.4	4.7	-
	Temps de l'évaluation (ms)	121	124	120	120	122	120	-
	Module de rigidité (MPa)	9404	10348	10625	11134	13630	9500	-
	Le module de rigidité après la correction (MPa)	10818	11534	11744	12130	14025	10891	≥14000

Le formule de corrélation ; $E_{cor}=E_{mes}\times 0.759+3680$ selon le RGRAN N836fevrier 2005

Rappels :

le module complexe: relation entre la contrainte et la déformation pour un matériau à visco-élastique linéaire soumis à une charge de forme sinusoïdale en fonction du temps, t , lorsque l'application d'une contrainte $\sigma \times \sin(\omega \times t)$ entraîne une déformation $\varepsilon \times \sin(\omega \times (t - \Phi))$ présentant un angle de phase, Φ , par rapport à la contrainte.

L'amplitude de la déformation et l'angle de phase dépendent de la fréquence, ω , et de la température d'essai, θ . Le module complexe E^* est défini comme étant le rapport de la contrainte à la déformation :

$$E^* = |E^*| \times [\cos(\Phi) + i \times \sin(\Phi)] \dots \dots \dots (V.3)$$

Remarque : le temps de conservation des éprouvettes Marshall de l'essai de module de rigidité a dépassé la norme de conservation à cause d'un problème dans l'appareil de NAT .

❖ %de vide

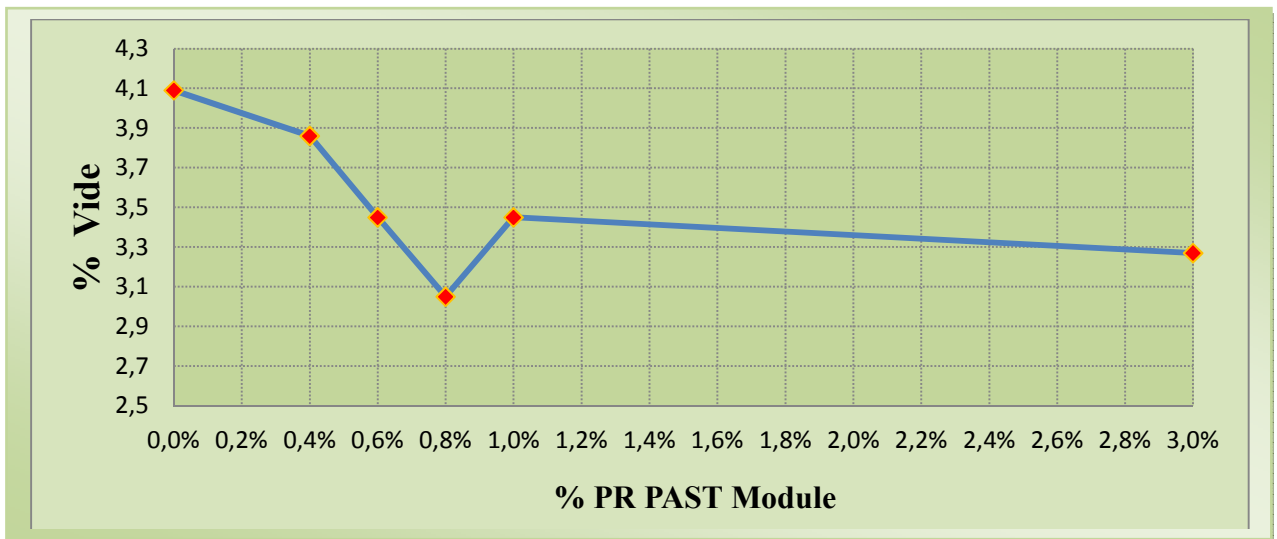


Figure IV-9: variation de %de vide en fonction de %de PR Plast

Le pourcentage de vide présente un minimum à une teneur en *PR Plast* module de 0.8%, mais pour les grandes teneurs de *PR Plast*, le %de vide a augmenté ; à 1%de *PR Plast* le %de vide est égal à 3.45%.

Nous recherchons toujours un enrobé dense (moins de vide) mais il faut un pourcentage de vide minimal pour l'auto-compactage , et pour éviter le ressuage.

❖ Stabilité Marshall

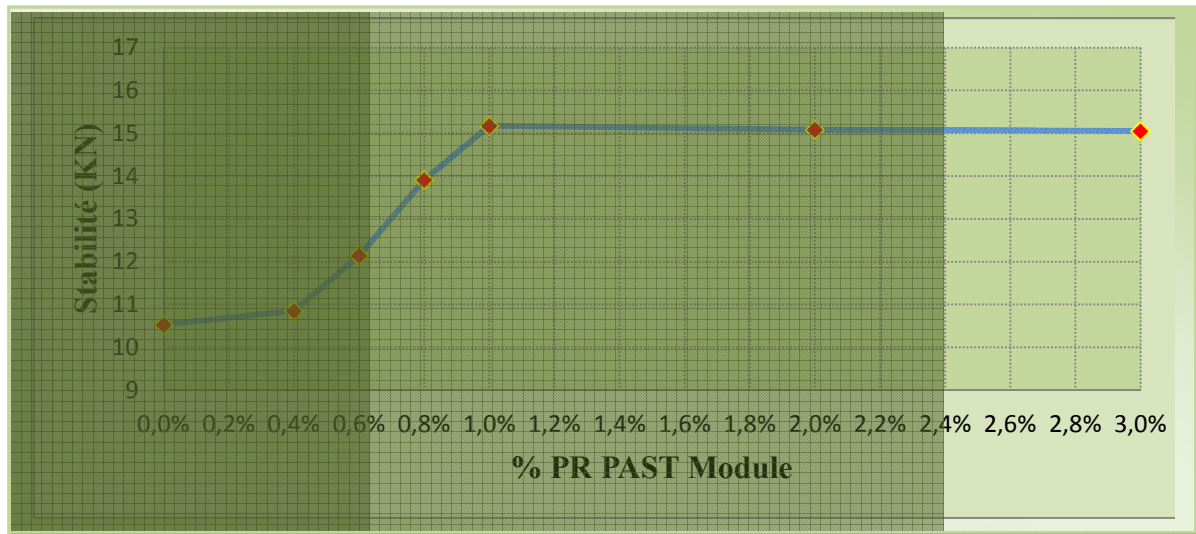


Figure V-10: variation de la stabilité Marshall en fonction de %de PR Plast Module

Les spécifications (CTTP2004) préconisent dans le cas de l'utilisation d'un bitume 40/50, une stabilité supérieure à 10.5KN ; donc tous les enrobés donnent des stabilités conformes aux spécifications algériennes.

La courbe de la stabilité Marshall augmente jusqu'à la teneur 1% de PR Plast, puis elle se stabilise aux grandes teneurs de PR Plast.

❖ Le fluage Marshall

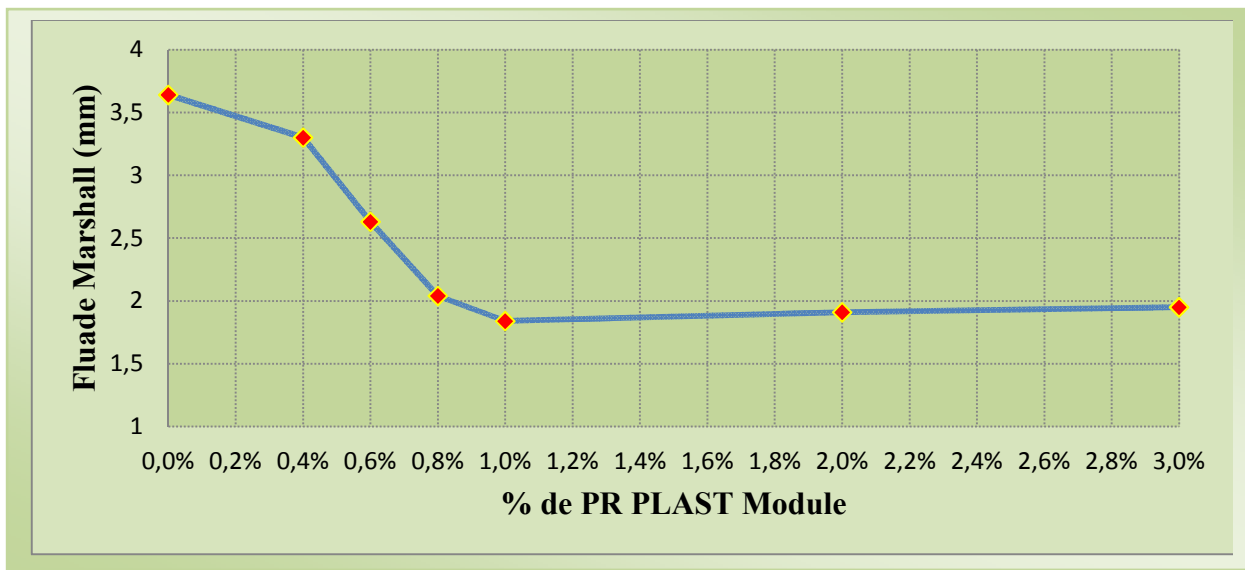


Figure V-11: Variation du fluage Marshall en fonction du %de PR Plast Module

Les spécifications (CTTP2004) préconisent ; dans le cas de l'utilisation d'un bitume 40/50, un fluage inférieur à 4 mm, donc les résultats obtenus avec tous les mélanges enrobés (figure V.9) donnent des stabilités vérifiant les spécifications Algériennes.

On remarque que le fluage Marshall diminue en fonction de pourcentage de *PR Plast* ajouté jusqu'à la teneur 1% *PR Plast* , puis se stabilise aux grandes teneurs de *PR Plast module* .

La modification de l'enrobé par le PR Plast module améliore la résistance au fluage jusqu'à la teneur 1% mais pour les grandes teneurs de PR Plast, le fluage Marshall reste stable. Cette amélioration est de l'ordre de 50% pour une teneur de 1% et 46% pour une teneur de 3% de PR Plast Module.

❖ Quotient Marshall

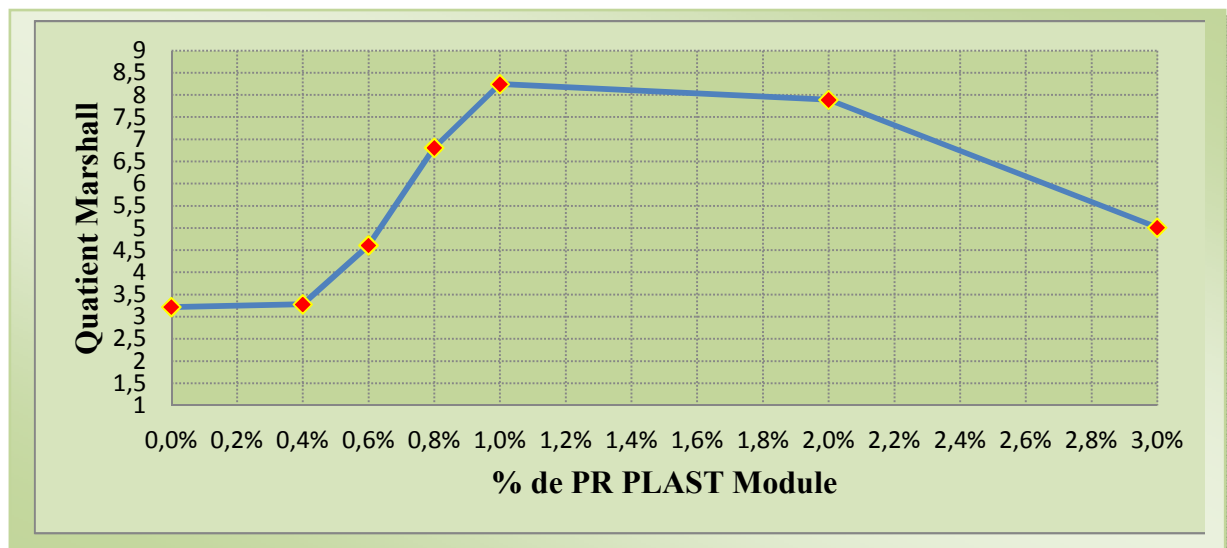


Figure V-12 : Variation de Quotient Marshall en fonction de %de PR Plast

Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

La courbe du Quotient Marshall (Figure V.10) augmente jusqu'à la teneur de 1% ; au delà, on remarque une légère diminution du quotient jusqu'à la teneur de 2% puis une chute.

Le mélange avec 1%de *PR Plast* présente pratiquement une amélioration de l'ordre de 155% et pour 3% de l'amélioration est de l'ordre de 60%.

❖ Tenue à l'eau

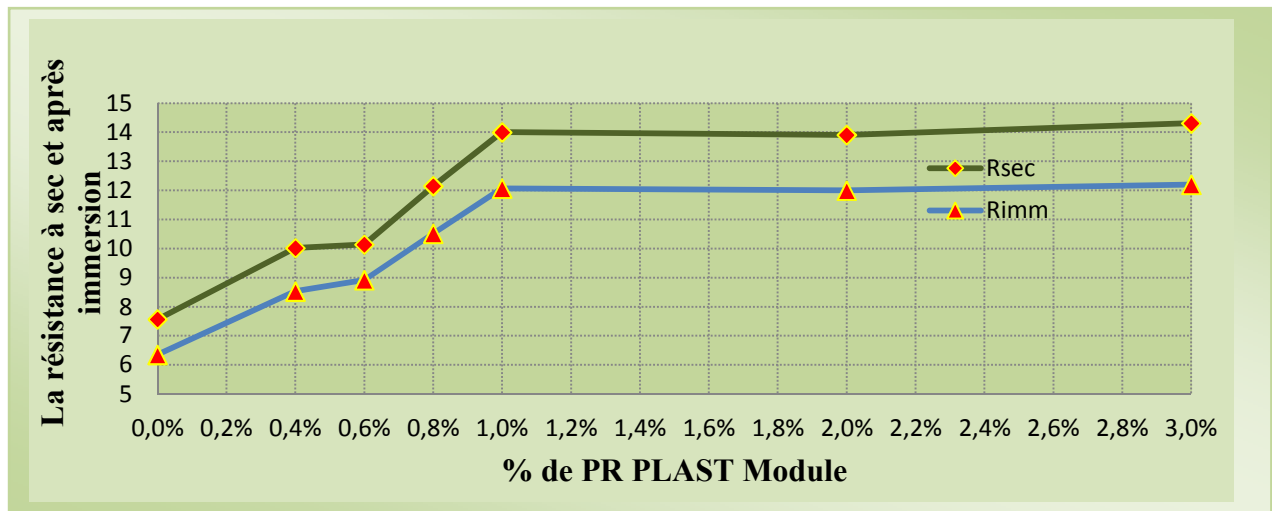


Figure V-13: Variation de la résistance à sec et après immersion en fonction de %de PR Plast

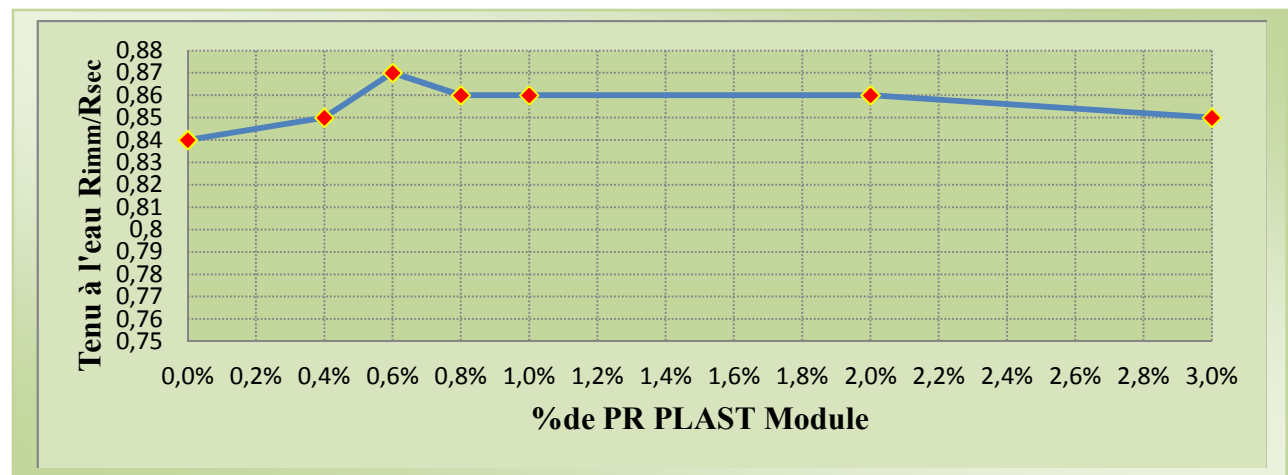


Figure V-14: Variation de tenue à l'eau en fonction de %de PR Plast

La résistance à la compression simple à sec R_{sec} s'accroît avec l'augmentation de la teneur en *PR Plast* jusqu'à une teneur de 1 % ; après cette teneur, la résistance reste stable pour les grandes teneurs en ajout.

La résistance à la compression simple après 7 jours d'immersion dans l'eau à 18°C présente une meilleure performance à 1 % de teneur de *PR Plast module*. Après cette teneur, la résistance reste stable aux grandes teneurs de *PR Plast module*.

Les tenues à l'eau obtenues avec tous les mélanges répondent aux spécifications algériennes (>0.75).

La tenue à l'eau augmente avec l'augmentation de *PR Plast module* de l'ajout jusqu'à une teneur de 0.6 % de *PR Plast module*, puis elle diminue à 0.8% de *PR Plast module*, ensuite on remarque que la tenue à l'eau se stabilise avec les autres teneurs.

❖ Le module de rigidité

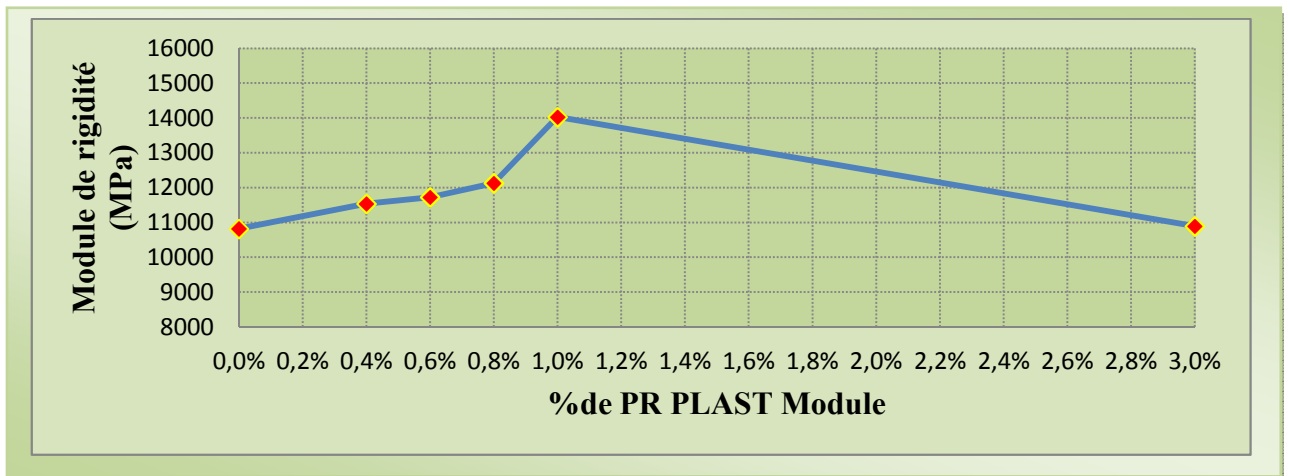


Figure V-15: variation de module de rigidité en fonction de %de PR Plast

Le graphe présente les résultats des essais de NAT (pour le calcul de module de rigidité avec traction indirecte) sur les enrobés bitumineux (avec différents pourcentages de PR Plast Module)

Les résultats expérimentaux obtenus sur les enrobés bitumineux testés montrent que le module de rigidité augmente avec l'augmentation de pourcentage de PR Plast Module jusqu'à la teneur de 1% puis chute.

A la teneur de 1% de PR Plast Module, le module de rigidité est égal à **14025MPa** alors le module est conforme aux spécifications algériennes (Enrobé à Module Elevé).

V.4.Conclusion :

L'étude expérimentale du comportement mécanique des enrobés en laboratoire a montré que les performances de l'enrobé augmentent avec la teneur en PR PLAST **par apport l'enrobé de base** , et on remarque que l'amélioration des performances de l'enrobé entre 0% et 1%(entre 0%et 0.8% pour le pourcentage de vide et entre 0%et0.6%pour la tenue à l'eau), est plus importante que l'amélioration entre 1% et 3%.

L'ajout jouerait un rôle de :

- Correcteur granulaire (diminution de % de vide augmentation de la compacité) jusqu'à la teneur de 0.8% de PR Plast Module.
- Liant : les performances (stabilité, module de rigidité et résistance à sec et émersion) augment en fonction de % de PR Plast Module introduit dans le squelette granulaire.