

Séminaire de restitution CCLEAR

Impact des conditions climatiques sur les infrastructures routières

Comportement des enrobés soumis aux cycles de gel - dégel

03 février 2015

Sébastien Liandrat et Olivier Chupin

Cerema/DTerCE et IFSTTAR

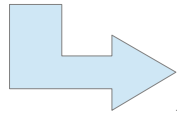
sebastien.liandrat@cerema.fr

olivier.chupin@ifsttar.fr

Contexte de l'étude

Historique

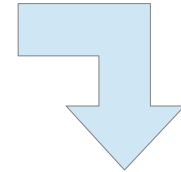
- Les structures de chaussées sont soumises à de multiples sollicitations liées au trafic et au climat
- Récemment en France et dans d'autres pays, apparition soudaine et sans signe précurseur de désordres sur les couches de roulement durant l'hiver
- Pelades, arrachements, nids de poule
- Observation sur plusieurs dizaines voire centaines de km



Suggestion d'un mécanisme de dégradation spécifique

Facteurs communs identifiés

- Séries de pluies en alternance avec des périodes de gel et dégel
- Teneur en eau importante dans la porosité des enrobés
- Température très négative peu de temps avant les dégradations (-10°C)
- Apparition des désordres en peu de passages de véhicules



Approche pour comprendre le phénomène

- Application de cycles de gel / dégel sur un enrobé saturé en eau
- Méthodes de caractérisation : déformation, tomographie, propagation d'ondes sismique
 - Mesures de rigidité par tests de module complexe

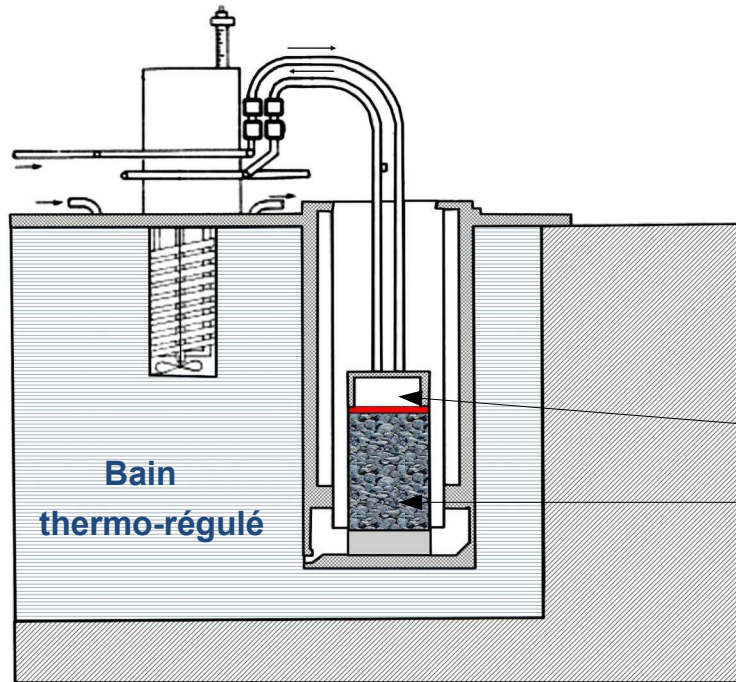
Sommaire

- Expérimentations 2011-2013 : observation et compréhension des mécanismes pendant les cycles de gel/dégel
- Expérimentations 2014 : vers une caractérisation plus simple de la tenue au gel des enrobés
- Essais « pour voir » de tomographie à rayons X
- Essais de module complexe
- Conclusions



Enceinte de gel / dégel

- Cellule de gel pour les essais de gonflement au gel des sols

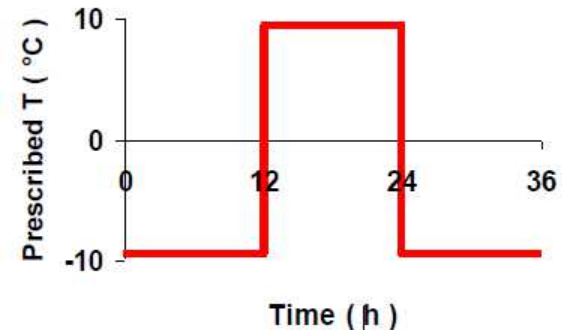


Vue en coupe du dispositif

- Le matériel est composé de 6 cellules
- Le front de gel se propage verticalement
- Les cycles de gel/dégel sont appliqués par un piston réfrigéré positionné au sommet des éprouvettes

Piston réfrigéré
Éprouvette d'enrobé

- Application de cycles de 24 heures variant entre $+10^{\circ}\text{C}$ et -10°C



Confection des éprouvettes

- Confection des éprouvettes selon NF P 98-251-1 : éprouvette de diamètre 80 mm et hauteur 90 mm

- Formule

Béton bitumineux semi-grenu

Fraction granulaire	Pourcentage en masse
0/4	43 %
4/6	12 %
6/10	41 %
Filler	4 %
Bitume 35/50	5,8 %

- Deux types d'échantillons cylindriques

- Mono-couche avec porosité de 11 %
- Bi-couche avec deux porosités : 11 % pour la couche du haut et 6 % pour la couche du bas

Mesures de porosité faites avec un banc gamma

- Saturation des éprouvettes

Immersion + Dépression résiduelle de 97 kPa pendant 60 minutes



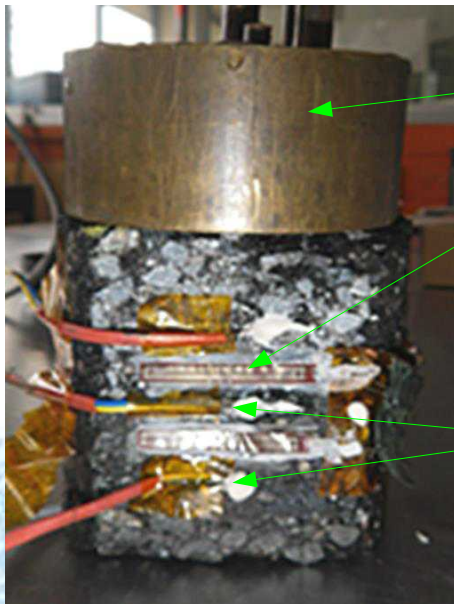
Cloche

Pompe à vide

Éprouvettes

Méthode des jauges de déformation

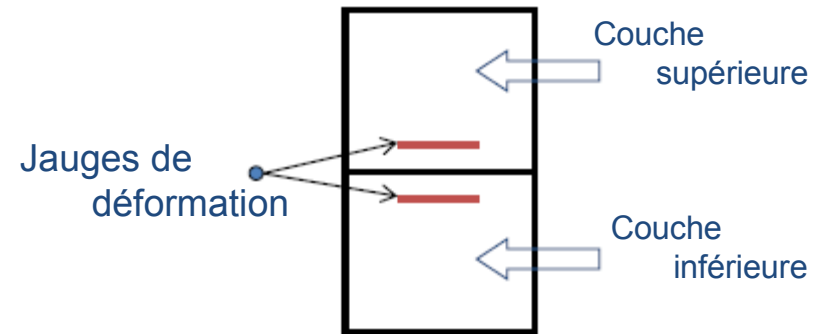
- Mesure de la déformation horizontale à l'aide de jauges de déformation
- Mesure de la température à différentes hauteurs sur l'éprouvette avec des thermocouples
- Compensation des températures avec un barreau de silicate
- Instrumentation d'un mono-couche (photo ci-dessous)
- Instrumentation d'un bi-couche (schéma ci-dessous)



Piston

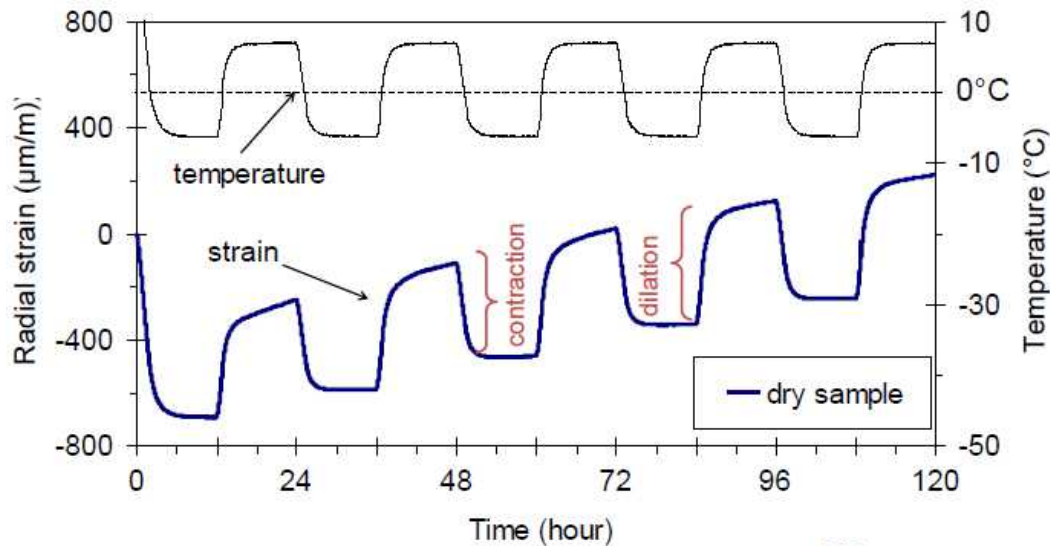
Jauge de déformation

Thermocouples



- Les jauges sont placées près de l'interface entre les deux couches

Résultats pour le cas mono-couche



Cas éprouvette sèche

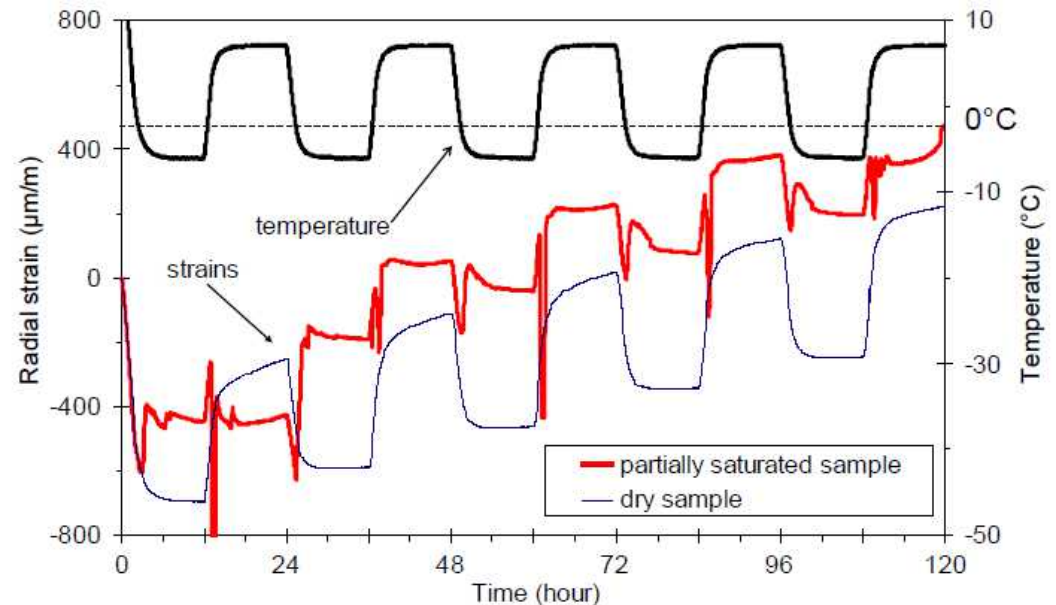
- Durant un cycle, déformation quasi-proportionnelle avec la température

$$\alpha = \Delta\varepsilon_r / \Delta T \sim 30 \mu\text{def} / ^{\circ}\text{C}$$

- En condition de déplacement libre, un gonflement apparaît après chaque cycle

Cas saturé – réponse plus complexe

- Des pics de déformation (vers le haut ou le bas) à chaque fois que la température passe par zéro au niveau de la jauge
- Passage de l'eau en glace : dilatation des pores et pics vers le haut ($\sim 200\mu\text{def}$)
- Passage de la glace en eau : la perte de volume crée une dépression d'où les pics vers le bas ($\sim 400\mu\text{def}$)



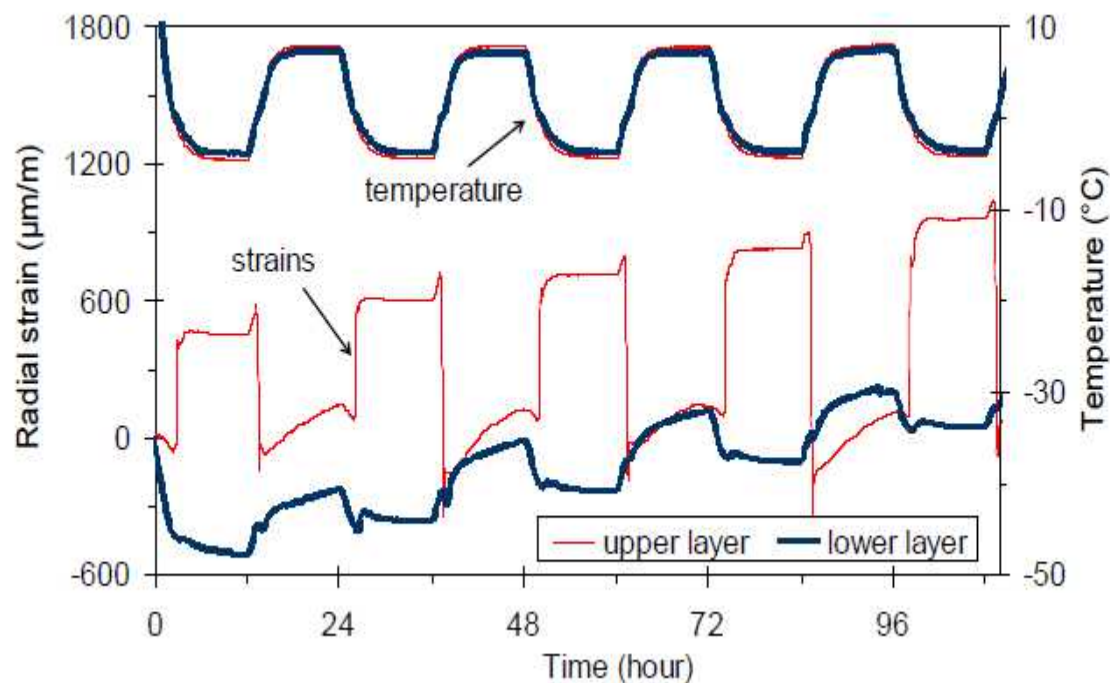
Résultats pour le cas bi-couche

Couche du haut (en rouge)

- Porosité = 11 %
- Comportement similaire à l'échantillon saturé du cas précédent avec des pics plus importants (500 $\mu\text{déf}$ vers le haut et 600 $\mu\text{déf}$ vers le bas)

Couche du bas (en bleu)

- Porosité = 6 %
- Comportement proche de celui de l'échantillon sec probablement dû à une plus faible présence d'eau
- Un faible effet de gel/dégel est présent avec de légers pics



- La réponse du bi-couche est complexe, caractérisée par des évolutions en opposition à certaines phases
- Ces déformations opposées pourraient induire des contraintes au niveau de l'interface

Une caractérisation plus simple de la tenue au gel

Bilan à la fin 2013

- Méthode des jauges bien maîtrisée
- Meilleure compréhension du comportement des enrobés soumis à des cycles de gel / dégel

Nouveaux objectifs

- Mettre au point un dispositif de gel / dégel accessible à tous les laboratoires
- Envisager un essai de tenue au gel plus simple que la méthode des jauges



Congélateur



Serpentin



Plaque réfrigérante

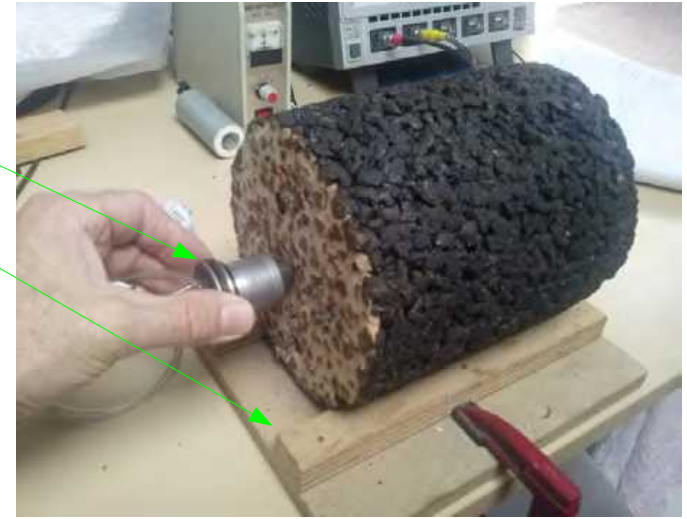
Essai de propagation d'ondes sismiques

Dispositif expérimental

Multivibrateur couplé à un accéléromètre ponctuel
Support en bois pour limiter la propagation de l'onde en dehors de l'échantillon



Oscilloscope
Accéléromètre récepteur



Mesures

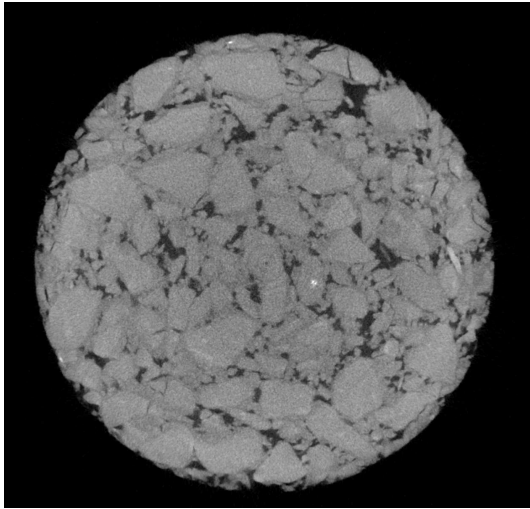
- Temps et donc vitesse de propagation dans l'enrobé
 - Avant cycle de gel/dégel
 - Après cycle de gel/dégel

Résultats

- Perte de vitesse d'environ 5 % après application des cycles (Écart-type mesuré d'environ 2,5 %)
- Interprétation : Les cycles de gel/dégel créent des vides qui ralentissent les ondes

Essai de tomographie

Quelques essais préliminaires ont été réalisés par le laboratoire **Nikon Metrology SARL** de Lisses (91)

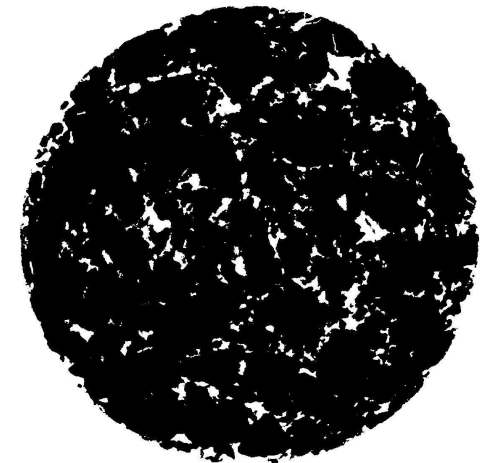


Principe des mesures

- Tomographie aux rayons X
- Découpage vertical avec un pas de 73 μm d'épaisseur
- 1200 images pour 8,7 cm de hauteur
- Différents niveaux de gris

Analyse des images

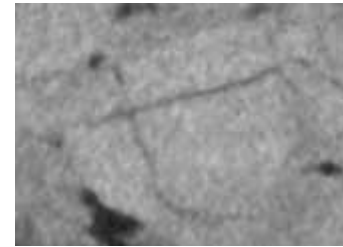
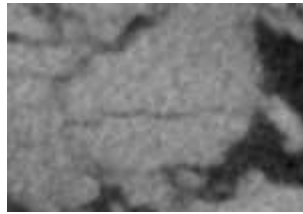
- Utilisation du logiciel ImageJ et du package Fiji
- Application d'un algorithme de transformation de l'image en noir et blanc – choix visuel parmi les possibilités
- Comptage de toutes les particules (= tâches blanches)
- Extraction sous Excel puis calcul du volume de vides



Essai de tomographie

Mesures réalisées sur deux éprouvettes ayant subis 30 cycles de gel / dégel

- Les volumes de vides mesurés sont de l'ordre de 6 % : plus faible mais proche des mesures au banc gamma qui sont de 8 et 9 %
- Au niveau de la partie haute de l'éprouvette, on mesure un pourcentage de vide plus fort (~9%) qu'au milieu et en bas (~4-5%)
- Au niveau de la partie haute de l'éprouvette, on observe de nombreuses fractures au sein des granulats



Essais à venir

- Comparaison d'une même éprouvette avant et après cycle
- Optimisation du processus d'analyse des images (algorithme de seuillage)

Essais de module complexe

- Les essais de propagation de front de gel sur EB partiellement saturé ont montré un effet significatif des phénomènes de gel/dégel sur les déformations (gonflement)
- Illustration des effets du gel sur la rigidité des EB essais de module complexe



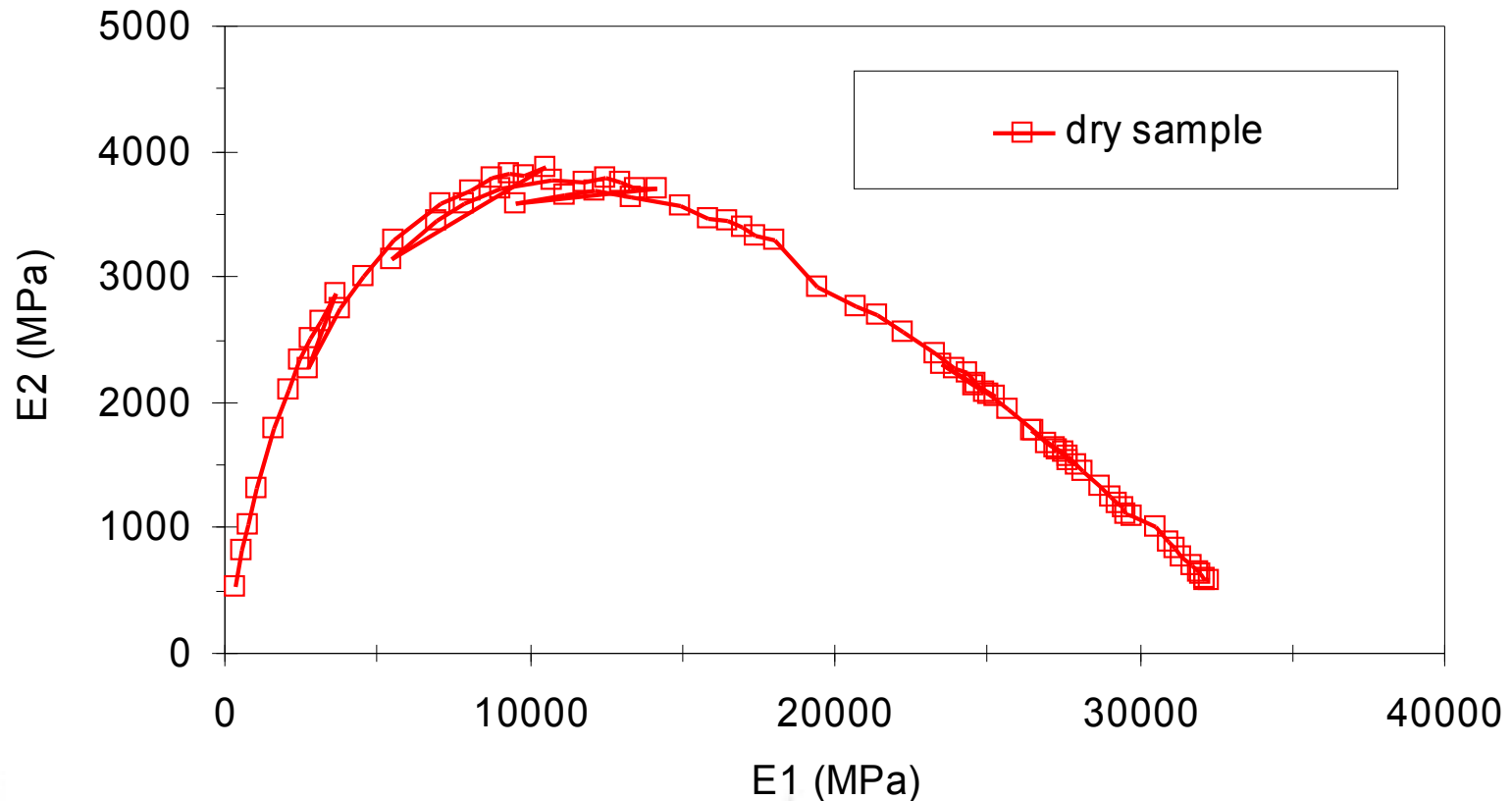
Description des essais

- La porosité des échantillons testés est comprise entre 7 et 8%
- Les essais sont réalisés sur des éprouvettes trapézoïdales sèches et partiellement saturées (~70%) en eau
- Les essais sont réalisés pour des conditions croisées de T°C et f(Hz) (température augmentée par « étape » en partant de -20°C, état gelé)

Temperature (°C)	-20	-10	-5	0	10	15	20	30		
Frequency (Hz)	1	2	3	5	10	15	20	25	30	40

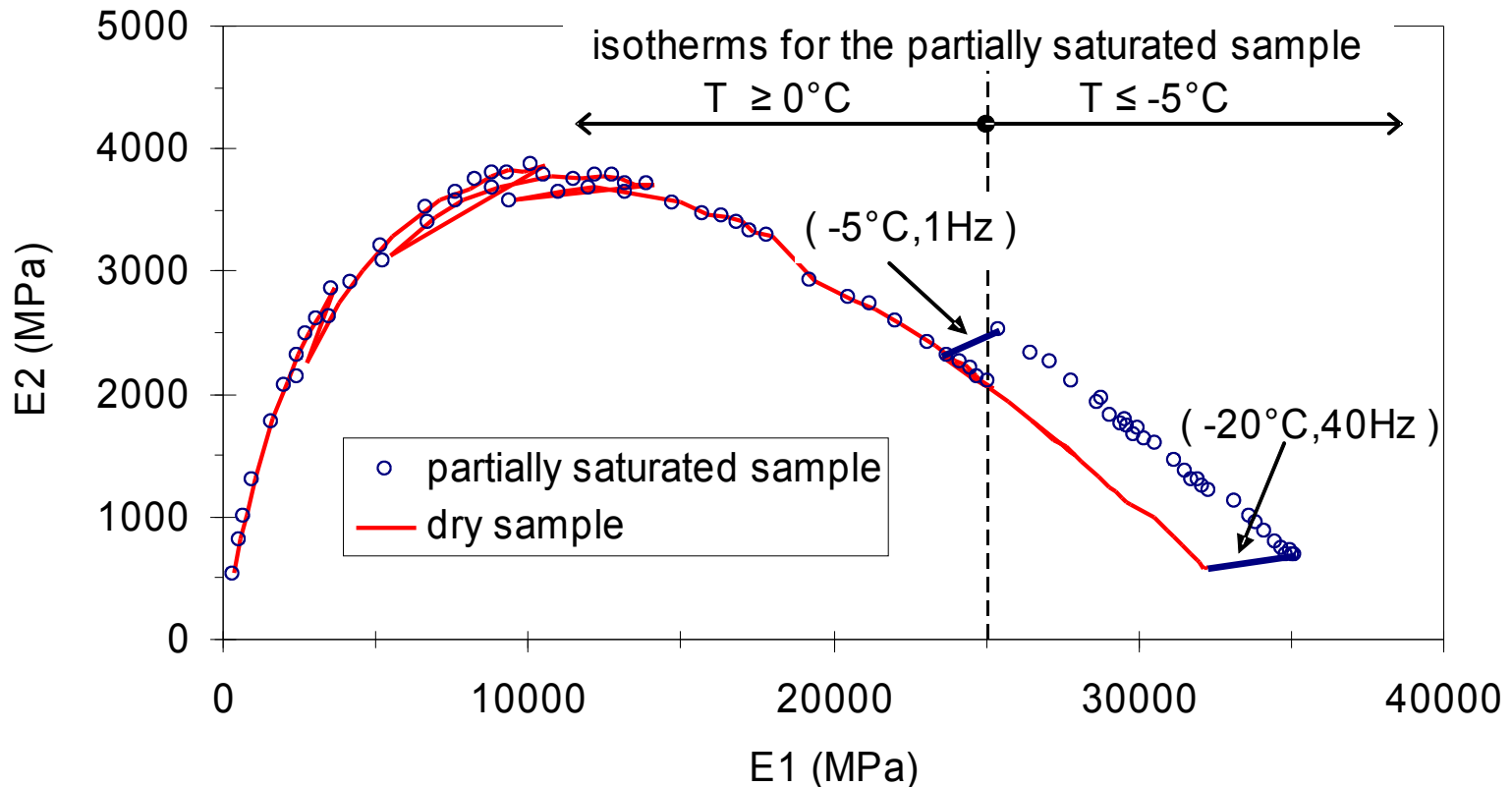
- L'impact de cycles multiples de gel/dégel sur un endommagement possible des échantillons n'est pas étudié ici

Résultat typique dans le plan Cole-Cole : échantillon sec



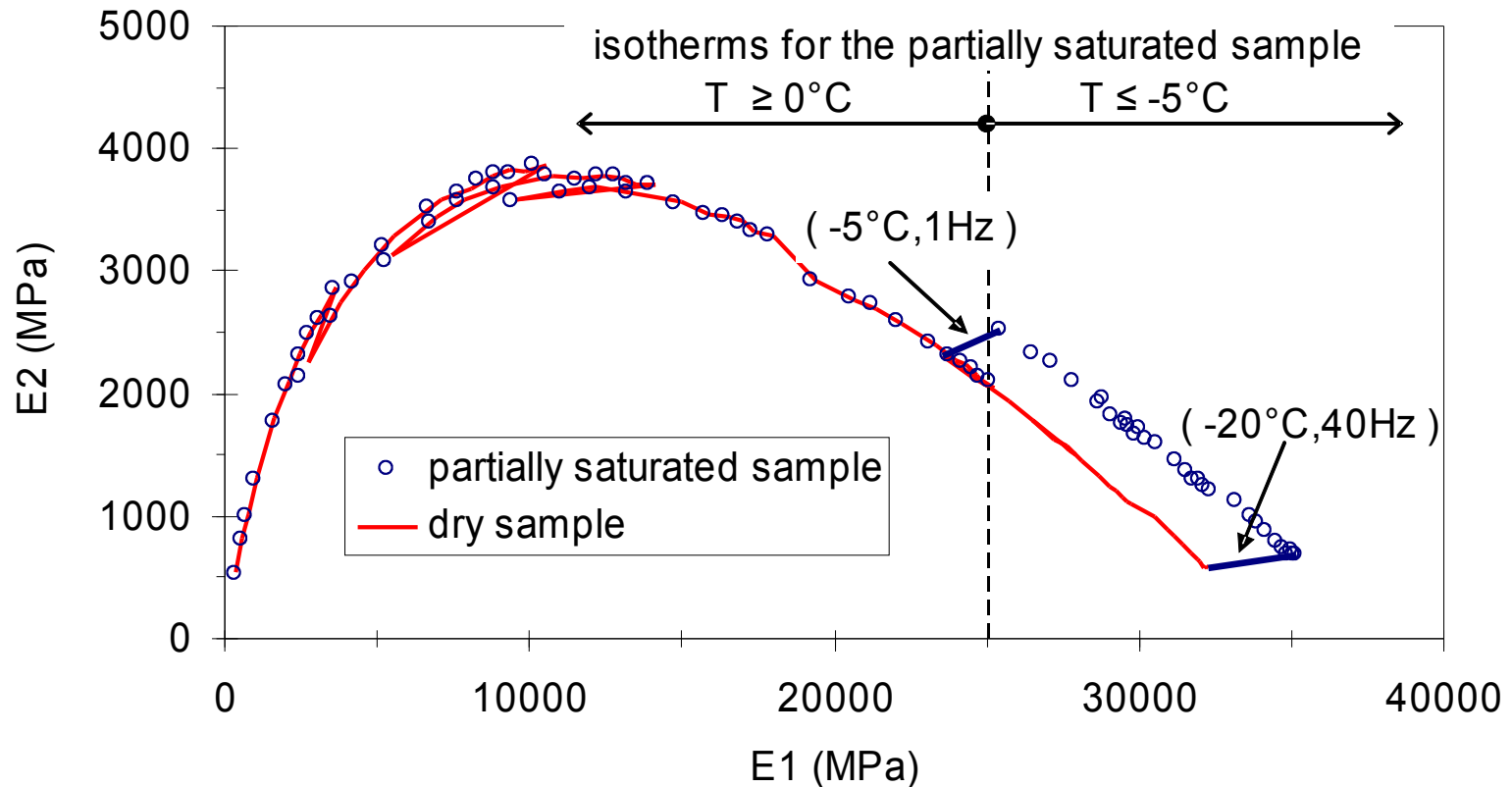
- Pour échantillon sec : continuité à la jonction entre les isothermes reflétée par le principe d'équivalence temps-température

Diagramme de Cole-Cole : échantillon partiellement saturé



- Isothermes superposées avec celles de l'échantillon sec pour $20 \leq T \leq 25^\circ\text{C}$: la saturation partielle en eau liquide n'affecte pas le comportement viscoélastique de l'EB
- Les isothermes obtenues pour des températures $25 \leq T \leq 27^\circ\text{C}$ montrent également une continuité à leur jonction
- Mais "saut" observé entre les isothermes 0 et 5°C

Diagramme de Cole-Cole : échantillon partiellement saturé



- Pour $T \leq 0^\circ\text{C}$ la courbe de module complexe semble homothétique à celle de l'échantillon sec avec un coefficient d'environ 110% (cf. segments sur la figure) *effet de rigidification du matériau dû à la présence de glace dans la porosité de l'EB (comme si la phase solide de l'EB avait augmenté)

Conclusions - Perspectives

- Essais de module complexe : effet de rigidification du matériau dû au changement de phase de l'eau en glace dans la porosité de l'EB
- Essais avec jauges de déformation : compréhension des mécanismes pour les enrobés secs et saturés, à cœur et aux interfaces
- Essais de propagation d'ondes sismiques : diminution de la vitesse de propagation des ondes liée à la création de vides dans l'enrobé : à confirmer
- Essais de tomographie : à développer en relatif sur éprouvette avant et après gel

L'opération de recherche CCLEAR a été l'occasion de mettre en place plusieurs essais fonctionnels destructifs et non-destructifs pour caractériser l'effet des cycles de gel / dégel.

Merci de votre attention !

