

Comportement mécanique des graves-émulsion

Marion LAMBERT
Routes de France / IFSTTAR / GC2D (Univ Limoges)

Contexte

- **Préoccupation environnementale croissante**
- **Parmi les solutions : l'enrobé à l'émulsion**
 - ↘ **consommation d'énergie**
 - ↘ **émission de GES**
- **Mis en œuvre à température ambiante**
- **Composition**
 - **Squelette granulaire**
 - **Emulsion = bitume + eau + émulsifiant**

Contexte : Enrobé à l'émulsion

- **Comportement évolutif**
 - Au très jeune âge, il est non cohésif et a un comportement d'un mélange non lié
 - Avec le temps, le matériau mûri par départ d'eau et évolution du liant. Sa cohésion augmente et son comportement devient de plus en plus visqueux
- **Conséquences**
 - Evolution des performances mécaniques avec le mûrissement
 - Cinétique de mûrissement variable
- => Tenir compte de ce caractère évolutif dans la loi de comportement et dans l'essai de caractérisation

Contexte

- **Mais, les savoir-faire s'appuient sur la connaissance des matériaux locaux**
 - **Pas de méthode de dimensionnement pour GE structurante (pas de prise en compte de l'évolution du module complexe, pas de critère de ruine)**
=> Limite le développement de la technique à l'échelle nationale
 - **Enrobés bitumineux à l'émulsion : 7% de la production d'enrobés en France en 2012**
 - **Utilisation en entretien essentiellement**

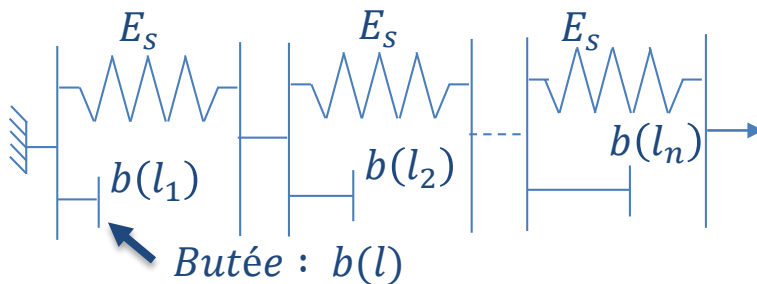
Dimensionnement de chaussée

Données nécessaires	Données acquises sur les enrobés à l'émulsion	Besoins enrobé à l'émulsion
<ul style="list-style-type: none"> • Loi de comportement permettant de relier pour chaque matériau contrainte – déformation • Code de calcul structurel pour détermination $\sigma - \varepsilon$ sous trafic • Essais de caractérisation du comportement « réversible » • Critère de durabilité (endommagement, fatigue, fissuration) • Essai de fatigue 	<ul style="list-style-type: none"> • Essais de caractérisation usuels du comportement sur matériau mûri (ex : module) • Guides régionaux de dimensionnement préconisant des structures types de chaussées • Pas de prise en compte de critère de durabilité 	<ul style="list-style-type: none"> • Essai(s) de caractérisation du comportement du matériau tout au long de son mûrissement <ul style="list-style-type: none"> ➤ relation contrainte – déformation ➤ Loi de mûrissement • Code de calcul structurel intégrant cette loi • Critère de durabilité ? • Mécanisme(s) d'endommagement ?

Développement d'une loi de comportement : point de départ

Modèle élastique non linéaire (ENL)

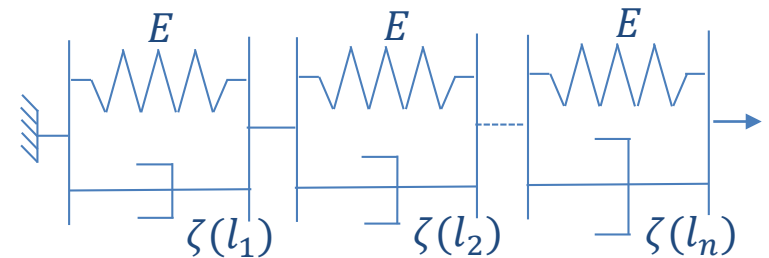
- Comportement des matériaux granulaires non liés (cf. loi de Boyce)
- Comportement rigidifiant ne travaillant qu'en compression
- Non dépendant de la température ou de la fréquence de sollicitation
- Représentation spectrale



« Fusion » des 2 spectres => spectre à 3 branches : ressort, amortisseur linéaire, butée

Modèle viscoélastique (VE)

- Comportement des enrobés à chaud (cf. Huet ou Huet-Sayegh)
- Comportement visqueux, dépendant de la température et de la fréquence de sollicitation
- Spectre de fluage : Kelvin-Voigt généralisé



Développement d'une loi de comportement : modèle VENL

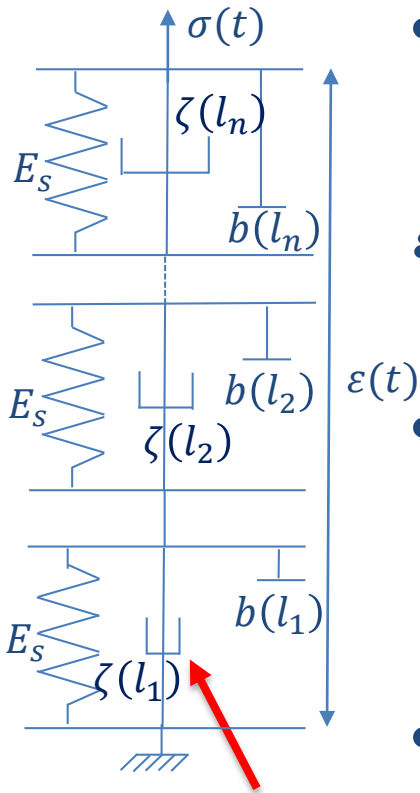
- Développement du modèle 3D
- Etat frais : comportement élastique non linéaire
 - En 3D, utilisation de la loi de Boyce :

$$\varepsilon_v(p, q) = -\frac{p_a}{K_a} \left(\frac{p}{p_a}\right)^n \left(1 - \chi \left(\frac{q}{p}\right)^2\right) \quad \varepsilon_d(p, q) = \frac{q}{3 G_a} \left(\frac{p}{p_a}\right)^{n-1}$$

- Mûrissement « infini » : comportement viscoélastique

$$F(t) = \frac{1}{E_s} \left(\frac{t}{A(\theta, \hat{age})}\right)^\beta, \quad 0 < \beta < 1$$

- Etats intermédiaires : fonction $A(\theta, \hat{age}) = a(\theta)v(\hat{age})$ = viscosité décroissante avec θ & augmentation avec \hat{age}

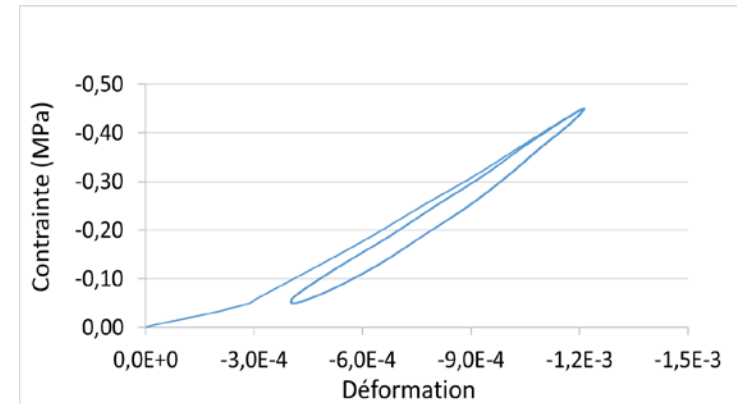


Viscosités = $A(\theta, \hat{age}) \zeta(l)$

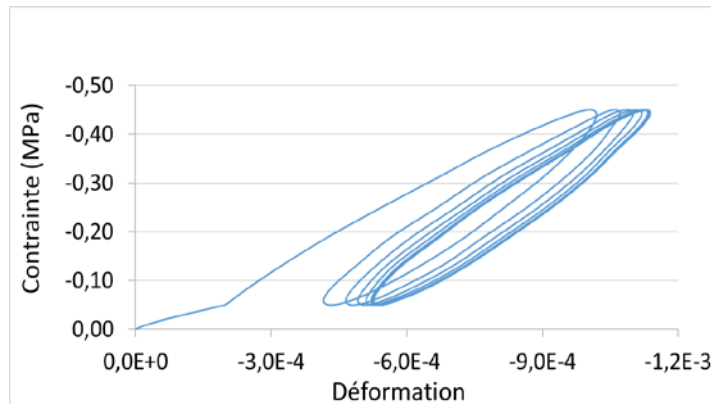
Développement d'une loi de comportement : simulation 3D

- Ex : simulation d'un essai œdométrique cyclique à valeur $A(\theta, \hat{age})$ donnée
 - Précharge + contrainte σ_{zz} sinusoidale imposée avec $\varepsilon_{xx} = 0$ et $\varepsilon_{yy} = 0$
 - Calcul de la déformation ε_{zz} et des contraintes σ_{xx} et σ_{yy} résultant

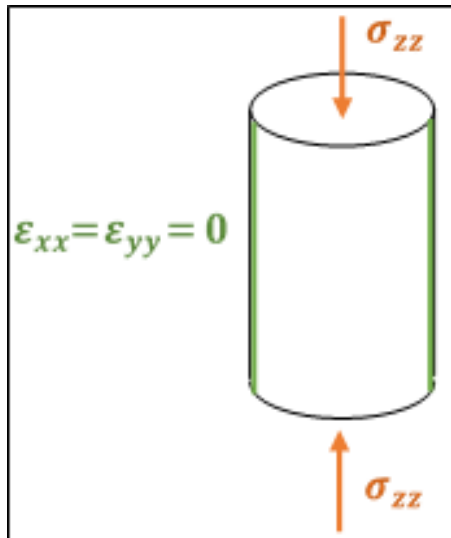
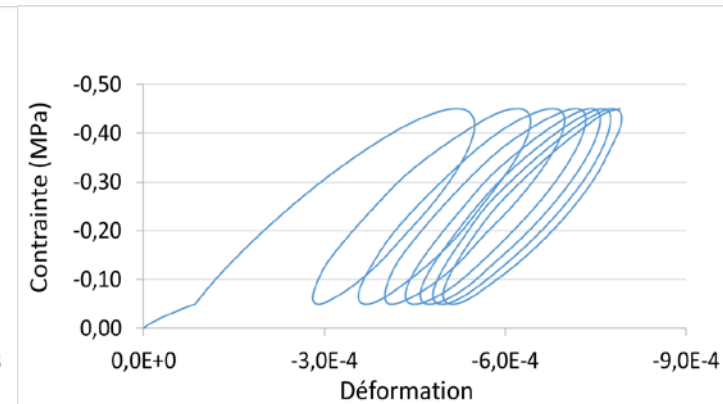
$$A(\theta, \hat{age}) = 4.10^8 s$$



$$A(\theta, \hat{age}) = 4.10^{10} s$$



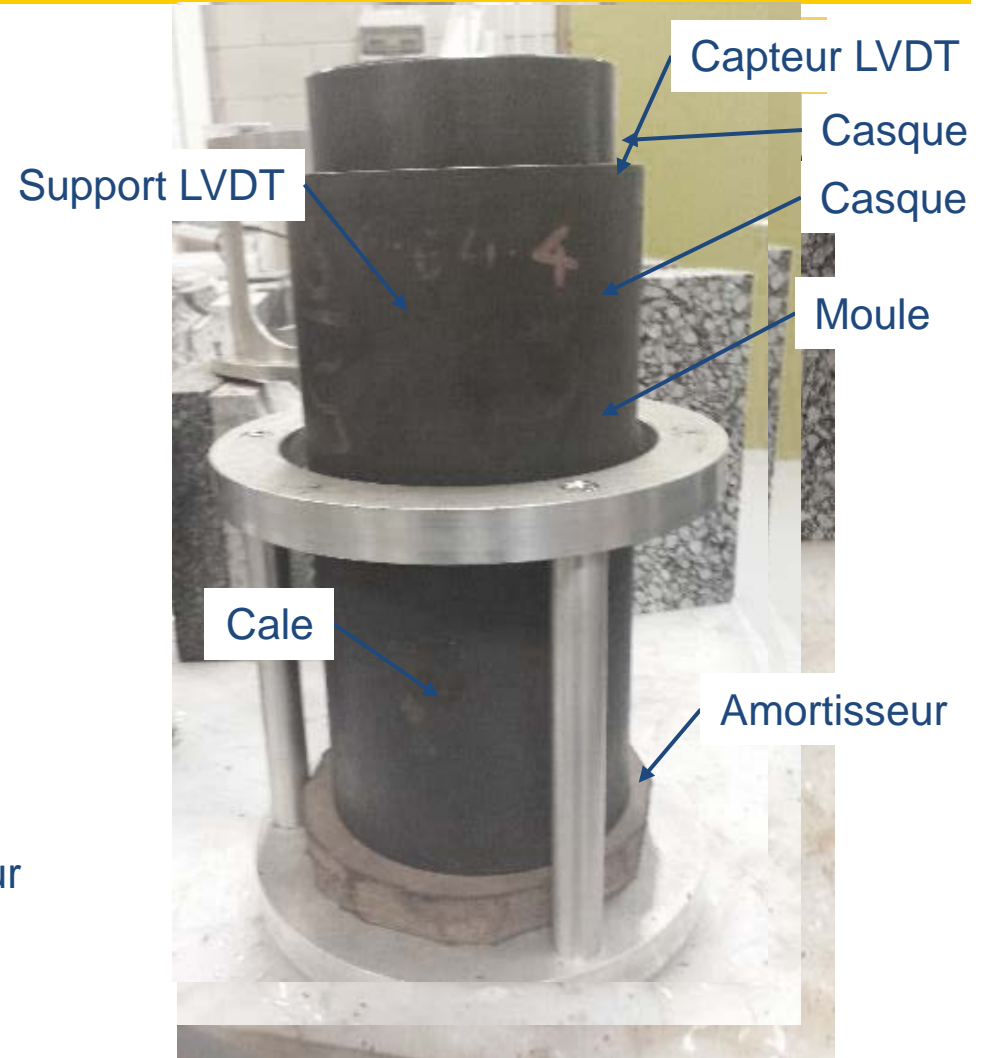
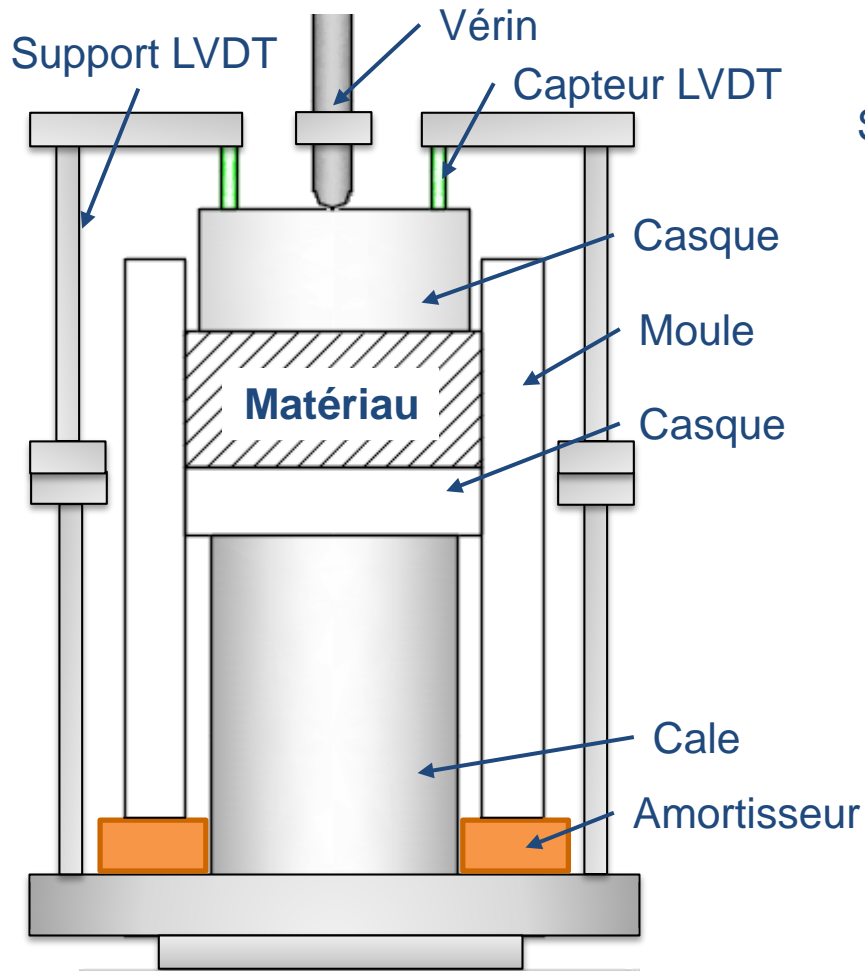
$$A(\theta, \hat{age}) = 4.10^{12} s$$



Choix de l'essai œdométrique

- Définition des paramètres élastiques et viscoélastiques :
 - Compression diamétrale, flexion points, triaxial, œdométrique
- Essai au jeune âge (Etat frais) => Matériau sans cohésion
- Choix de l'essai œdométrique simple et adapté au matériau
 - Il est possible de reproduire des cycles de chargement
 - $|E_{oedo}^*| = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} |E^*|$

Essai œdométrique : dispositif expérimental

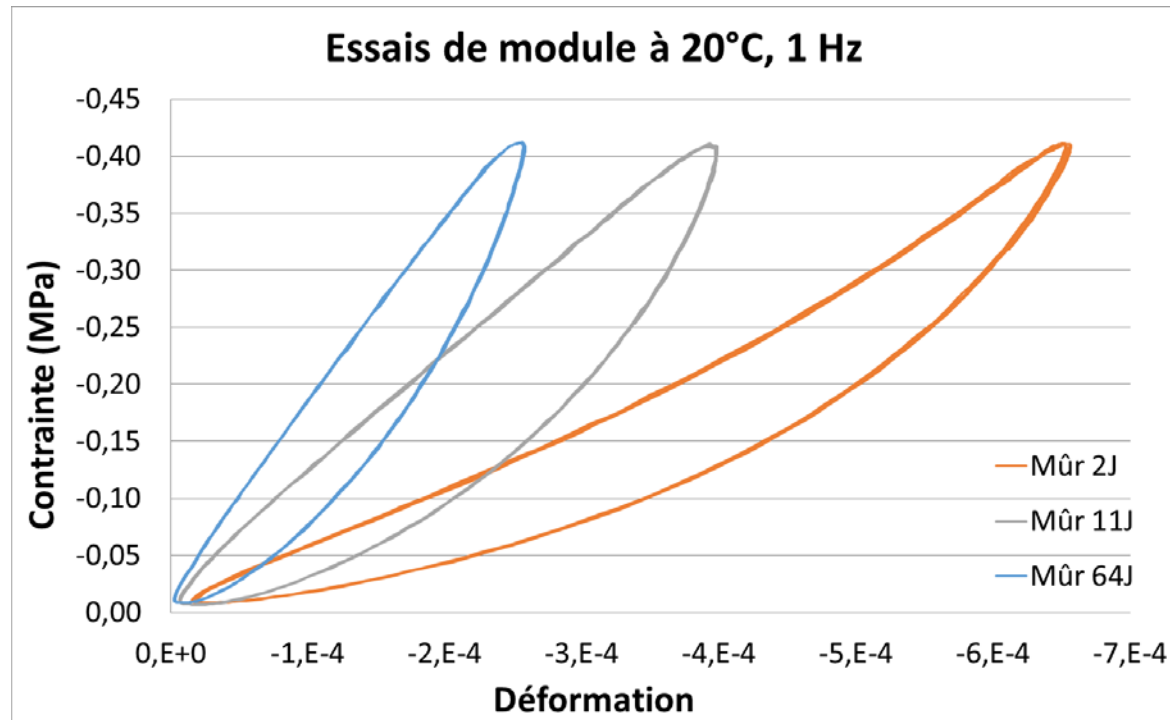


Essai œdométrique : protocole d'essai

- **Objectif : obtenir des courbes de contrainte et déformation**
- **Modalités :**
 - Plage de température : 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
 - Chargements cycliques \approx 100 cycles (petites déformations, jusqu'à stabilisation des déformations)
- **Mûrissement des échantillons dans leur moule (15°C et 35°C, 55% d'HR)**
 - Dimension échantillon : \varnothing 120 mm , 60 mm de hauteur
 - Les échantillons sont brièvement sortis de mûrissement pour essai

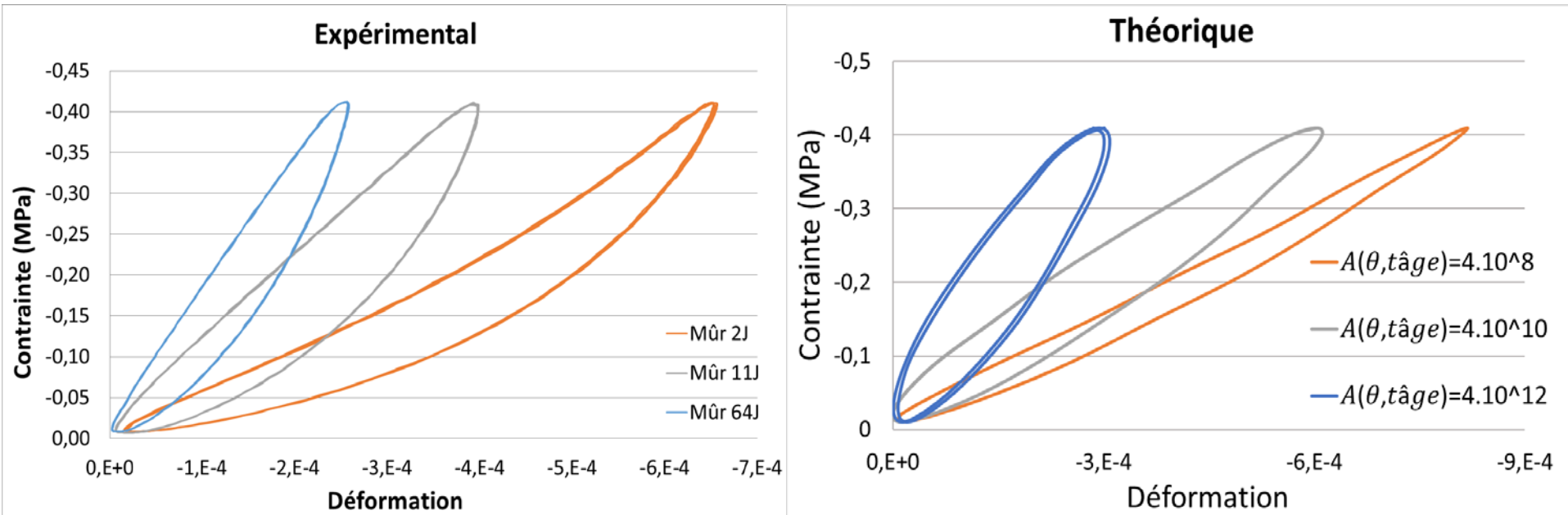
Comparaison des courbes $\sigma \leftrightarrow \varepsilon$ théorique et expérimentale

- Exemple : effet du mûrissement à 35 °C et 55 % d'HR



- A l'état frais : forte convexité cf : comportement ENL (GNT)
- Diminution de l'amplitude de déformation
- Augmentation de la viscoélasticité et rigidification du matériau

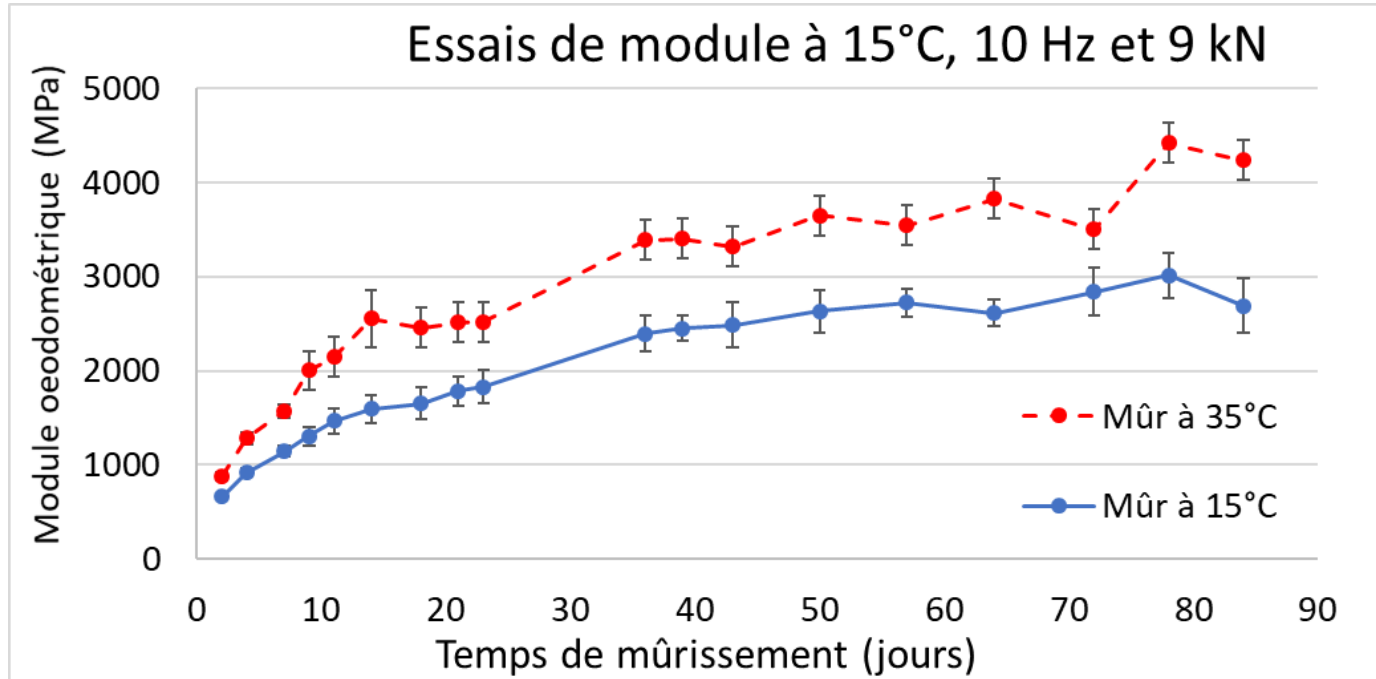
Comparaison des courbes $\sigma \leftrightarrow \varepsilon$ théorique et expérimentale



- Pas de calage optimisé ici
- Bonne aptitude du modèle à rendre compte du comportement expérimental à divers degrés de mûrissement

Effet de la température de mûrissement

- **15°C vs 35°C :**



- % de vides = $14,5 \pm 0,5$
- Vitesses de mûrissement $35^\circ\text{C} > 15^\circ\text{C}$
- Egalité des asymptotes pour temps de mûrissement élevés ? Effet histoire thermique ?
- $|E_{oedo}^*| > |E^*|$

Conclusions et perspectives

Conclusions

- Création d'une loi de comportement viscoélastique non linéaire (VENL),
- Développement d'un essai de caractérisation des enrobés à froid (de l'état frais à mûri),
- Corrélation entre comportement théorique et expérimental.

Perspectives

- Comportement aux petites déformations :
 - Implémentation de la loi dans un code aux éléments finis (calcul de la déformation sous chargement),
 - Calages des paramètres du modèles et de la fonction $A(\theta, t\grave{a}ge)$,
- Critère de durabilité :
 - Rechercher les modes de dégradation de ce type de matériau et en définir les critères de durabilité (orniérage, fatigue).

Merci de votre attention

Lambert Marion

Routes de France / IFSTTAR / GC2D (Univ Limoges)

marion.lambert@ifsttar.fr