

NOTE D'INFORMATION

Module de rigidité des enrobés : quels facteurs d'influence ?

Analyse d'une base de données

1 Introduction

La communauté routière se souvient de la série EAPIC 8.1.12 [1] sur le module de rigidité des enrobés réalisée en 2011-2012. S'agissant d'une caractéristique aussi importante pour le dimensionnement des chaussées, les valeurs élevées de reproductibilité observées alors en avaient inquiété plus d'un.

Quelques années plus tard, le contexte normatif évoluant — normes d'essai NF EN 12697-26 [2] et dimensionnement NF P 98-086 [3] notamment —, il importait d'organiser une nouvelle série EAPIC sur cette méthode d'essai, pour apprécier une éventuelle évolution dans les pratiques des laboratoires. La série 8.2.17, réalisée en 2017-2018 sur une formule proche des usages courants, répond à cette attente. Le rapport EAPIC 8.2.17 (août 2018) [4] fournit des valeurs de fidélité en amélioration pour les méthodes les plus répandues : A (flexion 2 points 2PB-TR) et C (traction indirecte impulsionnelle IT-CY). Leur reproductibilité demeure toutefois élevée, ce qui justifie un travail d'analyse des causes de cette dispersion.

Pour rendre possible cette analyse, EAPIC a fait évoluer sa pratique : le formulaire de réponse des laboratoires est depuis plusieurs années complété de nombreuses questions techniques sur leurs pratiques opératoires. Les données ainsi recueillies sont compilées sous couvert d'anonymat, en vue d'analyses ultérieures. Ce travail sur les facteurs d'influence du module vient d'être réalisé pour la série 8.2.17 par un groupe d'experts, issus pour la plupart d'EAPIC et de la Commission de Normalisation Essais relatifs aux Chaussées. Ses principaux enseignements font l'objet d'un article court publié dans la RGRA n°972 mai 2020 [5]. Il est ici présenté dans son intégralité, et consultable sur le site de l'IDRRIM.

N° 42
NOVEMBRE
2020

Sommaire

- 1 | Introduction
- 2 | Présentation
- 3 | Étude de la dispersion intra-laboratoires
- 4 | Première évaluation des paramètres
- 5 | Étude des paramètres retenus, isolément
- 6 | Étude de deux paramètres influents en mode combiné
- 7 | Détermination des paramètres combinés statistiquement significatifs pour les méthodes C et A
- 8 | Synthèse des résultats
- 9 | Conclusion et perspectives

2 Présentation de la série EAPIC 8.2.17

2.1 EAPIC

Le Groupe Spécialisé EAPIC (Essais d’Aptitude Par Inter-Comparaison) est né fin 2001, du besoin des laboratoires d’essais routiers – notamment ceux engagés dans des démarches qualité – de prouver leur aptitude à réaliser les essais qu’ils pratiquent. Initialement placé sous l’égide du CFTR (Comité Français pour les Techniques Routières), il s’est tout naturellement intégré en 2010 dans l’IDRRIM, au sein de son Comité Opérationnel « *Qualification - Comparaison inter-laboratoires* » (COQC) certifié ISO 9001.

Composé de représentants d’organismes publics et privés, il organise des essais d’aptitude par comparaison inter-laboratoires portant sur les principaux essais du domaine routier [6] [7]. Seize séries d’essais ont ainsi été réalisées depuis 2001, concernant majoritairement les enrobés bitumineux, mais également les granulats et les matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités. Leurs rapports émis depuis 2007 sont consultables sur le site de l’IDRRIM.

2.2 Déroulement de la série EAPIC 8.2.17

Dans l’organisation de la série 8.2.17 (2017-2018), le Groupe Spécialisé a modifié certains éléments techniques par rapport à la série 8.1.12 (2011-2012). Ainsi, la formule d’enrobé choisie devait tout à la fois conduire à une dispersion normale — mais pas excessive — des teneurs en vides, et à des valeurs du module représentatives des enrobés à chaud couramment utilisés en construction routière. Objectif atteint — on le verra plus loin — avec une formule de grave-bitume GB4 constituée de granulats de roche massive, de filler calcaire et bitume pur 35/50, dans les proportions suivantes :

10/14	32,0 %
6/10	15,0 %
2/6	15,3 %
0/2	31,0 %
Filler calcaire	2,0 %
Bitume 35/50	4,7 %

Les caractéristiques moyennes (sur 5 échantillons) du bitume étaient :

- Pénétrabilité : 41,6 1/10 mm
- Température Bille et Anneau : 53,6 °C
- Module G^* à 15°C ; 10 Hz : 31,7 MPa

Des instructions particulières ont été données aux laboratoires participants, concernant notamment :

- La valeur de MVRe fournie : 2,640 Mg/m³ (selon NF EN 12697-5 (mars 2010) Méthode A dans l'eau) ;
- La teneur en vides d'air à obtenir : (6,5 ± 1,5) % (selon NF EN 12697-6 (août 2012) Méthode D (géométrique)) ;
- Le dépotage du liant : durée et température ;
- La confection de l'enrobé : selon NF EN 12697-35 (juillet 2017) ;
- La confection des éprouvettes :
 - PCG selon NF EN 12697-31 (août 2007) ou
 - Compacteur de plaques selon NF EN 12697-33 (septembre 2007) ou
 - Autre méthode
- Essais de module : selon NF EN 12697-26 (juin 2012) [2]
 - Méthodes A, C, D (traction-compression directe), E (traction directe) ou F (traction indirecte sinusoïdale)
 - Température 15°C, 10°C et 15°C pour la méthode C
 - Fréquence / temps : 10 Hz / 124 ms / 0,02 s
- Nombre de répliques de l'essai complet : 4

Les formulaires de résultats ont été renseignés et transmis de façon confidentielle à la Cellule Exécutive d'EAPIC, pour traitement et établissement du rapport EAPIC 8.2.17 (30 août 2018) [4]. Le traitement a consisté à appliquer les tests de Cochran et Grubbs visant à détecter les dispersions aberrantes de résultats respectivement intra et inter laboratoires, puis à calculer les différentes grandeurs mentionnées dans le rapport. Y figurent pour chaque méthode les résultats de chaque laboratoire et leur moyenne brute, et, pour les populations de taille suffisante (méthodes A et C), la moyenne corrigée, les valeurs limites de fidélité r et R, et les z-scores de chaque laboratoire.

2.3 Données collectées

En plus des résultats d'essais transmis par les participants, le Groupe Spécialisé a également demandé aux participants de renseigner un certain nombre de rubriques techniques relatives à la fabrication de l'enrobé et à la confection des éprouvettes, et susceptibles d'agir sur la valeur du module.

Les données recueillies concernent les paramètres suivants :

- Dépotage et nombre de réchauffages du liant ;
- Température de malaxage de l'enrobé ;
- Type de malaxeur ;
- Temps de malaxage à sec ;
- Temps de malaxage humide ;

- Temps entre la fin de malaxage et le début de compactage (temps de stockage à chaud) ;
- Méthode et appareil de compactage ;
- Nombre de gâchées par plaque ;
- Géométrie et dimensions des éprouvettes ;
- Sciage ou moulage ;
- Teneur en vides d'air (mesure géométrique puis éventuellement la mesure au banc gamma) ;
- Âge moyen des éprouvettes, entre la confection et l'essai.

Un travail d'analyse paramétrique de ces données a ensuite été conduit par certains membres du Groupe Spécialisé EAPIC et de la Commission de Normalisation Essais relatifs aux Chaussées (CN EC) du BNTRA. Les principaux enseignements qui en découlent peuvent ainsi contribuer à l'évolution des normes concernées par le module des enrobés. C'est d'ailleurs là une autre mission statutaire d'EAPIC. Les résultats de ce travail peuvent aujourd'hui être présentés en intégralité, c'est l'objet des paragraphes suivants.

Mais avant cette analyse, l'étude de la dispersion intra-laboratoires des valeurs de modules a permis de déceler d'éventuelles anomalies qui pourraient fausser l'étude d'influence des différents paramètres.

3 Étude de la dispersion intra-laboratoires

3.1 Présentation des données

Quelle que soit la méthode évaluée par les laboratoires qui ont répondu à l'enquête, les résultats d'essais de la campagne ont été obtenus sur des lots de 4 éprouvettes A, B, C et D, comme le prévoit la norme NF EN 12697-26. Il a été demandé aux participants de réaliser 4 répliques successives de l'essai complet, afin d'identifier un effet éventuel du processus de montage / démontage. Pour chaque méthode, on dispose donc de 16 mesures individuelles (4 éprouvettes x 4 répliques), que l'on peut présenter sous la forme d'un tableau à double entrée où les colonnes comprennent les résultats propres à chaque éprouvette et les lignes ceux relatifs à chaque réplique. À titre d'exemple, le Tableau 1 présente les résultats obtenus par le laboratoire M29 avec la méthode A (flexion 2 points).

Tableau 1 : Réponse du laboratoire M29 selon la méthode A : modules en MPa [E*] à 15°C et 10 Hz pour chaque éprouvette et chaque réplique.

	ÉPROUVETTE A	ÉPROUVETTE B	ÉPROUVETTE C	ÉPROUVETTE D
Réplique 1	12 412	12 603	13 075	12 797
Réplique 2	12 447	12 629	12 981	12 873
Réplique 3	12 442	12 623	12 947	12 787
Réplique 4	12 316	12 566	12 912	12 756

3.2 Test d'acceptabilité : principe

On se propose de réaliser une analyse simple des données, basée sur les moyennes μ et écart-types σ obtenus pour chaque ligne et chaque colonne. L'analyse comparative des colonnes (intégrant chacune des 4 répliques sur une même éprouvette) permet d'apprécier la dispersion de la mesure liée aux différentes éprouvettes ; celle des lignes (intégrant chacune les 4 éprouvettes pour chaque réplique) donne une idée de la répétabilité de la mesure sur un même lot d'éprouvettes. Au sein de chaque quadruplet de données, pour lesquels on a calculé les moyennes μ et les écarts-types σ , on compare les résultats obtenus pour les quatre répliques (analyse par lignes) et les quatre éprouvettes (analyse par colonnes) en procédant à un test statistique simple, basé sur la valeur du paramètre χ , défini dans l'équation (1) :

$$\chi = (\mu_{max} - \sigma(\mu_{max})) - (\mu_{min} + \sigma(\mu_{min})) \quad (1)$$

où : μ_{max} est la plus grande moyenne des quatre lignes ou colonnes et $\sigma(\mu_{max})$ l'écart-type associé, μ_{min} est la plus petite moyenne des quatre lignes ou colonnes et $\sigma(\mu_{min})$ l'écart-type associé,

Une valeur de $\chi < 0$ est interprétée comme un recouvrement des intervalles de confiance : les écarts sont considérés comme statistiquement non significatifs et les mesures comme homogènes. A contrario, un $\chi > 0$ implique que les intervalles de confiance sont disjoints et que les écarts sont statistiquement significatifs : on considère ainsi que les mesures sont dispersées. L'interprétation graphique du test statistique peut être réalisée de manière directe en traçant les moyennes par réplique pour l'analyse par lignes (respectivement par éprouvette pour l'analyse par colonnes) sous forme d'histogrammes comportant des barres d'erreur de valeur $\pm \sigma$: les plages ainsi définies sont superposées dans le cas d'un χ négatif et disjointes pour un χ positif.

3.3 Test d'acceptabilité : exemple

À titre d'illustration, on reprend le cas de la réponse du laboratoire M29 avec la méthode A. Le Tableau 2 reprend les résultats du Tableau 1 en les complétant avec les moyennes μ et écarts-types σ pour chaque ligne et colonne. Les valeurs μ_{max} et μ_{min} ainsi que les écarts-types correspondants apparaissent respectivement en gras et en italique.

Tableau 2 : Réponse du laboratoire M29 pour la méthode A : modules en MPa [E*] à 15°C et 10 Hz, moyennes et écarts-types pour chaque éprouvette et chaque réplique.

	ÉPROUVETTE A	ÉPROUVETTE B	ÉPROUVETTE C	ÉPROUVETTE D	MOYENNE μ / ÉCART-TYPE σ : RÉPLIQUE
Réplique 1	12 412	12 603	13 075	12 797	12 722 / 283
Réplique 2	12 447	12 629	12 981	12 873	12 733 / 241
Réplique 3	12 442	12 623	12 947	12 787	12 700 / 217
Réplique 4	12 316	12 566	12 912	12 756	12 638 / 257
Moyenne μ / écart-type σ : éprouvette	12 404 / 61	12 605 / 28	12 979 / 70	12 803 / 50	

On peut alors calculer les valeurs de χ_{ligne} et $\chi_{colonne}$ calculés grâce la formule décrite par l'équation (1) :

$$\chi_{ligne} = (12\,733 - 241) - (12\,638 + 257) = -403 < 0 \quad (2)$$

$$\chi_{colonne} = (12\,979 - 70) - (12\,404 + 61) = 444 > 0 \quad (3)$$

On déduit des valeurs de χ_{ligne} et de $\chi_{colonne}$ obtenues pour ce laboratoire et cette méthode, que les écarts obtenus sur les valeurs de module sont statistiquement significatifs d'une éprouvette à l'autre mais pas d'une réplique à l'autre. Cette conclusion est illustrée par les graphes de la Figure

1 : les valeurs de χ_{ligne} et de $\chi_{colonne}$ sont symbolisées par des flèches. On constate bien ce que les signes de χ_{ligne} et de $\chi_{colonne}$ indiquent, à savoir la superposition des intervalles de confiance pour l'analyse par lignes et leur disjonction pour l'analyse par colonnes.

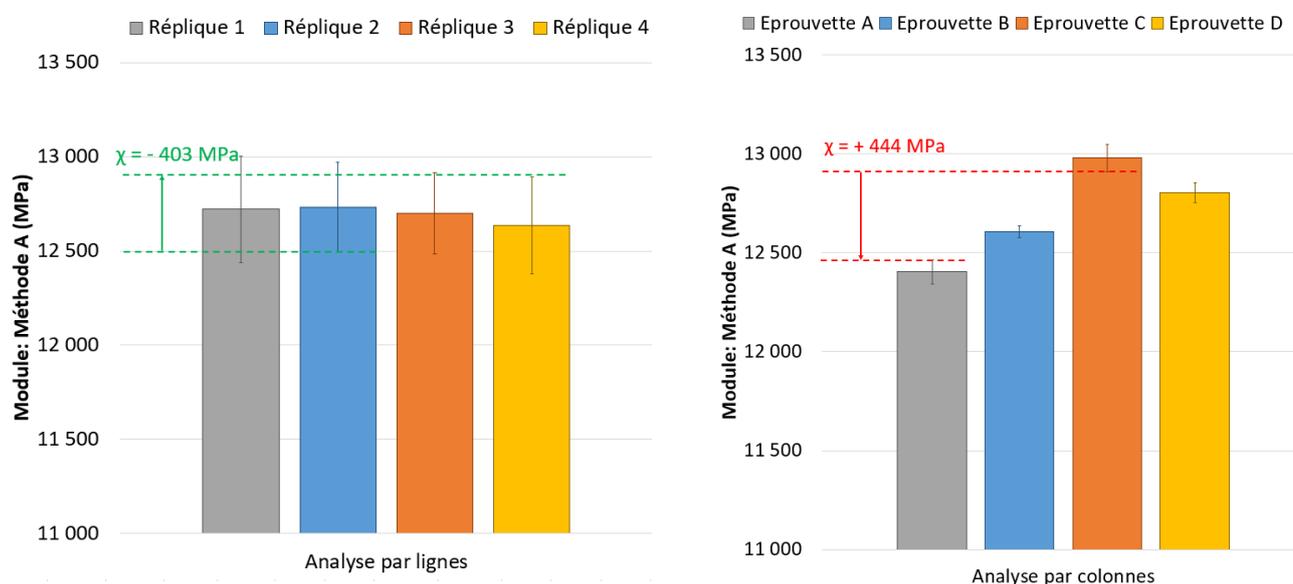


Figure 1 : Modules mesurés selon la méthode A par le laboratoire M29 : résultats par réplique (analyse par lignes – à gauche) et par éprouvette (analyse par colonnes – à droite).

3.4 Analyses comparatives des lignes : effet réplique

■ Résultats par méthode

Les histogrammes ci-après représentent les modules moyens et écarts-types par lot obtenus pour chacune des répliques et illustrent donc l'analyse par lignes. Pour une meilleure visualisation, les méthodes sont réunies par figure :

- Méthode C à 10°C sur la Figure 2, et à 15°C sur la Figure 3 ;
- Méthode A sur la Figure 4 ;
- Méthode D, E et F sur la Figure 5.

Les histogrammes correspondant à des valeurs de $\chi_{ligne} > 0$ sont encadrés en rouge. On constate qu'ils sont minoritaires (8 cas sur 68) et que dans la grande majorité des cas, les intervalles de confiance se superposent, indiquant que les résultats obtenus par réplique ne sont statistiquement pas différents, et donc que la mesure peut être considérée comme répétable. Cette conclusion est valable quelle que soit la méthode considérée, à l'exception de la méthode E pour laquelle on ne possède les données individualisées par éprouvettes, nécessaires pour le calcul de l'écart-type, que pour le laboratoire M21.

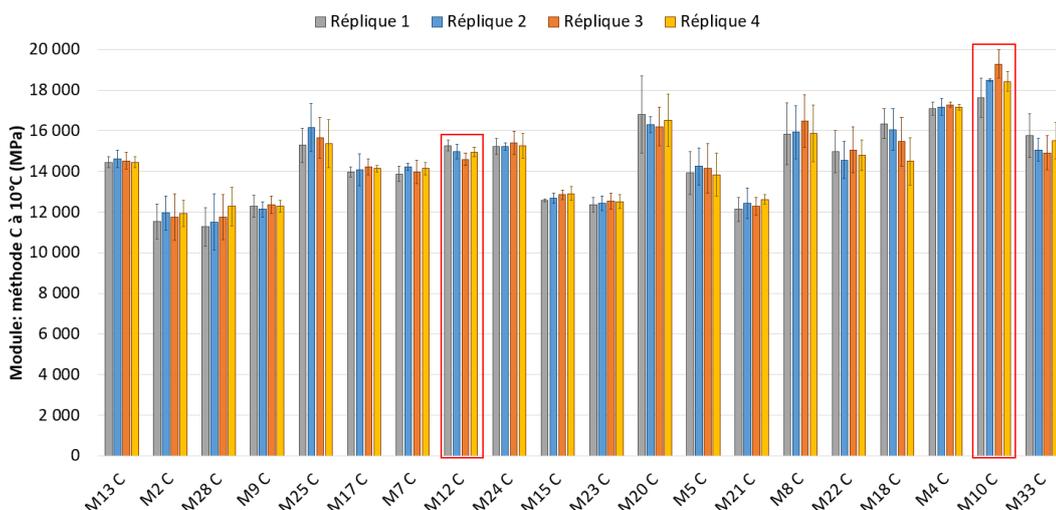


Figure 2 : Modules mesurés selon la méthode C à 10°C : résultats par réplique.

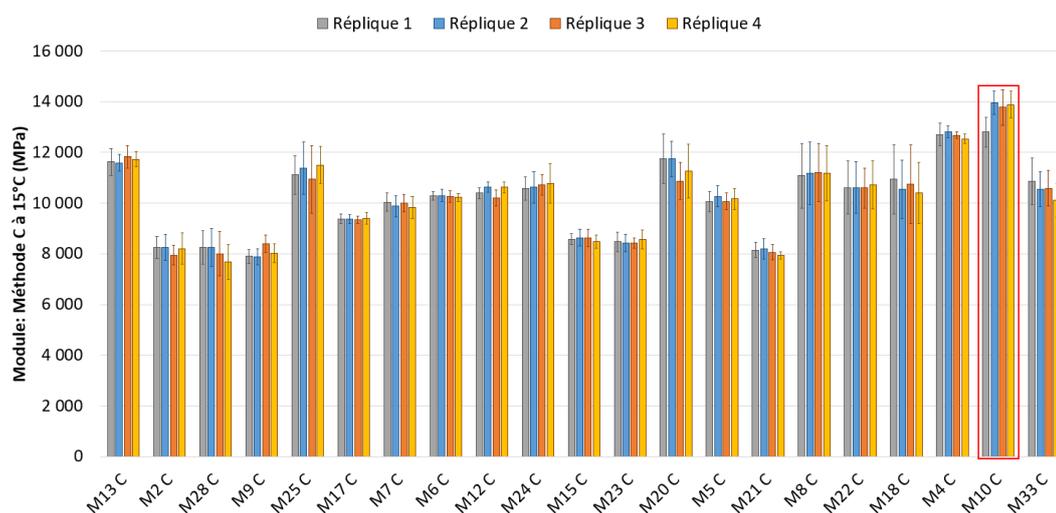


Figure 3 : Modules mesurés selon la méthode C à 15°C : résultats par réplique.

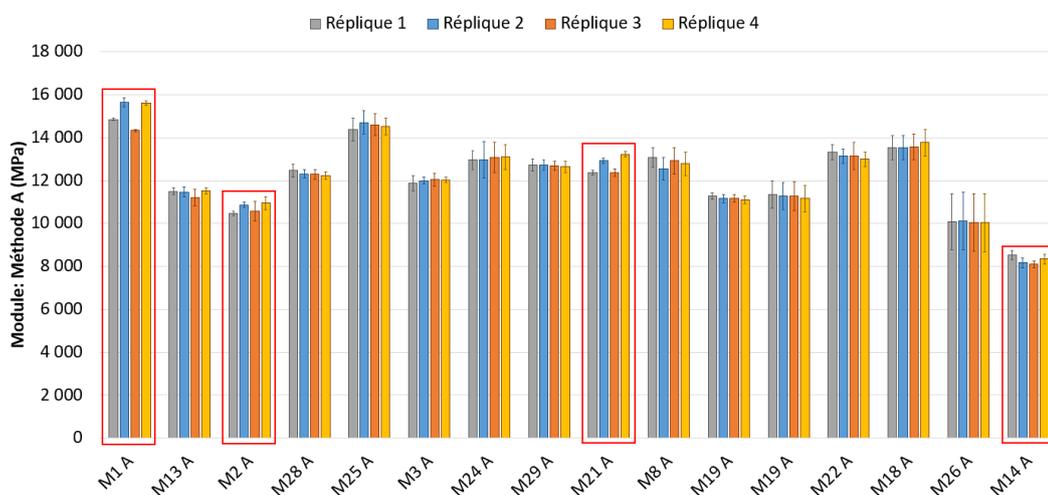


Figure 4 : Modules mesurés selon la méthode A : résultats par réplique.

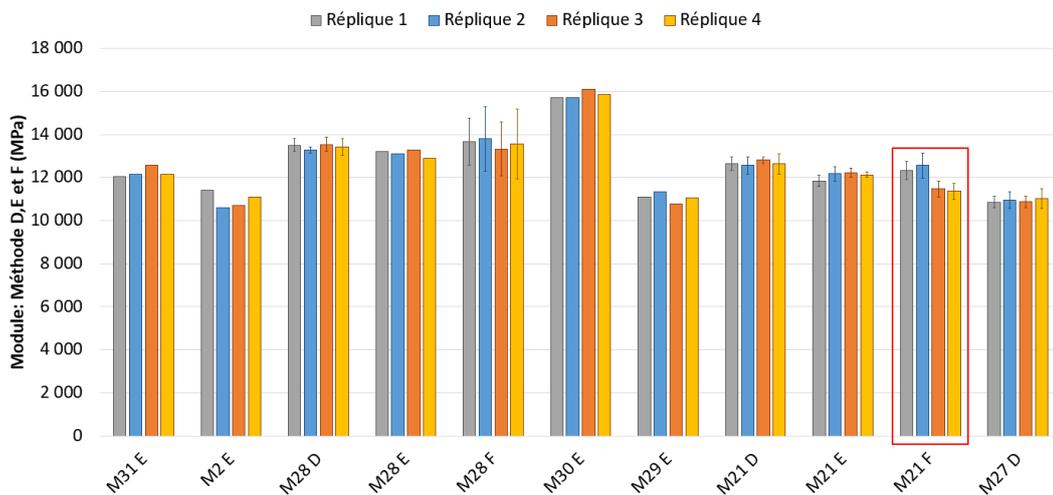


Figure 5 : Modules mesurés selon les méthodes D, E et F : résultats par réplique.

■ Analyse des résultats

Les 8 cas de χ_{ligne} positifs sont recensés dans le Tableau 3. On peut souligner que la méthode A est plus représentée que les autres méthodes avec 4 cas sur 8.

Tableau 3 : Cas présentant des χ_{ligne} positifs.

MÉTHODE A	MÉTHODE C À 10°C	MÉTHODE C À 15°C	MÉTHODE D, E, F
M1 A	M12 C	M10 C	M21 F
M2 A	M10 C	-	-
M21 A	-	-	-
M14 A	-	-	-

Pour trois de ces cas (M10 C à 10°C et à 15°C, M21 F), un potentiel biais d'interprétation a été identifié. On note en effet des écarts très conséquents entre la réplique 1 et les trois autres pour le laboratoire M10 et entre les répliques 1 et 2 et les deux autres pour le laboratoire M21 (cf. Figure 6 – les répliques significativement différentes des autres sont encadrées en rouge). Ces écarts ne semblent pas liés à la répétabilité normale de la mesure de module et paraissent donc suspects. L'origine n'a pas pu être déterminée sur la base des informations remontées lors de l'enquête ; elle pourrait par exemple être liée à des modifications métrologiques effectuées au cours de la campagne d'essais, ou à des problèmes de contrôle de la température dans l'enceinte, ou à des modifications opératoires comme par exemple un changement de technicien. En tout état de cause, ces résultats constituent des cas particuliers à exclure de cette analyse de dispersion.

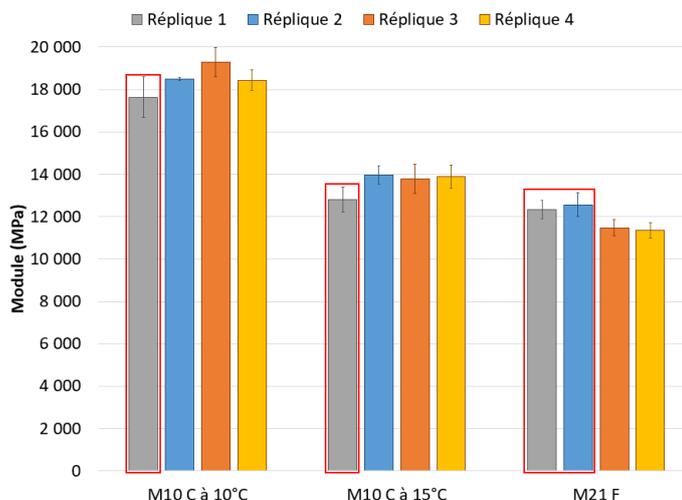


Figure 6 : Réponses M10 C à 10°C, M10 C à 15°C et M21 F : résultats par réplique.

Pour les 5 autres cas, on cherche à établir une relation entre les valeurs de χ_{ligne} et la dispersion intra-réplique, quantifiée par le coefficient de variation c_v , i.e. le rapport écart-type/moyenne exprimé en pour cent. Le c_v est calculé pour chaque ligne (i.e. chaque réplique), fournissant des valeurs similaires pour chaque réplique dans la plupart des cas. On choisit donc de les moyenner pour les quatre répliques. La valeur obtenue, c_{v_moy} , caractérise donc une répétabilité intra-réplique globale par laboratoire. A titre d'exemple, le calcul du c_{v_moy} pour la réponse du laboratoire M29 selon la méthode A est détaillé dans le Tableau 4 :

 Tableau 4 : Réponse du laboratoire M29 pour la méthode A : moyennes, écarts-types, et c_v par réplique.

	MOYENNE μ (MPA)	ECART-TYPE σ (MPA)	$C_v = \sigma / \mu$ (%)	C_{v_MOY} (%)
Réplique 1	12 722	283	2,23	1,96
Réplique 2	12 733	241	1,89	
Réplique 3	12 700	217	1,71	
Réplique 4	12 638	257	2,03	

Sur le graphe de la Figure 7, les valeurs de χ_{ligne} sont tracées en fonction de c_{v_moy} pour l'ensemble des mesures, toutes méthodes confondues. Les points rouges étiquetés représentent les cas pour lesquels les χ_{ligne} sont positifs, à l'exclusion des 3 réponses écartées comme précédemment mentionné. On constate que les laboratoires pour lesquels χ_{ligne} est positif se situent à gauche du graphique, ce qui indique une faible valeur de c_{v_moy} : toutes les valeurs correspondantes sont en effet inférieures à 2,5 %. Les cas M1 A et M21 A sont particulièrement représentatifs : il s'agit des deux réponses pour lesquelles les valeurs de c_{v_moy} sont les plus faibles et les valeurs de χ_{ligne} les plus élevées. De manière plus générale, une faible valeur de c_{v_moy} semble aller de pair avec un χ_{ligne} de valeur élevée, tandis qu'un c_{v_moy} élevé correspond à des χ_{ligne} fortement négatifs : la corrélation obtenue avec une courbe de tendance linéaire de pente négative est

assez bonne ($R^2 = 0,71$). Cela indique qu'un coefficient de variation intra-réplique faible (i.e. peu d'écart entre les modules des 4 éprouvettes) peut entraîner des écarts statistiquement significatifs entre répliques qui peuvent fausser le jugement sur la répétabilité de la mesure de module. Les deux dispersions (inter et intra-répliques) doivent être appréciées conjointement car elles sont manifestement corrélées.

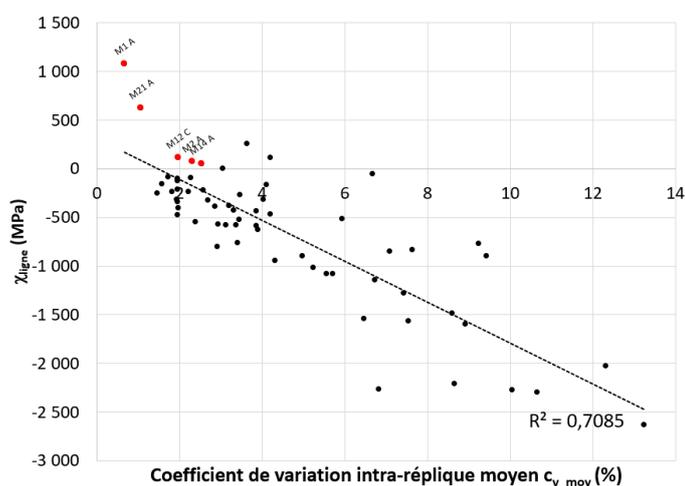


Figure 7 : χ_{ligne} en fonction du coefficient de variation intra-réplique moyen c_{v_moy} .

3.5 Analyse comparative des colonnes : effet éprouvette

■ Résultats par méthode

La méthodologie retenue pour l'analyse par colonnes est la même que pour l'analyse par lignes. Les histogrammes ci-après représentent les modules moyens et écart-type pour les quatre répliques obtenues pour chacune des éprouvettes. Le même regroupement par méthode a été réalisé :

- Méthode C à 10°C sur la Figure 8 et à 15°C sur la Figure 9 ;
- Méthode A sur la Figure 10 ;
- Méthode D, E et F sur la Figure 11.

Les histogrammes correspondant à des valeurs de $\chi_{\text{colonne}} > 0$ sont encadrés en rouge. Contrairement à l'analyse par lignes, ces cas sont très largement majoritaires (47 cas sur 63) : les intervalles de confiance ne se superposent donc pas dans la majorité des cas, indiquant que les résultats obtenus sont significativement différents d'une éprouvette à l'autre. Cette observation est valable pour toutes les méthodes, à l'exception de la méthode E pour laquelle on ne dispose que d'une seule réponse donnant les résultats individualisés par éprouvette (laboratoire M21). On peut aussi souligner que le phénomène est moins marqué pour la méthode A, avec seulement 10 χ_{colonne} positifs sur 16.

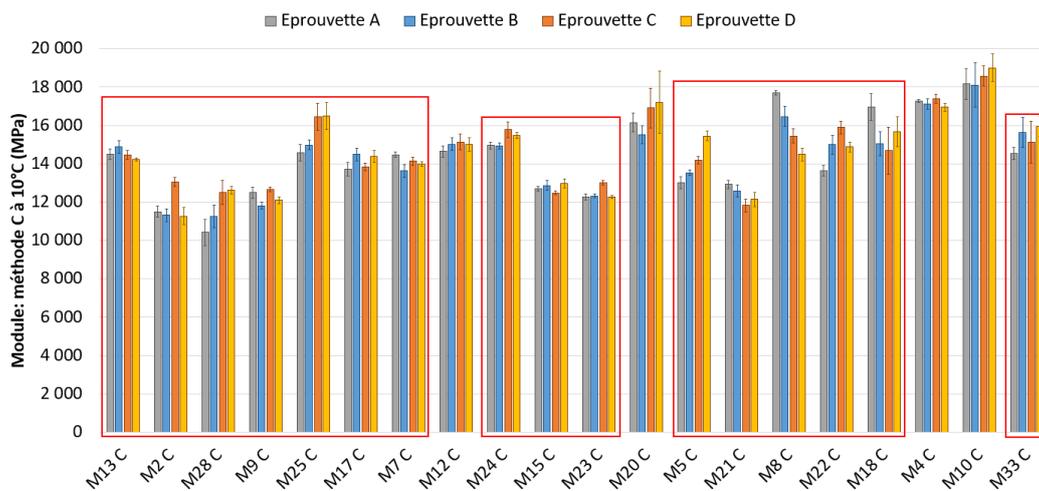


Figure 8 : Modules mesurés selon la méthode C à 10°C : résultats par éprouvette.

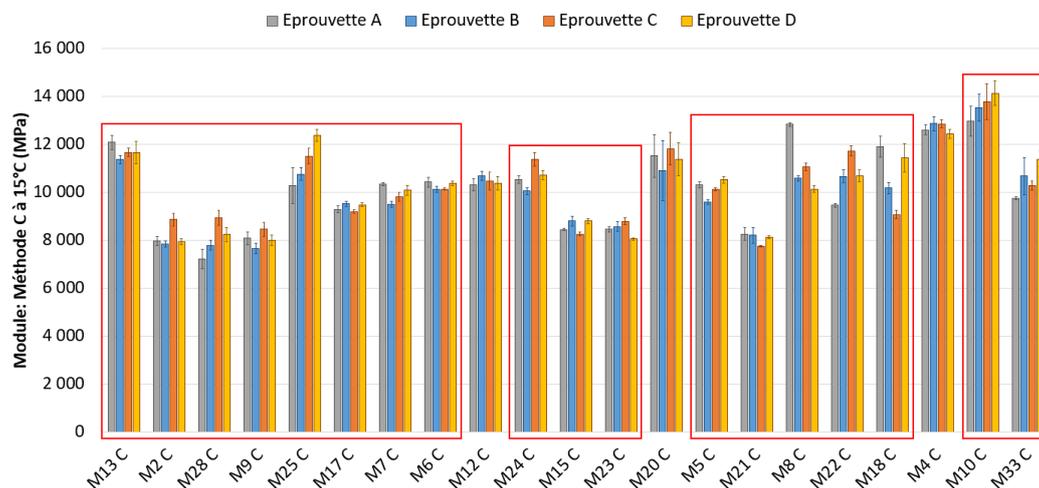


Figure 9 : Modules mesurés selon la méthode C à 15°C : résultats par éprouvette

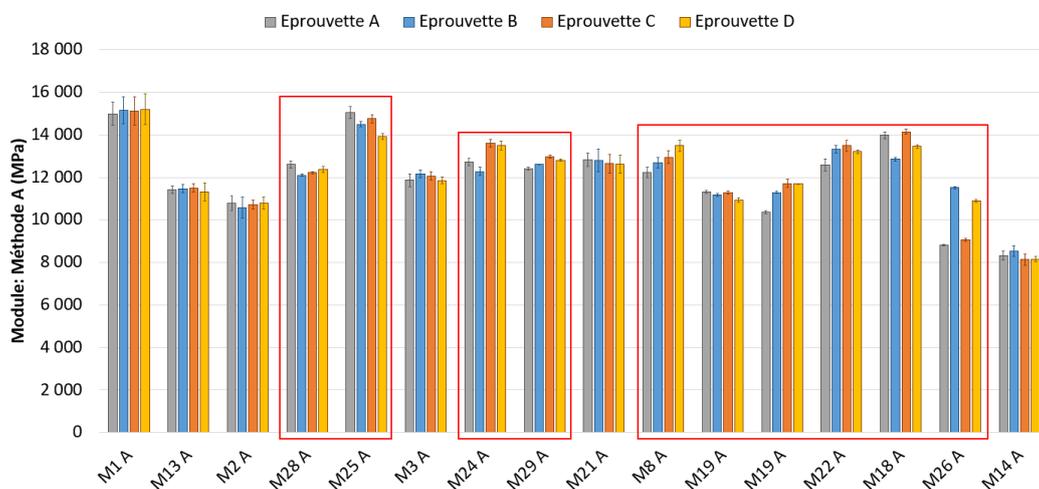


Figure 10 : Modules mesurés selon la méthode A : résultats par réplique.

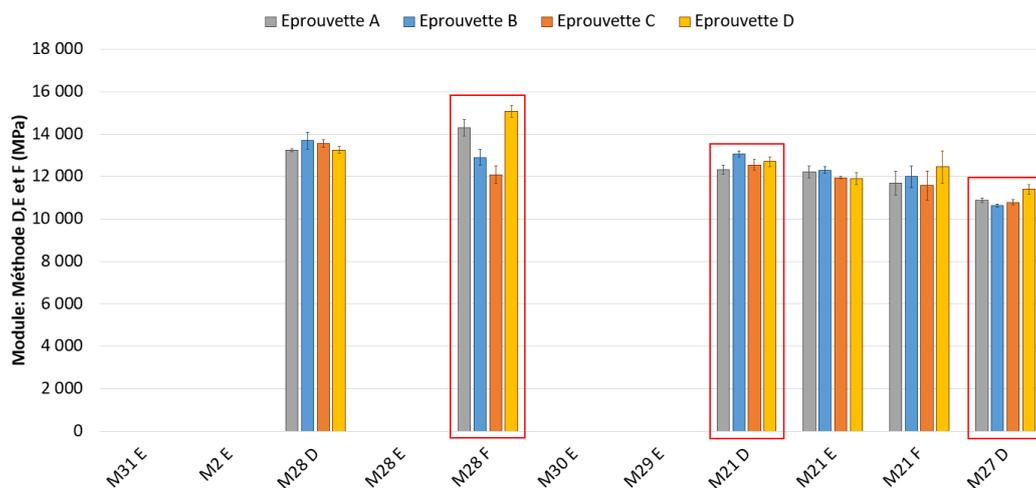


Figure 11 : Modules mesurés selon les méthodes D, E et F : résultats par éprouvette.

■ Analyse des résultats

L'analyse par colonnes indique donc que dans une large majorité, les mesures unitaires de module obtenues au sein d'un même lot sont statistiquement différentes d'une éprouvette à l'autre. Ce résultat n'est pas si surprenant : bien que les lots d'éprouvettes soient constitués pour être homogènes, leurs propriétés intrinsèques ont tellement d'influence sur la valeur du module que les éprouvettes d'un même lot peuvent fournir dans de nombreux cas des valeurs de module très différentes.

En particulier, la teneur en vides des éprouvettes est réputée être un facteur explicatif important de la valeur du module des enrobés. On peut alors supposer que les dispersions intra-lot observées dans la majorité des cas peuvent être liées aux écarts de teneurs de vides des éprouvettes. A contrario, on peut intuitivement penser qu'un lot d'éprouvettes dont les teneurs en vides sont proches fournit des valeurs de module proches. On se propose de le vérifier, en introduisant le coefficient de variation du pourcentage de vides de chaque lot $c_v(\text{vides})$. Il s'agit du rapport écart-type/moyenne des teneurs en vides géométriques des éprouvettes de chaque lot : plus la valeur du $c_v(\text{vides})$ d'un lot est petite, plus les éprouvettes qui le composent ont des teneurs en vides proches. À titre d'exemple, le Tableau 5 résume le calcul pour la réponse du laboratoire M29 selon la méthode A.

Tableau 5 : Teneurs en vides du lot du laboratoire M29 pour la méthode A : moyennes, écarts-types, et $c_v(\text{vides})$.

	TENEURS EN VIDES GÉOMÉTRIQUES (%)	MOYENNE μ (%)	ECART-TYPE σ (%)	$C_v(\text{VIDES}) = \sigma/\mu$ (%)
Epreuve A	4,62	4,28	0,28	6,65
Epreuve B	4,39			
Epreuve C	4,09			
Epreuve D	4,00			

Sur le graphe de la Figure 12, les valeurs de $\chi_{colonne}$ sont tracées en fonction de $c_v(\text{vides})$ pour l'ensemble des mesures, toutes méthodes confondues. Les points rouges représentent les cas pour lequel les $\chi_{colonne}$ sont positifs. Il ne semble pas y avoir de corrélation entre la dispersion des teneurs en vides au sein des lots, quantifiée par la valeur de $c_v(\text{vides})$, et l'homogénéité des mesures de module, comme illustré par le R^2 de la régression linéaire qui est très faible (0,0007). Disposer de lots d'éprouvettes homogènes en vides ne garantit donc pas des mesures de modules proches pour chaque éprouvette, et réciproquement. Les cas des réponses des laboratoires M18 et M21 selon la méthode A, mis en relief sur le graphique, sont particulièrement symptomatiques :

- **M18 A** : le lot est extrêmement homogène en teneurs en vides puisque toutes les éprouvettes ont le même indice des vides, d'où un $c_v(\text{vides})$ égal à 0%. Néanmoins, les mesures de module au sein du lot présentent des écarts statistiquement significatifs comme l'établit la valeur positive du $\chi_{colonne}$ (+ 1 080 MPa).
- **M21 A** : le lot présente une dispersion en vides élevée en comparaison des autres réponses, le $c_v(\text{vides})$ obtenu est de 12,6%. Pourtant, les écarts sur les modules mesurés sont non significatifs d'une éprouvette à l'autre : il s'agit d'un des cas de $\chi_{colonne}$ négatif recensés (- 530 MPa).

On ne peut donc ici établir formellement de lien entre les écarts de teneurs en vides des éprouvettes et ceux constatés sur les mesures de module au sein d'un même lot. Le soin apporté par l'opérateur pour constituer des lots d'éprouvettes homogènes en teneur en vides n'est donc pas suffisant pour s'affranchir d'autres paramètres influant sur la reproductibilité de la mesure : le facteur de forme des éprouvettes par exemple, pourrait avoir une incidence plus importante sur la valeur du module. Il s'agit d'un résultat surprenant car contre-intuitif : il va à l'encontre d'une réalité bien connue dans la profession.

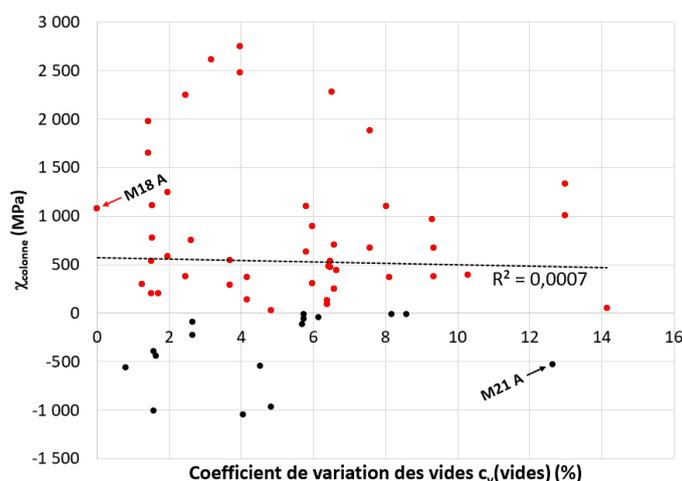


Figure 12 : $\chi_{colonne}$ en fonction du coefficient de variation des vides $c_v(\text{vides})$.

3.6 Synthèse de la dispersion intra-laboratoires

La mesure de module est globalement très répétable, quelle que soit la méthode retenue : on relève globalement peu d'écarts entre les répliques. Quand ceux-ci sont statistiquement significatifs, ils peuvent vraisemblablement être expliqués (M21 F et M10 C à 10°C et à 15°C : une ou deux répliques diffèrent des autres de manière suspecte, suggérant des modifications opératoires et/ou matérielles inopinées ou pendant la campagne expérimentale), ou relativisés (M1A, M2A, M12 C à 10°C, M21 A et M 14 A ont une faible dispersion intra-réplique qui fausse l'appréciation de la répétabilité inter-répliques).

Au sein d'un même lot, les modules sont souvent différents : la dispersion intra-lot des valeurs est plus élevée que celle liée à la répétition de la mesure sur une même éprouvette. Cela est souvent expliqué par la sensibilité des valeurs de module aux différences de caractéristiques des éprouvettes, bien que les lots de corps d'épreuve soient constitués pour être homogènes. Toutefois, et de manière surprenante, la constitution d'un lot très homogène en teneurs en vides ne garantit pas une faible dispersion intra-lot : on ne peut ici établir de corrélation évidente entre le coefficient de variation des vides $c_v(\text{vides})$ des lots d'éprouvettes et l'étalement des mesures de modules correspondant.

Enfin, cette analyse confirme a posteriori la nécessité des quatre éprouvettes requises par la norme d'essai EN 12697-26 [2] pour obtenir un résultat d'essai de module en réduisant l'effet éprouvette.

4 Première évaluation des paramètres

Les premières étapes de l'analyse ont consisté à corriger dans la base de données quelques hétérogénéités dans le mode de saisie des participants, puis à examiner pour chacun des paramètres la possibilité de l'exploiter statistiquement ou non.

Plusieurs d'entre eux ont été écartés à ce stade :

- Dépotage et nombre de réchauffages du liant : l'incohérence constatée entre les réponses de certains laboratoires ne permet pas une exploitation rigoureuse.
- Type de malaxeur : l'hétérogénéité et l'incomplétude des réponses ne permettent pas une exploitation rigoureuse. Le formulaire était, il est vrai, peu détaillé sur ce point.
- Nombre de gâchées par plaque : ce paramètre est fortement lié au temps entre fin de malaxage et début de compactage (stockage à chaud) ; il est abandonné à son profit.
- Géométrie et dimensions des éprouvettes : elles sont imposées par la méthode, et on constate trop peu de différences entre les différents participants pour déceler une éventuelle influence.

La corrélation des autres paramètres avec les modules mesurés a été analysée en retenant pour chaque laboratoire les moyennes des 4 répliques. Les résultats sont présentés séparément pour la méthode C à 10°C et 15°C, la méthode A à 15°C, et regroupées pour les méthodes D, E et F à 15°C, sans exploitation statistique (populations de données trop restreintes).

5.1 Méthode d'analyse de la corrélation

Afin de déterminer s'il existe une corrélation significative entre un paramètre donné et le module, nous présentons deux démarches d'analyse des résultats basées sur la statistique de Pearson [8].

La première démarche est dénommée « *Test 1* » pour la suite. Elle consiste à calculer tout d'abord le coefficient de corrélation linéaire simple « r » de Pearson entre deux séries de valeurs (paramètre p / module) : $r = COV(X, Y) / \sigma_x \cdot \sigma_y$. Les valeurs de r sont comprises entre -1 et +1. Une valeur de $r = 0$ indique une absence totale de corrélation, et plus la valeur absolue de r est proche de 1 plus forte est la corrélation entre les deux grandeurs.

On compare ensuite r avec la valeur donnée dans la table de Bravais-Pearson, pour un risque d'erreur α donné. Nous choisissons ici $\alpha = 5 \%$ et notons cette valeur $r_{critique}$. Si $r > r_{critique}$, alors il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % l'existence d'une corrélation entre le paramètre étudié et le module. C'est impossible dans le cas contraire.

Dans le cas d'une régression linéaire $r^2 = R^2$, où R^2 désigne le coefficient de détermination linéaire compris entre 0 et 1 (couramment présenté sur les graphiques de régressions Excel). Il représente la part de variabilité expliquée par la régression.

La deuxième démarche est dénommée « *Test 2* » pour la suite. Elle consiste à calculer tout d'abord la valeur- p de probabilité d'hypothèse nulle $r = 0$ (absence totale de corrélation).

On compare ensuite valeur- p avec le niveau de signification statistique choisi ($\alpha = 5 \%$), soit un intervalle de confiance de 95 %. Si valeur- $p < \alpha$ alors il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % l'existence d'une corrélation entre la température de malaxage et le module. C'est impossible dans le cas contraire. Dans ce cas il n'est pas nécessaire de déterminer r et r^2 .

On rappelle que :

- Une corrélation constatée statistiquement n'implique pas automatiquement de lien physique de cause à effet.
- Les résultats de cette analyse concernent pour chaque paramètre la plage de valeurs observée dans la base de données.
- Les résultats de cette analyse concernent la formule de GB4 étudiée.
- Aucun test de corrélation n'a été appliqué aux résultats des méthodes D, E et F car le nombre de résultats par méthode est insuffisant (2 résultats pour la méthode D, 3 résultats pour la méthode F, 6 pour la méthode E).

5.2 Température de malaxage

Les Figure 13 a) à d) montrent l'évolution du module en fonction de la température de malaxage de l'enrobé pour l'ensemble des méthodes A, C, D, E et F.

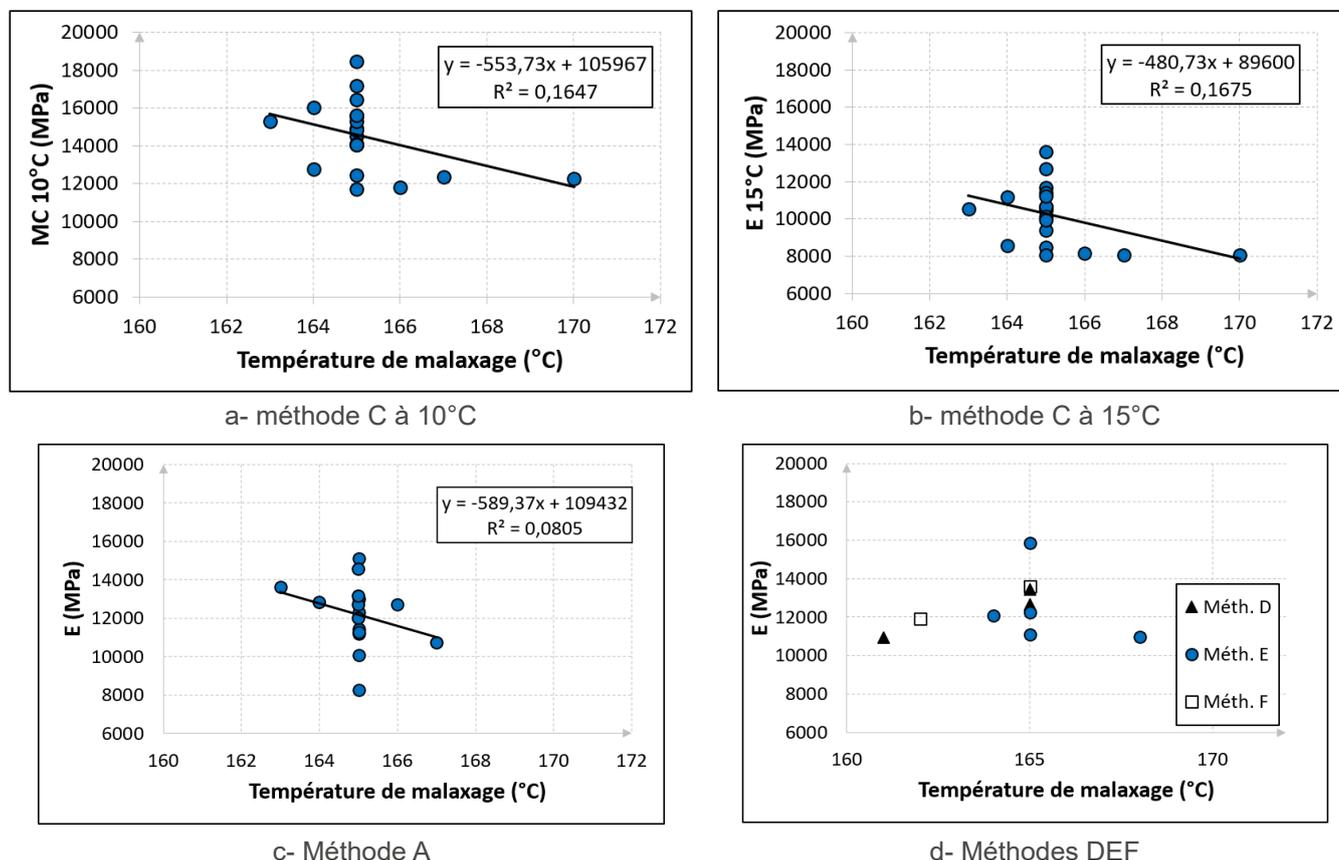


Figure 13 : Effet température de malaxage sur le module des méthodes ADEF et de la méthode C à 10°C et à 15°C.

Test 1 : Les données présentées dans le Tableau 6 ci-dessous montrent qu'il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre la température de malaxage et le module.

Tableau 6 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre la température de malaxage et le module : test 1

MÉTHODE	NOMBRE DE LABORATOIRES	DDL ¹	r	$r_{\text{CRITIQUE DE PEARSON À 95\%}}$	CORRÉLATION	r^2
Méthode C 10°C	20	18	-0,4058	0,4438	Non	0,1647
Méthode C 15°C	21	19	-0,4093	0,4329	Non	0,1676
Méthode A	16	14	-0,2837	0,4973	Non	0,0805

1 DDL = degré de liberté

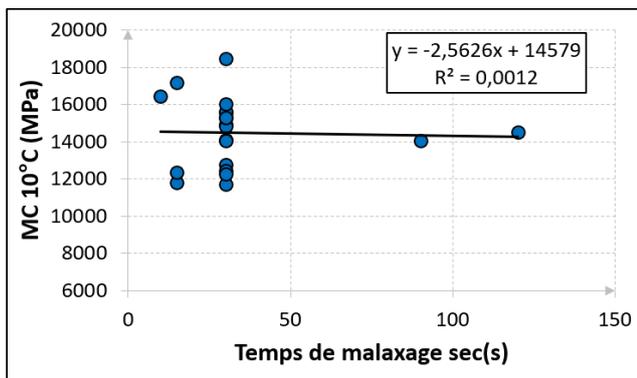
Test 2 : Tout comme dans le test 1, les données présentées dans le Tableau 7 ci-dessous montrent qu'il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre la température de malaxage et le module.

Tableau 7 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre la température de malaxage et le module : test 2

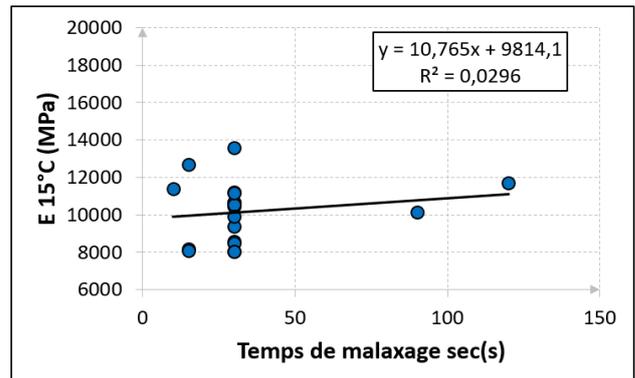
MÉTHODE	VALEUR- p	NIVEAU DE SIGNIFICATION α	CORRÉLATION	r	r^2
Méthode C 10°C	0,076	0,05	Non	Sans objet car valeur- $p > 0,05$	
Méthode C 15°C	0,065	0,05	Non		
Méthode A	0,287	0,05	Non		

5.3 Temps de malaxage à sec

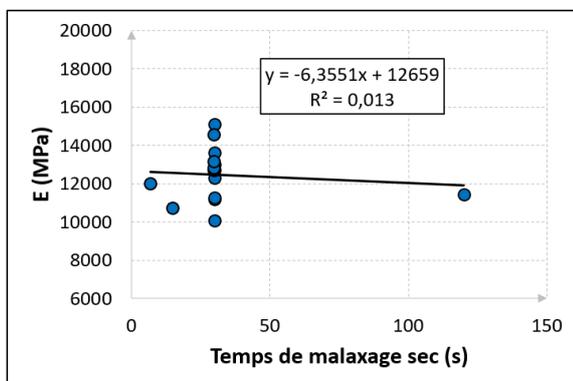
L'effet de ce facteur sur le module est ici difficile à interpréter, la majorité des réponses (32 sur 47) ayant le même temps : 30 s, dans une plage allant de 7 à 120 s (voir Figure 14 a) à d)). Il semble insignifiant quelle que soit la méthode de mesure.



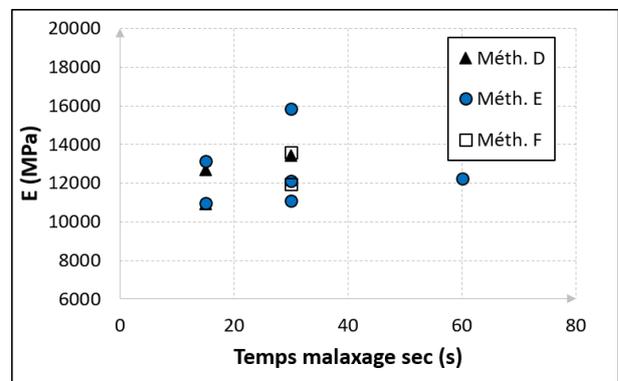
a- méthode C à 10°C



b- méthode C à 15°C



c- Méthode A



d- Méthodes DEF

Figure 14: Effet de la durée du malaxage sec sur le module des méthodes ADEF et de la méthode C à 10°C et 15°C

Test 1 : Les coefficients de corrélation fournis dans le Tableau 8 montrent qu'il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre le temps de malaxage à sec et le module.

Tableau 8 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre le temps de malaxage à sec et le module : test 1

MÉTHODE	NOMBRE DE LABORATOIRES	DDL	r	$r_{CRITIQUE}$ DE PEARSON À 95%	CORRÉLATION	r^2
Méthode C 10°C	20	18	-0,0346	0,4438	Non	0,0012
Méthode C 15°C	21	19	0,1714	0,4329	Non	0,0294
Méthode A	15	13	-0,114	0,5140	Non	0,013

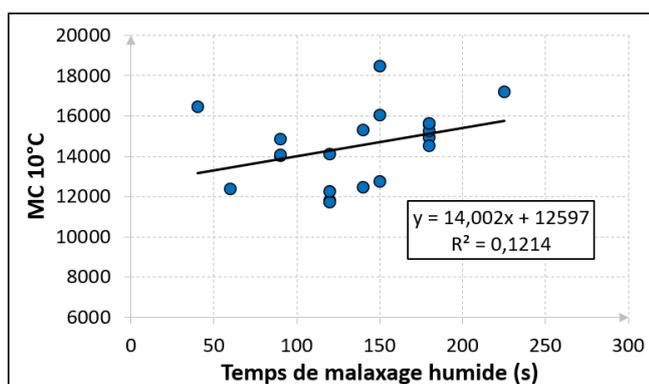
Test 2 : Les valeurs-p fournies dans le Tableau 9 ci-dessous montrent qu'il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre le temps de malaxage à sec et le module.

Tableau 9 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre la température de malaxage à sec et le module : test 2

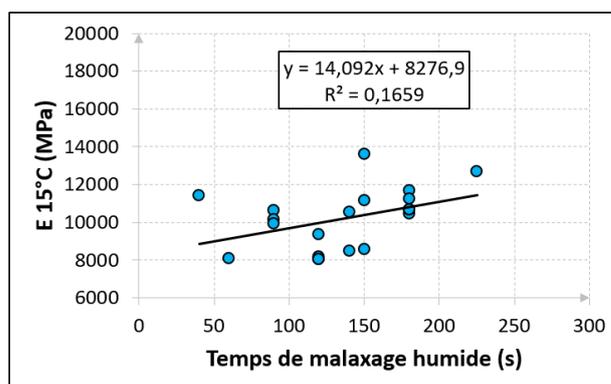
MÉTHODE	VALEUR-p	NIVEAU DE SIGNIFICATION α	CORRÉLATION	r	r^2
Méthode C 10°C	0,882	0,05	Non	Sans objet car valeur-p > 0,05	
Méthode C 15°C	0,457	0,05	Non		
Méthode A	0,685	0,05	Non		

5.4 Temps de malaxage humide

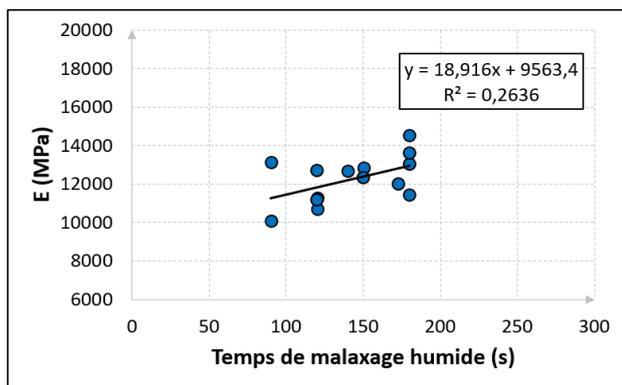
Les figures 15 a) à d) montrent l'évolution du module en fonction du temps de malaxage humide. Afin déterminer si ces évolutions sont statistiquement significatives, nous appliquons la même démarche que précédemment.



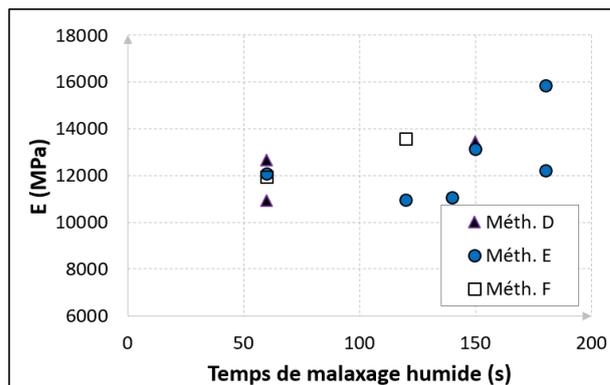
a- méthode C à 10°C



b- méthode C à 15°C



c- Méthode A



d- Méthodes DEF

Figure 15: Effet de la durée du malaxage humide sur le module des méthodes ADEF et de la méthode C à 10°C et 15°C

Test 1 : Les coefficients de corrélation fournis dans le Tableau 10 montrent qu'il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre le temps de malaxage humide et le module.

Tableau 10 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre le temps de malaxage humide et le module : test 1

MÉTHODE	NOMBRE DE LABORATOIRES	DDL	r	$r_{\text{CRITIQUE DE PEARSON À 95\%}}$	CORRÉLATION	r^2
Méthode C 10°C	20	18	0,3484	0,4438	Non	0,1214
Méthode C 15°C	21	19	0,3258	0,4329	Non	0,1062
Méthode A	14	12	0,5134	0,5324	Non	0,2636

Test 2 : Les valeurs- p obtenues dans le Tableau 11 sont nettement supérieures à $\alpha = 0,05$, par conséquent il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre le temps de malaxage humide et le module.

Tableau 11 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre le temps de malaxage humide et le module : test 2

MÉTHODE	VALEUR- p	NIVEAU DE SIGNIFICATION α	CORRÉLATION	r	r^2
Méthode C 10°C	0,132	0,05	Non	Sans objet car valeur- $p > 0,05$	
Méthode C 15°C	0,149	0,05	Non		
Méthode A	0,060	0,05	Non		

5.5 Temps entre fin de malaxage et début de compactage (stockage à chaud)

La Figure 16 a) à d) montre l'évolution du module en fonction du temps stockage à chaud de l'enrobé (c.-à-d. la durée entre la fin du malaxage humide et le début du compactage).

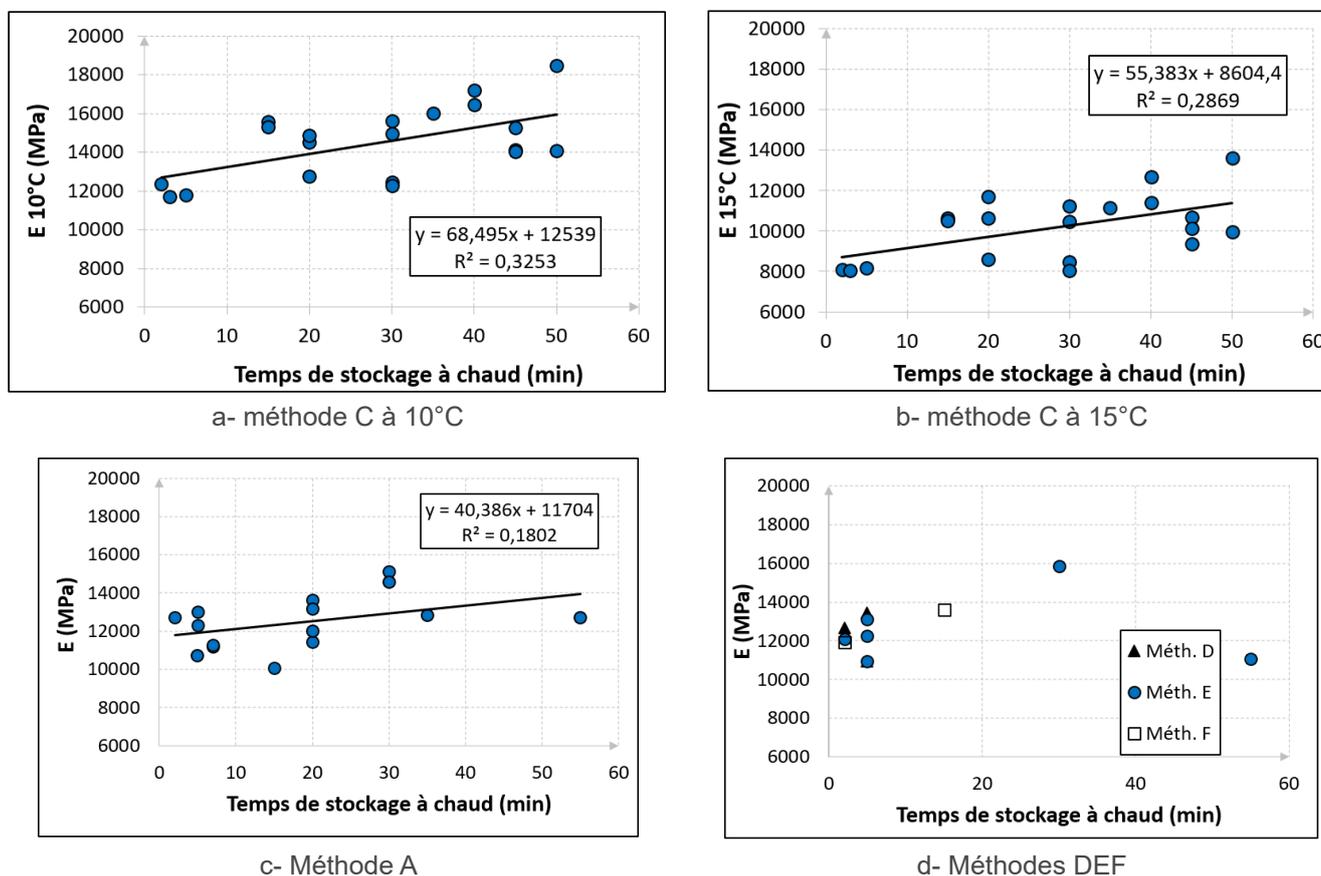


Figure 16: Effet du temps entre la fin du malaxage et le début du compactage sur le module Méthodes ADEF et méthode C à 10°C et à 15°C

Test 1 : Les coefficients de corrélation r fournis dans le Tableau 12 montrent qu'il n'est pas possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre le temps de stockage à chaud et le module.

Tableau 12 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre le temps de stockage à chaud et le module : test 1

MÉTHODE	NOMBRE DE LABORATOIRES	DDL	r	$r_{\text{CRITIQUE DE PEARSON À 95\%}}$	CORRÉLATION	r^2
Méthode C 10°C	20	18	0,5703	0,4438	Oui	0,3253
Méthode C 15°C	21	19	0,5141	0,4329	Oui	0,2644
Méthode A	16	14	0,4244	0,4973	Non	0,1802

Test 2 : Les valeurs- p sont fournies dans le Tableau 13 conduisent à la même conclusion que le Test 1 c'est-à-dire qu'ils montrent qu'il n'est pas possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre le temps de stockage à chaud et le module.

Tableau 13 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre le temps de stockage à chaud et le module : cas 2

MÉTHODE	VALEUR- p	NIVEAU DE SIGNIFICATION α	CORRÉLATION	r	r^2
Méthode C 10°C	0,009	0,05	Oui	0,57	0,325
Méthode C 15°C	0,017	0,05	Oui	0,514	0,264
Méthode A	0,115	0,05	Non	-	-

Pour la méthode C, les valeurs des coefficients de corrélation r dans le Test 1 et celles de la valeur- p dans le Test 2, montrent que 26 à 32 % de la dispersion du module de la méthode C peut être expliquée par l'augmentation du temps de stockage à chaud. Cette augmentation du module est de l'ordre 51 à 68 MPa/min.

5.6 Teneur en vides d'air (mesure géométrique)

La teneur en vides est un des facteurs bien connus qui influencent fortement les performances mécaniques (dont le module) des enrobés. La Figure 17 a) à d) montre l'influence de la teneur en vides géométriques des éprouvettes sur les modules.

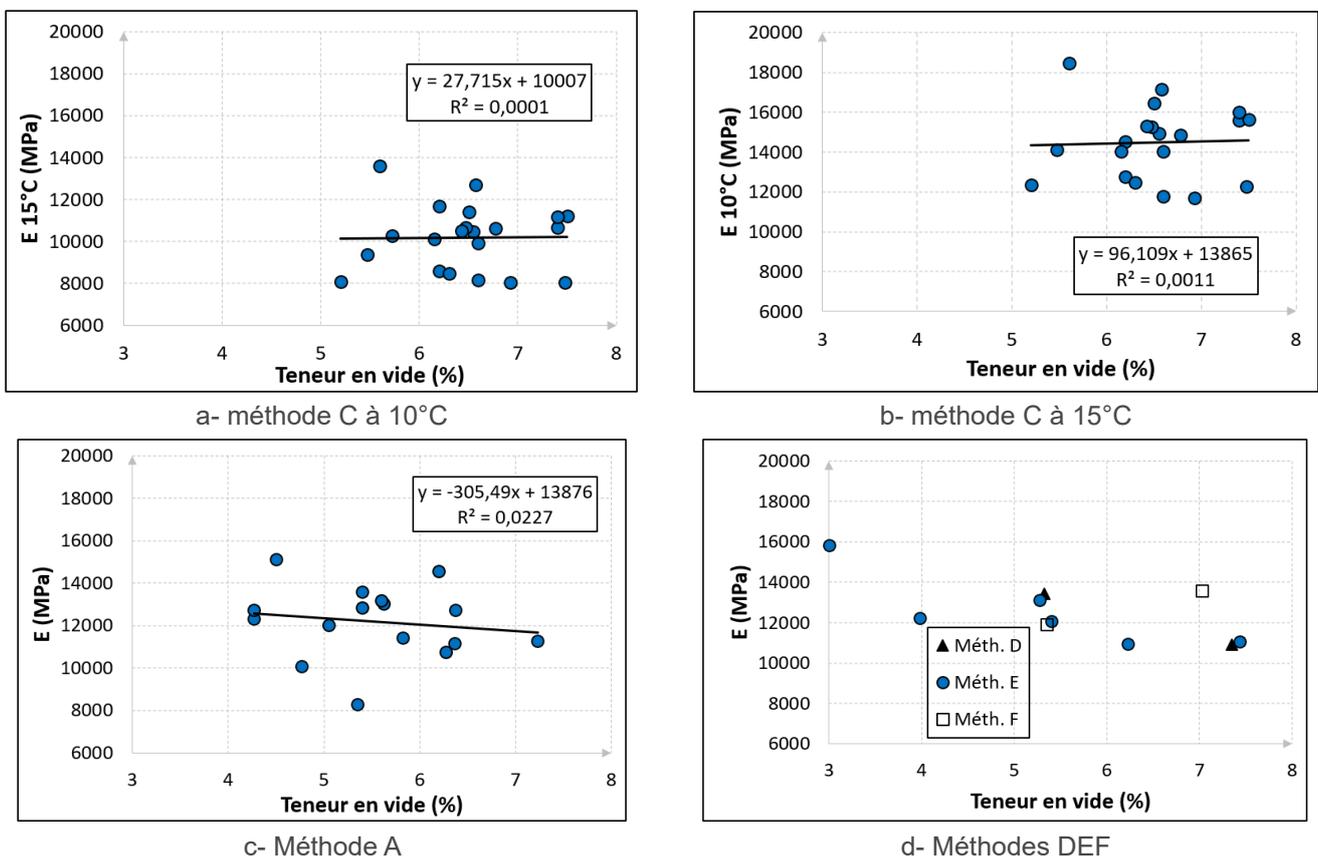


Figure 17: Effet de la teneur en vides sur le module

Test 1 : Les coefficients de corrélation r fournis dans le Tableau 14 conduisent à constater (avec une confiance de 95 %) une absence de corrélation statistique entre la teneur en vides d'air et le module de l'enrobé.

Tableau 14 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre la teneur en vides et le module : test 1

MÉTHODE	NOMBRE DE LABORATOIRES	DDL	r	$r_{\text{CRITIQUE DE PEARSON À 95\%}}$	CORRÉLATION	r^2
Méthode C 10°C	20	18	0,0331	0,4438	Non	0,0011
Méthode C 15°C	21	19	0,01	0,4329	Non	0,0001
Méthode A	16	14	0,1506	0,4973	Non	0,0227

Test 2 : Les valeurs- p fournies dans le Tableau 15 sont nettement supérieures à $\alpha = 0,05$, par conséquent il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre la teneur en vides et le module.

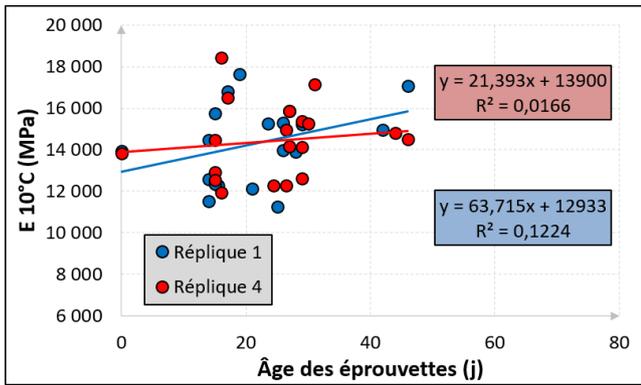
Tableau 15 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre la teneur en vides et le module : test 2

MÉTHODE	VALEUR- p	NIVEAU DE SIGNIFICATION α	CORRÉLATION	r	r^2
Méthode C 10°C	0,890	0,05	Non	-	
Méthode C 15°C	0,961	0,05	Non		
Méthode A	0,577	0,05	Non		

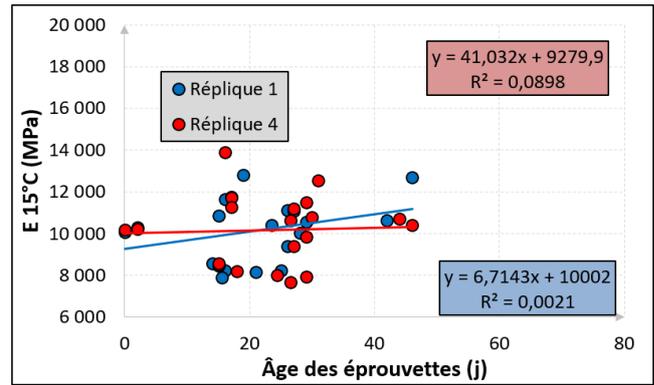
Les Test 1 et 2 montrent (avec une confiance de 95 %) qu'il n'existe pas de corrélation entre la teneur en vides et le module. Or la teneur en vides est un facteur bien connu pour influencer fortement les performances mécaniques (dont le module) des enrobés. Le constat statistique est probablement dû à la relative homogénéité des teneurs en vides : 5 % à 8 %, qui ne permet pas de rendre visible leur effet sur le module.

5.7 Âge des éprouvettes

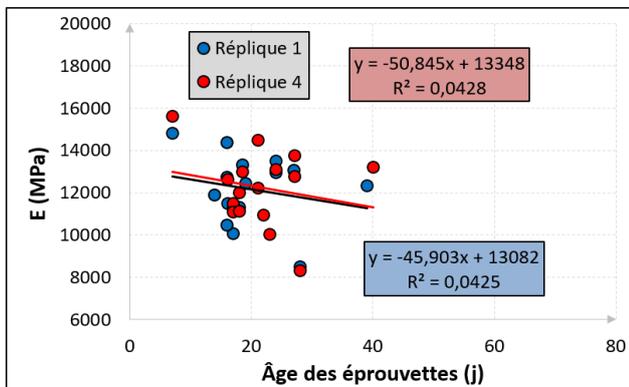
L'âge des éprouvettes (c.-à-d. la durée entre le sciage et le début des essais) dépend de chaque réplique. Pour mieux appréhender son influence nous n'avons considéré que les résultats des répliques 1 et 4 correspondant à l'âge minimal moyen de 20 jours et maximal moyen de 26 jours. La Figure 18 a) à d) montre l'évolution du module en fonction de l'âge des éprouvettes.



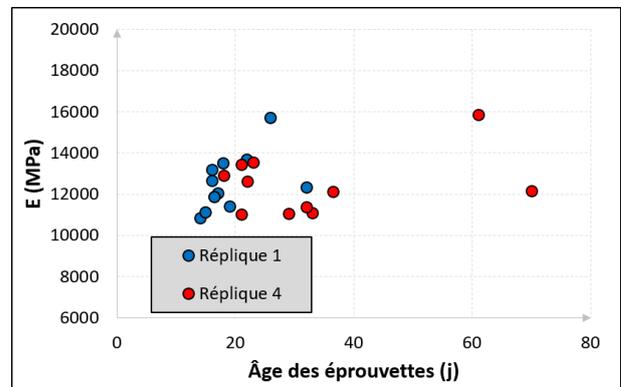
a- méthode C à 10°C



b- méthode C à 15°C



c- Méthode A



d- Méthodes DEF

Figure 18: Effet de l'âge des éprouvettes sur le module

Test 1 : Les résultats du Tableau 16 montrent que les valeurs- p sont supérieures à $\alpha = 0,05$, il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre l'âge des éprouvettes et le module.

Tableau 16 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre l'âge des éprouvettes et le module : test 2

MÉTHODE	RÉPLIQUE	NOMBRE DE LABORATOIRES	DDL	r	$r_{\text{CRITIQUE DE PEARSON À 95\%}}$	CORRÉLATION	r^2
Méthode C 10°C	Réplique 1	20	18	0,3498	0,4438	Non	0,1224
	Réplique 4			0,1288		Non	0,0166
Méthode C 15°C	Réplique 1	21	19	0,0458	0,4329	Non	0,0021
	Réplique 4			0,2996		Non	0,0898
Méthode A	Réplique 1	16	14	0,2061	0,4973	Non	0,0425
	Réplique 4			0,2068		Non	0,0428

Test 2 : Les résultats du Tableau 17 montrent que les valeurs- p sont supérieures à $\alpha = 0,05$, il est possible d'affirmer avec une confiance de 95 % qu'il n'existe pas de corrélation entre l'âge des éprouvettes et le module.

Tableau 15 : Analyse de l'existence ou non de corrélation entre la teneur en vides et le module : test 2

MÉTHODE	RÉPLIQUE	VALEUR- p	NIVEAU DE SIGNIFICATION α	CORRÉLATION	r	r^2
Méthode C 10°C	Réplique 1	0,143	0,05	Non	-	
	Réplique 4	0,103	0,05	Non		
Méthode C 15°C	Réplique 1	0,159	0,05	Non		
	Réplique 4	0,172	0,05	Non		
Méthode A	Réplique 1	0,444	0,05	Non		
	Réplique 4	0,442	0,05	Non		

L'absence de corrélation statistique avec le module de l'enrobé est constatée pour l'ensemble des méthodes A, C, D, E et F, dans la plage de valeurs enregistrées : 0 à 70 jours. Cette plage dépasse pourtant largement celle prévue par la norme : 14 à 42 jours.

5.8 Confection des éprouvettes : appareil de compactage ET sciage ou non

Les informations recueillies montrent que 11 laboratoires ont moulé les éprouvettes à la PCG pour la méthode C et 9 laboratoires les ont confectionnées à partir de plaques carottées. Elles ne permettent pas une exploitation précise de l'impact face sciée / non sciée comme dans la référence [9]. Le prélèvement en plaque impose en effet un carottage, donc une circonférence d'éprouvette systématiquement sciée. L'interprétation des résultats se ramène donc ici à la comparaison entre « PCG-moulée » et « Plaque-sciée », sans pouvoir séparer l'effet de la machine de compactage (giratoire ou plaque) de celui des faces (sciées ou non).

L'analyse des données (Figure 19) montre un impact très significatif du mode confection des éprouvettes. A 10°C les éprouvettes confectionnées par compactage giratoire / sans sciage conduisent à un module de 2 906 MPa (= 15 799 MPa – 12 893 MPa) de plus que celles confectionnées au compacteur de plaque / carottage. A 15°C, cet écart est de 2 133 MPa (= 11 203 MPa – 9 070 MPa). À ces deux températures, il représente 20 % de la valeur « PCG-moulage ».

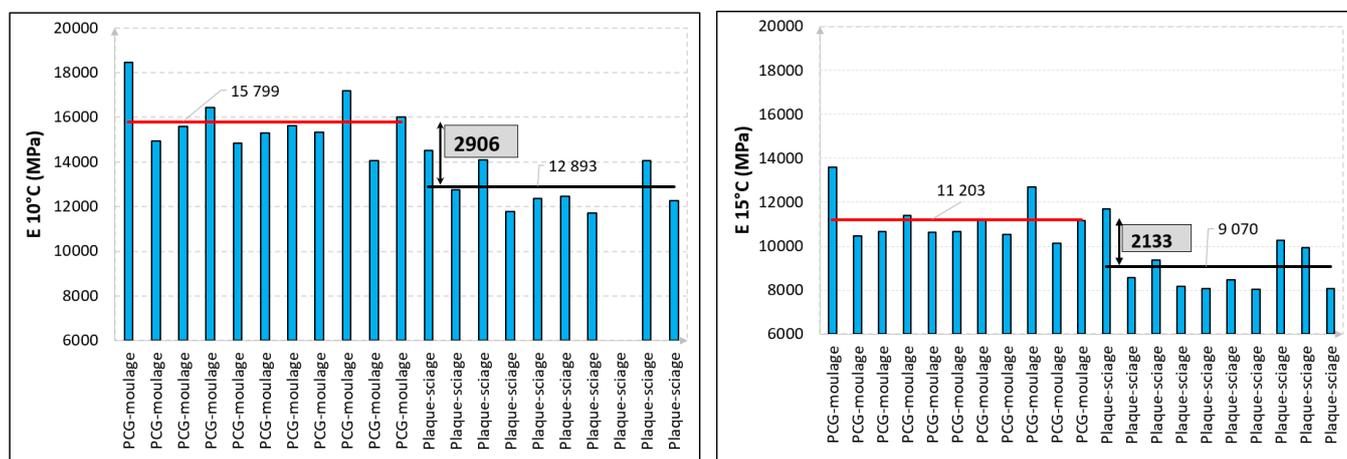


Figure 19: Effet de l'appareil de compactage et du sciage sur le module de la méthode C

6

Étude de deux paramètres influents en mode combiné : temps de stockage à chaud / appareil de compactage et sciage

Pour la méthode C, les informations recueillies montrent qu'environ la moitié des laboratoires ont confectionné les éprouvettes à la PCG sans sciage, et l'autre moitié au compacteur de plaque, suivi d'un carottage. Dans ce paragraphe nous proposons d'analyser séparément les résultats de ces deux modes de confection des éprouvettes. La Figure 20 permet de dissocier les impacts de la durée de stockage à chaud de l'enrobé avant compactage et du mode de confection des éprouvettes. Les pentes obtenues sont plus faibles que celles calculées sur les figures 16a et 16b. Ceci s'explique par le fait que les deux populations de résultats d'essais (PCG/moulage, plaque/sciage) n'ont pas un temps de stockage à chaud moyen équivalent ; la population fabriquée à la PCG associe un module moyen et un temps de stockage à chaud moyen plus élevés. Sur les figures 16a et 16b, une partie de l'effet du mode de compactage est donc attribuée à tort au temps de stockage à chaud. Ceci illustre l'intérêt d'analyser l'effet les paramètres en mode combiné.

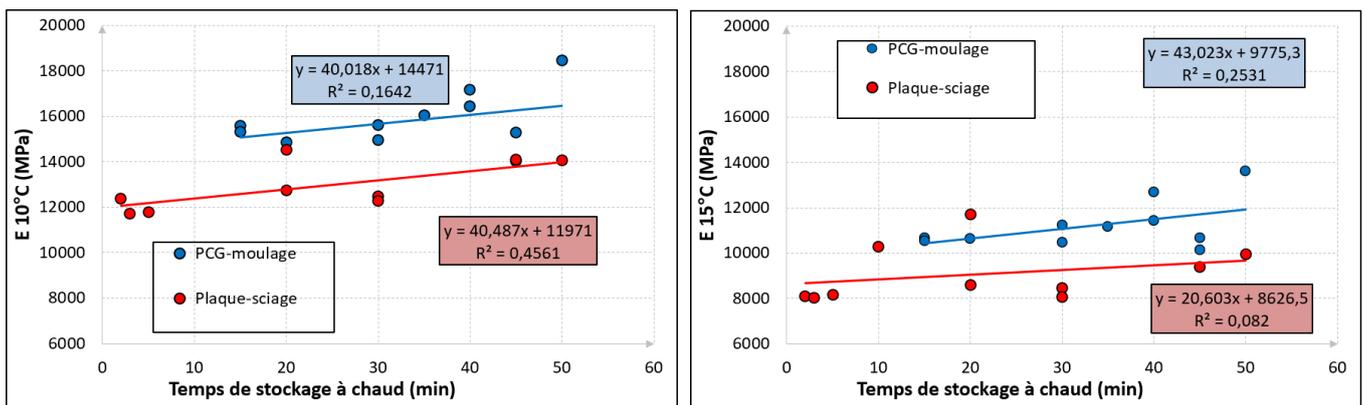


Figure 20: Évolution du module IT-CY 10°C et 15°C en fonction du temps de conservation de l'enrobé avant compactage

7 Détermination des paramètres combinés statistiquement significatifs pour les méthodes C et A

Afin de tester la significativité statistique des effets des différents paramètres d'essai combinés, les données de la méthode A et de la méthode C sont maintenant analysées par régression linéaire multiple.

7.1 Rappel sur le principe général de la régression linéaire simple

Le principe général de la régression linéaire simple est de faire l'hypothèse qu'une variation d'un paramètre d'essai x_1 provoque une variation linéaire proportionnelle $a_1 x_1$ de la valeur du module. Un jeu de valeurs de module mesurées pour différentes valeurs de ce paramètre peut donc être exprimé de la façon suivante (équation (4)) :

$$E_j = a_0 + a_1 x_{1j} + \varepsilon_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

avec :

- $E_1 \dots E_n$ les n différentes valeurs de module mesurées
- $x_{11} \dots x_{1n}$ les n différentes valeurs du paramètre d'essai x_1
- a_0 une constante
- a_1 le coefficient associé au paramètre x_1
- ε_j les erreurs résiduelles

Les erreurs résiduelles ε_j traduisent le fait que toutes les variations du module ne sont pas expliquées par le paramètre x_1 . L'objectif de la régression est de trouver le couple de valeurs a_0 et a_1 pour lequel ces erreurs résiduelles ε_j sont les plus faibles c'est-à-dire le couple qui donne les valeurs les plus proches des valeurs mesurées E_j . L'outil mathématique utilisé est la méthode des moindres carrés qui consiste à minimiser la somme des carrés des erreurs résiduelles $\sum_{j=1}^n \varepsilon_j^2$.

Comme indiqué au paragraphe 4.1, la qualité de la régression est mesurée par le coefficient de détermination r^2 qui représente la part de variabilité expliquée par la régression.

La régression simple est la technique qui a été employée sur les graphiques du paragraphe 4 pour l'étude des paramètres séparément. Ce concept peut être étendu pour étudier l'effet de plusieurs paramètres simultanément. Cette extension est appelée régression linéaire multiple.

7.2 Principe général de la régression linéaire multiple

L'hypothèse est cette fois que les variations de plusieurs paramètres d'essai $x_1 \dots x_p$ provoquent des variations linéaires proportionnelles du module qui s'additionnent : $a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_p x_p$. Un jeu de valeurs de module mesurées pour différentes valeurs de ces paramètres peut donc être exprimé de la façon suivante (équation (5)) :

$$E_j = a_0 + a_1 x_{1j} + a_2 x_{2j} + \dots + a_p x_{pj} + \varepsilon_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

- avec :
- $E_1 \dots E_n$ les n valeurs de module mesurées
 - $x_{1j} \dots x_{pj}$ les valeurs des p paramètres d'essais
 - a_0 une constante
 - $a_1 \dots a_p$ les coefficients associés au paramètres $x_1 \dots x_p$
 - ε_j les erreurs résiduelles

Comme pour la régression simple, l'objectif est de trouver, par la méthode des moindres carrés, la combinaison des p valeurs $a_1 \dots a_p$ pour laquelle les erreurs résiduelles ε_j sont les plus faibles. De même, la qualité de la régression est mesurée par le coefficient de détermination r^2 . Mais, dans le cas de la régression linéaire multiple, il est aussi nécessaire de s'assurer que parmi les paramètres retenus, certains ne soient pas sans effet et compliquent inutilement le modèle. Un test complémentaire est donc réalisé pour s'assurer que les coefficients sont significativement différents de la valeur 0, ce qui indique un paramètre superflu. Le tableau de résultats d'analyse par régression multiple indique donc :

- Le coefficient de détermination de la régression r^2 ;
- L'écart-type des erreurs résiduelles qui ne sont pas expliquées par la régression ;
- Le nombre de valeurs mesurées ;
- Pour chaque paramètre, la valeur du coefficient associé et sa significativité :
 - « *significatif* » indique que la probabilité que la valeur du coefficient soit égale à 0 est inférieure à 5 %,
 - « *non significatif* » indique que la probabilité que la valeur du coefficient soit égale à 0 est supérieure à 5 %).

7.3 Régression linéaire multiple sur les données de la méthode C

Le jeu données concernant la méthode C est constitué de 41 valeurs, 20 obtenues à 10°C et 21 obtenues à 15°C. Cette variation de température n'est pas un aléa d'essai mais une condition volontairement imposée. Toutefois il a été choisi d'introduire la température en paramètre, pour améliorer la robustesse de l'analyse en groupant les jeux de données à 10 et 15°C. Les 2 modes de confection des éprouvettes sont représentés de façon équivalente (compacteur de plaque/

sciage : 20 données ; presse giratoire/moulage : 21 données). L'analyse a donc porté sur 7 paramètres (température d'essai, teneur en vides des éprouvettes, température de malaxage, temps de stockage à chaud, temps de malaxage à sec, temps de malaxage humide, mode de confection des éprouvettes). Ces 7 paramètres expliquent 90 % de la dispersion des données de la méthode C (coefficient de détermination égal à 0,90) mais les coefficients obtenus pour 3 paramètres (teneur en vides des éprouvettes, température de malaxage, temps de malaxage à sec) ne sont pas significativement différents de 0 (Tableau 18).

Tableau 18 : Synthèse des résultats de la régression multiple sur les données de la méthode C – analyse sur 7 paramètres

COEFFICIENT DE DÉTERMINATION R^2	0,90
ECART-TYPE RÉSIDUEL	940 MPa
NOMBRE DE VALEURS	41

VALEURS ET SIGNIFICATIVITÉ DES COEFFICIENTS		
PARAMÈTRE	COEFFICIENT ASSOCIÉ	SIGNIFICATIVITÉ DU COEFFICIENT
Constante	33 986 MPa	non significatif
Température d'essai	- 860	significatif
Teneur en vides des éprouvettes	- 476	non significatif
Température de malaxage	- 67	non significatif
Temps de stockage à chaud	32	significatif
Temps de malaxage à sec	2,6	non significatif
Temps de malaxage humide	8,4	significatif
Mode de confection des éprouvettes	2 146 MPa	significatif

L'analyse a donc été poursuivie en éliminant ces 3 paramètres non significatifs (Tableau 19).

Tableau 19 : Synthèse des résultats de la régression multiple sur les données de la méthode C – analyse sur 4 paramètres

COEFFICIENT DE DÉTERMINATION R^2	0,89
ECART-TYPE RÉSIDUEL	964 MPa
NOMBRE DE VALEURS	41

VALEURS ET SIGNIFICATIVITÉ DES COEFFICIENTS		
PARAMÈTRE	COEFFICIENT ASSOCIÉ	SIGNIFICATIVITÉ DU COEFFICIENT
Constante	19 822 MPa	significatif
Température d'essai	- 857	significatif
Temps de stockage à chaud	36	significatif
Temps de malaxage humide	8,2	significatif
Mode de confection des éprouvettes	1 987 MPa	significatif

Avec 3 paramètres en moins, le modèle obtenu (équation (6)) explique presque la même proportion de variation des données (89 %) :

$$E = 19\,822 - 857 \cdot TE + 36 \cdot TS + 8,2 \cdot TMH + 1\,987 \cdot MC + \varepsilon \quad (6)$$

- avec :
- E le module mesuré selon la méthode C (MPa)
 - TE la température d'essai (°C)
 - TS le temps de stockage à chaud (min)
 - TMH le temps de malaxage humide (s)
 - MC le mode de confection des éprouvettes (plaque/sciage MC=0, PCG/moulage MC=1)
 - ε l'erreur résiduelle de moyenne 0 et d'écart-type de 964 MPa

7.4 Estimation de la fidélité de la méthode C pour des conditions de fabrication fixées

Parmi les 4 paramètres significatifs identifiés, 3 ne sont pas encadrés dans la version actuelle de la norme d'essai de module. Ils concernent tous la fabrication : temps de stockage à chaud, temps de malaxage humide, mode de confection des éprouvettes. Il est possible d'estimer le gain potentiel de fidélité que pourrait apporter l'imposition de valeurs fixes pour ces 3 paramètres. L'écart type résiduel obtenu avec le modèle à 4 paramètres peut être considéré comme une estimation de l'écart-type interlaboratoires s_L (au sens des normes NF ISO-5725). En utilisant par ailleurs les écarts-types de répétabilité s_r du rapport EAPIC 8.2.17 [4] (231 MPa à 10°C et 188 MPa à 15°C), nous pouvons estimer la variance de reproductibilité de la méthode C pour des valeurs fixées des paramètres temps de stockage à chaud, temps de malaxage humide et mode de confection des éprouvettes en utilisant l'équation (7) :

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2 \quad (7)$$

Les valeurs de la variance et de la limite de reproductibilité ainsi estimées pour les 2 températures sont présentées dans le Tableau 20. Il est important de noter que les estimations des limites de reproductibilité obtenues sont beaucoup plus faibles que celles obtenues lors de l'essai EAPIC et très proches de la valeur indiquée pour la méthode A dans la norme NF EN 12697-26 ($R = 2\,740$ MPa). Des temps de stockage à chaud et de malaxage humide harmonisés et un même mode de confection des éprouvettes permettraient donc d'améliorer de façon significative la reproductibilité de la méthode C.

Tableau 20 : Estimation de la variance s_R et de la limite de reproductibilité R de la méthode C à 10 et 15°C pour un temps de stockage à chaud et un temps de malaxage humide donnés et un même mode de compactage des plaques (avec $R = 2,77 \cdot s_R$).

MÉTHODE	TEMPÉRATURE D'ESSAI	ECART-TYPE DE REPRODUCTIBILITÉ ESTIMÉ s_R	LIMITE DE REPRODUCTIBILITÉ ESTIMÉE R	LIMITE DE REPRODUCTIBILITÉ R EAPIC 8.2.17
C	10°C	991 MPa	2 745 MPa	5 266 MPa
	15°C	982 MPa	2 720 MPa	4 971 MPa

■ Régression linéaire multiple sur les données de la méthode A

Le jeu de données concernant la méthode A est constitué de 15 valeurs obtenues pour la même température de 15°C. Dans tous les cas sauf un, le compactage a été réalisé au compacteur de plaques. La valeur obtenue pour l'unique cas avec un compactage à la presse giratoire ne s'éloigne que de 0,51 écart-type de la moyenne générale. Il a donc été décidé de conserver cette valeur et de ne pas prendre en compte le paramètre mode de confection des éprouvettes dans l'analyse, du fait de la sous-représentation du compactage à la presse giratoire. Pour une donnée, le temps de malaxage humide n'est pas renseigné. Il a été décidé de conserver la donnée en lui affectant un temps de malaxage égal à la moyenne des autres données. L'analyse a donc porté sur les 5 paramètres suivants : teneur en vides des éprouvettes, température de malaxage, temps de stockage à chaud, temps de malaxage à sec et temps de malaxage humide. Le modèle associé à ces 5 paramètres n'explique que 38 % de la dispersion des données de la méthode A (coefficient de détermination égal à 0,38) et aucun des paramètres n'est significatif (Tableau 21). La probabilité d'une amélioration significative de la fidélité des résultats de la méthode A en fixant les valeurs des paramètres étudiés est donc faible. Les principales causes de la dispersion observée pour cette méthode sont à chercher ailleurs.

Tableau 21 : Synthèse des résultats de la régression multiple sur les données de la méthode A

COEFFICIENT DE DÉTERMINATION R^2	0,38
ÉCART-TYPE RÉSIDUEL	1 365 MPa
NOMBRE DE VALEURS	15

VALEURS ET SIGNIFICATIVITÉ DES COEFFICIENTS

PARAMÈTRE	COEFFICIENT ASSOCIÉ	SIGNIFICATIVITÉ DU COEFFICIENT
Constante	40 431 MPa	non significatif
Teneur en vides des éprouvettes	36	non significatif
Température de malaxage	- 186	non significatif
Temps de stockage à chaud	32	non significatif
Temps de malaxage à sec	- 14	non significatif
Temps de malaxage humide	17	non significatif

8 Synthèse des résultats

8.1 Résultats toutes méthodes confondues

La Figure 21 a) présente une synthèse des résultats de l'ensemble des méthodes ACDEF. Les résultats des éprouvettes moulées à la PCG sont indiqués en vert tandis que les autres sont issues de plaques carottées. Pour la méthode C, les résultats à 10°C et 15°C sont représentés. Chaque résultat représente la moyenne de 4 répliques. Les résultats sont classés de gauche à droite par ordre croissant de module à 15°C. A la même température (15°C), ces résultats montrent une surreprésentation de la population de la méthode C à gauche de l'histogramme.

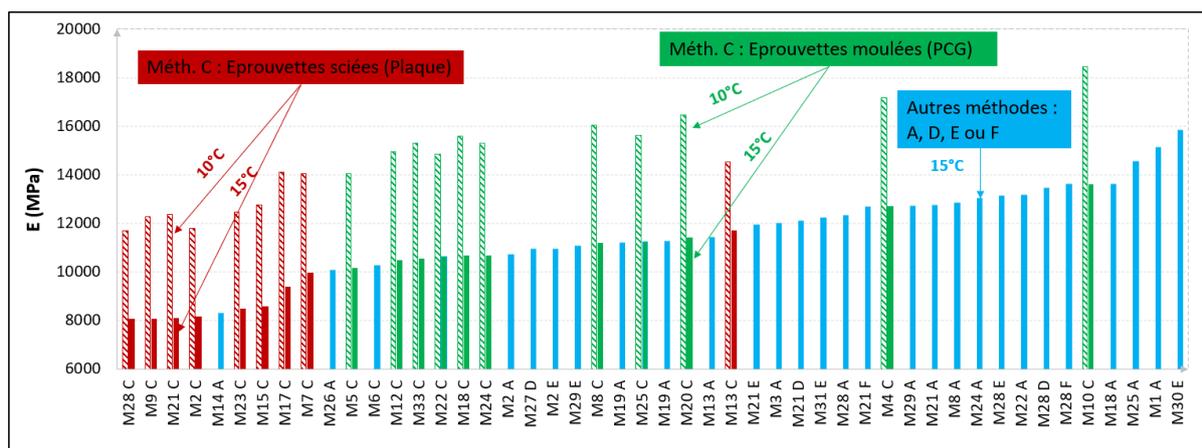
Dans la Figure 21 b), sans changer l'ordre des laboratoires, on a appliqué pour la méthode C la préconisation de la norme NF P 98-086 (§ D.3.1.2.1) [3] : calculer la demi-somme des modules à 10°C et à 15°C. Les autres valeurs sont inchangées. Les résultats ainsi obtenus toutes méthodes confondues vont de 8 285 MPa à 16 035 MPa avec une moyenne de 12 332 MPa et un écart-type de 1 620 MPa.

Si l'on sépare les valeurs par mode de confection pour la méthode C (cf. 4.8), on obtient :

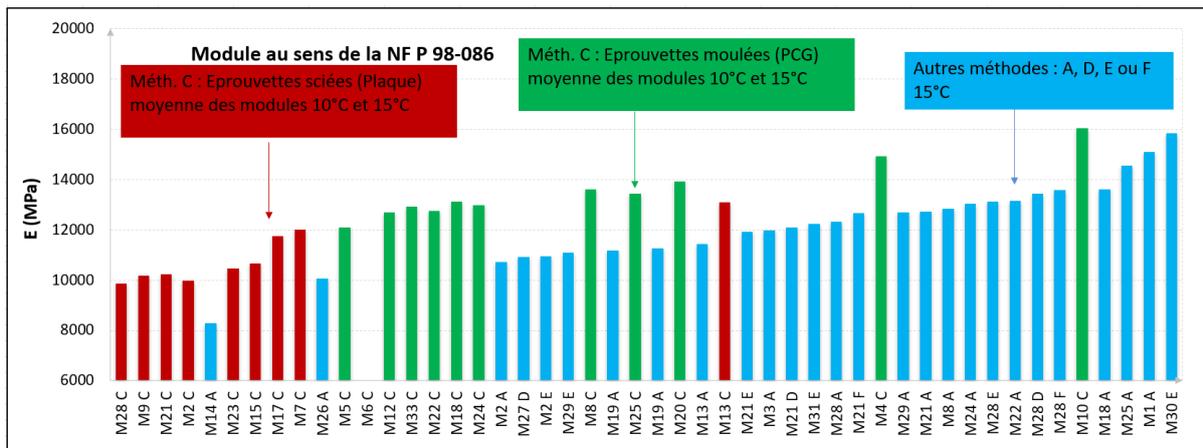
- Moyenne méthode C à 10 et 15°C / Compacteur giratoire sans sciage : 13 501 MPa.
- Moyenne méthode C à 10 et 15°C / Compacteur de plaques et sciage : 10 850 MPa.

Ce constat confirme celui de travaux réalisés sur ce point en 2004 [10] et 2005 [9].

Pour les méthodes A, D, E et F, cet effet n'est pas analysable car elles n'ont fait l'objet — sauf pour un laboratoire — que d'un seul mode de confection : plaque carottées et/ou sciées.



a- Résultats des modules toutes méthodes confondues. Pour la méthode C, 11 résultats sont issus d'éprouvettes confectionnées à la PCG



b- Résultats des modules selon la norme NF P 98-086.

Figure 21: Résultats des modules toutes méthodes confondues.

8.2 Discussion

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de l'analyse de cette base de données. Ils concernent 3 aspects complémentaires : l'organisation de l'essai croisé, les spécifications de la norme de mesure du module EN 12697-26 et les spécifications de la norme de dimensionnement NF P 98-086.

■ Aspects concernant l'organisation de l'essai inter laboratoires

- Certains paramètres, notamment le type de malaxeur, ont été écartés dès le début de l'analyse car la qualité des données recueillies était insuffisante. Ce point pourrait être amélioré lors de campagnes futures.
- D'autres paramètres influents connus, n'apparaissent pas corrélés au module. C'est notamment le cas de la teneur en vides des éprouvettes, ce qu'on constate avec trois types d'analyses différents (voir chapitres 3.6, 5.6 et 7.3). Cela tient aux conditions mêmes de l'essai inter-laboratoires qui imposait ou notait des variations faibles de ces paramètres, rendant leur influence éventuelle peu visible, et/ou à l'existence d'autres paramètres plus influents, qui masquent celle des premiers.
- La faible représentation des méthodes D, E et F, ne permet pas leur analyse statistique. On note toutefois qu'elles conduisent à des valeurs moyennes très voisines, et proches des moyennes des méthodes A et C (10°C/15°C) [4].

■ Aspects concernant les spécifications de la norme de mesure du module EN 12697-26

- La nécessité — d'ailleurs prévue par la norme d'essai — de moyenniser sur 4 éprouvettes pour fournir un résultat d'essai est confirmée. Elle permet d'obtenir une répétabilité acceptable : 367 MPa pour la méthode A à 15°C, 526 et 648 MPa pour la méthode C à 15 et 10°C [4].

- Deux paramètres influents ressortent de cette analyse : le temps de stockage à chaud de l'enrobé avant son compactage pour les méthodes A et C, et le mode de confection des éprouvettes (compactage et sciage) pour la méthode C. L'encadrement des valeurs de ces deux paramètres dans les méthodes d'essais définies dans la norme EN 12697-26 permettrait d'améliorer très sensiblement leur reproductibilité. Un biais subsiste toutefois pour la méthode C quel que soit le mode de confection retenu.

- **Aspects concernant les spécifications de la norme de dimensionnement NF P 98-086**

Pour la méthode C, si l'on sépare les valeurs par mode de confection, ce qui correspond à la réalité de la pratique des laboratoires pour une formule donnée d'enrobé, on obtient :

- Moyenne méthode C à 10 et 15°C / Compacteur giratoire sans sciage : 13 501 MPa.
- Moyenne méthode C à 10 et 15°C / Compacteur de plaques et sciage : 10 850 MPa.

L'application de la règle de calcul de la norme NF P 98-086 [3] conduit donc de manière générale à des valeurs du module soit supérieures soit inférieures à la moyenne des autres méthodes, ce qui n'est pas satisfaisant.

9 Conclusions et perspectives

Cette campagne d'essais inter-laboratoires sur la détermination des valeurs de module a été une véritable réussite, tant pour le nombre de laboratoires ayant participé, que pour la qualité des mesures réalisées avec une faible dispersion des valeurs de teneurs en vides et de module de rigidité de chaque laboratoire.

L'analyse des données EAPIC 8.2.17 fournit plusieurs indications précieuses sur le module de rigidité des enrobés bitumineux, tant pour les techniciens et ingénieurs des laboratoires que pour les rédacteurs de prescriptions. Elles complètent utilement les travaux antérieurs réalisés sur ces méthodes [10] [9] [11]. Outre la nécessité de réaliser 4 éprouvettes pour fournir un résultat, deux paramètres ressortent de l'étude avec une influence importante sur le module obtenu : le temps de stockage à chaud de l'enrobé avant compactage et le mode de confection des éprouvettes — appareil de compactage, suivi ou non d'un sciage (ou carottage).

Ce dernier paramètre n'est visible que pour la méthode C, les autres méthodes faisant en général l'objet d'un mode unique de confection. Il conduit à des valeurs moyennes du module nettement différentes suivant l'un ou l'autre des deux modes de confection choisis, à 10°C comme à 15°C. Cette même différence se retrouve donc logiquement sur les moyennes des résultats à 10°C et 15°C. Des solutions peuvent être envisagées pour l'utilisation de cette méthode C, en particulier le choix d'un mode de confection des éprouvettes et la redéfinition des conditions d'essai dans les textes normatifs et les guides techniques. De nouveaux chantiers à ouvrir pour que la profession continue d'avancer !

Bibliographie

- [1] *Rapport EAPIC 8.1.12 Détermination du module des enrobés*, 20 décembre 2012.
- [2] *NF EN 12697-26 Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud — Module de rigidité*, juin 2012.
- [3] *NF P 98-086 Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves*, mai 2019.
- [4] *Rapport EAPIC 8.2.17 Mesure du module des enrobés*, 30 août 2018.
- [5] C. Somé et autres, « *Module de rigidité des enrobés : quels facteurs d'influence ?* » RGRA n°972, mai 2020.
- [6] Note d'Information IDRRIM n°40 « *EAPIC, pour prouver la compétence des laboratoires* », février 2020.
- [7] *Référentiel EAPIC*, 24 août 2018.
- [8] Bart L. Weathington and all, *Understanding Business Research*, Appendix B-7, ISBN : 978-1-118-34296-1 (2012), 2012.
- [9] X. Carbonneau et autres, « *Mesure du module en compression diamétrale* », RGRA n°836, Février 2005.
- [10] A.E. Hunter and all - *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Influence of compaction method on asphalt mixture internal structure and mechanical properties, Vienna, 2004.
- [11] X. Carbonneau, Y. Le Gal, « *Mesure du module des enrobés en compression diamétrale* », RGRA n°862, novembre 2007.

Rédacteurs

- Cyrille Somé, Cerema, Membre d'EAPIC, Membre de la CN EC
- Michel Saubot, Eiffage, Secrétaire général d'EAPIC, Membre de la CN EC
- Paul Marsac, Université Gustave Eiffel, Président de la CN EC
- Julien Van Rompu, Eiffage
- Christophe Priez, Colas, Membre d'EAPIC
- Frédéric Delfosse, Eurovia, Membre d'EAPIC
- Jean-François Gal, Routes de France, Membre de la CN EC
- Guillaume Gaillard, Braja-Vésigné, Membre de la CN EC

La présente note d'information a été rédigée par un groupe d'experts issus pour la plupart d'EAPIC et de la Commission de Normalisation Essais relatifs aux Chaussées, et validé par le Comité Opérationnel « Qualification - Comparaison Inter-Laboratoires » (COQC) de l'IDRRIM.

Avertissement : La présente note est destinée à une information rapide. La contrepartie de cette rapidité est le risque d'erreur et de non exhaustivité. Ce document ne peut en aucun cas engager la responsabilité ni des auteurs, ni de l'Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité.



9, rue de Berri - 75008 Paris - Tél : +33 1 44 13 32 99

www.idrrim.com - idrrim@idrrim.com

 [@IDRRIM](https://twitter.com/IDRRIM)

Association loi 1901