L'exploitation
et la maintenance
des infrastructures

PN - ANR MOVE
DVDC
DURÉE DE VIE DES CHAUSSÉES

IREX
Institut pour la recherche appliquée
et l'expérimentation en génie civil

Projet ANR MOVEDVDC

Objectifs du projet et programme expérimental

P.Hornych – Université Gustave Eiffel

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

Restitution publique des résultats
7 novembre 2023, ENTPE, Vaulx-en-Velin

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

PROJET ANR MOVEDVDC - MOdélisation du Vieillissement et de l'Endommagement pour l'évaluation de la Durée de Vie Des Chaussées

OBJECTIFS :

Projet lié aux problématiques de **préservation du patrimoine routier**
Associé au thème 1 du PN DVDC « mécanismes de dégradation des matériaux »

Enjeu : Mieux évaluer les **performance mécaniques** et la **durée de vie résiduelle** des matériaux bitumineux anciens, présents dans les chaussées en service, afin de mieux évaluer la durée de vie résiduelle de ces chaussées, et les besoins d'entretien…

Idées directrices :

- Se limiter aux **matériaux d'assise**, qui déterminent en grande partie la résistance structurelle des chaussée, et leur durée de vie
- S'intéresser à la fois aux mécanismes de **vieillissement** et d'**endommagement mécanique**
- Mener les études à la fois : à l'échelle des **liants** et des **enrobés ,** sur des matériaux prélevés **in situ** et vieillis **en labo**

ORGANISATION DU PROJET

PARTENAIRES

ORGANISMES DE RECHERCHE

Université Gustave Eiffel
Université de Limoges
estp
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES STRASBOURG

ENTREPRISES

TotalEnergies
EIFFAGE
VINCI CONSTRUCTION
spie batignolles
malet

TÂCHES

TÂCHE 2 (Université Gustave Eiffel)
Choix et caractérisation sites expérimentaux

TÂCHE 1 (Université Gustave Eiffel)
Coordination

TÂCHE 6
Valorisation

TÂCHE 3 (TotalEnergies)
Analyse des bitumes

TÂCHE 4 (VINCI CONSTRUCTION)
Analyse des enrobés

TÂCHE 5 (INSA STRASBOURG)
Modélisation et calcul de durée de vie

Etude de matériaux de couche d'assisse (type GB3)

Programme expérimental à plusieurs échelles

Constituants :

Liant pur
AZALT 35/50

Liant modifié
STYRELF 13/40

Diorite
LA NOUBLEAU

Calcaire

1	**2 BITUMES VIEILLIS EN LABORATOIRE**	3 niveaux de vieillissement : RTFOT, 1xPAV et 2xPAV
2	**4 ENROBÉS VIEILLIS FOISONNÉS EN LABORATOIRE**	5 niveaux de vieillissement (procédure RILEM)
3	**4 CHAUSSÉES EN SERVICE VIEILLIES (Couche d'assisse circulée et non circulée)**	Effet du **climat**, **du trafic** et de la **profondeur**

Essais sur liants extraits : **Péné**, **TBA**, **SARA**, **ACD**, **FTIR**, **Métravib** et **DSR**

Essais sur enrobés : **Module**, **fatigue**, **sensibilité à l'eau**, **fissuration à froid (TSRST)** et **Auscultation non destrutive**

Préparation des matériaux :

- Liant neuf (Azalt 35/50)
- Liant modifié (Styrelf 13-40)

1 → Vieillissement en laboratoire

2 → Fabrication d'enrobés et vieillissement en laboratoire

2 granulats Diorite/Calcaire

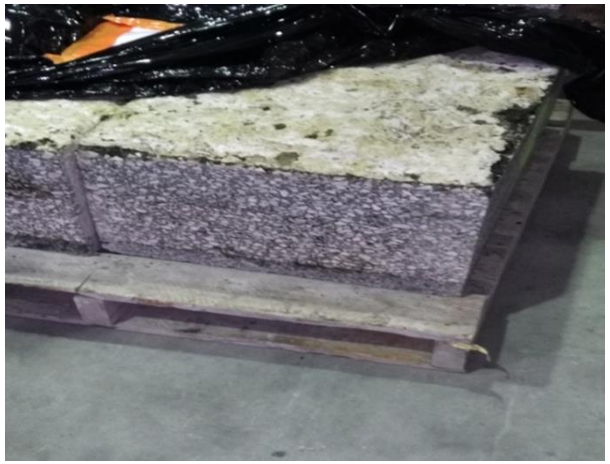
Neuf
Vieillissement RTFOT
Vieillissement RTFOT+1PAV
Vieillissement RTFOT+2 PAV

Neuf
2 j
5 j
9 j

Vieillissement méthode RILEM classique : 135 °C – 4h + 85 °C – x j

3

Enrobés et Liants extraits de 4 sites



- RD700 (Dijon)
- A35 (Strasbourg)
- RD34 (Montpellier)
- Manège de fatigue (Nantes)

4 Sites de prélèvement de matériaux

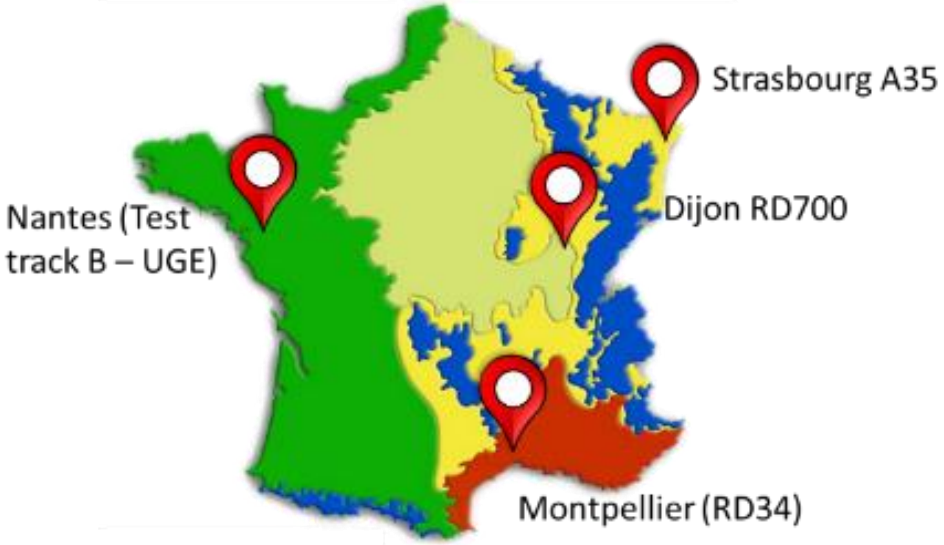
Chaussées bitumineuses à moyen et fort trafic

âge ≈ 20 ans – structure en GB3

Endommagement faible à moyen

Prélèvements en zone circulée et non circulée

Caractérisation des dégradations



Plaques prélevées sur A35 près de Strasbourg

Prélèvements – RD14 près de Montpellier

Echantillons prélevés en zone circulée et non circulée

Analyse des enrobés et liants extraits

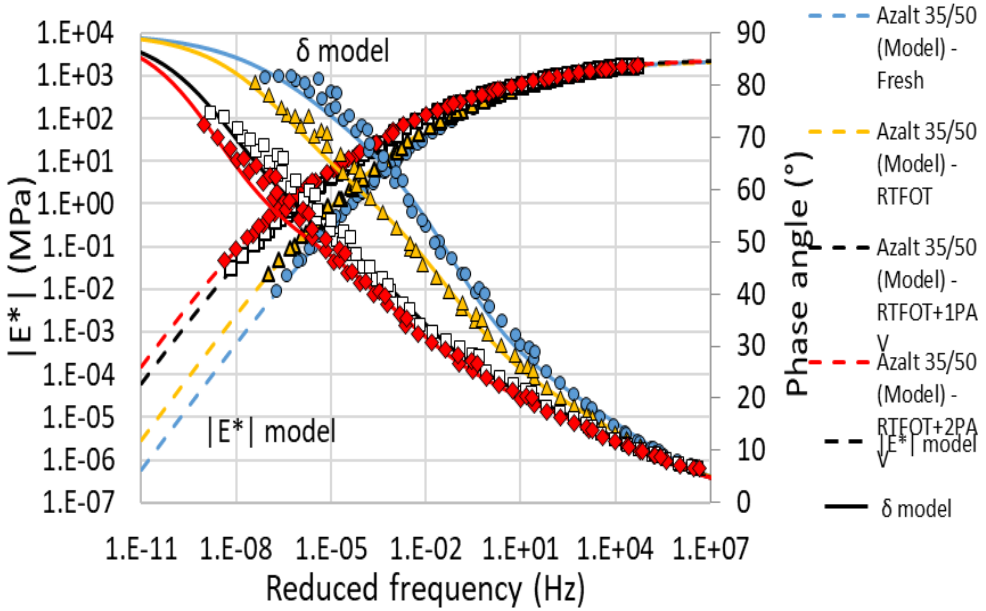
Essais réalisés sur les liants

Essai	Laboratoire
Péné, TBA	Total
Fractions SARA	Total
Calorimétrie différentielle (DSC)	UGE, ESTP
DSR	ESTP, Sb malet
Metravib	UGE
Spectrométrie Infrarouge (FTIR)	UGE, ESTP, Sb malet

Importante base de données d'essais

- Analyse de liants vieillis seuls et extraits d'enrobés
- Analyse de l'évolution des paramètres physico -chimiques et rhéologiques en fonction du vieillissement
- Recherche d'indicateurs de niveau de vieillissement
- Relations entre liants et enrobés

Norme du module et angle de phase



Essais réalisés sur les enrobés

Essai	Laboratoire
Module complexe	UGE
Fatigue	Vinci Construction, Eiffage, Sb malet
Résistance à l'eau (essai ITSR, Duriez)	Vinci Construction, ESTP
Fissuration à froid (essai TSRST)	UGE
Visualisation des fissures (imprégnation)	Vinci Construction
Essais mécaniques + mesures par ultrasons, émissions acoustiques	Université Limoges, Vinci Construction, Eiffage, Sb malet

Importante base de données d'essais

- Développement de méthodes d'évaluation des performances résiduelles
- Analyse de l'évolution des propriétés mécaniques en fonction du vieillissement
- Détection de l'endommagement par méthodes non destructives (Ultrasons, émissions acoustiques)

L'exploitation
et la maintenance
des infrastructures

PN - ANR MOVE
DVDC
DURÉE DE VIE DES CHAUSSÉES

IREX
Institut pour la recherche appliquée
et l'expérimentation en génie civil

ANR MOVEDVDC

Quelques résultats marquants du projet

Rodrigo Siroma – Colas

Mokhfi Takarli – Université de Limoges

Bertrand Pouteau – Vinci Construction

Léo Coulon – INSA Strasbourg

Restitution publique des résultats
7 novembre 2023, ENTPE, Vaulx-en-Velin

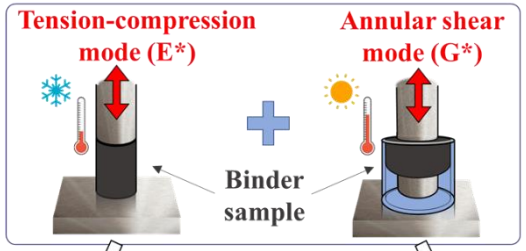
MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

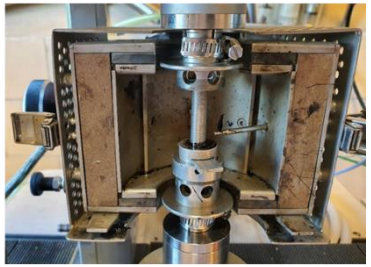
AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Essai Module Complexe

Rhéomètre Métravib (DMA)

2 modes de sollicitations





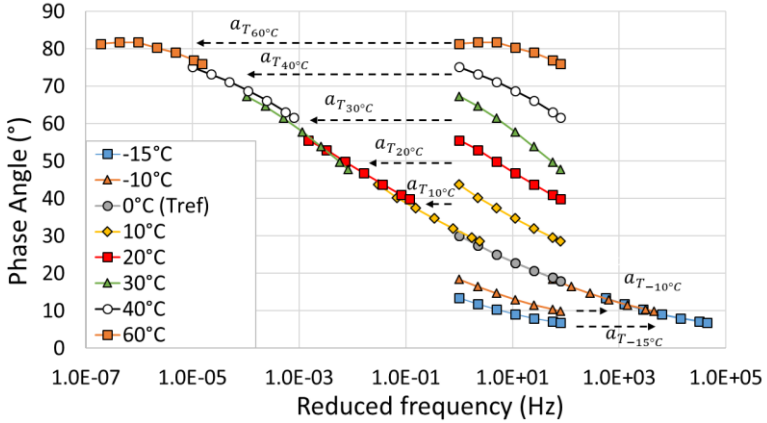
Température : -15 à 60°C

Fréquence : 1 à 80Hz

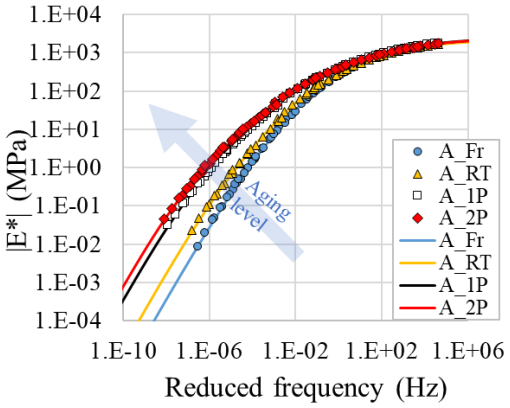
Coefficient de Poisson : 0,5

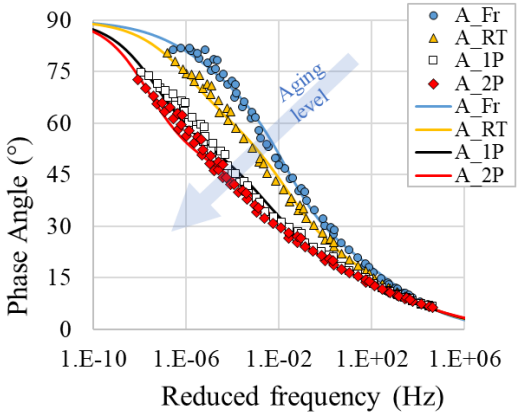
Traitement des données expérimentales

Courbe maîtresse (Chailleux *et al*, 2006)



Modèle rhéologique 2S2P1D (Olard & *Di Benedetto*, 2003)

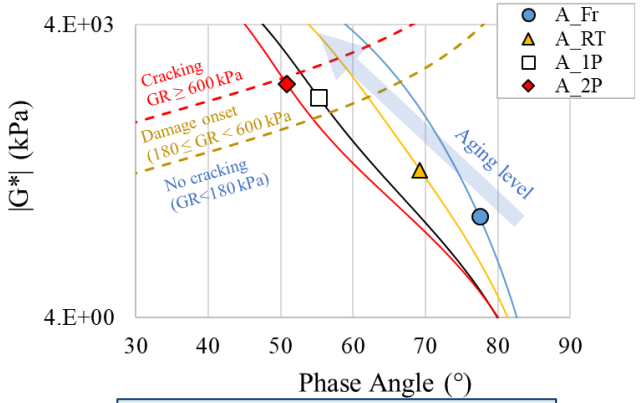




Critères rhéologiques

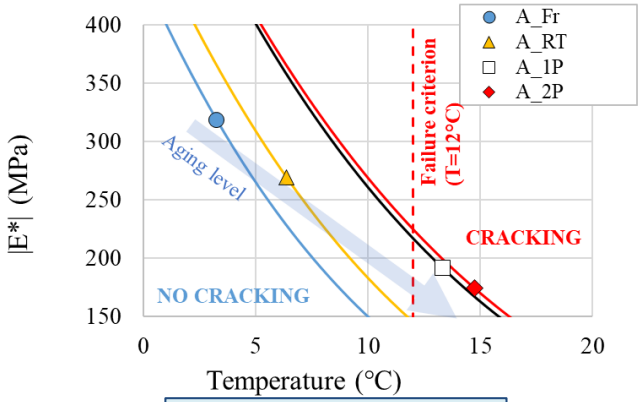
Critères type « points »

Glover-Rowe (G-R) (Rowe, 2011)

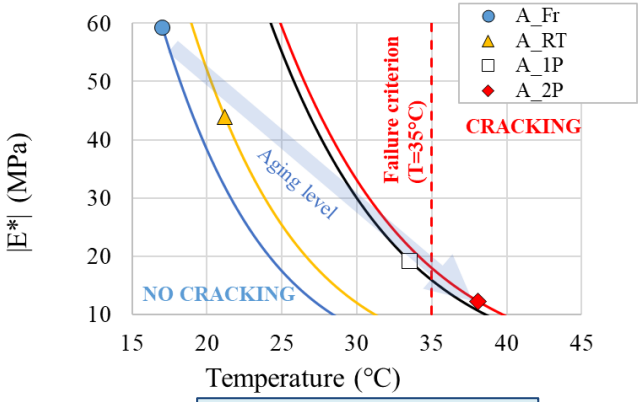


15°C et 0,005rad/s

Températures équivalentes à l'angle de phase 27° et 45° à 7,8Hz (GNB, 1999)



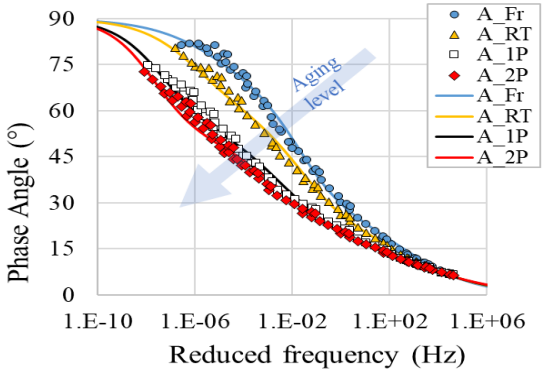
Φ =27° à 7,8Hz



Φ =45° à 7,8Hz

Critère type « forme » ??

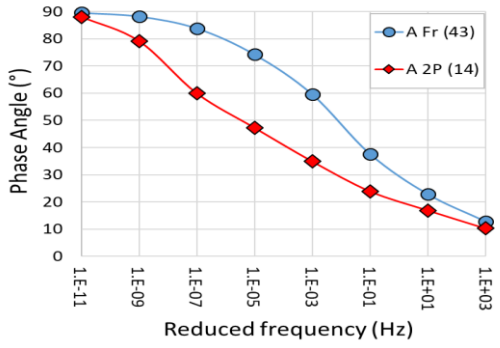
- L'angle de phase est plus **sensible à la chimie** et à la **microstructure** du bitume
- La courbe maîtresse de l'angle de phase **s'aplatit avec le vieillissement** (bitume plus rigide)



À quelle **fréquence** a-t-il lieu **le changement le plus important** dans la courbe maîtresse de l'angle de phase avec le vieillissement ?

Analyses Statistiques Multivariées

Analyses en Composantes Principales (ACP)



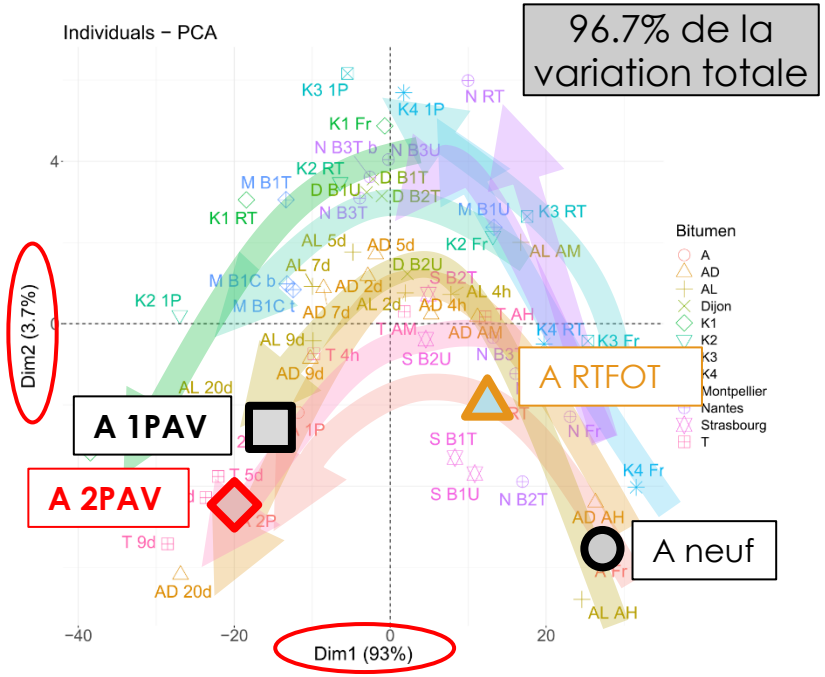
8 valeurs d'angle de phase

59 bitumes

	1.00E-11	1.00E-09	1.00E-07	1.00E-05	1.00E-03	1.00E-01	1.00E+01	1.00E+03
A Fr	89.54649665	88.35454618	84.60629994	76.10587068	61.86550748	38.9897911	23.30014342	12.84708867
A RT	89.52027564	87.6932616	80.73085139	66.99633515	52.83823895	34.29083747	20.46010705	11.61241596
A 1P	88.88417734	83.68944016	67.95091149	53.16911689	40.38462707	26.25341391	17.52335331	10.66685862
A 2P	88.72319415	81.89053396	62.63582431	48.92179339	37.75358459	25.04772189	16.73746132	10.33815418
T AH	89.313389	87.3219217	81.16710646	69.53545377	53.08772913	31.10360486	15.60944618	5.946941093
T AM	88.96639948	85.72203836	76.46345834	62.8884838	47.0068401	29.05077106	14.92267448	5.317969377
T 4h	88.16349878	82.649018	70.26637828	56.67928623	40.98592544	25.89506359	13.35640719	4.638710637
T 2d	87.17589193	79.26601454	65.61969865	53.07758425	37.1844644	23.47932813	12.8715606	4.984778783
T 5d	86.3897033	77.12120878	63.25639477	50.46758121	35.16421947	22.89421513	12.11531729	4.342584806
T 7d	86.03438127	76.24847109	62.42096454	49.53583075	34.38968565	22.69035459	12.12065176	4.361361558
T 9d	86.03423365	75.07132184	59.52139548	45.95629957	32.09131119	22.19165935	12.74329003	4.998387322
K1 Fr	89.38097431	86.95538061	78.00156783	61.71538303	43.02146253	25.6152298	15.55626323	7.85348107
K1 RT	88.76969169	83.5153535	68.08903333	51.03337723	34.28720497	21.72494425	13.72794959	6.95021989
K1 1P	88.09752494	77.43959648	54.09026202	39.40386871	26.79466023	18.01433185	11.8836073	6.5786750 9
K2 Fr	89.67375658	88.41761563	83.16783001	69.50724818	50.92538993	31.01485413	18.93656977	9.438276024
K2 RT	89.0920119	85.65890313	74.50852846	57.80097193	39.75708565	25.47670419	16.77367798	8.71430073
K2 1P	88.45657612	81.06497968	61.94857327	45.84141892	30.80850342	20.34414308	13.97596772	8.123032853
K3 Fr	89.84912364	89.288068	86.80124308	77.99823623	59.06454825	35.06790975	19.24854507	9.177930834
K3 RT	89.80994245	89.01953806	85.3096966	73.09616152	53.06117714	32.0821361	18.41275633	9.183154709
K3 1P	89.43698915	86.9427451	76.81214447	58.11103847	39.37337345	24.7518066	15.81724368	8.194844527
K4 Fr	89.87913086	89.45329518	87.60931692	80.75701004	63.4582014	39.2181859	22.46331516	10.85584383
K4 RT	89.75087188	88.78432028	84.61578327	72.86081932	56.09602312	34.64880301	19.52237787	11.09257247
K4 1P	89.66260517	88.03611933	80.26310152	61.83606141	43.16913427	27.47385116	17.54589286	9.517346151
AD AH	89.69902845	88.76144207	85.3213543	76.20926641	61.01343865	38.66540827	22.39070942	12.32017884
AD AM	89.47294578	87.63503909	81.01462215	67.4405817	50.45703397	31.9561712	21.0612765	12.2640491
AD 4h	89.39181885	87.00487294	78.25893001	63.23241269	47.90486778	30.38781047	19.68016916	11.77834497
AD 2d	89.52795039	86.97056966	75.28343708	58.64416861	43.39432018	29.19634971	18.91972638	11.40224965
AD 5d	89.29998039	86.36402532	75.68263064	59.20423182	43.11005918	27.72416829	19.07679165	11.79506076
AD 7d	89.0551813	84.99704154	71.71513349	55.42810857	40.05838784	26.06160346	18.03001863	10.89877012
AD 9d	88.18865996	82.54061372	69.86175657	56.1403962	38.9134259	25.46196468	18.41414512	11.07038842
AD 20d	87.59209824	77.35654128	58.45633178	45.97988271	32.93821244	22.82381142	16.59523717	10.328776
AL AH	89.2070386	87.46475994	82.95099113	74.90838989	62.10944641	38.08690357	22.36693028	12.38174327
AL AM	89.85983463	89.14788896	85.1842015	70.80183218	51.2185171	34.39806914	21.9307828	12.7442371
AL 4h	89.58374965	87.76988056	80.06590686	64.22098227	48.85051562	31.72933077	19.98202637	11.78530976
AL 2d	89.3177308	86.65484921	76.92309658	61.37548555	46.02561083	29.08916924	18.91085414	11.20167337
AL 5d	89.35342449	86.28012112	74.27785609	57.00157837	42.28782973	26.99007495	17.62338887	10.53186868
AL 7d	89.30990841	85.63395129	71.10225283	53.41556275	40.15625533	26.20987275	17.13775029	10.24268563
AL 9d	88.79240932	83.92358749	70.03337522	55.3034356	40.23067971	25.43846404	17.30027315	10.4674911

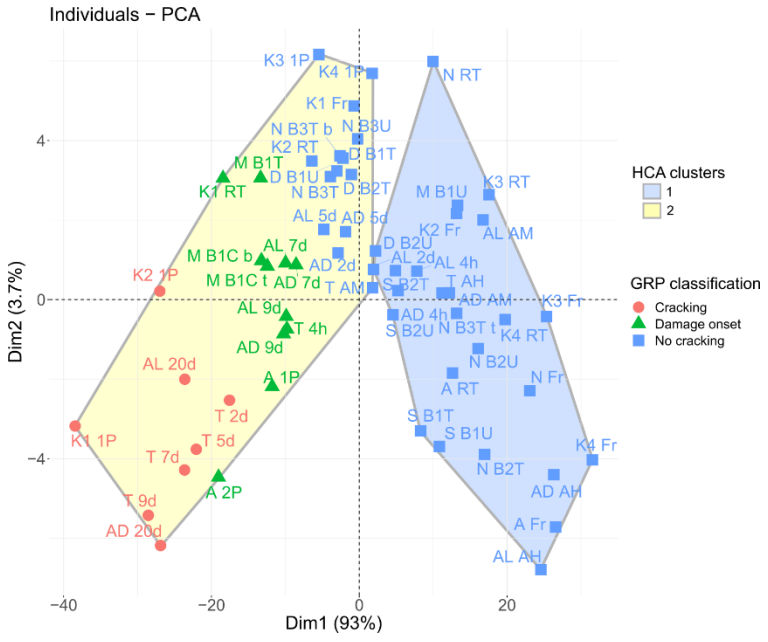
•••

← - - Niveau de vieillissement - - -



Fréquence réduite ≈ **8,5x10^{-6}Hz**

Regroupement Hiérarchique (ACH)



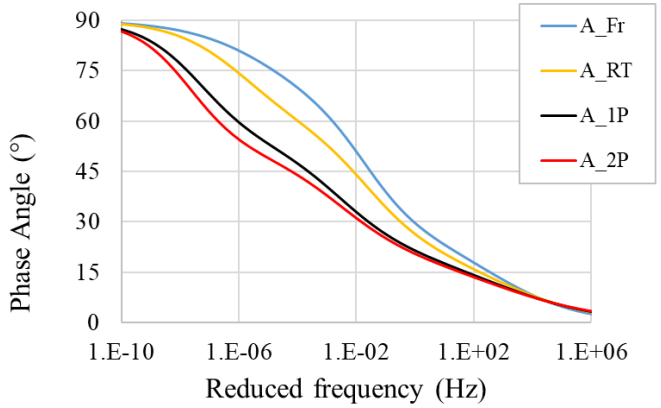
Le clustering correspond bien au critère **Glover-Rowe (G-R)**

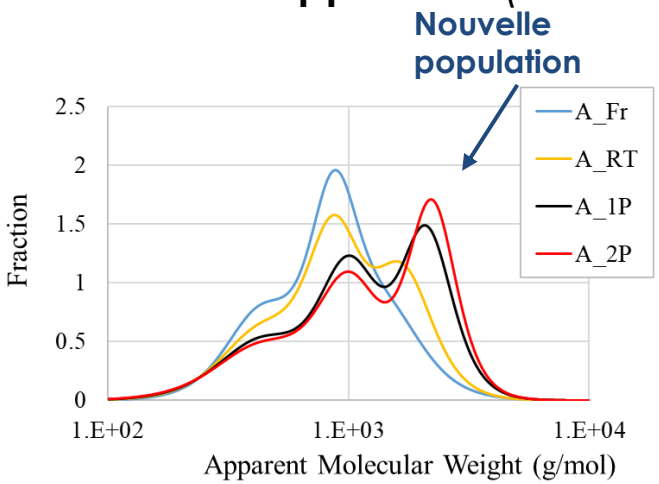
À quoi correspond f = 8,5x10^{-6}Hz dans une courbe maîtresse ?

Méthodes Analytiques

Delta Méthode (Zanzotto *et al.*, 1999 et Themeli *et al.*, 2015)

- Estimer la **distribution de masse moléculaire apparente** (DMMA) partir de la **rhéologie**

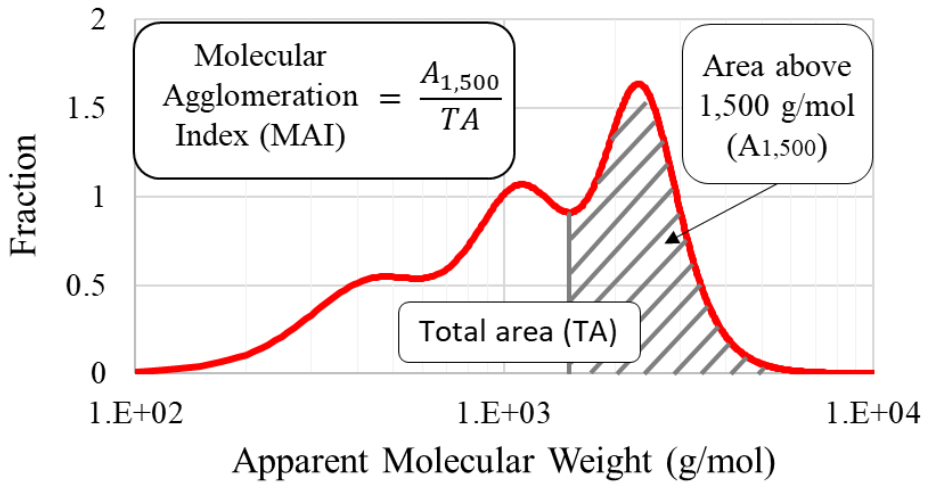




- ↓ molécules petites ↑ molécules grandes
- f = 8,5x10^{-6}Hz de l'ACP correspond à **1500g/mol (2 molécules d'asphaltènes selon Mullins (2011)**

Comment quantifier **l'agglomération moléculaire** ?

Molecular Agglomeration Index (MAI)

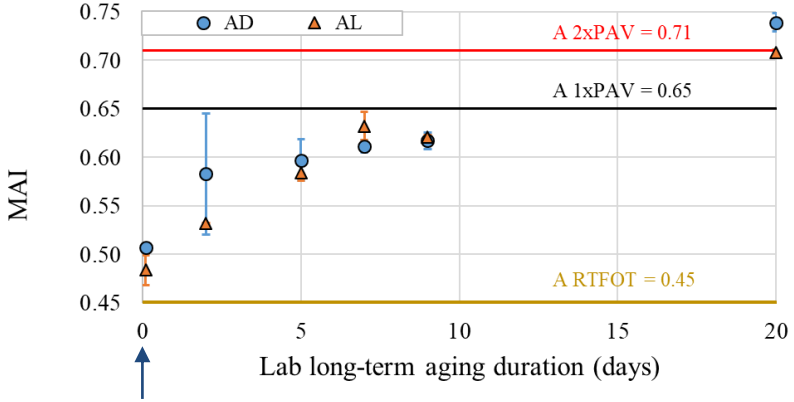


- **0 ≤ MAI ≤ 1**
- MAI **augmente** avec le vieillissement

Analyses avec MAI

Évolution du MAI avec le vieillissement

Bitumes extraits des enrobés vieillis foisonnés (méthode RILEM)

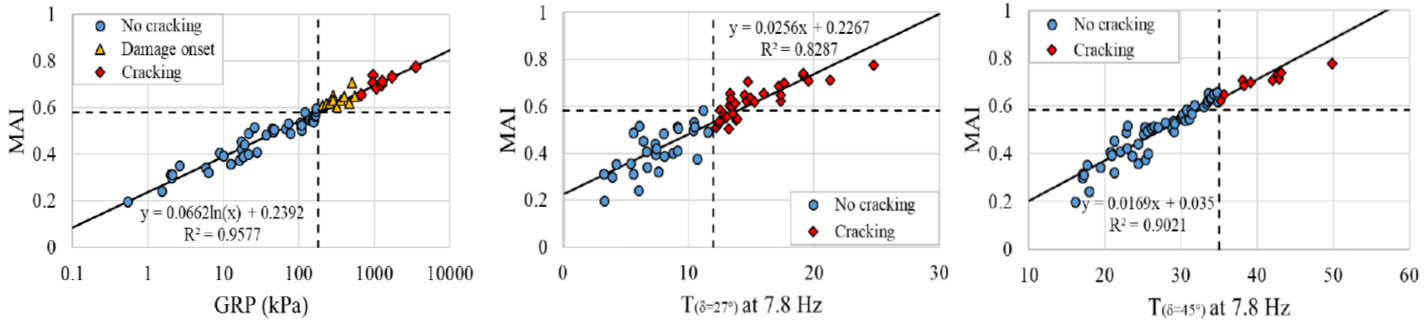


Bitume vieilli court terme

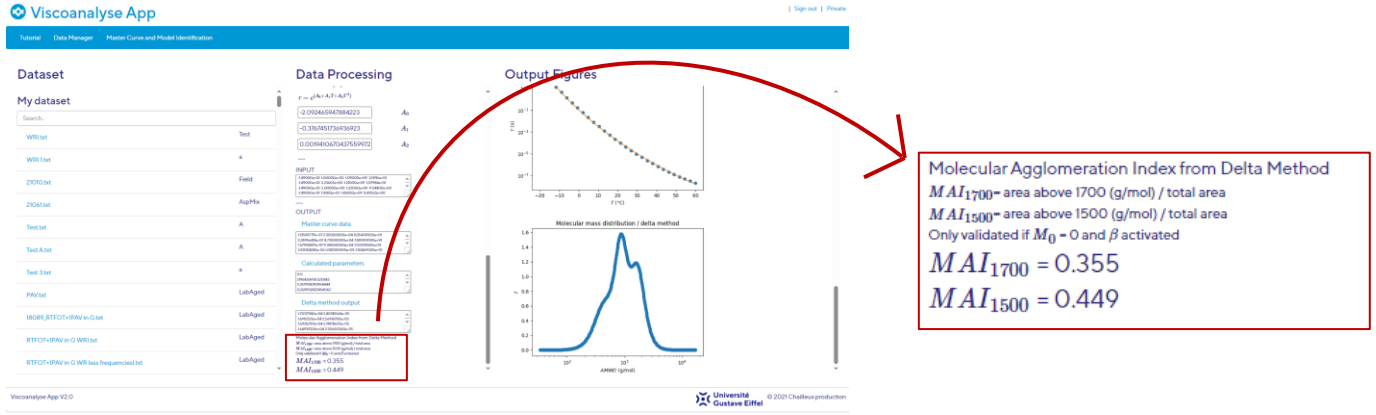
Coefficient de variance des mesures de **2 labos** et **2 rhéomètres** différents

	A_Fr	A_1P	NB3T	MB1T
G-R	38.40%	36.90%	1.90%	8.40%
MAI	10.00%	3.40%	0.80%	1.30%

Détermination d'une valeur seuil provisoire pour MAI

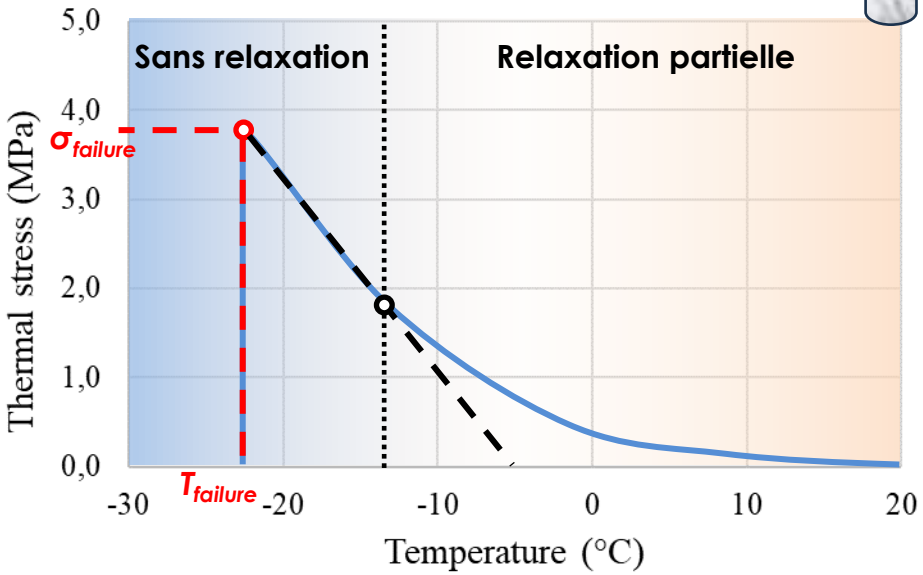


- Bonne corrélation avec les autres critères de fissuration
- Valeur seuil proposée : **MAI = 0,58**
- MAI dans Viscoanalyse App : [Viscoanalyse App (ifsttar.fr)]



Essai Retrait Thermique Empêché (TSRST)

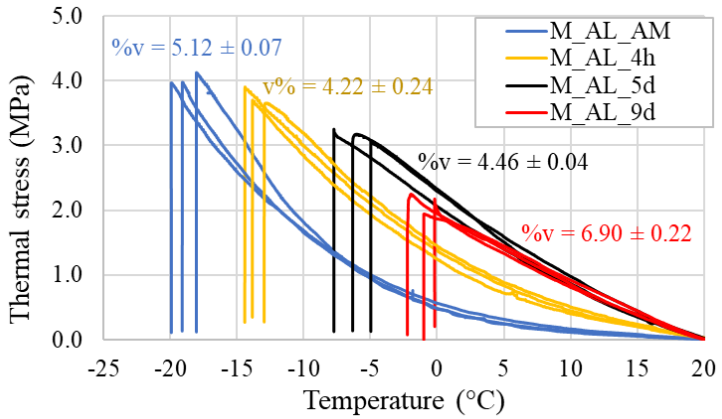
- Résistance à basse température
- L'éprouvette est **soumise à un refroidissement** contrôlé et **empêchée de se rétrécir**
- Augmentation d'une **contrainte cryogénique (σ_{cry})** dans l'éprouvette jusqu'à rupture
- TSRST souligne la **fragilité de l'enrobé**
- La $T_{rupture}$ et la $\sigma_{rupture}$ dépendent du **niveau de vieillissement** du bitume



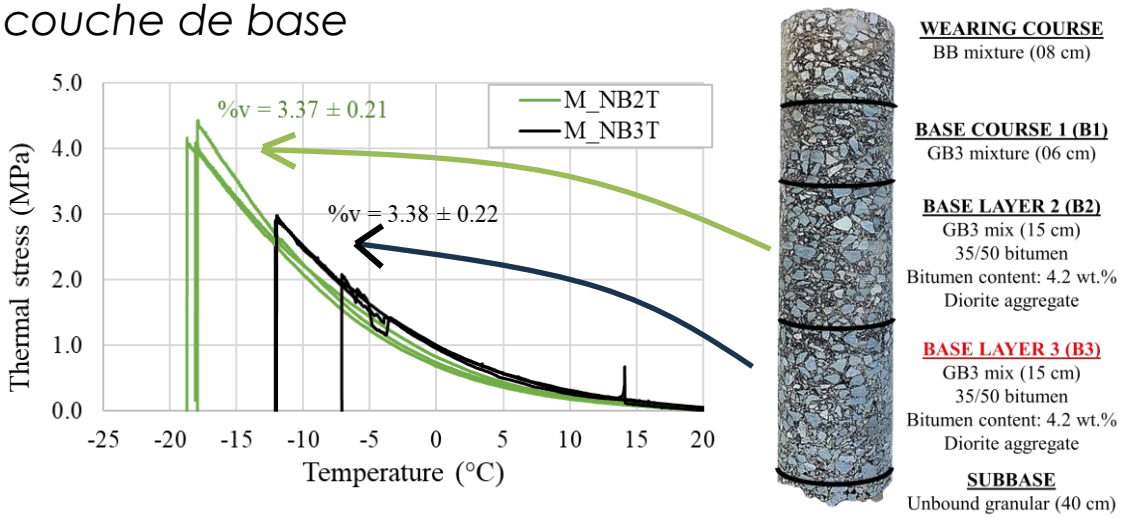
Température initiale : 20°C
Vitesse de refroidissement : -10°C/heure

Résultats de l'essai TSRST

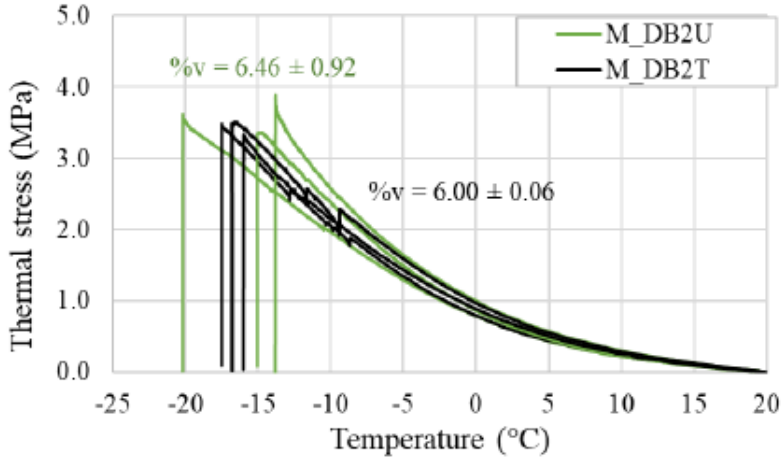
- *Avec le **vieillissement** :*
  - ↑ de la $T_{rupture}$
  - ↓ de la $\sigma_{rupture}$
  - Pour les **enrobés vieillis foisonnés en labo**, il y a une diminution de la capacité de relaxation à hautes température



*À Nantes, la **couche de fondation est plus vieillie** que la couche de base*

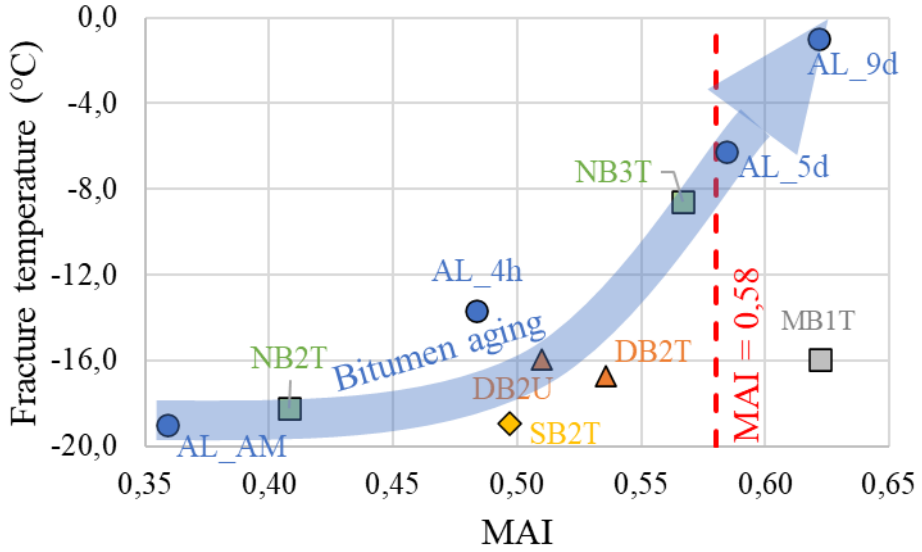


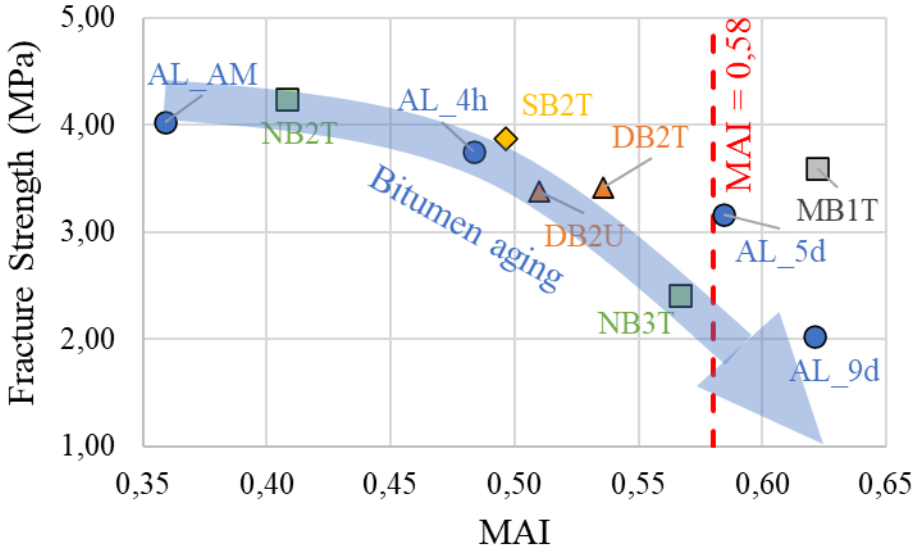
Couche de fondation des zones circulées et non circulées de la section à Dijon



Relation entre MAI et TSRST

- *MAI semble avoir une **bonne corrélation** avec les paramètres TSRST*
- ***Augmentation abrupte** de la $T_{rupture}$ lorsque MAI ≈ 0,58*





- *Bitumes extraits des **enrobés vieillis foisonnés en labo** et des sites de **Nantes**, **Dijon**, **Strasbourg** et **Montpellier**.*

Conclusions partielles

- *La **courbe maîtresse de l'angle de phase** allie la haute sensibilité de l'angle de phase à l'utilité des courbes maîtresses (extrapoler les conditions d'essais de laboratoire).*

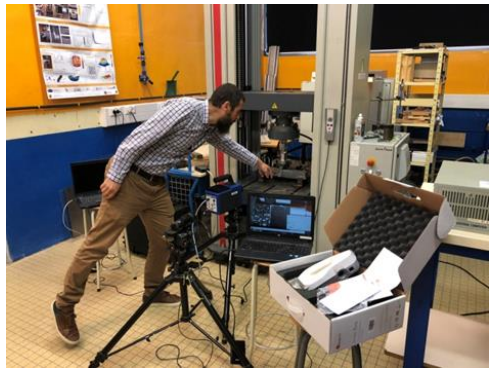
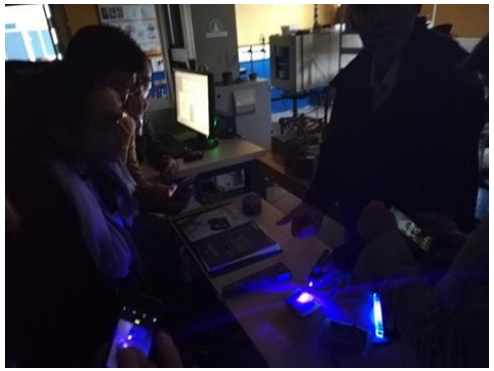
- ***ACP et ACH** a montré que la fréquence réduite à laquelle la variation la plus pertinente de la courbe maîtresse de l'angle de phase à T_{ref} = 0 °C a lieu est à **f ≈ 8,5 x 10^{-6}Hz**.*

- *Le **Molecular Agglomeration Index (MAI)** est proposé en revisitant la Delta-Méthode avec la fréquence réduite déterminée par l'ACP.*

- *MAI **quantifie l'incidence d'agglomération moléculaire** à partir de la rhéologie. Une valeur provisoire a été proposée étant donnée la bonne corrélation de MAI avec d'autres paramètres (**MAI = 0,58**)*

- *MAI présente une **bonne relation** avec les $T_{rupture}$ et $\sigma_{rupture}$ de l'essai TSRST.*

► Workshop CND&DVDC : 11 et 12 juin 2019 - Regards Croisés sur les Méthodes Avancées en Caractérisation, Laboratoire et In-situ, du Vieillissement et de l'Endommagement des Enrobés Bitumineux

► Outils et Méthodes :

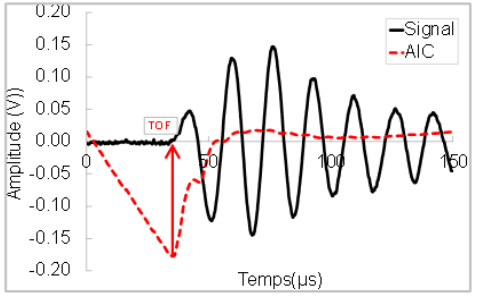
(1) Ultrasons, (2) Impact-réponse, (3) Emission acoustique, (4) Corrélation d'images, (5) Thermographie infrarouge, (6) Imprégnation colorée, (7) Déflectomètre à masse tombante, (8) Géoradar, (9) Simulateur de trafic

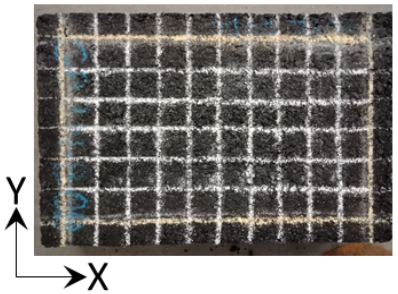
► Etat de l'art :

An Overview on the Passive and Active Seismic NDT in Asphalt Pavements - Laboratory and field methods for: Cracking and Delamination; Fracture Process; Fatigue Damage; Mix Parameters and Moduli

► Détermination des propriétés élastiques par Ultrasons : mesures C-scan pour la détermination de E, G et ν

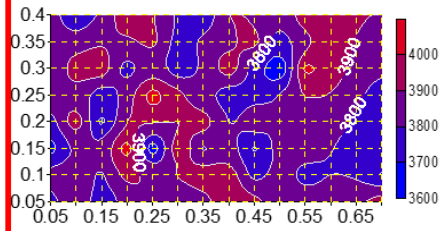
1. Traitement de signal



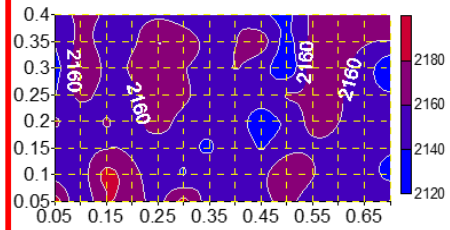


2. Vitesses US

Vp [m/s]

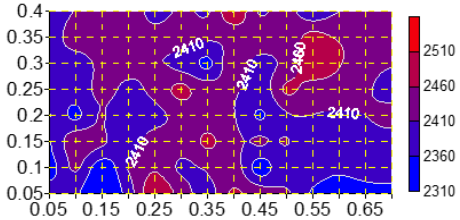


Vs [m/s]



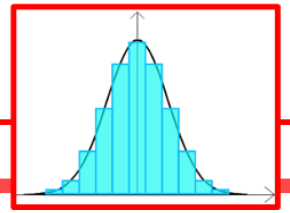
3. Masse volumique

ρ[kg. m^{-3}]



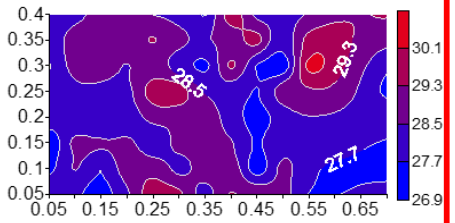
Gamma-densimétrie
Par gravimétrie
Calculée

(NF EN 12697-5, 2018)

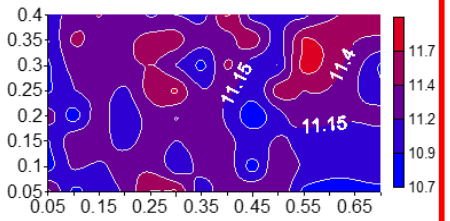


4. Propriétés mécaniques

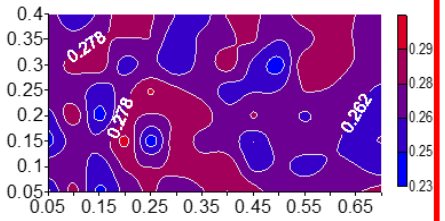
E[GPa]



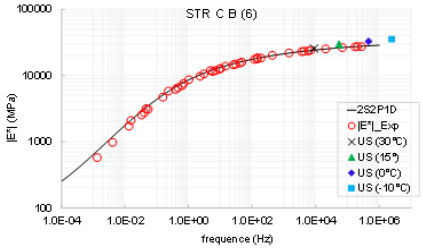
G[GPa]



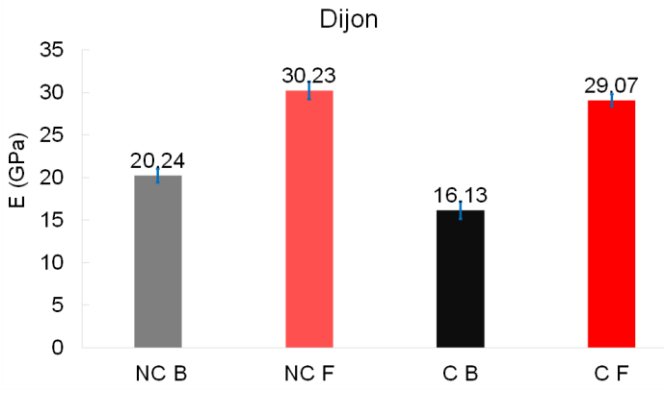
ν

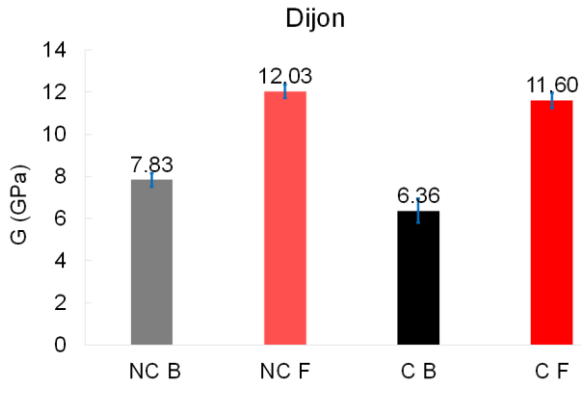


5. Courbe maîtresse

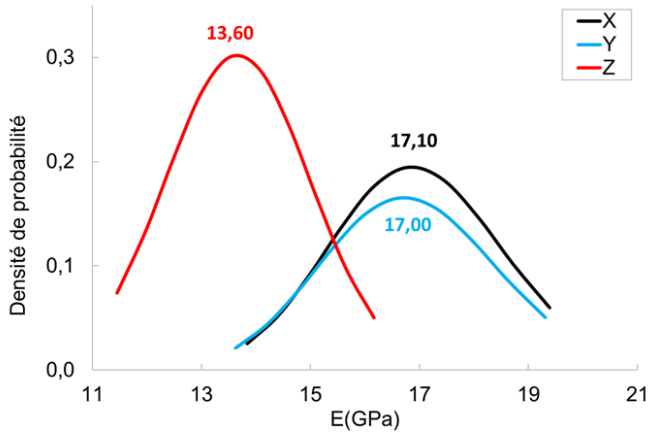


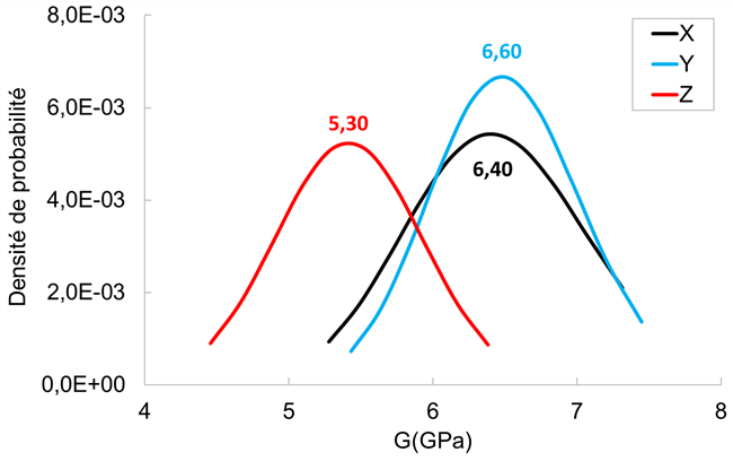
► Détermination des propriétés élastiques par Ultrasons : mise en évidence de l'effet du trafic par comparaison inter-couches & zones (site de Dijon – mesures à 15 °C)





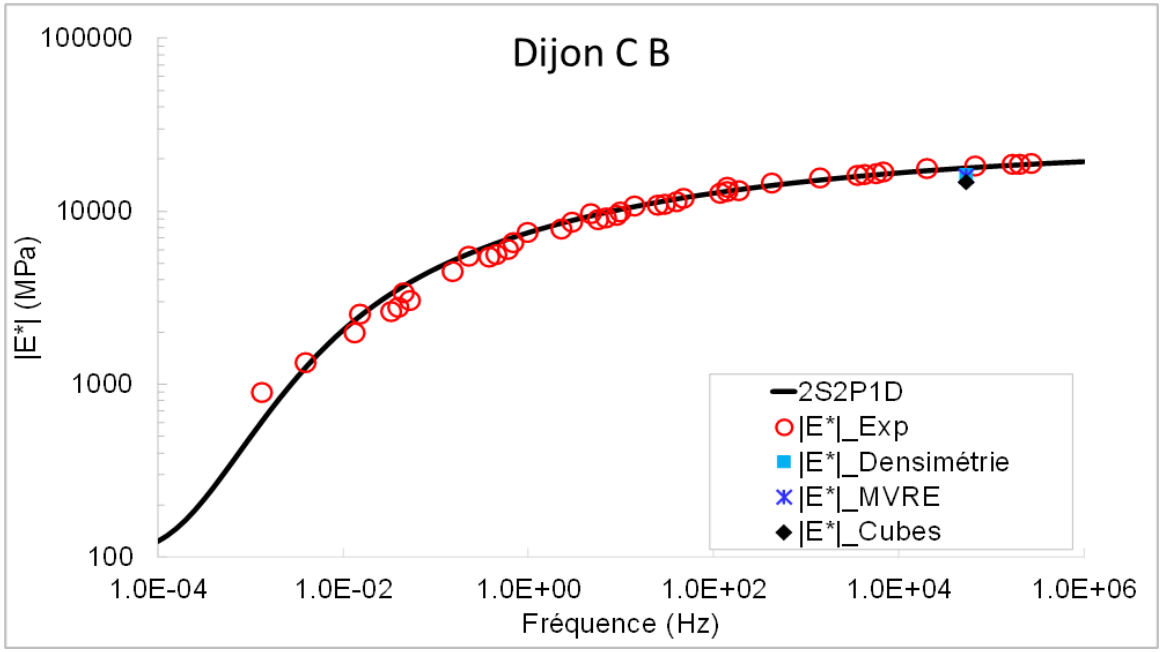
► Evaluation du degré d'anisotropie :

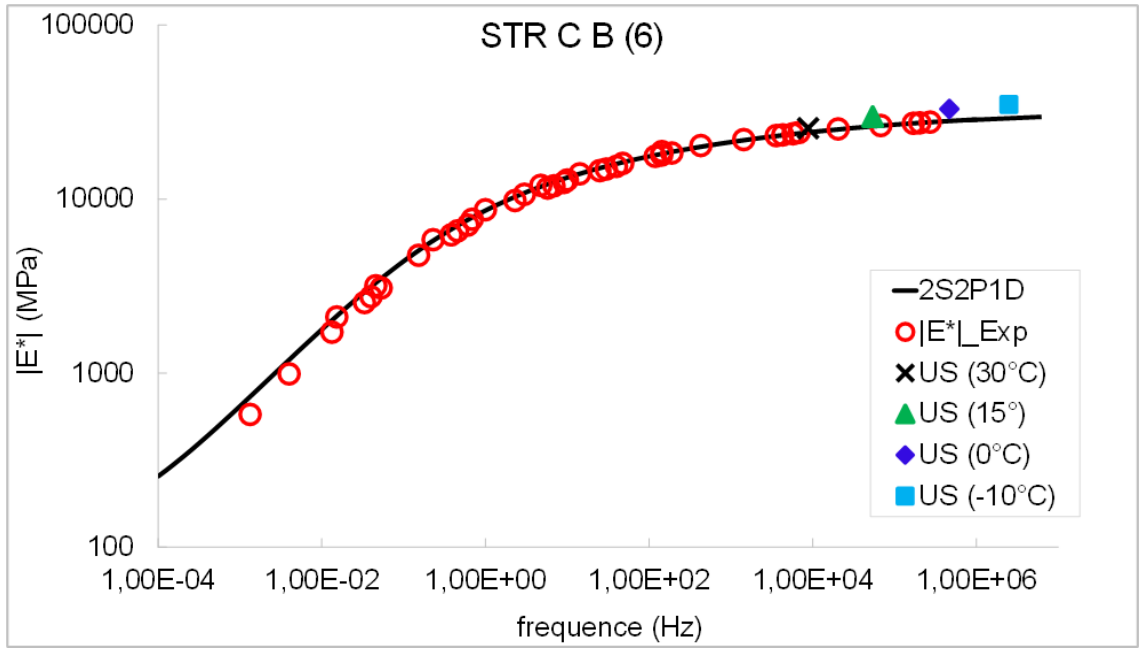




► Détermination des propriétés à hautes fréquences :

- Effet de la méthode de détermination de la masse volumique (Gammadensimètre, Gravimétrie et Estimation normative) ;
- Principe Equivalence temps-température ;
- Propagation des ondes ultrasonores : Elasticité vs. Viscoélasticité
- Essai mécanique hétérogène vs. essai ultrasonore homogène

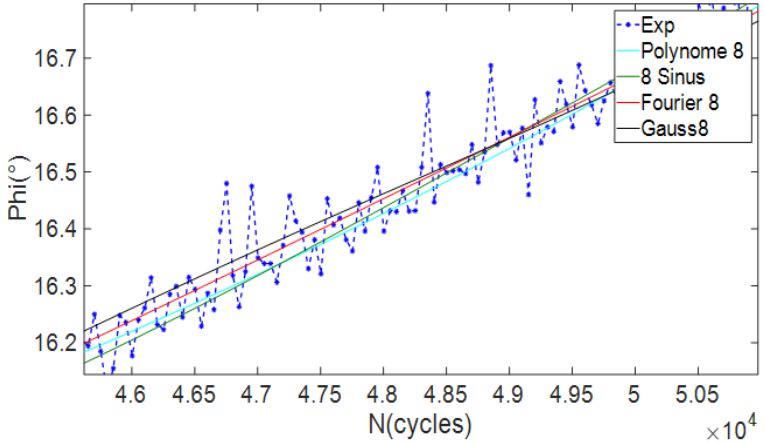


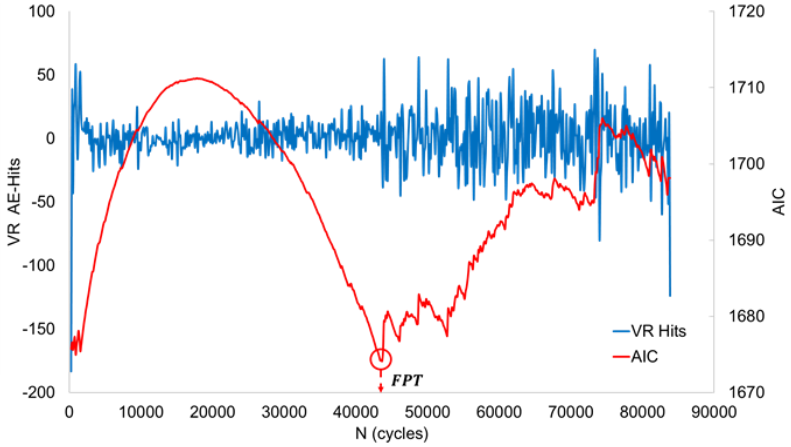


► Monitoring par émission acoustique du processus de fatigue : méthodologie

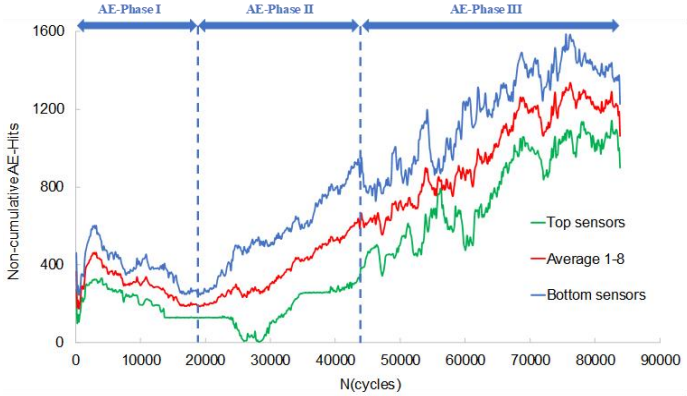
EA + Flexion 2 points : une première

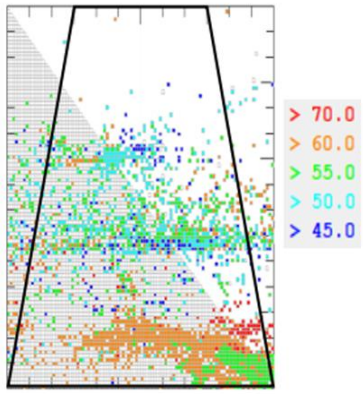
Traitement de signal



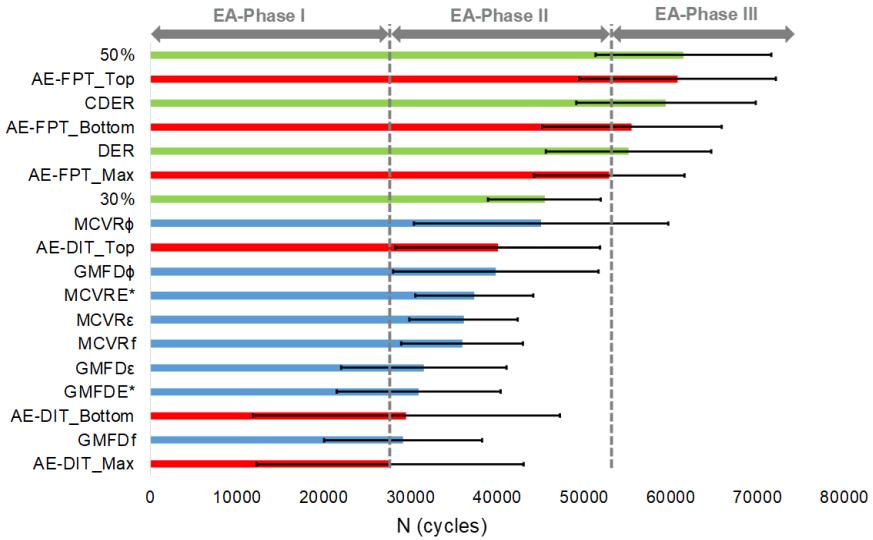


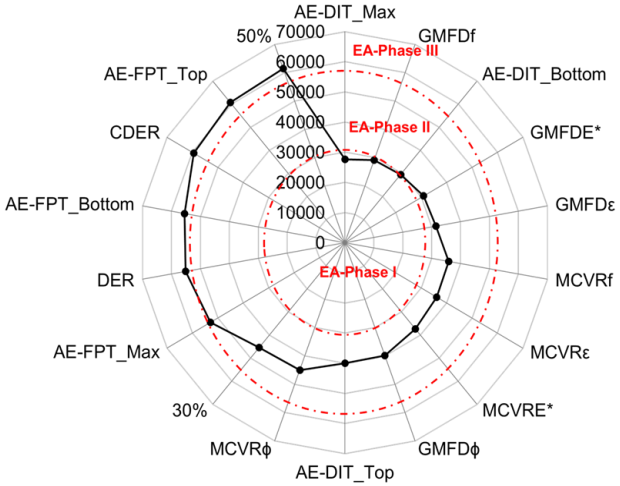
Critères d'endommagement & rupture

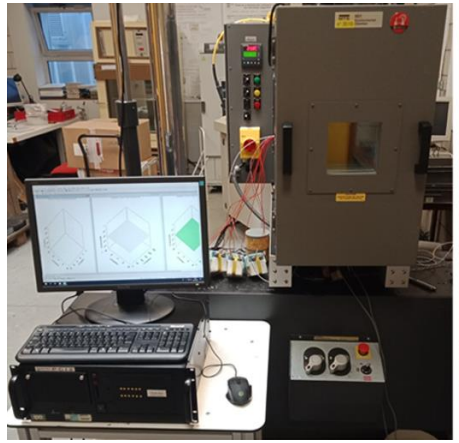


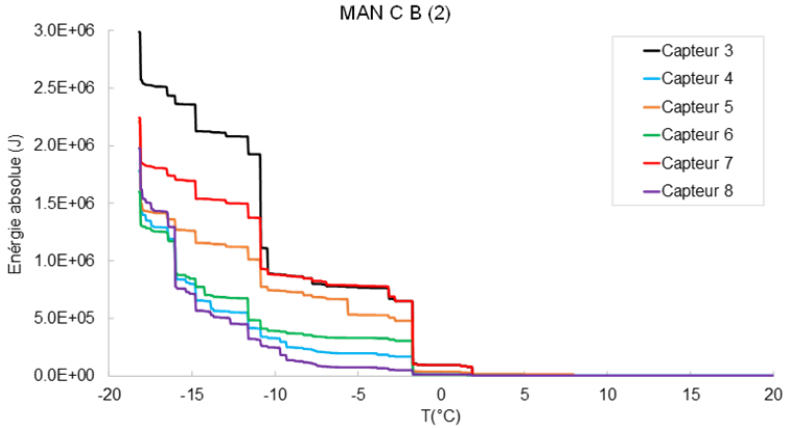


► Monitoring par émission acoustique du processus de fatigue : Résultats (Flexion 2 points) et perspectives (TSRST)

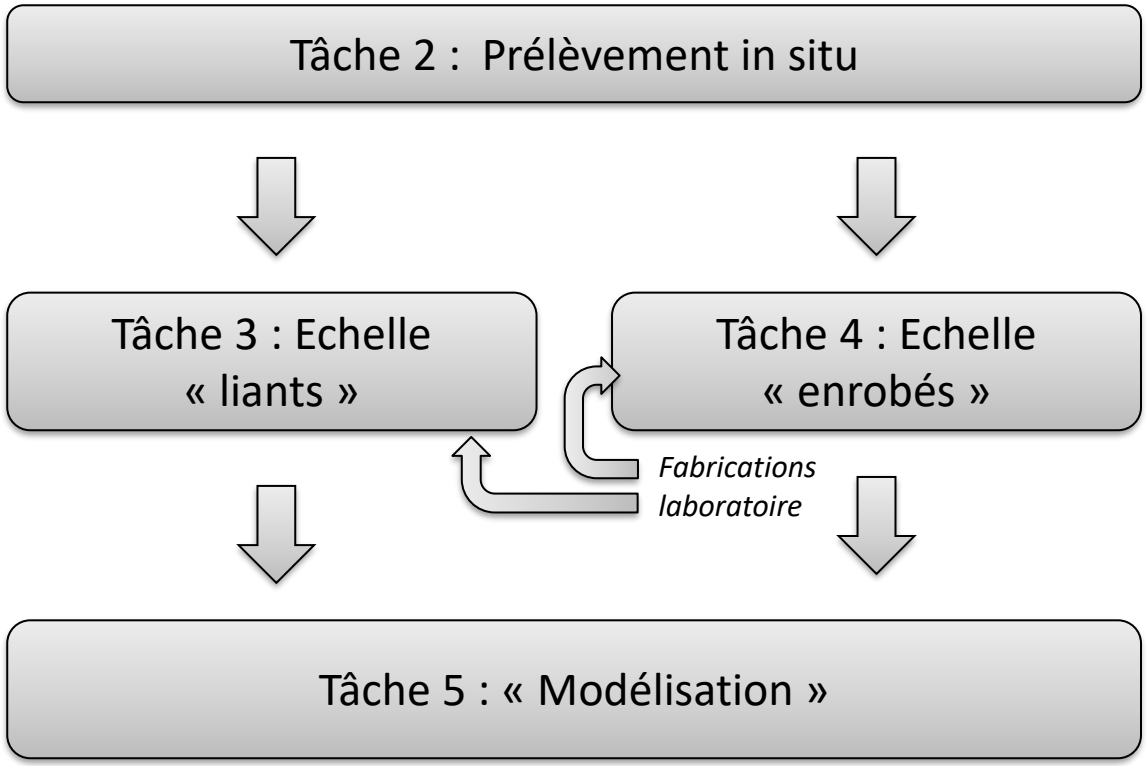








Partie 2 : Quelques résultats marquants - Base de données expérimentale



- Un programme expérimental ambitieux
  - Echelle liants
    - 60+ configurations matériaux
      - Provenance X Vieillissement
    - Modalités expérimentales
      - Rhéologie
      - DSC
      - SARA
      - I.R. …
  - Echelle enrobés
    - 20+ configurations matériaux
      - Provenance X Vieillissement
    - Modalités expérimentales
      - Module
      - Fatigue
      - Tenue à l'eau
      - Retrait thermique empêché,
      - Mesures par ultra sons …
  - Distribués auprès des partenaires (7/8)
    - Université Gustave Eiffel
    - E.S.T.P
    - I.U.T Egletons
    - Total Energies
    - Eiffage
    - Spie batignolles malet
    - Vinci Construction
  - Au cours d'une période prolongée (2017 → 2022)

► Objectifs de la « base de données »

- Faciliter l'accès à l'information pour les acteurs du projets
- Standardiser les échanges
  - Nomenclature définie en début de projet
    - Explicitée dans les différents livrables expérimentaux du projet
  - Définition des « résultats » d'essais à présenter en base
    - Définitions des indicateurs à conserver en base (sources = normes & experts)
- Faciliter des exploitations complémentaires au-delà du projet (e.g. MURE)
  - Base de données aux deux échelles « Liants » et « Enrobés »
    - Une synthèse des résultats
  - Rassembler 100% des résultats expérimentaux
    - Indicateurs ← PV d'essai ← données « brutes » lorsque disponibles
  - Il est souvent difficile pour le « modélisateur » d'accéder à la donnée « utile »

► La « base de données »

- Indicateurs
  - Base « Excel »
  - 1 x liants
  - 1 x enrobés

	SNF	SCF	SNB	SCB	BNB
Fatigue - 2PB - %vides (-)	3,43	4,00	-	-	11
Fatigue - 2PB - %vides EType (-)	0,20	0,21	-	-	0,84
Fatigue - 2PB - Temperature(°C)	10,0	10,0	-	-	10
Fatigue - 2PB - Frequence(Hz)	25,0	25,0	-	-	25
Fatigue - 2PB - Nf50% - eps6(µm/m)	105	97	-	-	92
Fatigue - 2PB - Nf50% - b (-)	-0,187	-0,198	-	-	-0,168
Fatigue - 2PB - Nf50% - Delta eps6(µm/m)	4,34	3,43	-	-	9,87
Fatigue - 2PB - Nf50% - SN (-)	0,17	0,13	-	-	0,375
Gradient Mva - roulement - %vides (-)	-	-	-	-	-
Gradient Mva - liaison- %vides (-)	-	-	-	-	-
Gradient Mva - base - %vides (-)	-	-	4,99	4,09	7,57
Gradient Mva - fondation- %vides (-)	3,65	3,60	-	-	-
Gradient Mva - roulement - %vides EType (-)	-	-	-	-	-
Gradient Mva - liaison- %vides EType (-)	-	-	-	-	-
Gradient Mva - base - %vides EType (-)	-	-	0,29	0,45	0,54
Gradient Mva - fondation- %vides EType (-)	0,53	0,30	-	-	-
E10degC124msNAT-E0minimum (MPa)	15689	14930	-	-	10379
		...			

	SNF	SCF	SNB	SCB
Rhéo MAI@0°C - UGE/Viscoanalyse	0,51	0,50	0,49	0,52
Rhéo TVET@7,8 Hz -50 rad/s (°) - UGE/Viscoanalyse	25,22	25,61	22,81	22,99
Rhéo TVET@1,59 Hz -10 rad/s (°) - UGE/Viscoanalyse	15,12	15,41	12,40	12,80
Rhéo GVET (MPa) - UGE/Viscoanalyse	11,38	12,07	11,35	9,78
Rhéo G-R (kPa) - UGE/Viscoanalyse	43,48	45,45	21,47	25,43
Rhéo MAI@0°C - UGE/RHEA				
Rhéo TVET@7,8 Hz -50 rad/s (°) - UGE/TE-RHEA	28,77	28,56	25,01	27,59
Rhéo TVET@1,59 Hz -10 rad/s (°) - UGE/TE-RHEA	23,24	22,89	19,27	21,94
Rhéo GVET (MPa) - UGE/TE-RHEA	7,02	8,19	8,37	5,88
Rhéo G-R (kPa) - UGE/TE-RHEA	326,70	343,20	166,90	192,70
Rhéo MAI@0°C - ESTP/Viscoanalyse	0,50	0,47	0,41	0,47
Rhéo TVET@7,8 Hz -50 rad/s (°) - ESTP/Viscoanalyse	26,80	27,80	24,70	25,00
Rhéo TVET@1,59 Hz -10 rad/s (°) - ESTP/Viscoanalyse	22,60	23,60	20,50	20,80
Rhéo GVET (MPa) - ESTP/Viscoanalyse	7,19	6,96	5,52	6,16
Rhéo G-R (kPa) - ESTP/Viscoanalyse	46,98	56,82	21,34	32,10
Rhéo MAI@0°C - ESTP/RHEA				
Rhéo TVET@7,8 Hz -50 rad/s (°) - ESTP/TE-RHEA	28,61	33,41	27,98	26,75
		...		

Exploitation : corrélation différentes échelles
→ travaux restant à produire

- PV d'essai
  - Documents techniques complets
- données « brutes » lorsque disponibles
  - Fichiers « machine »

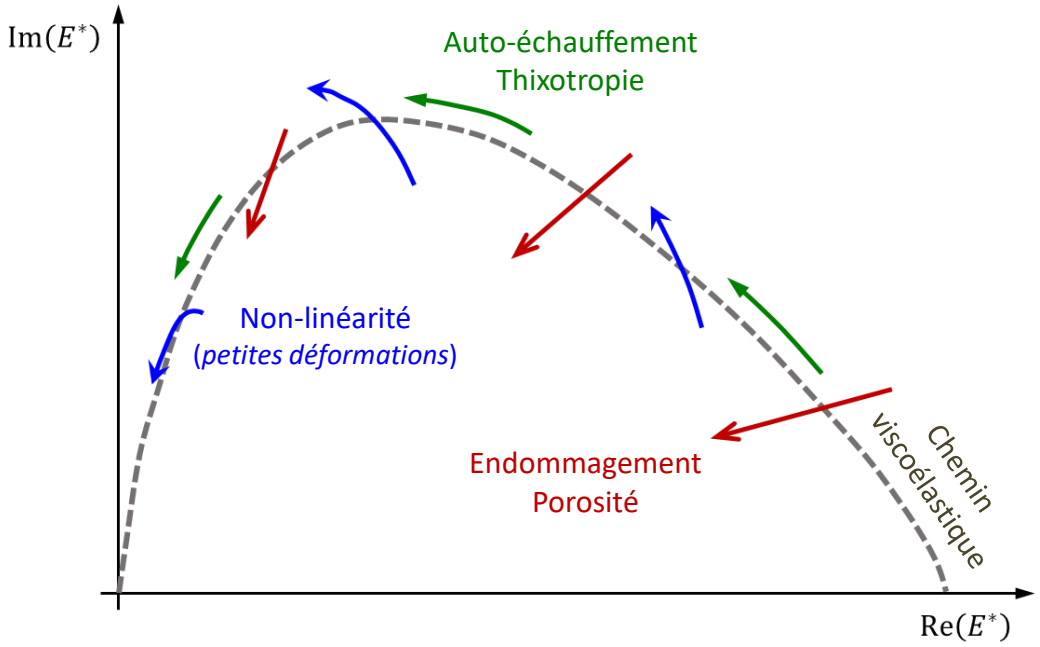
Exploitation : exemple Modélisation du comportement
Thèse Léo Coulon

► Bilan

- Initiative lancée tardivement dans le projet (mi parcours)
- Démarche simple et structurante (et très « coûteuse » à lancer en fin de projet)
- Mise à disposition au travers du « cloud » - évidence
- **Conseil :** à prévoir et débuter au lancement d'un projet
- Adopté / validé par tous les acteurs
- Nécessaire pour le lien « Expérience » x « Modèle »

▶ Élaboration d'un modèle

- Analyse d'essais DTC-CY extraits de la littérature et d'essais 2PB-TR du projet MOVEDVDC.
- Analyse des effets lors d'essais de module complexe (porosité, non-linéarité) et de fatigue (auto-échauffement, thixotropie, endommagement).
- Mise en place de principes de modélisation.

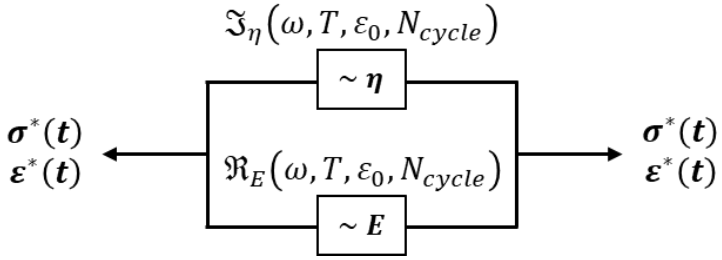


Conception d'un nouveau modèle analytique en dynamique.

Modèle VENoL

(ViscoÉlastique NOn-Linéaire)

Modèle de Kelvin-Voigt à paramètres variables



Équation générale :

$$\sigma^*(t) = \mathfrak{R}_E(\omega, T, \varepsilon_0, N_{cycle}) \cdot \varepsilon^*(t) + \mathfrak{I}_\eta(\omega, T, \varepsilon_0, N_{cycle}) \cdot \dot{\varepsilon}^*(t)$$

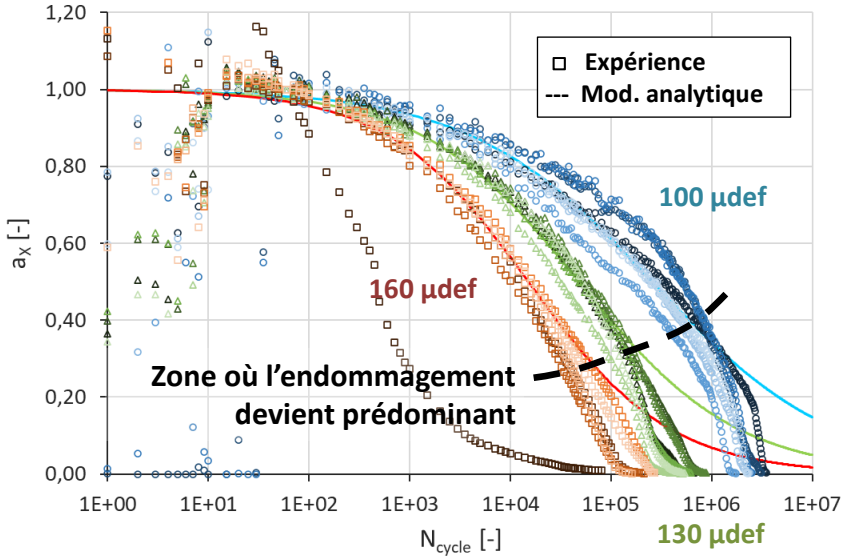
↑ Composante de rigidité [MPa] ↑ Composante de viscosité [MPa.s]

> Température T ⇨ **PETT** ⇨ coef. $a_T(T)$. ***CONNU***
Principe d'Équivalence Temps-Température

> Amplitude ε_0 ⇨ **PSETA** ⇨ $a_A(\varepsilon_0)$ et $b_A(\varepsilon_0)$. ***½ CRÉÉ***
Principe de Semi-Équivalence Temps-Amplitude

> Thixotropie N_{cycle} ⇨ **PSETX** ⇨ $a_X(N)$ (et $b_X(N)$?). ***CRÉÉ***
Principe de Semi-Équivalence Temps-thiXotropie

+ loi d'endommagement : $E_D^* = \left(1 - D_f(a)\right)\left(1 - D_{0,rep}\right) \cdot E^*$



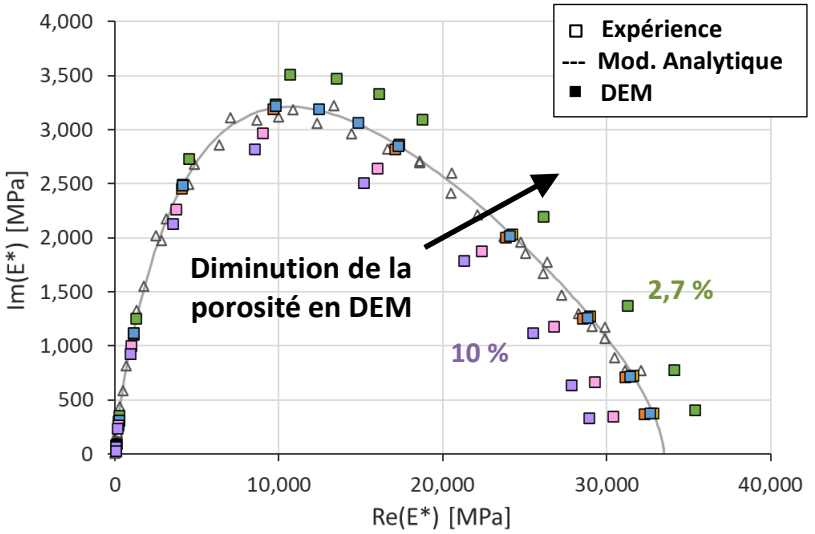
▶ Exemples de modélisations analytique et numérique (*éléments discrets*)

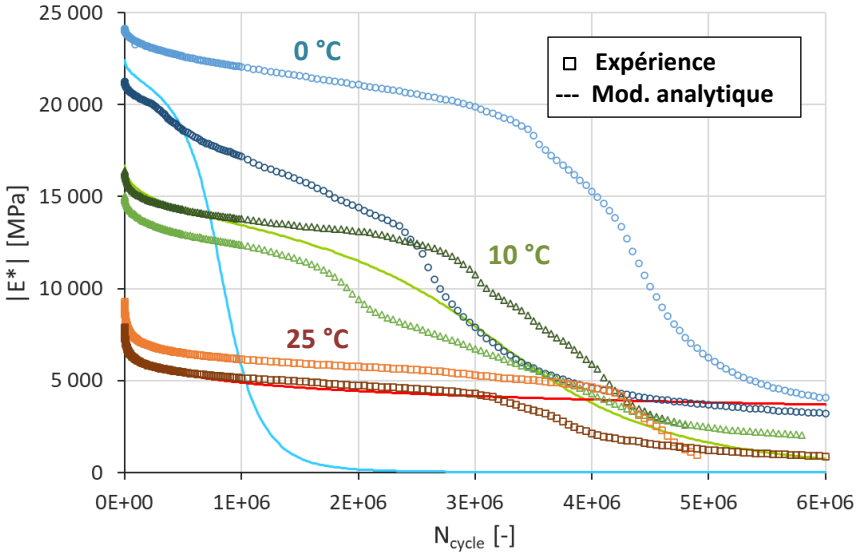
< Extraction thixotropie

GB3_DNF_17A
Fatigue 2PB-TR
Exp. Eiffage
10 °C / 25 Hz

Effet de la porosité >

A1-H3
Module complexe DTC-CY
Exp. (FREIRE, 2021)
50 µdef



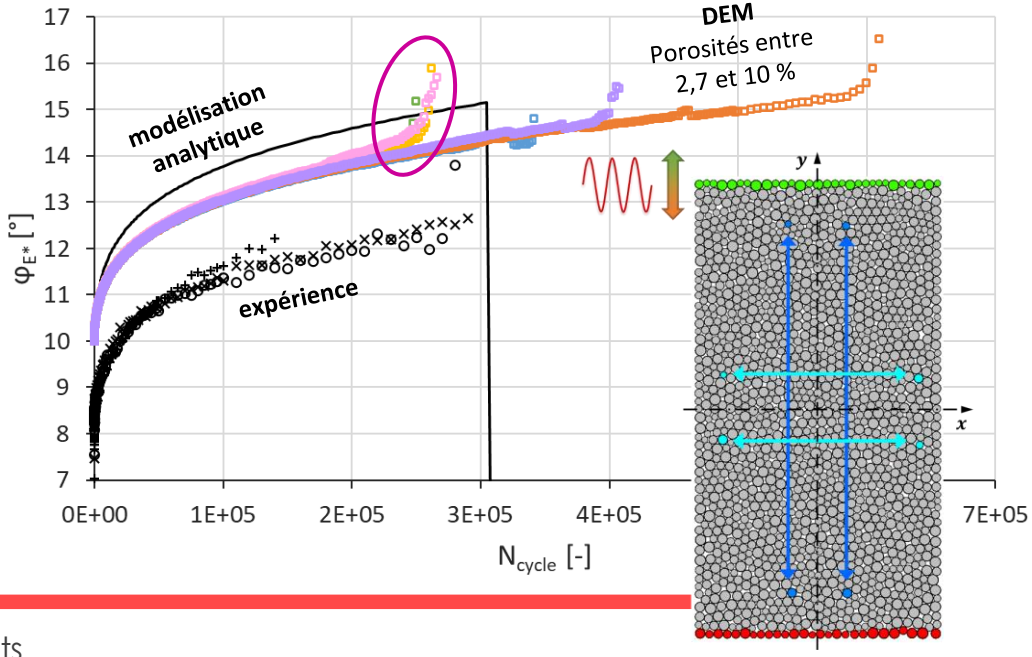


Effet fissure macroscopique sur l'angle de phase >

A#-H#
Fatigue DTC-CY
Exp. (FREIRE, 2021)
100 µdef / 10 °C / 10 Hz

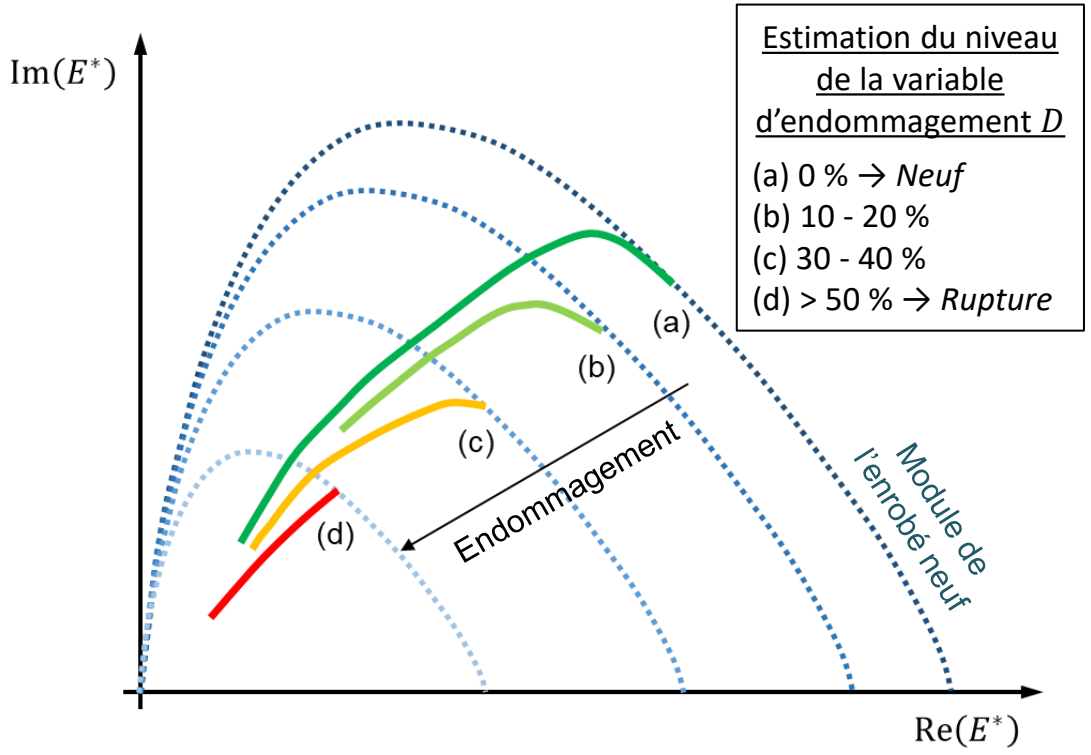
< Tentative de modélisation à différentes températures

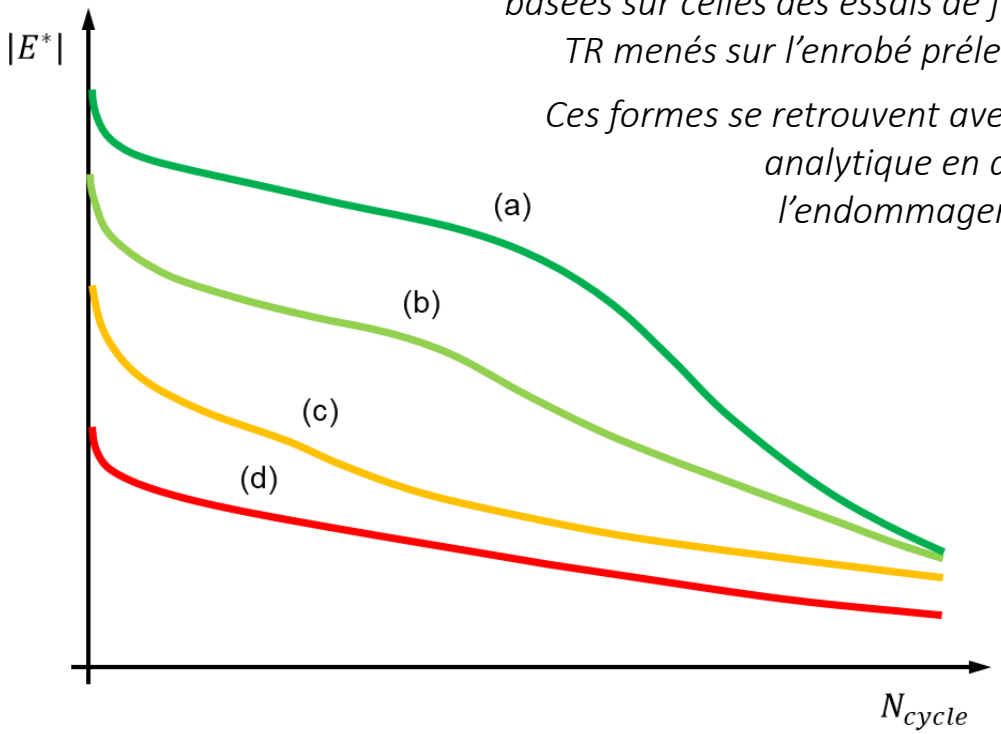
GB3_N_A3550_00J
Fatigue 2PB-TR
Exp. Eurovia
100 µdef / 25 Hz



► Estimation du niveau d'endommagement d'une chaussée

- Si état neuf connu ⇨ le ratio d'essai de module complexe donne une estimation de D.
- Si état neuf inconnu ⇨ la forme des essais de fatigue est un indicateur empirique car la cinétique d'endommagement devient prédominante plus tôt sur celle des effets biaisants (disparition des phases I et II).





Les formes des courbes schématisées sont basées sur celles des essais de fatigue 2PB-TR menés sur l'enrobé prélevé de Dijon.

Ces formes se retrouvent avec le modèle analytique en augmentant l'endommagement initial.

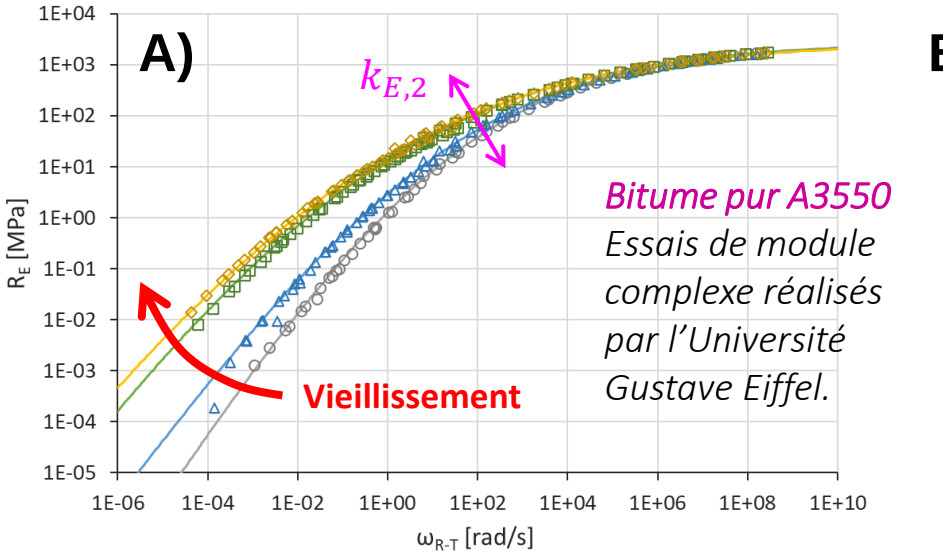
► Vieillissement

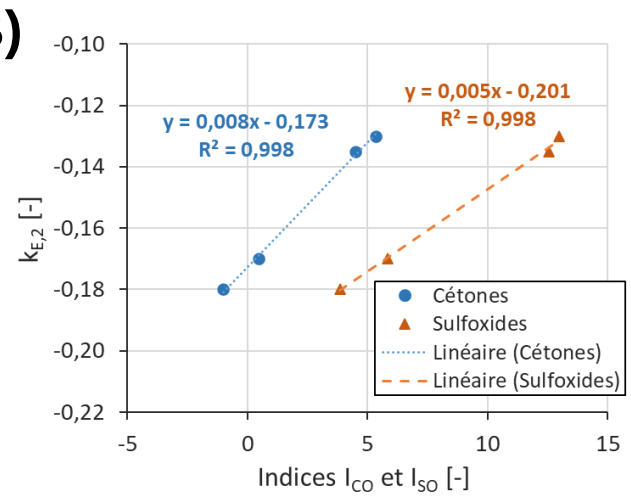
Essai de module complexe :

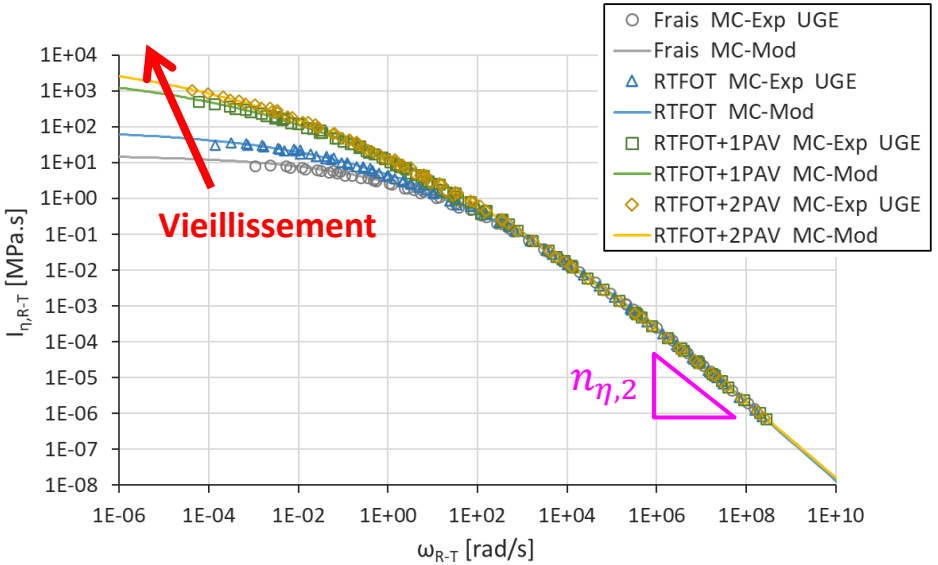
- Rigidification du bitume à basse fréquence et haute température bien identifiée par $\Re_E$ et $\Im_\eta$ (cf. figures A).
- Un lien existe entre les paramètres du modèle VENoL et l'évolution des taux de cétones et de sulfoxides (cf. figures B).

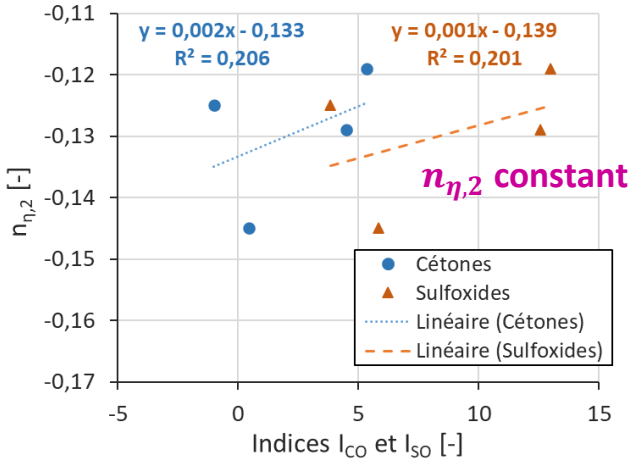
Essai de fatigue :

- Le vieillissement semble impacter les cinétiques d'évolution de la thixotropie et de l'endommagement.
- Modélisation « possible » mais il semble nécessaire de recalibrer tous les paramètres du modèle.
- Étudier un enrobé vieilli revient à étudier un nouvel enrobé !









► Modélisation hétérogène de la fatigue des enrobés :

Approche thermodynamique

Energie Dissipée

$$\phi_{period} = -\pi \cdot \mathrm{Im}(\bar{Z}) \cdot \sigma_o^{\,2}$$

Thermique transitoire

Phase I

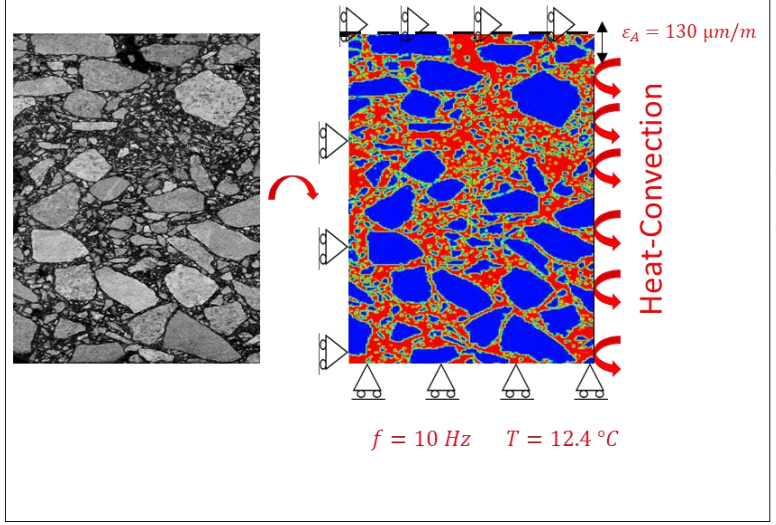
Energie Restituée

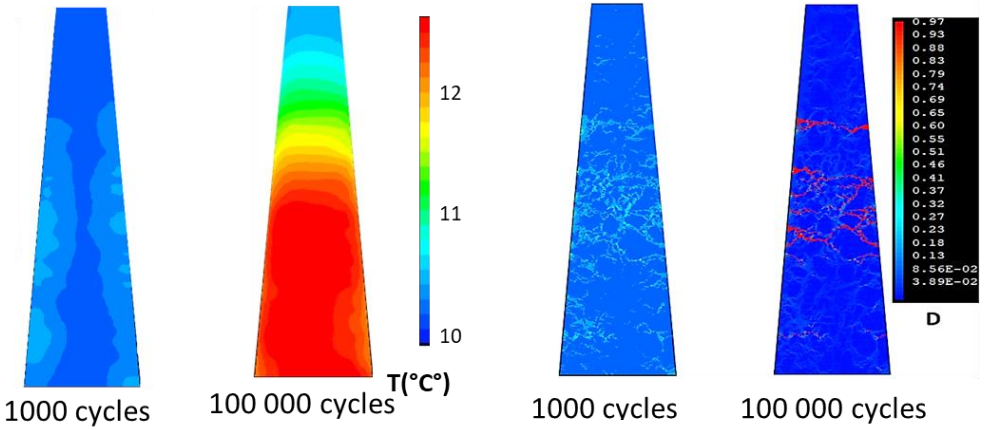
$$Y^{\max} = \frac{1}{2 \cdot \rho} \cdot \Re e(\bar{Z}) \cdot \sigma_o^{\,2}$$

Endommagement

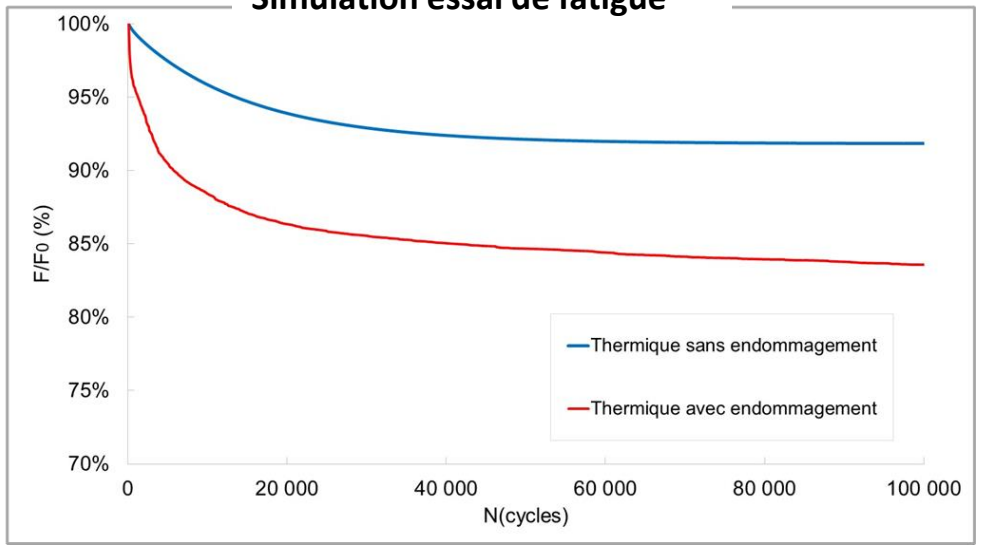
Phase II

Modélisation hétérogène





Simulation essai de fatigue



L'exploitation
et la maintenance
des infrastructures

PN - ANR MOVE
DVDC
DURÉE DE VIE DES CHAUSSÉES

IREX
Institut pour la recherche appliquée
et l'expérimentation en génie civil

Projet ANR MOVEDVDC

Conclusions et perspectives

P.Hornych – Université Gustave Eiffel

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

Restitution publique des résultats
7 novembre 2023, ENTPE, Vaulx-en-Velin

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

Principaux résultats du projet

Etude des liants

- Méthodes de vieillissement en labo sur liant seul (RTFOT, PAV) confrontés à des liants extraits (chantier et fabrication enrobé + RILEM)
- Meilleure description de vieillissement des liants (gradient in situ) et des cinétiques - Vieillissement in situ situé entre les niveaux RTFOT et RTFOT + PAV
- Plusieurs critères proposés pour estimer le niveau de vieillissement

Etude des enrobés

- Approche pour distinguer vieillissement et endommagement (comparaison matériaux circulés / non circulés)
- Protocoles de prélèvements sur chantier et de production échantillons laboratoire de formes variées
- Démonstration des limites des essais normatifs sur les prélèvements chantiers altérés par le « temps »
- Développement d'essais innovants pour la description des phénomènes d'endommagement et de rupture applicables sur prélèvements chantier et fabrications laboratoire
- Meilleure description de l'évolution des propriétés mécaniques avec le vieillissement
- Relations niveau de vieillissement du liant – propriétés mécaniques de l'enrobé sur certains essais à poursuivre par l'exploitation de la base de données

Développement d'un modèle pour les enrobés permettant de prendre en compte la fatigue, à éprouver pour la prise en compte du vieillissement

Très importante base de données de comportement de liants et d'enrobés avec différents niveaux de vieillissement

Travaux nécessaires au-delà du projet : analyses complémentaires de la base de données

3 Thèses réalisées dans le projet MOVEDVDC

- **Soufyane BENABOUD** Université de Limoges

Evaluation du vieillissement et de l'endommagement des matériaux bitumineux par modélisation hétérogène et mesures acoustiques

Soutenue le 13 mai 2022

- **Rodrigo SIROMA** Université Gustave Eiffel

Methodes expérimentales et théoriques d'évaluation de la durée de vie des chaussées basées sur l'analyse des liants extraits

Soutenue le 1er Septembre 2022

- **Léo COULON** INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES STRASBOURG

Modélisation de l'effet du vieillissement et de la fatigue sur le comportement résiduel des matériaux de chaussées

Soutenue le 12 juillet 2023

Étude des liants

[1] Siroma, R., Nguyen, M. L., Hornych, P., Lorino, T. et Chailleux, E.(2021). **Clustering aged bitumens through multivariate statistical analyses using phase angle master curve.** *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, n°S1 : EATA 2021, p. 51 – 68.

[2] Siroma, R., Nguyen, M. L., Hornych, P., Chailleux, E. (2022). **A literature review of bitumen aging: from laboratory procedures to field evaluation.** *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, vol. 50, no. 2 (March/April 2022): 1023–1044.

[3] Siroma, R., Nguyen, M. L., Hornych, P., Lorino, T., Hung, Y., Nicolaï, A., Ziyani, L. et Chailleux E. (2022). **Molecular Agglomeration Index (MAI): Quantification of the Incidence of Asphaltene Molecular Agglomeration in Aged Asphalt Binders Through Rheological Measurements.** *Transportation Research Record*.

Étude des enrobés

[4] Benaboud, S., Takarli, M., Pouteau, B., Allou, F., Dubois, F., Hornych, P. et Nguyen, M. L. (2021). **Fatigue Damage Monitoring and Analysis of Aged Asphalt Concrete Using Acoustic Emission Technique.** *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, n°S1 : EATA 2021, p. 592 – 603.

[5] Benaboud, S., Takarli, M., Pouteau, B., Allou, F., Dubois, F., Hornych, P. et Nguyen, M. L. (2021). **A New Analysis of Fatigue Test for Bituminous Mixtures using Fourier Series Fitting and Acoustic Emission Measurements.** *Construction and Building Materials*, 301.

Modélisation

[6] Coulon, L., Koval, G., Chazallon, C. et Roux, J.-N. (2021). **Analytical modelling of thixotropy contribution during T/C fatigue test of asphalt concrete with the VENoL model**. *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, n°S1 : EATA 2021, p. 536 – 559.

[7] Coulon, L., Koval, G., Chazallon C. et Roux, J.-N. (2023). **Analytical modelling of complex stiffness modulus test in direct tension-compression on asphalt concrete and non-linearity effect due to strain amplitude.** *Road Materials and Pavement Design*, vol. 24, n°1, p. 216 – 246.