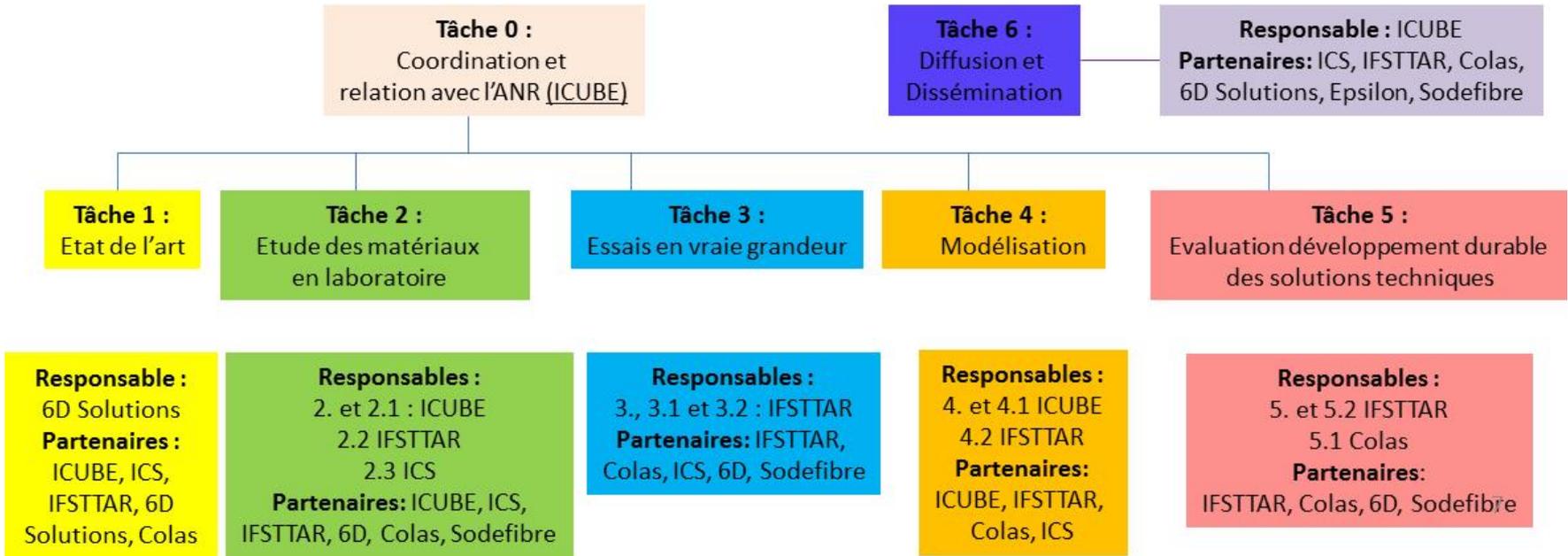


Projet ANR SolDuGri
Le renforcement des infrastructures
par grilles en fibre de verre

C. Chazallon / E. Godard
INSA Strasbourg / Colas S.A.

- **Partenaires :**      
- **Date de début du projet 01/01/2015**
- **Durée : 60 mois**
- **Budget total : 2 028 118.14 €**
- **Aide accordée : 894 263.59 €**

• Méthodologie



Tâche 2 : Etude des matériaux en laboratoire

Tâche 3 : Essais en vraie grandeur : endommagement en place / essai de fatigue manège

Tâche 4 : Modélisation : essais de fatigue / critère de dimensionnement

Tâche 5 : Evaluation développement durable des solutions techniques

1. Essais laboratoire

G1 : 50 kN/m résine a

G2 : 50 kN/m résine b

G3 : 100 kN/m résine a

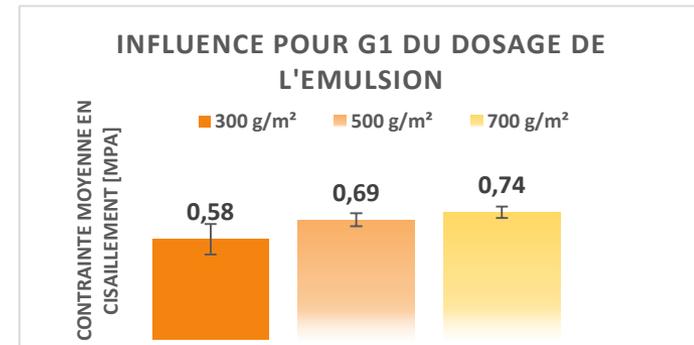
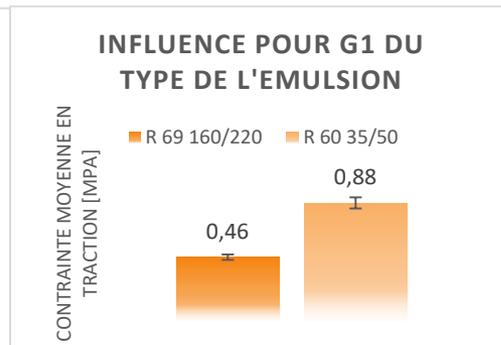
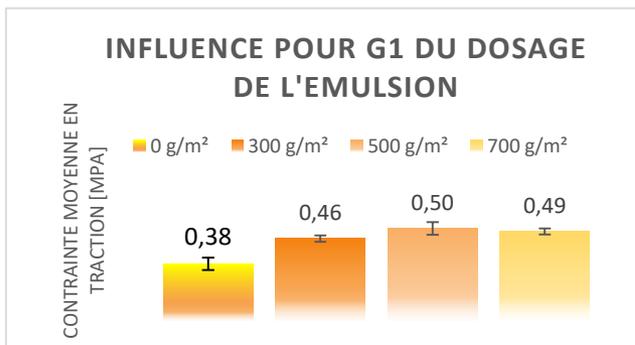
G4 : 100 kN/m résine b

Essais traction et cisaillement - Pr NF EN 12697-48 (épreuves fabriquées en laboratoire)

Traction (TAT / TBT cf. RILEM) $\phi 100$, force constante de 200 N/s, 8 répétitions
 - Etude paramètres : type de support, âge de l'éprouvette, effet de la T°C, de l'émulsion, grille G1 / sans grille

Cisaillement $\phi 100$ (entre mors 10mm), 50 mm/min, 4 répétitions seulement
 - Etude paramètres à 20°C: émulsion, grille G1, G3 / sans grille
 - Essais + dispersés / essais traction (entre mors <5mm recommandations RILEM 2018)

→ La présence de la grille réduit le collage des interfaces



- Essais de module complexe et de fatigue en flexion 2P et 4P sur BBSG +/- renfort
 - Essais de fatigue en traction sur fils

- Réalisation d'essais monotone et d'essais de fatigue en traction sur fils de grille
 - Caractérisation du comportement mécanique des grilles neuves / limites d'endurance
- Réalisation de plaques de dimensions 600*400*150 : renforcées ou non renforcées



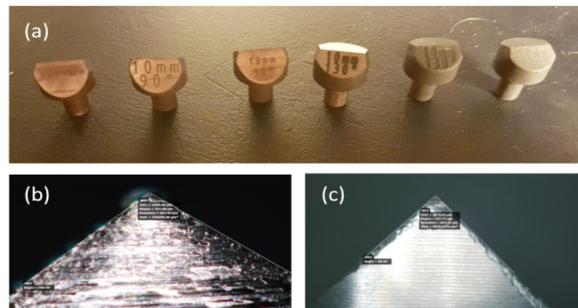
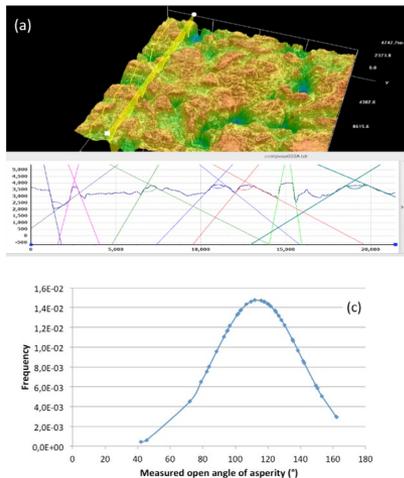
- 3 poutres 600*100*100 mm³ avec des grilles en positions 15 et 85 mm ou 25 et 75 mm
- Module à 10°C en balayage de fréquence
- Fatigue à 10°C et 25 Hz

Fatigue	Matériaux	Position grille		ϵ_6 min	ϵ_6	ϵ_6 max	pente
4PB	Enrobé lab.	/	Thèse 2013	109.21	114.97	119.16	-5.29
		/	SolDuGri	109.43	114.52	118.31	-4.48
	Enrobé + G1	25-50-25	Thèse 2013	115.61	121.97	126.12	-6.22
		15-70-15	SolDuGri	121.2	126.17	130.02	-5.21
Enrobé + G3	25-50-25	Thèse 2013	123.8	127.05	129.62	-5.85	
	15-70-15	SolDuGri	122.66	131.82	142.52	-4.72	
2PB	Enrobé site	/	SolDugri	107.7	112	116.3	-6.22
2PB	Enrobé lab.	/	SolDugri	103.7	109	114.3	-4.25

Gain en durée de vie observé

Endommagement des grilles à la mise en oeuvre / reproduction en laboratoire

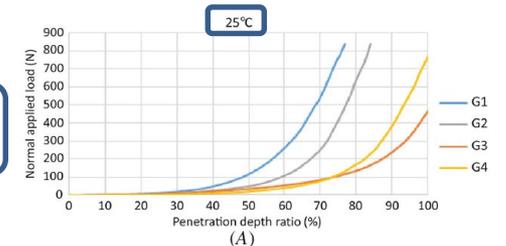
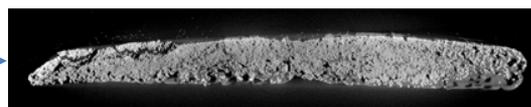
- Endommagement en place : **réduction de la résistance en traction des grilles et à un degré moindre du module d'élasticité** / Conservation d'une limite d'endurance satisfaisante en fatigue par traction des grilles récupérées de $2 \cdot 10^{-3}$
- Reproduction de l'endommagement en laboratoire par compactage : **tendances identiques avec compacteur pneumatique cylindre vibrant**
- Reproduction de l'endommagement en laboratoire par indentation



Indentation dièdre 14 mm

Coupe frontale G1 indentation dièdre 6 mm

Coupe transversale G3

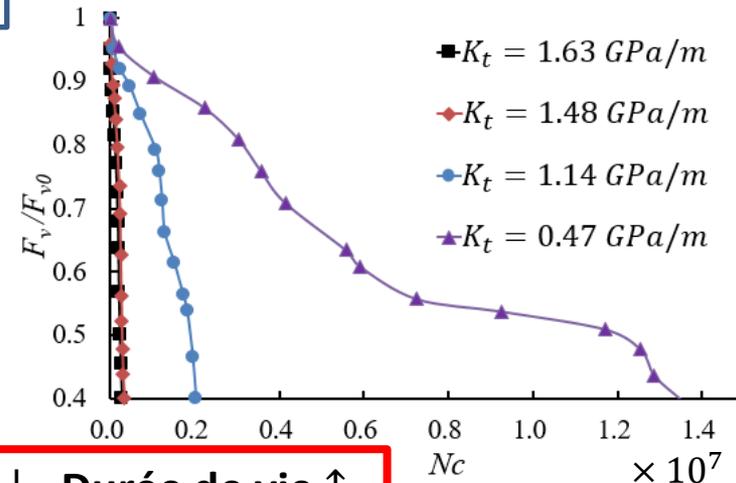
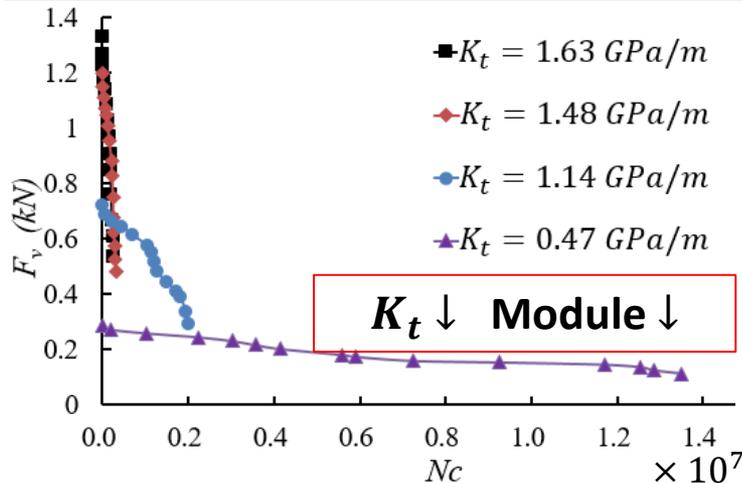
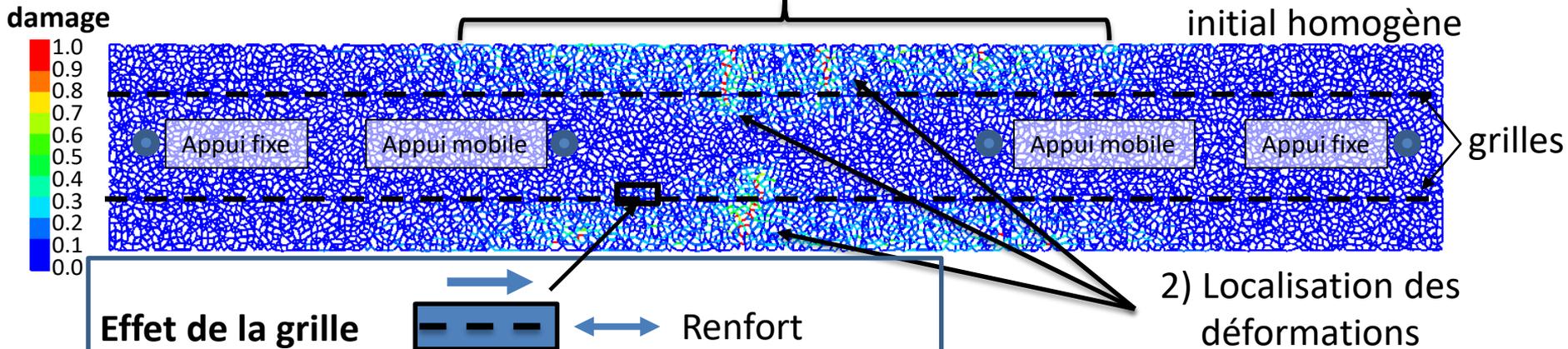


Modélisations

Modélisation DEM des essais de fatigue – 4PB

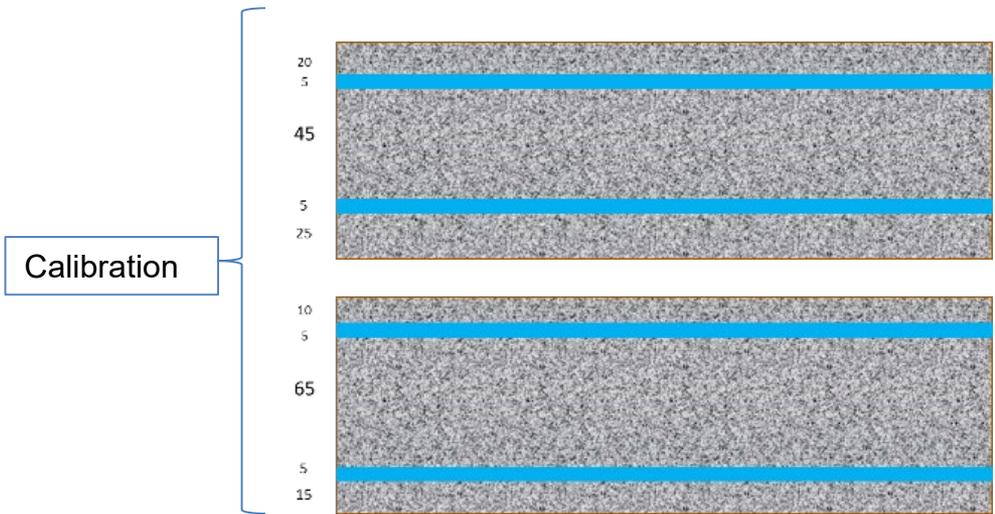
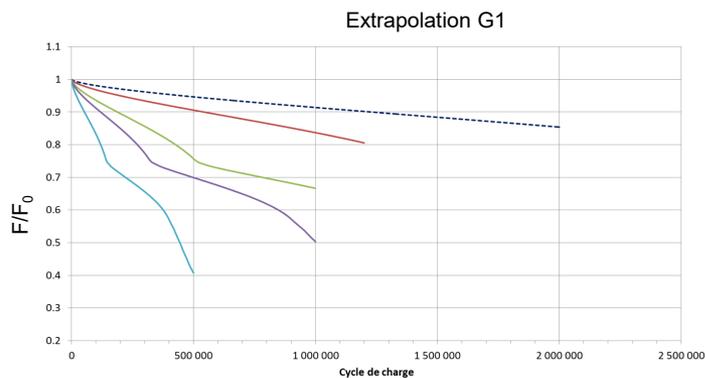
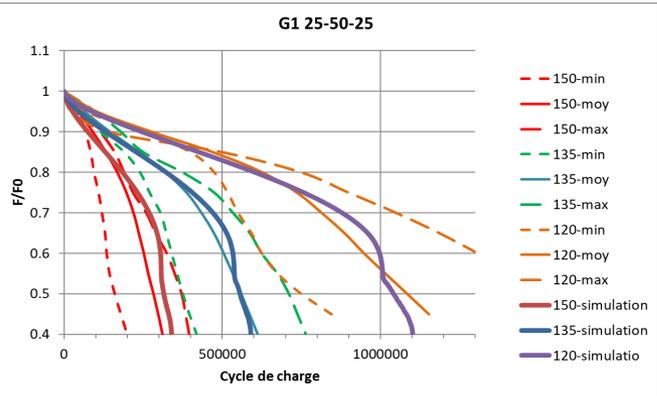
Thèse G. LIU, 2019

Champ d'endommagement (DEM)



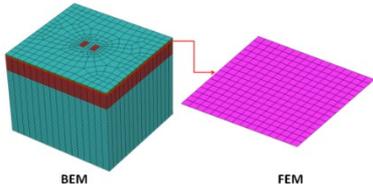
Modélisation des essais de fatigue 4PB

- Loi d'endommagement isotrope (FEM)
 - Prise en compte de la position du renfort dans l'essai de fatigue 4PB

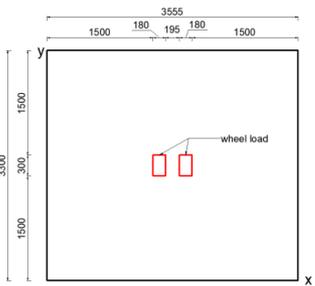


Modélisation de l'effet d'une grille par couplage FEM-BEM

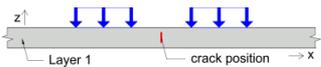
Thèse A. Dansou, 2019



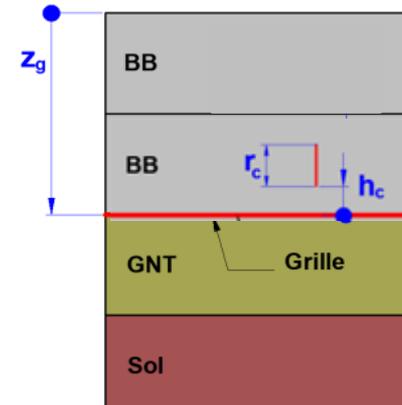
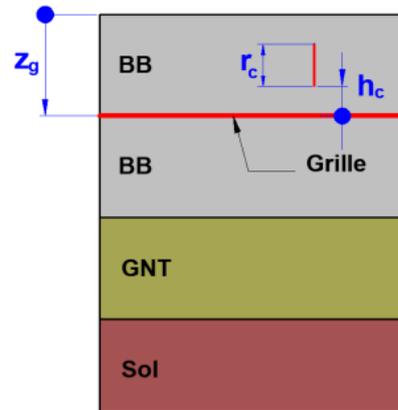
#	Couche	Ép.(mm)	E (MPa)
1	BB	60	11 364
	Grille	1	16 804
2	BB	50	11 364
3	GNT	300	400
4	Sol	2600	200



Empreinte de chargement ($p=0.6$ MPa)



Influence de la couche renforcée sur l'ouverture de fissure



$R_c = 10$ mm et $h_c = 5$ mm

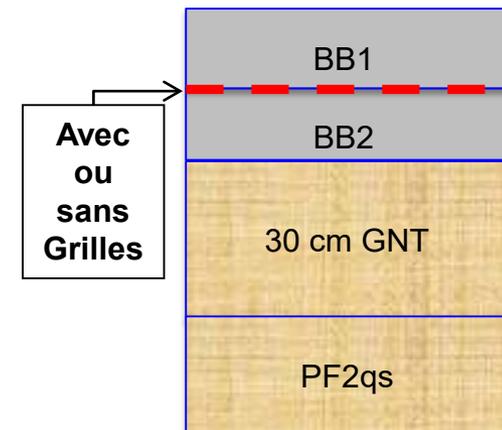
	$E_g = 16,8$ GPa	$E_g = 40$ GPa	$E_g = 70$ GPa
S1 : Fissure 1ère couche $Z_g = 60$ mm	0,50%	2,01%	2,71%
S3 : Fissure 2ème couche $Z_g = 110$ mm	2,34%	5,05%	8,12%

Réduction de l'ouverture maximale de la fissure (COD)

Dimensionnement

Essai de fatigue des structures en vraie-grandeur sur le Manège

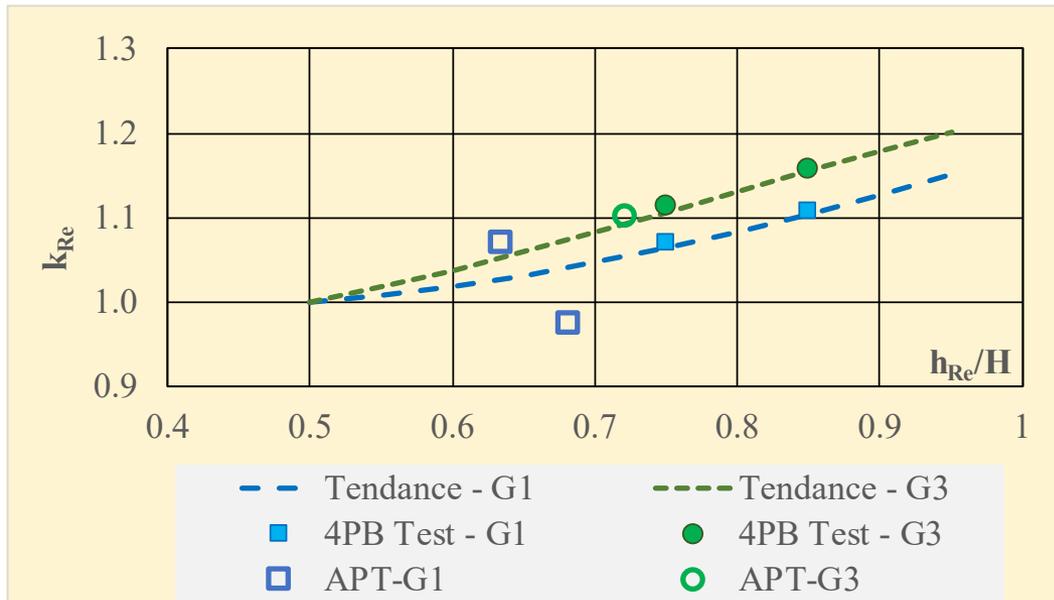
Caractéristiques	Statistiques
Sections de chaussées testées	6
Enrobé (BBSG3 en deux couches)	1 à chaud, 1 tiède
Grilles en fibre de verre	4 types
Nombre de chargements (6,5 tonnes)	2,2 millions
Vitesse angulaire moyenne (linéaire au rayon 19m)	10 tours/min (70 km/h)
Durée de l'essai (arrêt pendant l'été et nouvel an)	4 mois



Estimation de la résistance en fatigue pour chaque grille de renforcement avec sa position

- Etablir des courbes de tendance à partir des essais en laboratoire sur poutres sans ou avec grille, pour:

Deux grilles différentes (G1 et G3) et à deux positions (75-25; 85-15)



$$k_{Re} = \frac{\varepsilon_{6_renforcée}}{\varepsilon_{6_non-renforcée}}$$

Démarche de dimensionnement proposée et calage

- **Méthode rationnelle française avec une prise en compte de deux spécificités**

$$\varepsilon_{t,max} \leq \varepsilon_{t,adm} = \varepsilon_6^* \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_\theta k_r k_c k_s$$

- **Module réduit (5-10%) pour couche renforcée**
- **ε_6^* estimée à partir de courbe de tendance**
- **Calage des paramètres de dimensionnement**

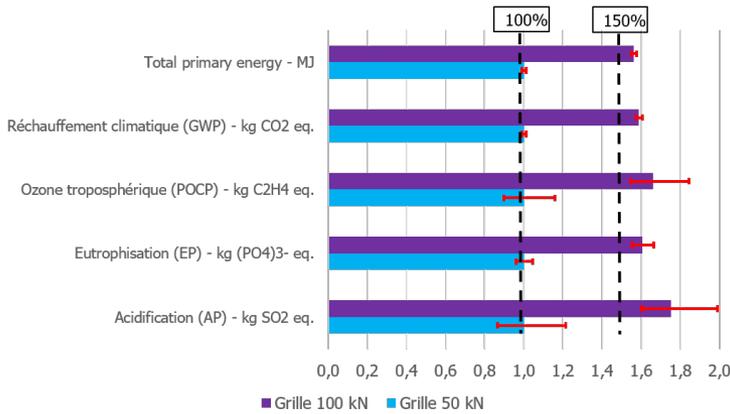
Paramètres	S1a*-Ref.	S1b-Ref.	S5a*-G1	S5b-G1	S6a*-G3
Rapport d'épaisseur (h_{Re}/H_{totale})	-	-	0.68	0.64	0.72
Module d'enrobé à 15°C - 10 Hz (MPa)	12000	12000	11500	11500	11000
Endommagement calculé $k_{r,calcul}$ (%)	20.4	3.7	37.3	10.3	2.1
Fissures observées à 2.2m cycles (%)	19	< 5	63	< 5	< 5
k_c	1.3	1.3	1.35	1.35	1.4

*zones instrumentées

Evaluation environnementale

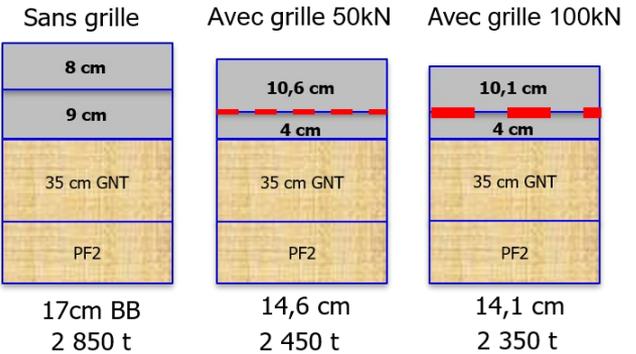
Analyse de cycle de vie

1^{ère} étape : ACV des grilles

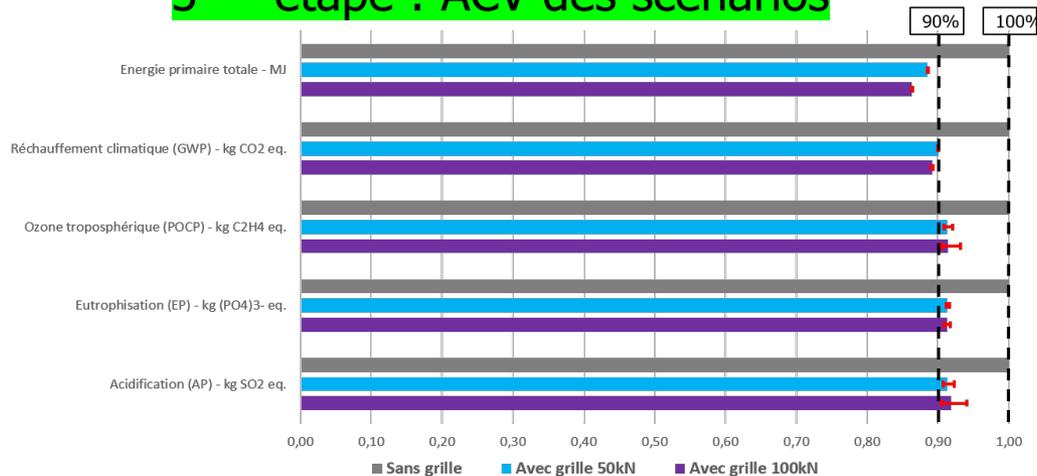


2^{ème} étape : scénarios basés sur l'essai manège

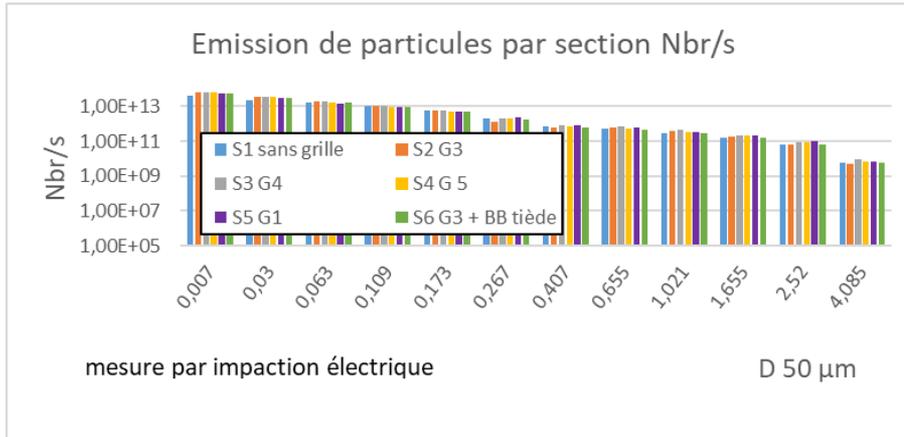
VRNS, TC5 (20 ans), NPL = 3,3 millions
Tronçon de 1km d'une chaussée de 7m de largeur



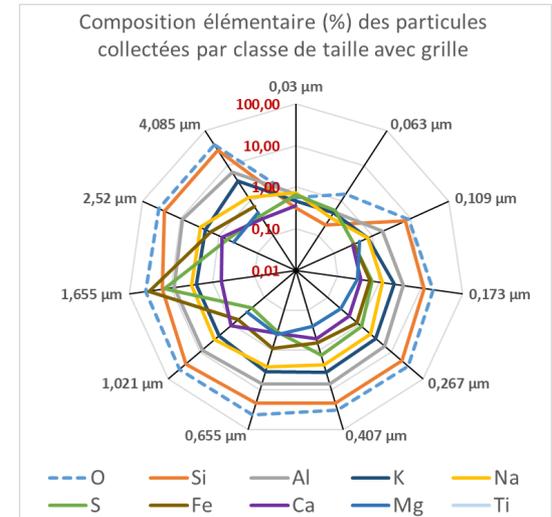
3^{ème} étape : ACV des scénarios



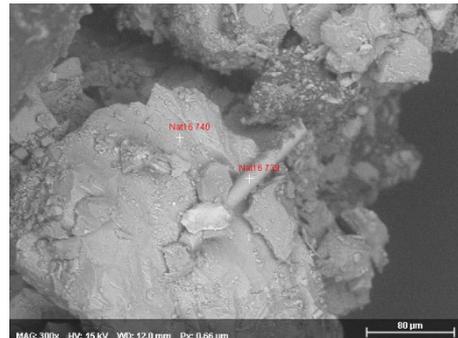
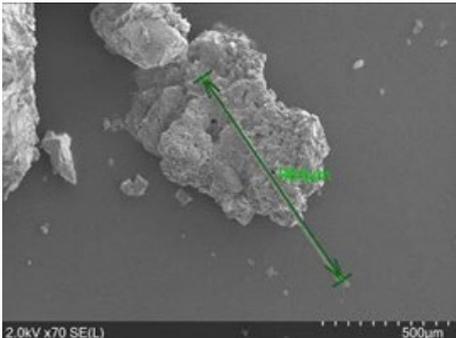
Mesures et identification des particules au rabotage



- Tailles des particules émises : <math><0,2 \mu\text{m}</math> (en nombre) / 1-3 μm (en volume)
- Emissions lors du rabotage : de l'ordre de 10^{14} particules/s
- **L'introduction de la grille modifie peu les quantités émises et la granulo.**
 → Dans les émissions: présence des fragments de grille (cm), de fibres piégées (dizaines de μm à qq mm), de fibres libres (dizaines de μm)
- Ca (et Mg) indicateur probable des fibres de verre, signal apparaît dès 0,3 μm
- Grille : diminue la part des éléments associés aux poussières de granulats.



Avec grille : des teneurs moyenne plus faibles en Si et Al et relativement plus fortes en K, Ca et Fe



Recyclabilité



- **Etudes de Niveau 4**
 - BBSG 0/10 R30 (AE témoin)**
 - BBSG 0/10 R30F (AE avec grille G1)**
 - BBSG 0/10 R0**



- **Les performances des BBSG 0/10 avec AE sont du même ordre de grandeur que celle de la formule de BBSG 0/10 témoin**

- **Coordinateur du projet:**
Cyrille Chazallon, INSA-ICUBE (UMR 7357)

cyrille.chazallon@insa-strasbourg.fr

Journée de restitution projet SolDuGri : 26/11/2020

IFSTTAR (Univ. Gustave Eiffel) – campus Marne la Vallée, citée Descartes, Amphi Coriolis

Conférence :



Journée de restitution projet ORRAP (recyclage optimal des agrégats d'enrobés) 17/06/2020

INSA et CEREMA Strasbourg/ EMPA Zürich / Univ. Karlsruhe

Lieu : INSA Strasbourg

www.orrapp.org