



Utilisation de granulats de verre dans les enrobés bitumineux : évaluation de l'adhésion bitume-verre

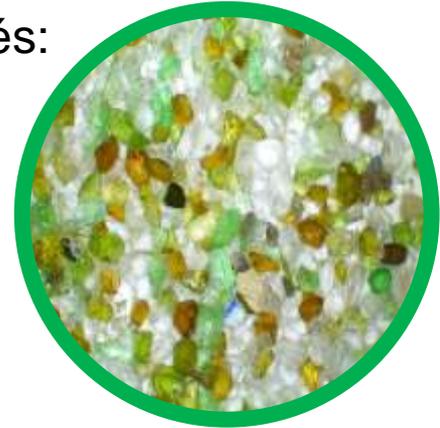
Présenté par :

Éric LACHANCE-TREMBLAY, ing.jr., M.Sc.A., candidat au doctorat

51^e Congrès de l'Association Québécoise des Transports,
Québec, 13 Avril 2016

Introduction: Problématique du recyclage du verre au Québec

- Les centres de tri n'ont pas les équipements requis permettant un tri du verre en fonction de la couleur;
- Les contenants de verre brisés se retrouvent mélangés:
 - Le résultat est appelé verre mixte;
- Le verre mixte ne peut être réutilisé pour produire des nouveaux contenants de verre;
- Jusqu'à maintenant, peu d'utilisations pour le verre mixte:
 - **Pourquoi?**: la principale entreprise de recyclage du verre a fermée en 2013;
 - **Les utilisations?**: la majorité du verre mixte est utilisé pour matériel de recouvrement journalier dans les LET;
 - **Que doit-on faire?**: trouver de nouvelles utilisations au verre mixte avec une valeur ajoutée élevée.

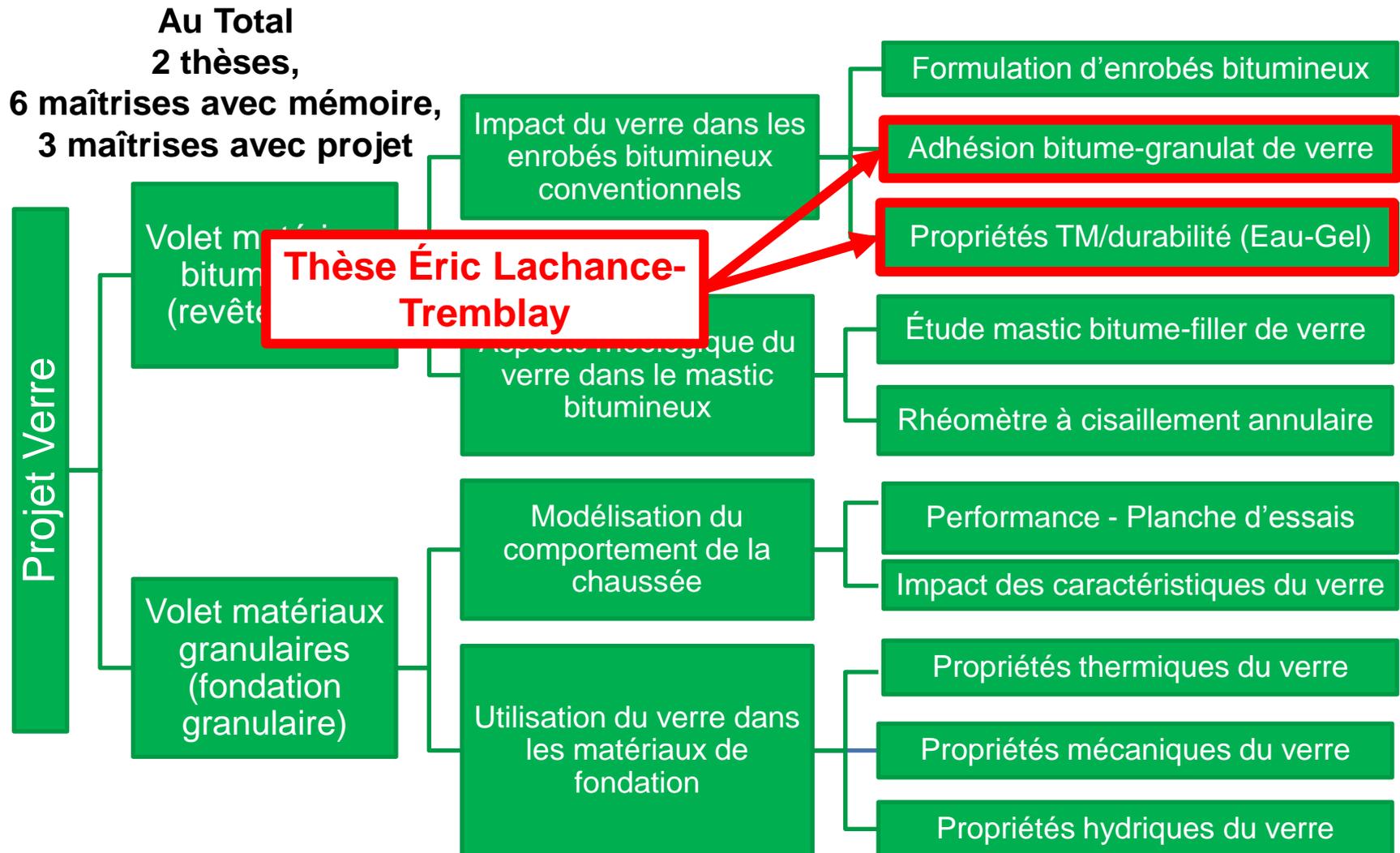


Projet de recherche : Incorporation de granulats de verre dans les matériaux de chaussées

- Projet réalisé au Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS)
- Professeur responsable : Michel Vaillancourt
- Professeurs collaborateurs : Daniel Perraton, Alan Carter & Hervé Di Benedetto (ENTPE-Lyon)
- 4 partenaires : SAQ, ÉÉQ, Recyc-Québec, Ville de Montréal



Projet de recherche : Incorporation de granulats de verre dans les matériaux de chaussées



Plan de la présentation

- Mise en contexte
- Description du phénomène de sensibilité à l'eau
- Approche préconisée
- Méthodologie du projet
- Résultats jusqu'à présent



Mise en contexte

- Les premiers projets portant sur l'incorporation de granulats de verre dans les EB ont débutés dans les années 70;
- Les points suivants ont été identifiés comme problématiques:
 - Faible adhésion bitume-verre;
 - Perte d'adhérence entre la chaussée et les pneus;
 - Possibilité de bris des particules de verre;
 - Risque d'arrachement;
 - Augmentation de la sensibilité à l'eau;
- L'adhésion bitume-granat :
 - Adhésivité active : mouillage des granulats par bitume, couverture de la surface des granulats
 - Formation de la liaison bitume-granat
 - Adhésivité passive : résistance du bitume à décoller de la surface des granulats
 - Pérénnité de la liaison bitume-granat

Mise en contexte - *Explication du phénomène d'adhésion bitume-granulat*

- L'adhésion bitume-granulat peut s'exprimer par quatre mécanismes :

Adhésion physique

1. Ancrage mécanique :

- Pénétration du liant dans les pores et aspérités des granulats;
- Limite le mouvement physique du bitume;
- Paramètres :
 - Texture de surface (lisse vs rugueuse);
 - Dimension des pores ouvertes;

Mode de quantification :

- Surface spécifique
- Évaluation de la porosité

Adhésion chimique

2. Liaison électrostatique :

- Chaque matériau possède des charges de surfaces (négative, neutre ou positive);
- Liaison électrostatique résulte de l'attraction de charges de signes opposés;
- Paramètre :
 - Charges de surface des matériaux;

Mode de quantification :

- Potentiel Zetâ (granulats)

3. Liaison chimique :

- Formation d'une liaison chimique (ionique, covalente);
- Dans les EB, réactions entre les composés acides et basiques;
- Paramètre :
 - Chimie de surface des matériaux.

Mode de quantification :

- Nature minéralogique (granulats)

Dans les deux cas, la composition chimique du bitume joue un rôle important

Mise en contexte - Explication du phénomène d'adhésion bitume-granulat

- L'adhésion bitume-granulat peut s'exprimer par quatre mécanismes :

4. Thermodynamique (*Énergies de surfaces*)

- À la surface de chaque matériau, les liaisons non saturés confèrent au matériau une énergie libre de surface (ELS);

- Plusieurs théories pour expliquer l'ELS :

- Théorie des deux composés;
- Théorie acide-base;

$$\gamma^{Total} = \gamma^{Dispersive} + \gamma^{Spécifique}$$

Composante de Lifshitz-V.D.W

Composante acide-base

- Lorsque deux matériaux entrent en contact, compensation des énergies de surface;
- À l'interface : énergie libre interfaciale;
- Adhésion du liquide sur le substrat dû aux forces intermoléculaires à l'interface (contact physique nécessaire).

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW} \gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+ \gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^- \gamma_B^+}$$

Composante de Lifshitz-V.D.W

Composante acide-base

Adhésion chimique

Sensibilité à l'eau – *Explication du phénomène*

- Durabilité est l'une des propriétés les plus importantes des EB, dépend des :
 - Caractéristiques des granulats et du bitume;
 - Adhésion bitume-granat;
- La qualité et la durabilité de l'adhésion peuvent être affectée par l'eau;
- L'eau peut :

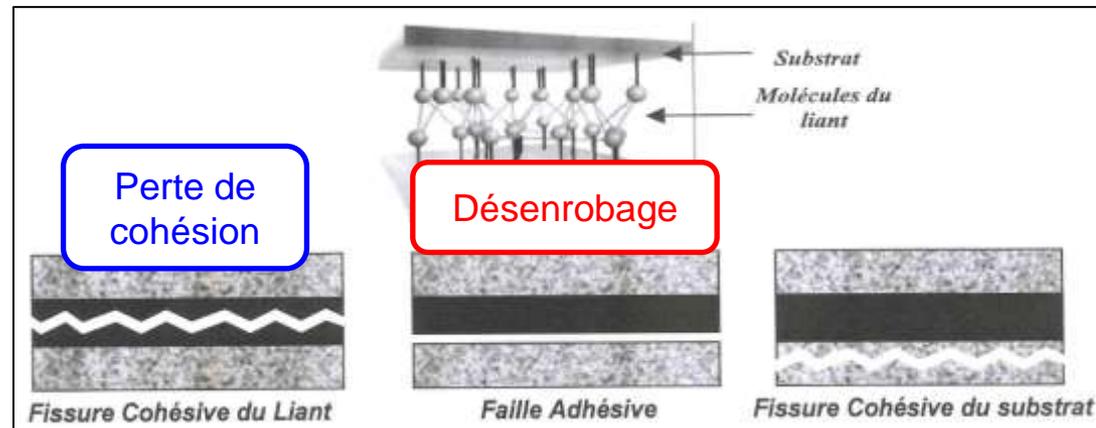


Image tiré de la thèse Pinzon 2004

Interférence de l'eau sur
l'ensemble des forces
intermoléculaires des
matériaux

Perte d'adhésion
bitume-granat

Sensibilité à l'eau – *Explication du phénomène*

- Dans les deux cas, **Désenrobage** & **Perte de cohésion** engendrent une diminution des propriétés mécaniques;
- La durabilité d'un EB dépend :
 - Résistance au désenrobage du couple bitume/granat;
 - Interactions bitume-eau au niveau cohésif;
- La vérification de la sensibilité à l'eau des EB est une partie importante de la formulation;
- Méthode traditionnelle:
 - Essais mécaniques réalisés en condition sèche et humide, ratio perte de résistance;
- Principal désavantage: **Faible pouvoir discriminant**
 - Impossible d'associer les caractéristiques des matériaux (bitume, granulats) aux différents mécanismes d'endommagement par l'eau.

Sensibilité à l'eau – *Approche préconisée*

- Approche préconisée:
 - Évaluer la sensibilité à l'eau d'EB suivant deux principaux modes de dégradations :

Désenrobage

Perte de
cohésion

- Étude à 2 niveaux:
 - 1^{er} niveau: Échelle de la microstructure;
 - Objectif: bien **différencier l'impact** du type bitume des granulats **au niveau de l'adhésion** et de la **durabilité** de celle-ci;
 - Comment: en ciblant des essais permettant d'évaluer séparément, et de façon quantitative, l'impact du type de bitume;
 - Essai de traction type « pull-off »;
 - Mesure des tensions de surface et calcul de l'énergie d'adhésion;
 - 2^e niveau: Échelle de la macrostructure;
 - Objectif: évaluer **la perte de cohésion** d'un EB en présence d'eau;
 - Comment: suivi de l'évolution des caractéristiques d'éprouvettes d'EB suivant des cycles de trempage;
 - Essai de module complexe (E^*).

Sensibilité à l'eau – Approche préconisée

- Approche préconisée:
 - 2 volets:

Perte d'adhésion
bitume-granulat



Influence du bitume sur
l'adhésion

1.1. Caractérisation des
bitumes (SARA)

1.2. Énergie de surface
des bitumes (Wilhelmy)

1.3. Force
d'arrachement (*pull-off*)

Interférence de l'eau sur
l'ensemble des forces
intermoléculaires des matériaux



Essais sur EB avec verre

2.1. Additif d'adhésivité
nécessaire ?

2.2. Effet de l'effet sur les
propriétés VEL des EB avec
verre

Méthodologie – Influence du bitume sur l'adhésion

- 2.1. Influence du bitume sur l'adhésion
- Interrogation : *Quels sont les caractéristiques du bitume qui influencent l'adhésion au verre?*
- Cinq bitumes sélectionnés, trois paramètres :
 - Grade PG (3 différents);
 - Source du brut (3 différentes);
 - Présence de polymères SBS;

Grade PG	Source brut	Polymère	Nombre d'essai		
			Traction pull-off		Plaque Wilhelmy
			Sec	Humide	
PG58-28	A	Non	3	3	5
PG64-22	A	Non	3	3	5
PG64-22	B	Non	3	3	5
PG64-22	C	Non	3	3	5
PG70-28	A	Oui	3	3	5

Méthodologie – Influence du bitume sur l'adhésion

- Quelles sont les caractéristiques du bitume qui influencent l'adhésion au verre?
- Pour chaque bitume (5), trois essais :
 - 1.1. Composition chimique → Détermination des composés SARA;
 - 1.2. Essai de plaque Wilhelmy → Calcul énergie d'adhésion;
 - 1.3. Traction de type *pull-off* → Influence du bitume sur la force d'adhésion.

Influence du bitume sur l'adhésion

1.1. Caractérisation des bitumes (SARA)

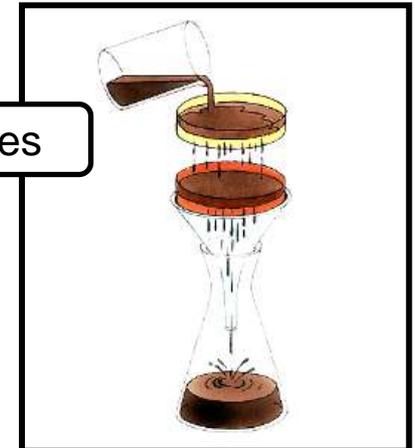
1.2. Énergie de surface des bitumes (Wilhelmy)

1.3. Force d'arrachement (*pull-off*)

Composition du bitume :

- Asphaltènes
- Résines
- Aromatiques
- Saturés

Maltènes



Méthodologie – Influence du bitume sur l'adhésion

- 1.2. Énergie de surfaces des bitumes – Plaque Wilhelmy
 - Lamelles de verre enduites d'un film de bitume et immergée dans des liquides d'essais;
 - Permet d'obtenir l'angle de contact bitume-liquide et...
 - D'obtenir les composantes des tensions de surfaces;

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A^{LW} \gamma_B^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_A^+ \gamma_B^-} + 2\sqrt{\gamma_A^- \gamma_B^+} = \pi_e + \gamma_B^{total} (1 - \cos \theta)$$

Composante de Lifshitz-V.D.W

Composante acide-base

γ liquide d'essai

Angle de contact

- Pour déterminer les composantes du bitume, il faut tester au moins **trois** différents liquides d'essais;
- Optimal avec cinq liquides :
 - Eau, iodure de méthylène, formamide, glycérol & éthylène glycol;
- Résultat : **connaissances des composantes des ELS**;
- Une fois les composantes connus, le travail d'adhésion bitume-verre sera calculé.

$$W_{AB} = 2\sqrt{\gamma_A \gamma_B}$$

Influence du bitume sur l'adhésion

1.1. Caractérisation des bitumes (SARA)

1.2. Énergie de surface des bitumes (Wilhelmy)

1.3. Force d'arrachement (*pull-off*)



Méthodologie – Influence du bitume sur l'adhésion

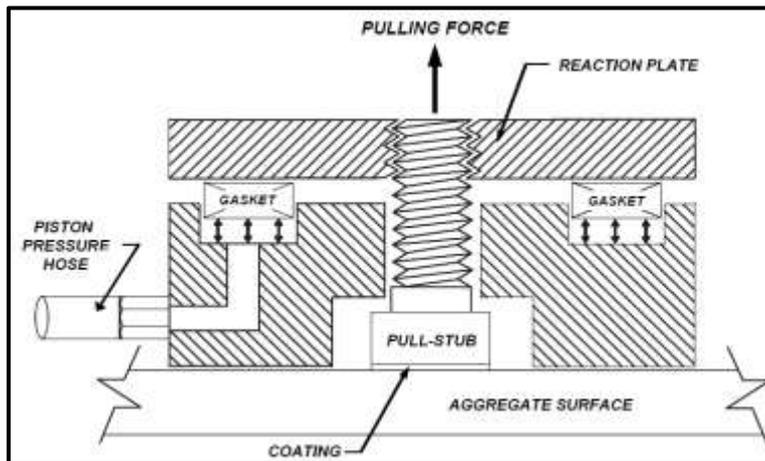
- 1.3. Force d'arrachement – Essai de traction de type *pull-off*
 - Consiste à mesurer la force d'adhésion du bitume sur un substrat donné;
 - Échantillons peuvent être conditionnés dans l'eau;
 - Permet d'observer le type de rupture (adhésive vs cohésive);
 - Résultat : **résistance à l'arrachement**;
 - Dans le cadre de ce projet :
 - Appareil : Jauge d'adhérence hydraulique;
 - Substrat : plaque de verre, plaque de calcaire;
 - Plot : \varnothing 50 mm, laiton, rebords 300 μ m avec ouvertures.

Influence du bitume sur l'adhésion

1.1. Caractérisation des bitumes (SARA)

1.2. Énergie de surface des bitumes (Wilhelmy)

1.3. Force d'arrachement (*pull-off*)



Sensibilité à l'eau – *Approche préconisée*

- Approche préconisée:
 - 2 volets:

Perte d'adhésion
bitume-granulat



Influence du bitume sur
l'adhésion

1.1. Caractérisation des
bitumes (SARA)

1.2. Énergie de surface
des bitumes (Wilhelmy)

1.3. Force
d'arrachement (*pull-off*)

Interférence de l'eau sur
l'ensemble des forces
intermoléculaires des matériaux



Essais sur EB avec verre

2.1. Additif d'adhésivité
nécessaire ?

2.2. Effet de l'effet sur les
propriétés VEL des EB avec
verre

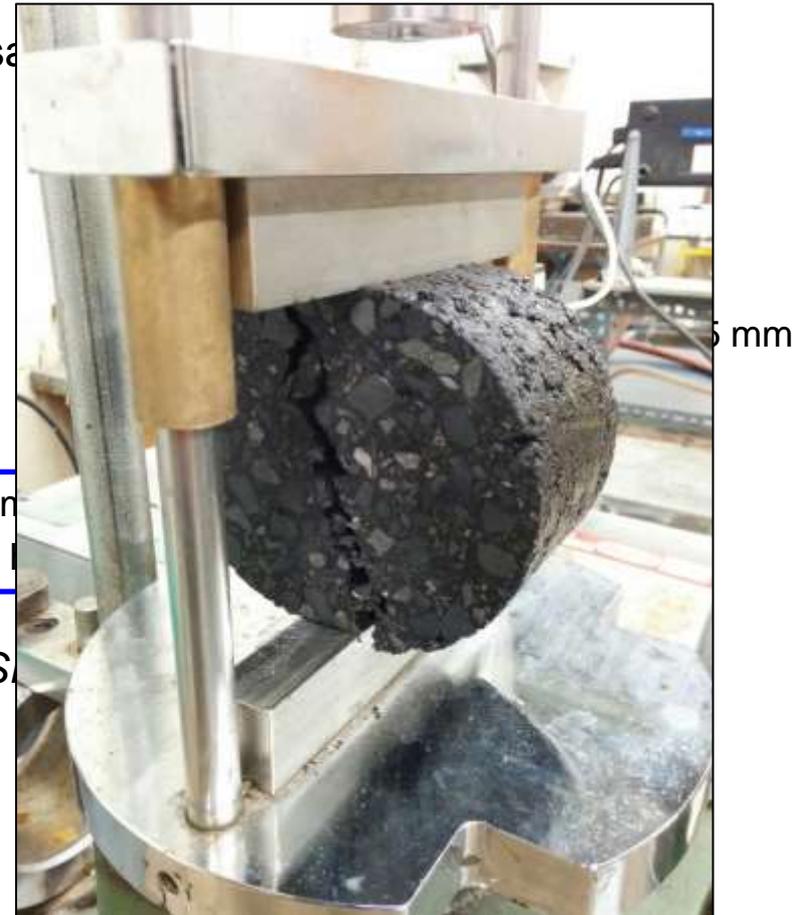
Méthodologie – Étude à l'échelle de la macrostructure

- 2.1. Est-il nécessaire d'utiliser un additif d'adhésivité ?
- ESG10 référence & ESG10 20 % de verre (volumique)
- PG70-28
- Additif d'adhésivité : Chaux hydratée, dosage
- Tenue à l'eau basé sur AASHTO T283
 - Compaction des éprouvettes à la PCG;
 - Essai de traction indirecte;
- Conditionnement des éprouvettes :
 - Saturation à l'eau entre 70,0 % et 80,0 %;
 - Éprouvettes couvertes pellicule plastique, n
 - Éprouvettes mise en bassin d'eau pour 24 h
- Tenue à l'eau : *Tensile Strength Ratio (TSR)*

Essais sur EB avec verre

2.1. Additif d'adhésivité
nécessaire ?

2.2. Effet de l'eau sur les
propriétés VEL



Méthodologie – Étude à l'échelle de la macrostructure

- 2.2. Effet de l'eau sur les propriétés VEL;
- Propriétés viscoélastiques linéaires (VEL) d'un EB évaluée au moyen de l'essai de module complexe (E^*);
- Essai non-destructif, permet de cerner le degré de cohésion du matériau (rigidité) pour plusieurs températures et fréquences;
- Sollicitation sinusoïdale traction-compression;
- 3 enrobés testés (ESG10) avec chaux & PG70-28:
 - Enrobé de référence
 - Enrobé 20 % verre
 - Enrobé 60 % verre
- Confection des éprouvettes à la PCG (Vi cible 7,0 %)
- Saturation à l'eau entre 70,0 % et 80,0 %
- Éprouvettes testés selon deux procédures distinctes

Essais sur EB avec verre

2.1. Additif d'adhésivité
nécessaire ?

2.2. Effet de l'eau sur les
propriétés VEL

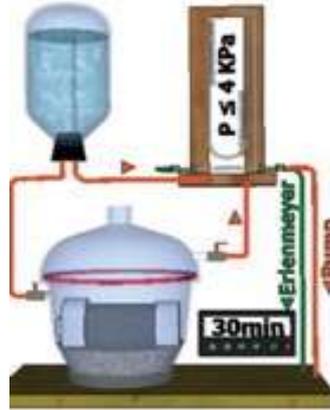


Méthodologie – Étude à l'échelle de la macrostructure

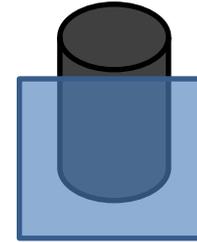
1. E* à sec
-35°C à 35°C; 7 Fr



2. Saturation



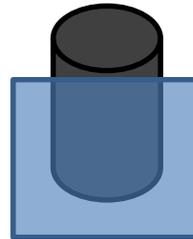
3. Eau @ 60°C, 21 jours



4. E* humide
5°C à 35°C; 7 Fr



5. Cycles de gel-dégel



6. E* humide
-35°C à 35°C; 7 Fr

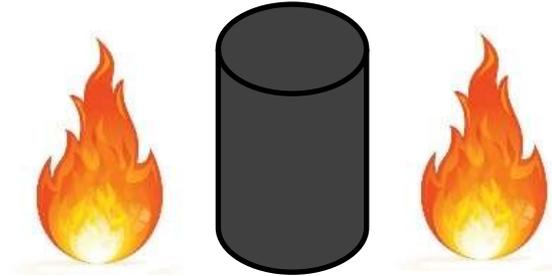


Méthodologie – Étude à l'échelle de la macrostructure

1. E* à sec
-35°C à 35°C; 7 Fr



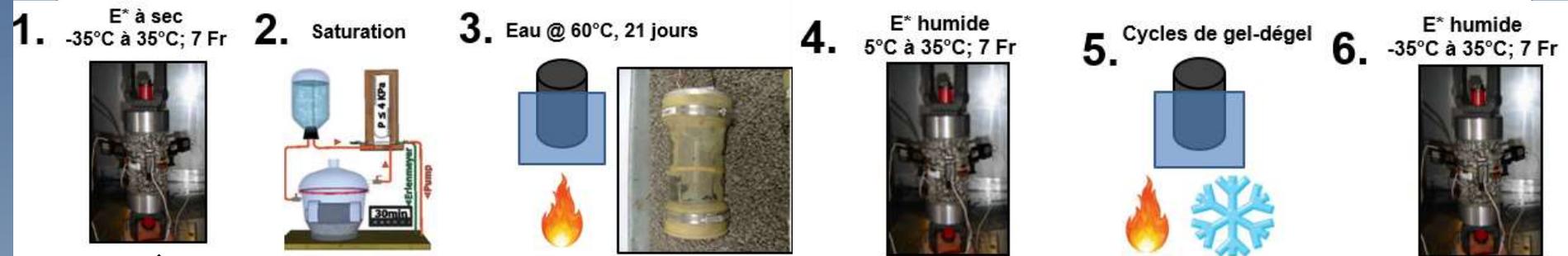
2. Four @ 60°C, 21 jours



3. E* à sec
-35°C à 35°C; 7 Fr

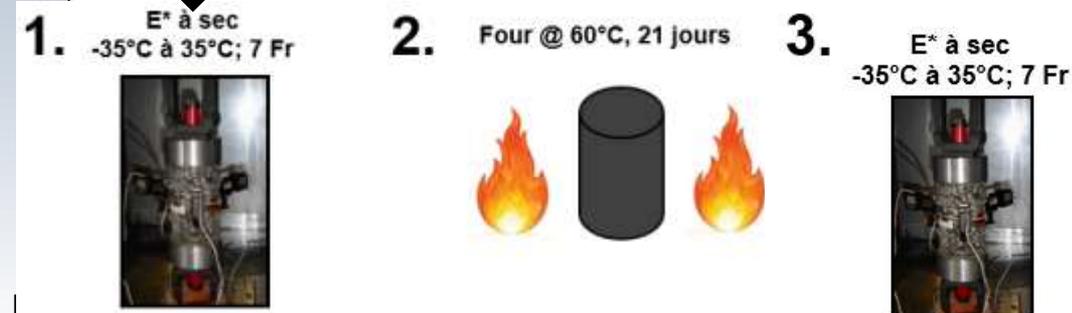


Méthodologie – Étude à l'échelle de la macrostructure



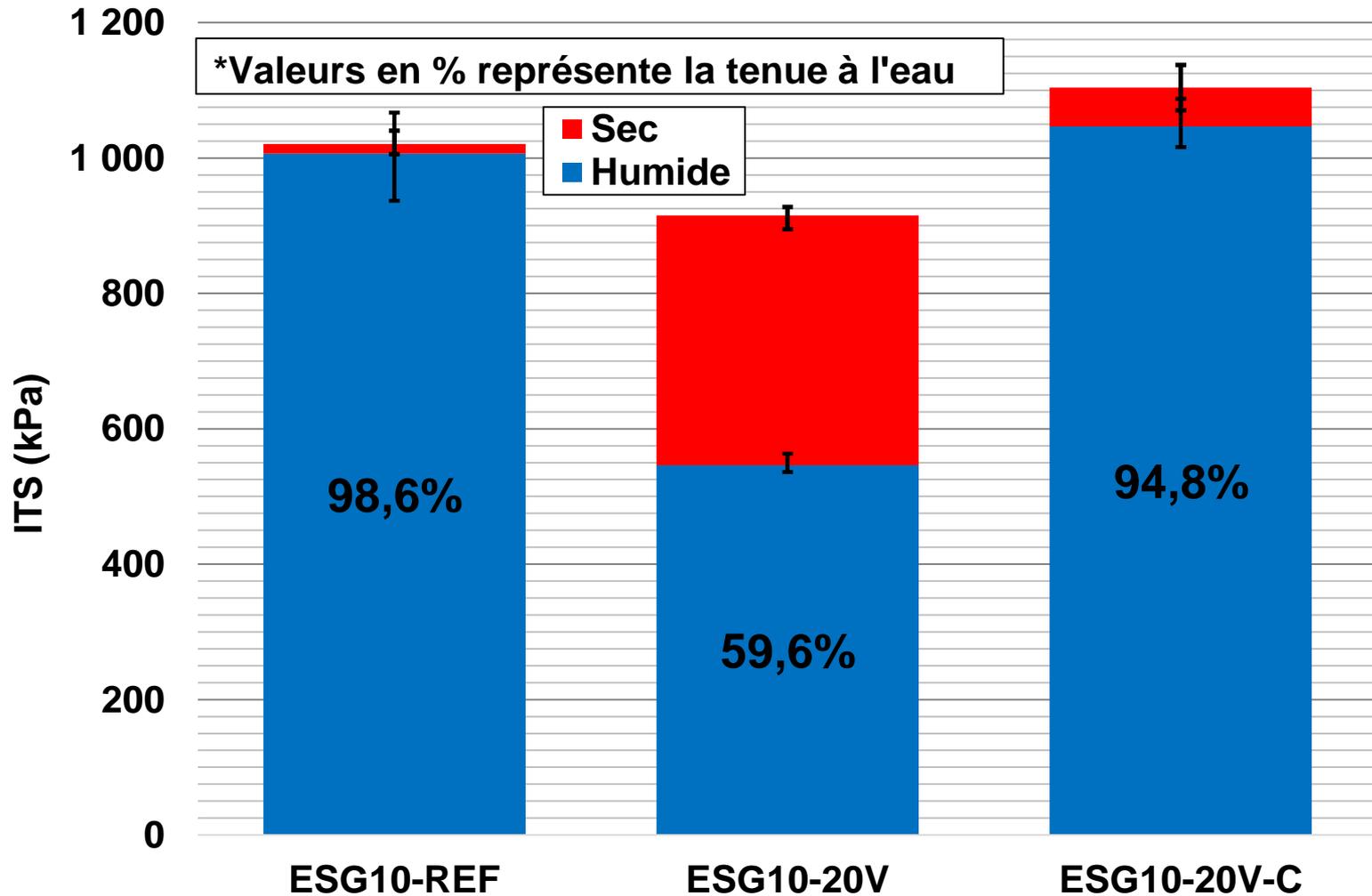
2x (E* à sec -35°C à 35°C; 7 Fr)

- Procédures différentes pour séparer les effets du vieillissement à haute température des effets de l'eau.



Résultats jusqu'à présent

- 2.1. Est-il nécessaire d'utiliser un additif d'adhésivité ?



Résultats jusqu'à présent

- 2.1. Est-il nécessaire d'utiliser un additif d'adhésivité ?

