

# Comité de suivi de thèse n°6 : **Mûrissement et comportement des enrobés bitumineux à l'émulsion de bitume et impact sur la réponse des chaussées sous trafic**

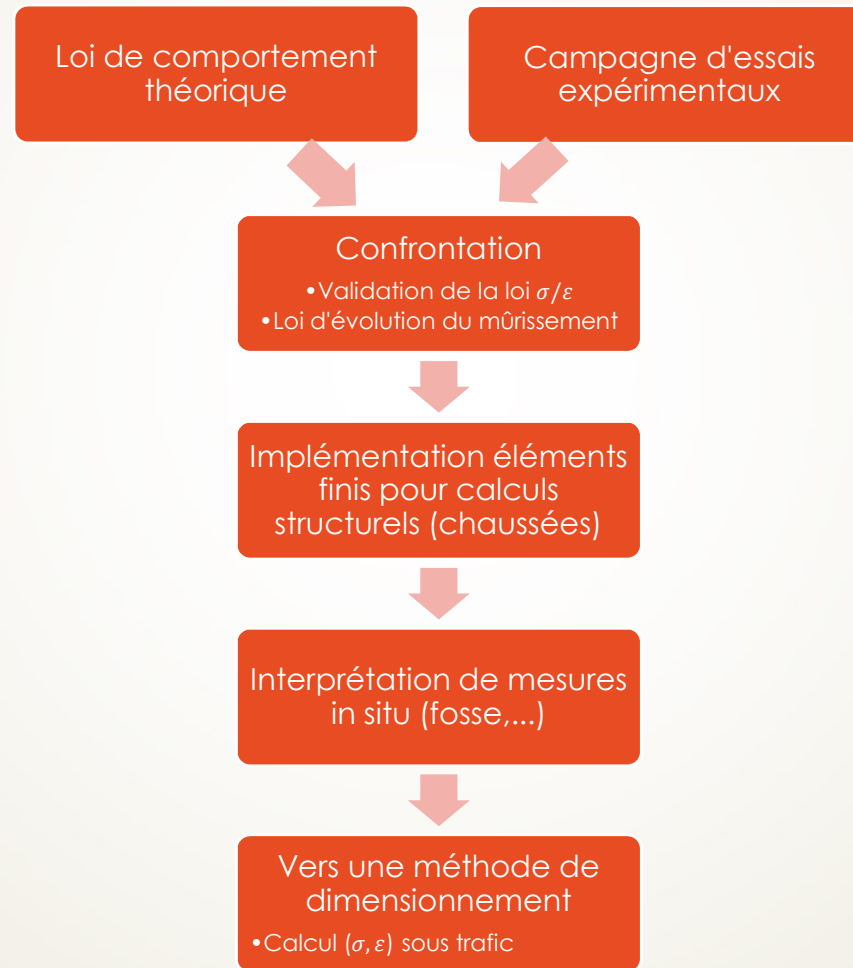
1

Lambert Marion  
9 Février 2017, USIRF, Paris

# Sommaire

- Déroulement général de la thèse
- « Fusion » entre spectres d'élasticité non linéaire (ENL) et de viscoélasticité (VE)
- Campagne expérimentale de mûrissement des GE : Essai œdométrique

## Déroulement de la thèse

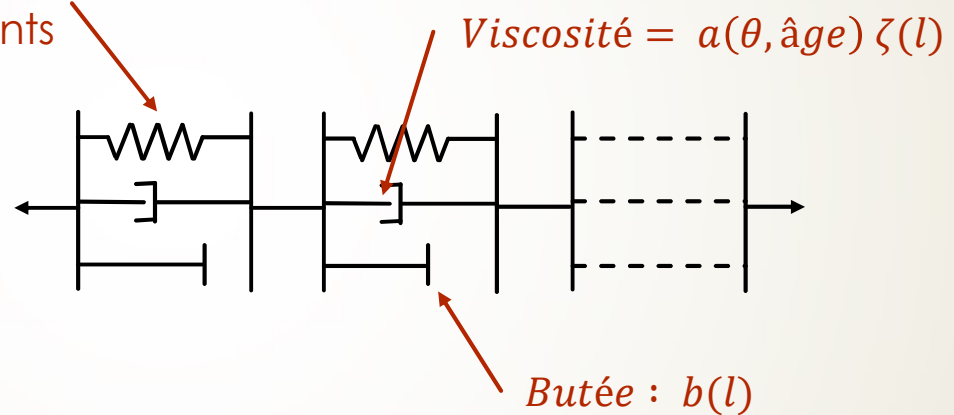


## « Fusion » entre spectres d'élasticité non linéaire (ENL) et de viscoélasticité (VE)

- Travaux en cours sur le modèle
- Perspectives modèles

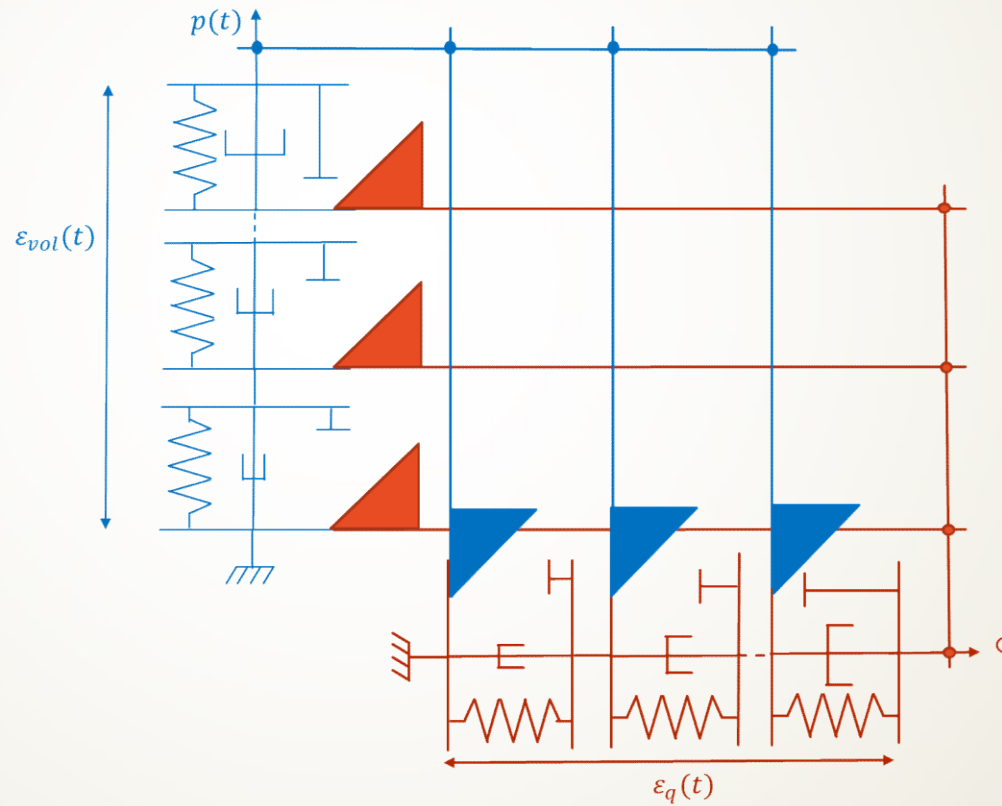
## Rappel 1D : modèle ENL + VE

Ressort de rigidité arbitraire  
identique pour tous les éléments



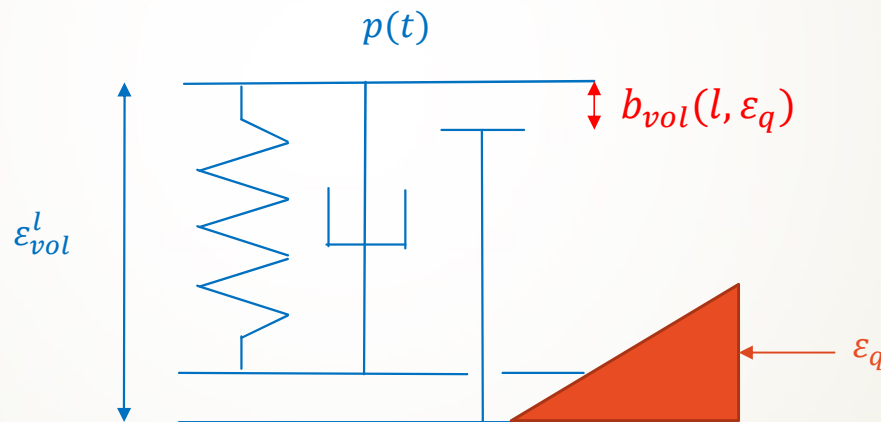
# Travaux en cours sur le modèle

- Tensorialisation de la décomposition spectrale de la loi de Boyce :



# Travaux en cours sur le modèle

- Extension du principe de décomposition spectrale dans le cas tensoriel :
  - Extension mathématique « naturelle » du cas 1D
  - Interprétation au niveau élémentaire des spectres :



- Tensorialisation de la décomposition spectrale de la loi de Boyce (sans amortisseur)
  - Calculs analytiques préparatoires effectués
  - Programmation en cours (ok pour la partie volumique de Boyce)

## Développement du modèle : suite

- Ajout de VE dans le modèle spectral tensoriel :
  - Calculer le tenseur de déformation connaissant le tenseur de contrainte
  - Calculer le tenseur de contrainte connaissant le tenseur de déformation, en vue implémentation aux éléments finis
- Déterminer la fonction  $a(\theta, \text{âge})$  en fonction du mûrissement et identifier sa loi d'évolution
- Identification des paramètres mécaniques de la loi de comportement et de la loi d'évolution  $a(\theta, \text{âge})$  du mûrissement à partir de l'ensemble des essais de module œdométrique pratiqués aux différents stades de mûrissement
  - Utilisation des 3 températures de mûrissement
  - Utilisation des 3 températures d'essai œdométrique

# Perspectives modèle

- ▶ Implémentation de la loi de comportement dans un code aux éléments finis
  - ▶ Développement d'un script FreeFeM++ pour la simulation des essais de déflexion:
    - ▶ charge roulante sur structure de chaussée avec couche de GE représentée par le modèle spectral tensoriel
- ▶ Application du script EF sur cas de référence : fosse de Toulouse
  - ▶ Modélisation des essais de déflexion sur fosse de Toulouse
  - ▶ Comparaison avec les campagnes de mesures sur site
  - ▶ Analyse des champs de contraintes & déformations calculées dans les couches de GE

## Campagne expérimentale de mûrissement des GE : essai œdométrique

- Campagnes expérimentales : suivi de module
- Essais « à vide » : sans matériau
- Protocole d'essais 5ème campagne
- Protocole d'essais de mesure de module en cours de mûrissement
- Résultats de la 5<sup>ème</sup> campagne d'essais
- Perspectives essais

# Campagnes expérimentales : suivi de module

## ➤ 1ère campagne :

| Amélioration réalisée                                                                                                                                                                                 | Problème rencontré                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Faisabilité utilisant les matériaux de la RD26 (Pourcentage de vide mesuré 18 %)</li><li>• Effet de l'épaisseur du matériau : 2 épaisseurs testées,</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Trop de vibration,</li><li>• Essai peu répétable,</li></ul> |

## ➤ 2ème campagne :

| Amélioration réalisée                                                                                                                                                                             | Problème rencontré                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Choix d'une épaisseur : 60 mm</li><li>• Mise en place d'amortisseur sous le moule pour éviter la transmission d'effort au support de la presse,</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Trop de vibration,</li></ul> |

## ➤ 3ème campagne :

| Amélioration réalisée                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Problème rencontré                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Changement des 2 cales pas une cale unique pour limiter les vibrations induites par les contacts métal/métal,</li><li>• Mesure du déplacement à vide du montage,</li><li>• Essais sur BBSG et delrin « étalon » pour évaluer la justesse de nos mesures,</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• trop d'écart entre la valeur observée et la valeur souhaitée,</li></ul> |

# Campagnes expérimentales : suivi de module

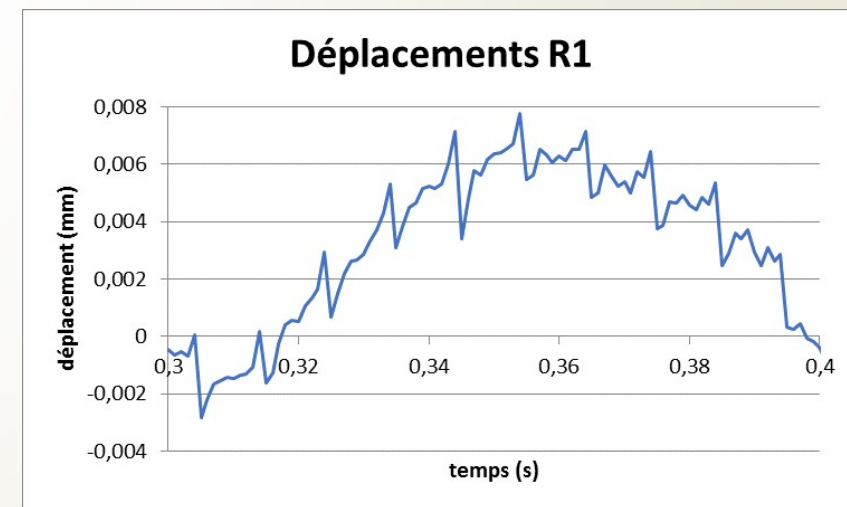
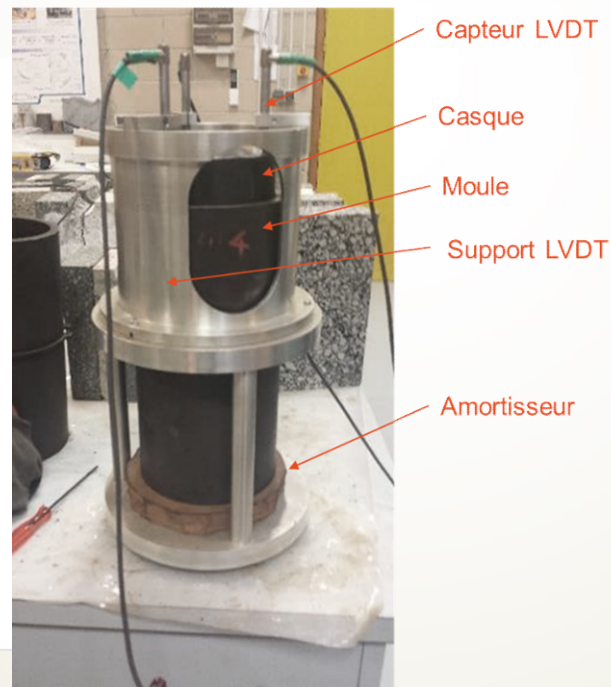
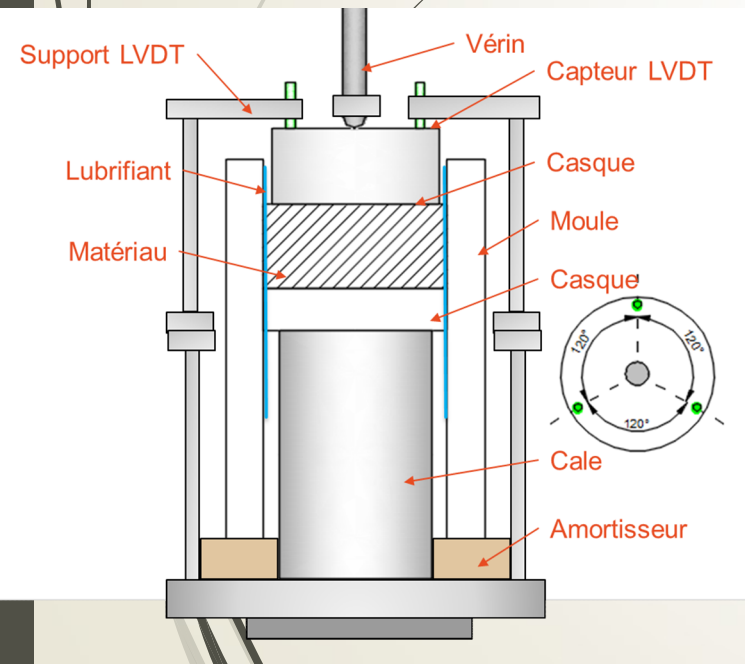
➤ 4ème campagne :

## Amélioration réalisée

- Mesure de déplacement entre la cale et le casque supérieur => Nouveau support,
- Dépendance en température,

## Problème rencontré

- Problème de Bruit et sauts toutes les 0,01 secondes sur les signaux,



# Campagnes expérimentales : suivi de module

➤ 5<sup>ème</sup> campagne :

## Amélioration réalisée

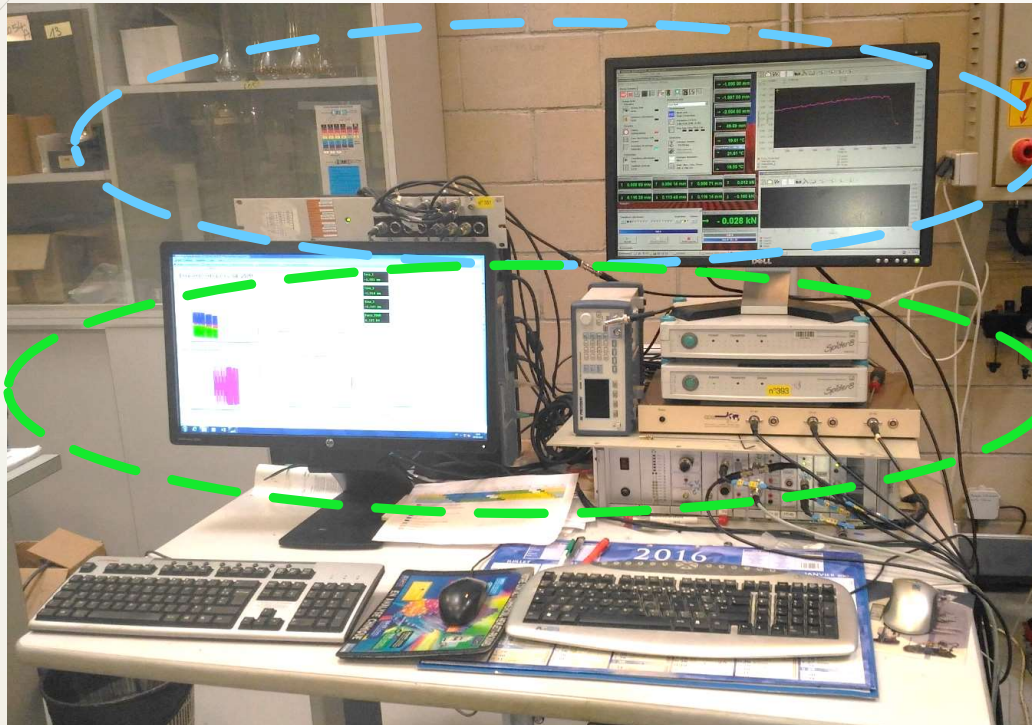
- Changement du système d'acquisition,
- Tests sur matériaux USIRF : Grave émulsion 0/14 : 60 litres d'émulsion C60 B5 + 800 kg granulats de Mauzac
- Dépendance en température,

## Problème rencontré



# Campagnes expérimentales : suivi de module

## 5<sup>ème</sup> campagne :



Pilotage presse  
+ ancienne acquisition

Nouvelle acquisition :  
Spider + logiciel  
d'acquisition

- Par jours d'essais :
- Changement de 1 acquisition/fréquence à 1 acquisition/force soit 6x moins de fichiers
- Changement total du traitement sur VBA => tout automatisé (durée de traitement = 1h)

# Campagnes expérimentales : suivi de module

## 5<sup>ème</sup> campagne :

- Enceinte climatique pour le mûrissement des éprouvettes sur une plage de température de 10 à 40°C et une plage d'humidité de 15 à 70%
- Presse hydraulique permettant des sollicitations dynamiques d'au moins 20kN
- Capteur force de 20 kN
- 3 capteurs LVDT de type TESA GT22 espacés de 120°
- Moule Duriez  $\varnothing 120$  mm + casques (2 à 3 moules par modalité de mûrissement)
- Support essai œdométrique
- Acquisition spider + logiciel

2 000 €

2 000 €

1 000 € / Moule

2 000 €

8 000 €

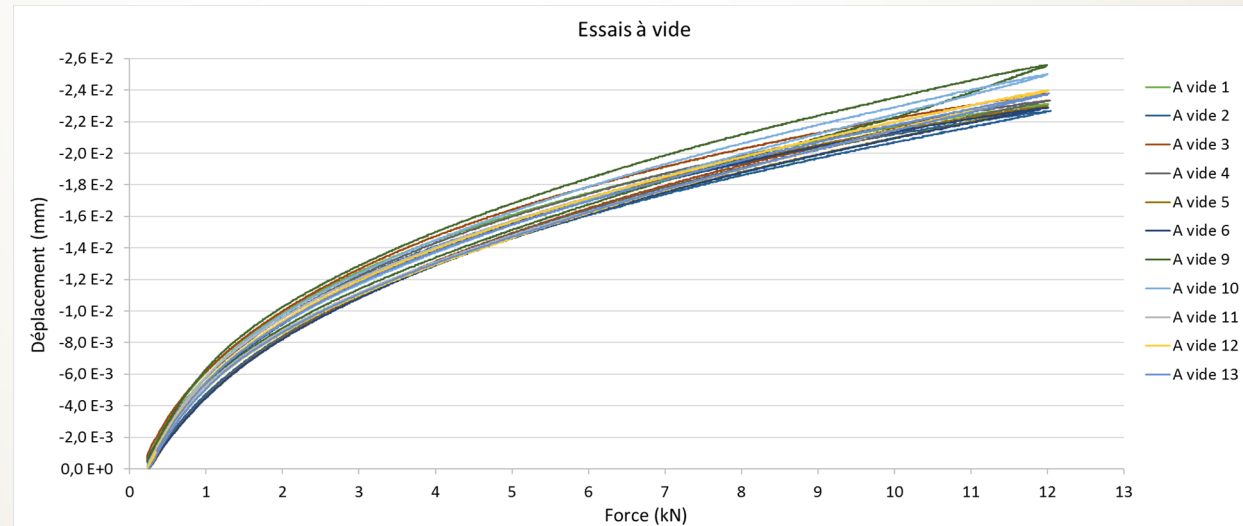
17 000 €

# Campagnes expérimentales : suivi de module

- Campagne d'essais à venir :
- 6ème campagne :
  - Tests sur matériaux USIRF,
  - Dépendance en hygrométrie,
- 7ème campagne ?
  - Tests sur matériaux USIRF
  - Incorporation de recyclés,
  - Dépendance en température,

## Essais « à vide » : sans matériau

- Déterminer la souplesse du nouveau support en réalisant des essais cycliques de 0,5 kN à 12 kN,
- Ces essais sont réalisés sans matériau mais en gardant tous les composants métalliques (cale, casque inférieur, casque supérieur) et en intercalant une pièce en acier
- Pas de dépendance en fréquence mais une dépendance à la force



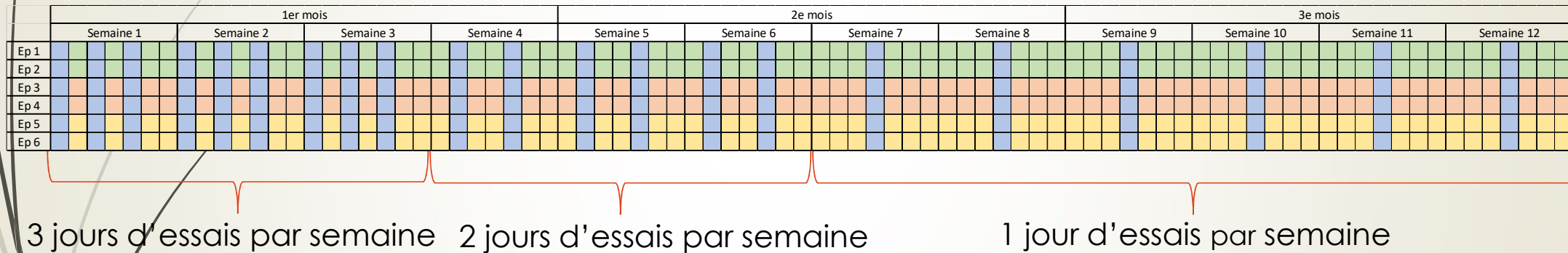
- Courbe de déplacement : pour une valeur de force, nous aurons la valeur de déplacement à soustraire aux valeurs mesurées avec matériaux

## Protocole d'essais 5ème campagne d'essais

- Essais de mûrissement avec suivi du module œdométrique complexe :
  - Fabrication, compactage et essai dans moule Duriez ( $\varnothing 120$  mm,  $h = 62$  mm)
  - Températures de mûrissement : 15°C, 20°C et 35°C
  - Hygrométrie de 45%
  - Répétabilité sur 2 moules
  
- Essais de module œdométrique sur matériaux dans leur moule réalisés du jeune âge à l'état mûr. Périodicité des essais à déterminer en fonction de la cinétique de mûrissement.
  
- Modalités pour essais de module œdométrique complexe :
  - Conditions œdométriques
  - Chargements cycliques  $\approx 100$  cycles
  - Plage de température : de 15°C, 20°C et 35°C
  - Force : 2,3 kN, 4,6 kN et 9 kN
  - Fréquence : 0,1 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 6Hz et 10 Hz

# Protocole de mesure de module en cours de mûrissement

➡ Protocole de la première campagne de mûrissement/essais sur 4 mois :

[illegible]

|                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mûrissement à 20°C et 45% d'hygrométrie soit la température et l'hygrométrie dans la salle d'essai |
| Mûrissement à 15°C et 45% d'hygrométrie dans une enceinte thermo-hydrorégulée                      |

# Protocole de mesure de module en cours de mûrissement

➤ Protocole d'essais :

|     | 7h |    | 8h |                                              |                                  |    | 9h |    |    |    | 10h |    |    |                                              | 11h                              |    |    |    | 12h |                                              |    |    | 13h |    |    |    | 14h |    |    |    | 15h |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|----|----|----|----------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|----|----|-----|----|----|----------------------------------------------|----------------------------------|----|----|----|-----|----------------------------------------------|----|----|-----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|
|     | 30 | 45 | 0  | 15                                           | 30                               | 45 | 0  | 15 | 30 | 45 | 0   | 15 | 30 | 45                                           | 0                                | 15 | 30 | 45 | 0   | 15                                           | 30 | 45 | 0   | 15 | 30 | 45 | 0   | 15 | 30 | 45 |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ep1 |    |    |    | Temps de stabilisation de 35°C à 15°C = 3h00 |                                  |    |    |    |    |    |     |    |    |                                              | Temps de stab 20°C à 15°C = 2h00 |    |    |    |     |                                              |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ep2 |    |    |    |                                              |                                  |    |    |    |    |    |     |    |    |                                              |                                  |    |    |    |     |                                              |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ep3 |    |    |    |                                              | Temps de stab 20°C à 15°C = 2h00 |    |    |    |    |    |     |    |    | Temps de stabilisation de 15°C à 35°C = 3h00 |                                  |    |    |    |     |                                              |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ep4 |    |    |    |                                              |                                  |    |    |    |    |    |     |    |    | Temps de stabilisation de 15°C à 35°C = 3h00 |                                  |    |    |    |     |                                              |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ep5 |    |    |    |                                              | Temps de stab 15°C à 20°C = 2h00 |    |    |    |    |    |     |    |    |                                              |                                  |    |    |    |     | Temps de stabilisation de 20°C à 35°C = 3h00 |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ep6 |    |    |    |                                              |                                  |    |    |    |    |    |     |    |    |                                              |                                  |    |    |    |     |                                              |    |    |     |    |    |    |     |    |    |    |     |  |  |  |  |  |  |  |  |

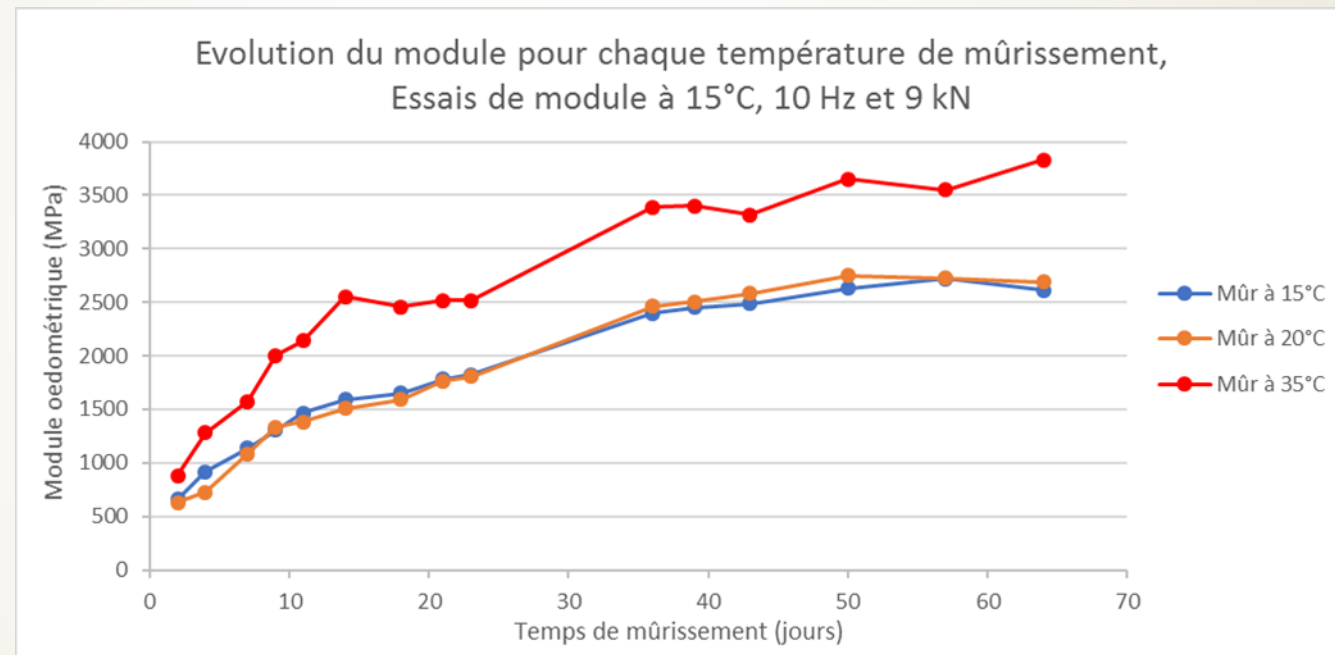
|  |                       |
|--|-----------------------|
|  | T° murissement à 35°C |
|  |                       |
|  | T° murissement à 20°C |
|  |                       |
|  | T° murissement 15°C   |

|  |                                                       |
|--|-------------------------------------------------------|
|  | Stabilisation T° à 35°C dans enceinte thermorégulée   |
|  |                                                       |
|  | Essais à 35 °C                                        |
|  |                                                       |
|  | Stabilisation T° à 20 °C à la température de la salle |

|  |                                           |
|--|-------------------------------------------|
|  | Essais à 20°C                             |
|  |                                           |
|  | Stabilisation T° à 15°C                   |
|  |                                           |
|  | Essais à 15°C dans enceinte thermorégulée |

# Résultats de la 5ème campagne d'essais

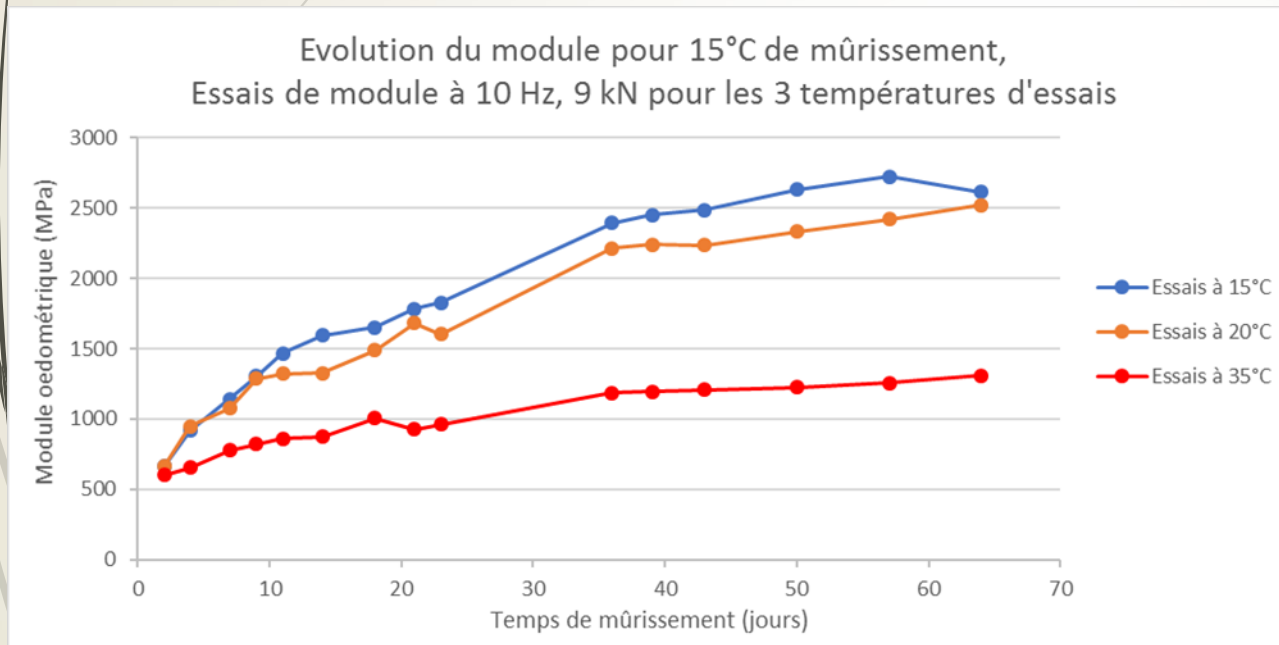
- Dépendance à la **température de mûrissement** :



- Mûrissement à 20°C assez lent : hygrométrie de la salle non régulée (variation entre 35 % et 55% d'HR)
- Rappel :  $|E_{oedo}^*| > |E^*|$

# Résultats de la 5ème campagne d'essais

➤ Dépendance à la **température d'essai** pour un mûrissement à 15 °C et 43 % d'HR :

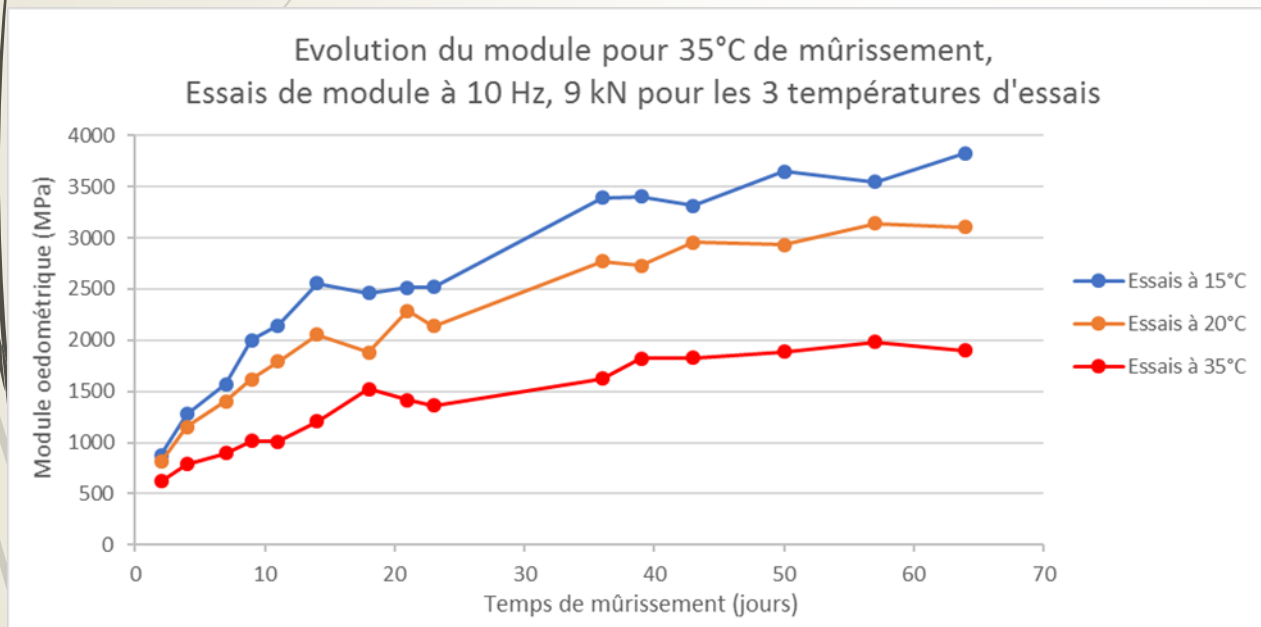


| Déformation correspondante ( $\mu\text{déf}$ ) |      |      |      |
|------------------------------------------------|------|------|------|
| T° essais                                      | 15°C | 20°C | 35°C |
| <b>2 jours</b>                                 | 1120 | 1086 | 1188 |
| <b>11 jours</b>                                | 472  | 565  | 833  |
| <b>64 jours</b>                                | 272  | 283  | 539  |

➤ Plus la température est basse pour le matériau se rigidifie :  $\nearrow$  du module

# Résultats de la 5ème campagne d'essais

➤ Dépendance à la **température d'essai** pour un mûrissement à 35 °C et 43 % d'HR :

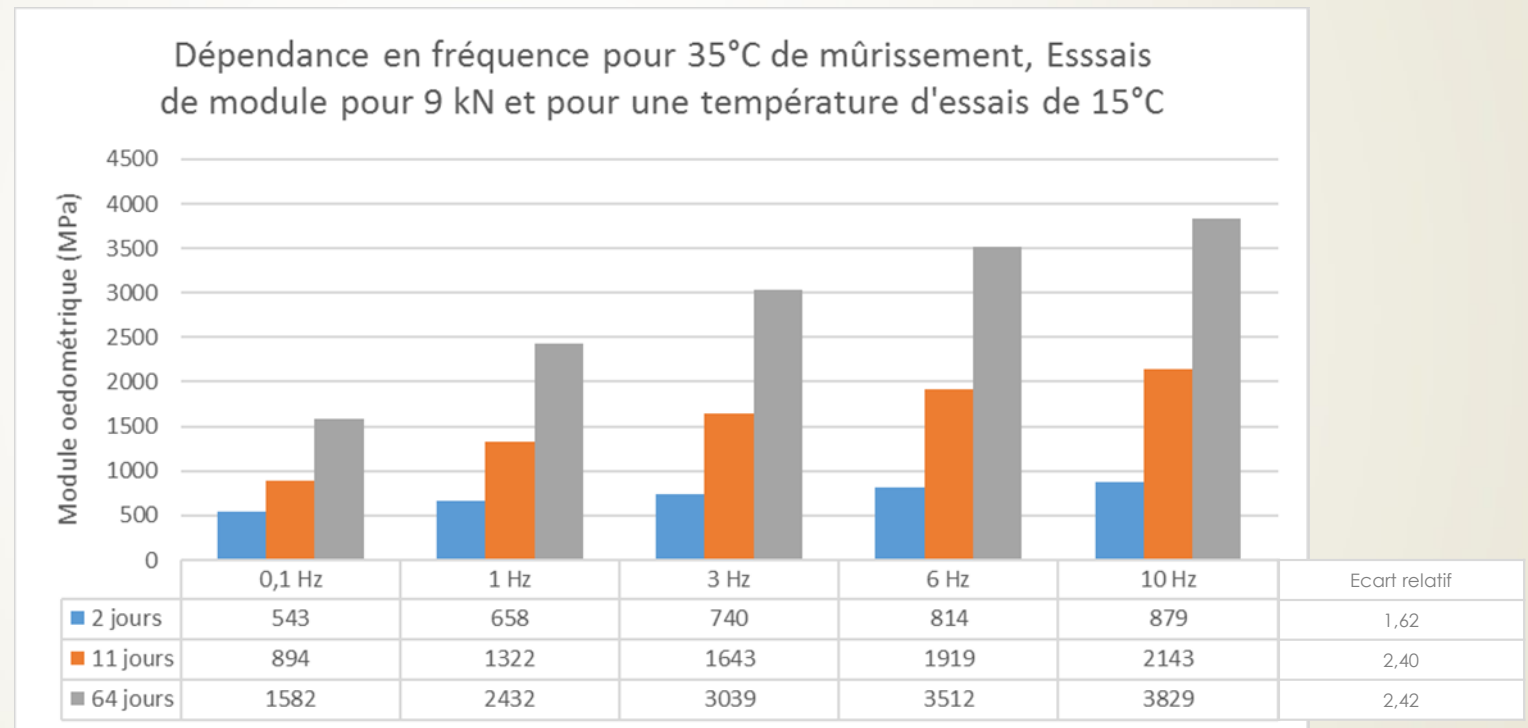


| Déformation correspondante ( $\mu\text{déf}$ ) |      |      |      |
|------------------------------------------------|------|------|------|
| T° essais                                      | 15°C | 20°C | 35°C |
| 2 jours                                        | 856  | 924  | 1214 |
| 11 jours                                       | 354  | 420  | 743  |
| 64 jours                                       | 195  | 241  | 395  |

➤ Plus la température est basse pour le matériau se rigidifie :  $\nearrow$  du module

# Résultats de la 5ème campagne d'essais

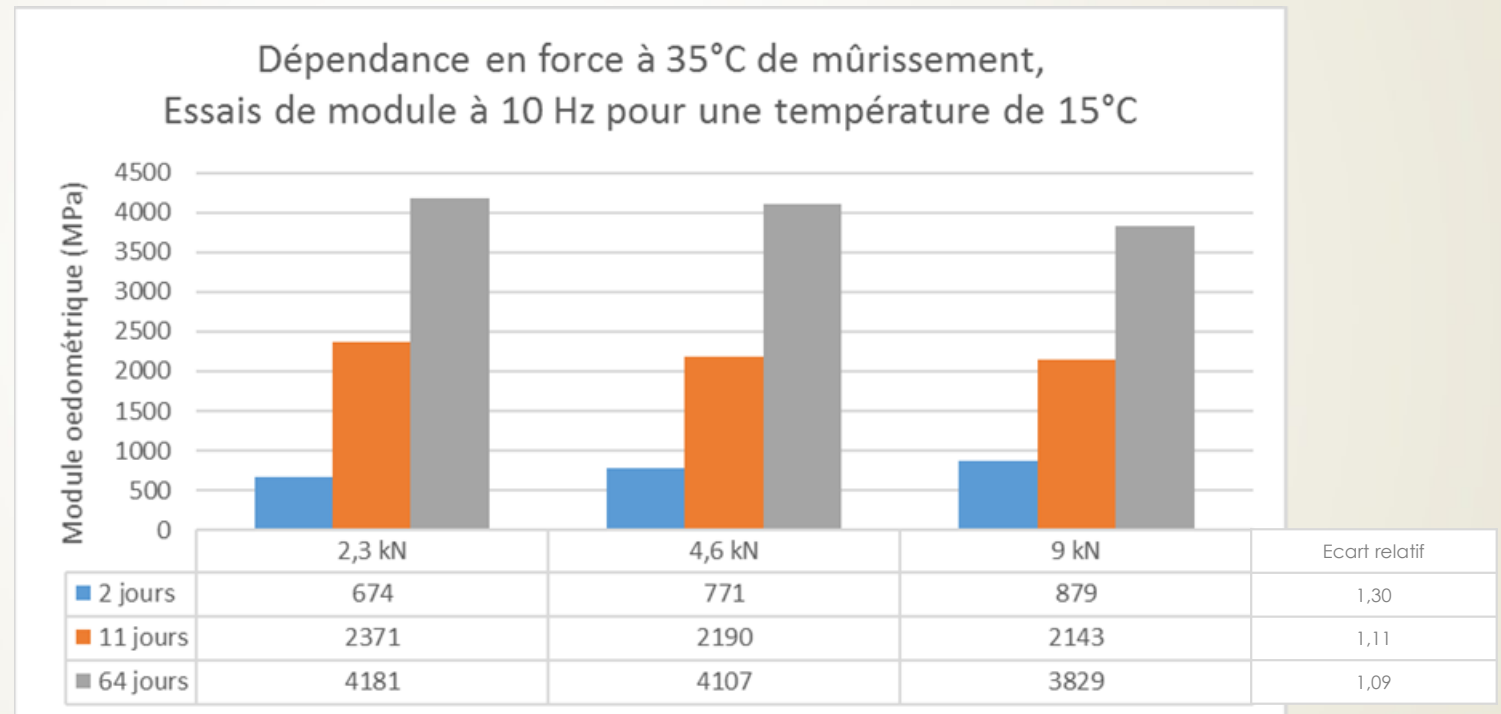
- Dépendance à la **fréquence de sollicitation** pour un mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR :



- Au l'état frais (2J),  $|E_{oedo}^*|$  très peu dépendant de la fréquence
- Au l'état jeune (11J) et à l'état mûri (64J) :  $|E_{oedo}^*|$  dépendant de la fréquence => Augmentation de la composante visqueuse dans le comportement du matériau

## Résultats de la 5ème campagne d'essais

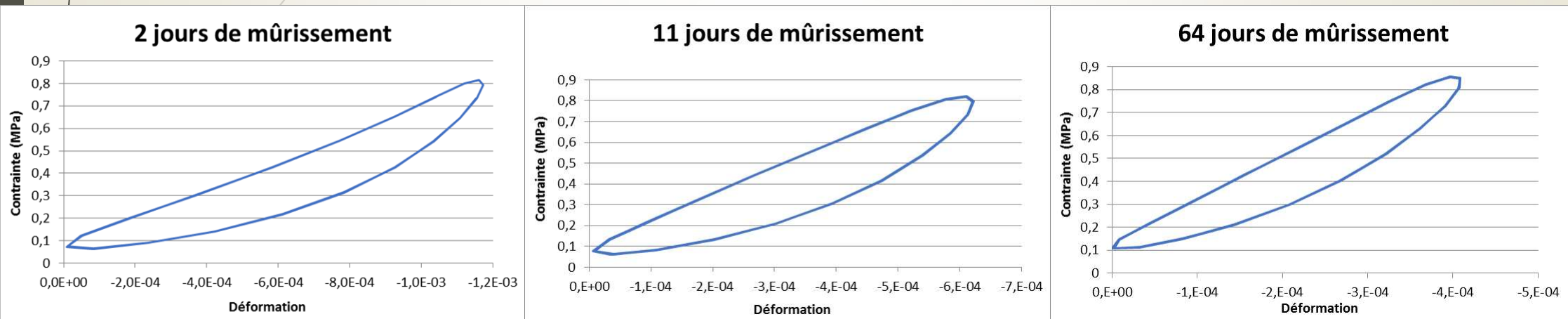
- Dépendance à l'**effort de sollicitation** pour un mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR :



- Quelque soit l'état de mûrissement, il existe une légère dépendance à la force de sollicitation
- Dépendance que l'on peut également voir sur les essais sur les enrobés à chaud

## Résultats de la 5ème campagne d'essais

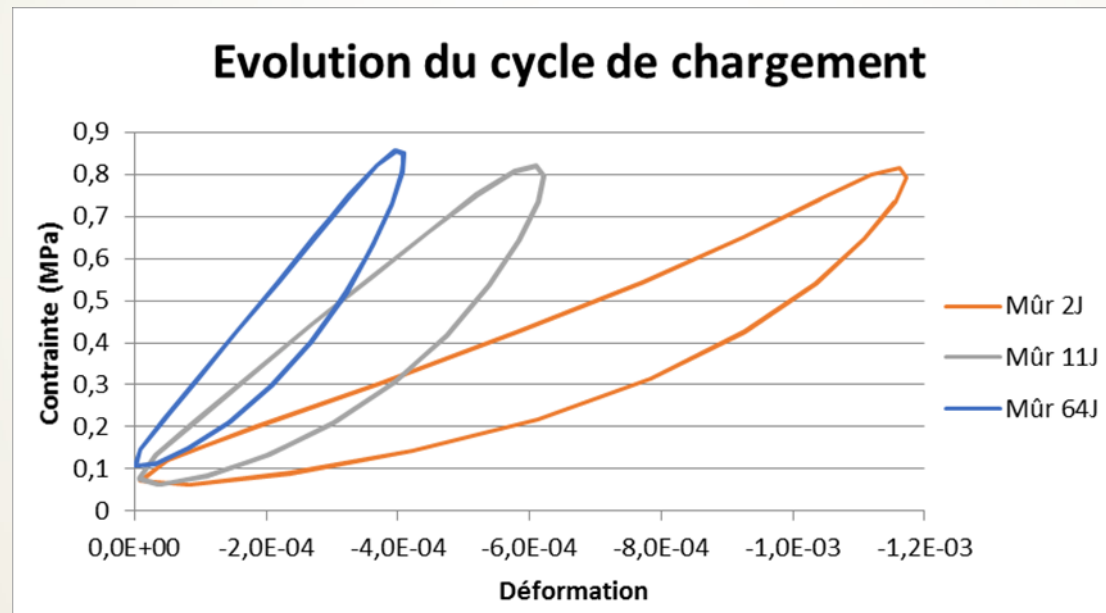
- Evolution des cycles de chargement pour un mûrissement à 35 °C et 45 % d'HR : Essais à 15 °C, 10 Hz et 9 kN



- A l'état frais, comportement élastique non linéaire cohérent avec la non dépendance à la fréquence
  - Nous avons déjà un matériau rigide après 2 jours de mûrissement, de plus l'essai est réalisé à 15°C
- La forme des cycles de chargement devient moins convexe
  - Augmentation de la viscoélasticité dans le comportement du matériau

## Résultats de la 5ème campagne d'essais

- Zoom sur le cycle de chargement de la GE mûrie pendant 64 jours à 35°C, 45% d'hygrométrie :
  - Essais à 15°C, 10 Hz et 9 kN



- Diminution de l'amplitude de déformation
- Le matériau a mûri très rapidement

| Mûrissement | Module œdo (Mpa) |
|-------------|------------------|
| 2 jours     | 879              |
| 11 jours    | 2143             |
| 64 jours    | 3829             |

## Perspectives essais

- ▶ 5<sup>ème</sup> campagne d'essais :
  - ▶ % de vide déterminé par banc Gamma une fois les essais terminés et les échantillons sortis de leur moule
  - ▶ Essais de compression diamétrale (GEMH)
  
- ▶ 6<sup>ème</sup> campagne d'essais : à hygrométries différentes
  - ▶ Effet de l'hygrométrie
    - ▶ Placer les éprouvettes dans des boîtes hermétiques + des sels pour réguler l'hygrométrie
    - ▶ Refaire la modalité à 20°C/43% d'HR + 2 nouvelles modalités 35°C/70% d'HR
  - ▶ Essais de compression diamétrale (GEMH)
  - ▶ Essais de module complexe par flexion 2 points sur barreaux extraits d'une plaque ornièreur et d'un moule Duriez pour évaluer le module complexe
  
- ▶ 7<sup>ème</sup> campagne d'essais : intégrant des matériaux recyclés
  - ▶ Effet de la température
  - ▶ Essais de compression diamétrale

# Exploitation prévue des essais

## ■ Détermination de la loi de mûrissement

■  $a(\theta, \text{âge})$  = fonction de translation temps/température + vieillissement

■ Hypothèse factorisation :  $a(\theta, \text{âge}) = a^*(\theta) v(\text{âge})$

■  $a^*(\theta)$  = fonction de translation temps/température (a priori assimilable à la fonction  $a^*$  du bitume)

■  $v(t)$  = variable de mûrissement variant de 0 à 1

$$\frac{dv}{d(\text{âge})} = f(v) \underbrace{e^{\frac{-K}{R T(\text{âge})}}}_{\text{loi d'Arrhénius}}$$

■  $T(\text{âge})$  = historique de température au cours de la vie de l'émulsion

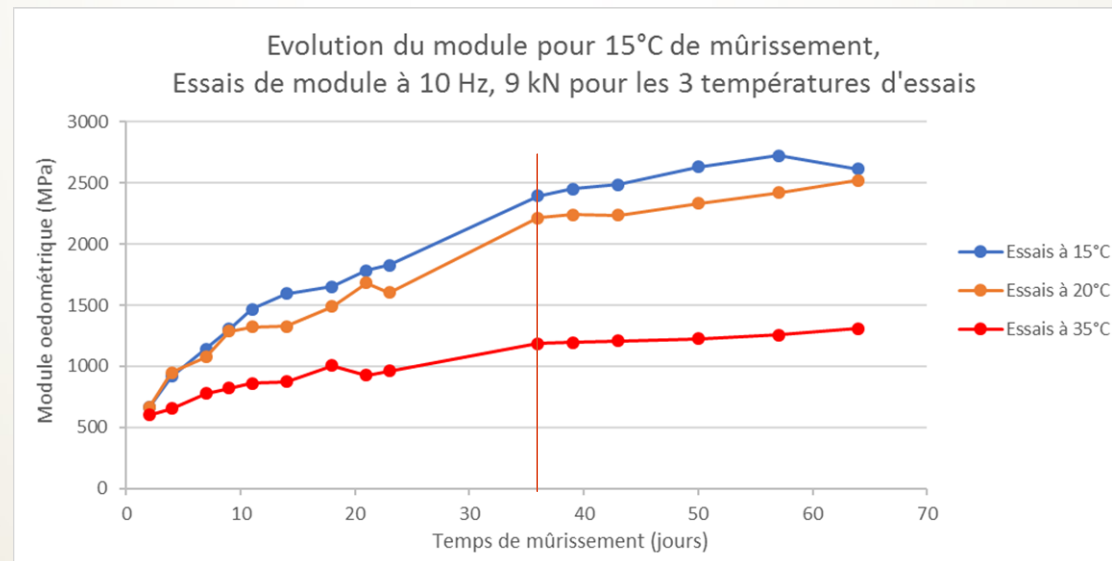
■ Pour nos essais : 3 historiques constants

# Exploitation prévue des essais

➤ Inconnues à identifier :  $a^*(\theta)$ ,  $f(v)$  et  $K$

➤  $a^*(\theta)$  :

- Utilisation des mesures de MCO effectuées aux 3 différentes températures (15 °C, 20 °C et 35 °C)
  - Même éprouvette (température de mûrissement constante)
  - Valeurs de MCO mesurées le même jour (même stade de mûrissement)



# Exploitation prévue des essais

## ► Identification de $f(v)$ :

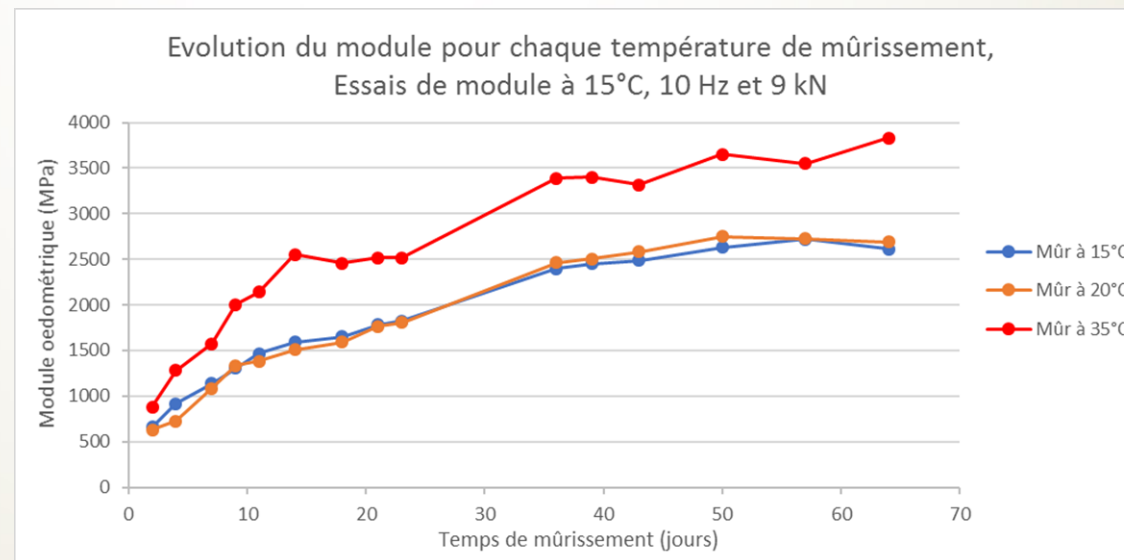
### ► Utilisation des mesures MCO dans le temps

- Même éprouvette, même valeur de température d'essai MCO
- Détermination de  $v$  en fonction du temps, puis de  $f(v)$  par l'équation :

$$\frac{dv}{d(\text{âge})} = f(v) \underbrace{e^{\frac{-K}{RT(\text{âge})}}}_{\text{loi d'Arrhénius}}$$

## ► Identification de $K$ :

- Utilisation des 3 températures de mûrissement



# Valorisation de la thèse

- Modification article EATA + poster :
  - Enlever l'application pas à pas du calcul de déformation
  - Expliquer plus en détail :
    - le mûrissement,
    - ce que représente la variable  $a(\theta, aging)$  dans notre modèle,
    - La relation entre nos équations de base de notre modèle et les modèles de Huet et de Boyce
- Soumission d'un résumé au Congrès Français de la Mécanique
  - Réponse le 15 Février
- Valorisation par la rédaction de 2 articles :
  - 1 : Plus orienté modèle
  - 2 : Plus orienté campagne expérimentale / Essais œdométrique

Merci de votre attention