

# Recyclage des BPHU :

## Gestion des déchets composites historiques et fin de vie de composites éco-conçus

R.Léger, H.Bel Haj Frej, D.Perrin, P.lenny, P.J.Liotier,  
C.Aymonier, P.Gérard, J.F.Devaux



**LE RECYCLAGE DES COMPOSITES**

Un nouveau cap pour la course au large



**25 SEPTEMBRE 2025**



**LORIENT - Palais des congrès**

# Contexte et exemples d'études

## Bateaux de plaisance

- Secteur en plein essor économique
- Conçus avec des composites non pensés pour être recyclés (résines pétrosourcées + fibres de verre)

## Projet THANABOAT

- Etude de voies de valorisation matière par recyclage mécanique, thermique ou chimique.
- Evaluation de la qualité des fibres recyclées
- Incorporation dans des matrices cimentaires



## Bateaux de plaisance hors d'usage (BPHU)

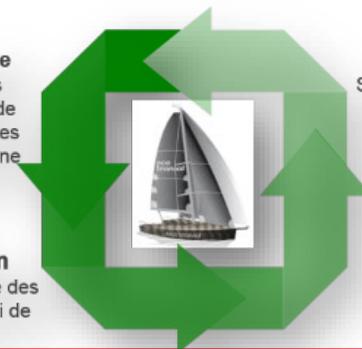
- Collecte complexe
- Coût élevé du démantèlement
- Impact environnemental médiocre
- Valorisation énergétique, valorisation matière

## Projet DURACOMP

- Eco-composite recyclable
- Recyclage thermique en boucle fermée

**Mise en œuvre**  
Fabrication des bateaux à base de matières premières et recyclées (résine & renfort)

**Utilisation**  
Mise en service des navires et suivi de santé



**Recyclage**  
Séparation matières (matrice/renfort) et réutilisation à l'identique

**Valorisation**  
Déconstruction des navires en fin de vie

# Recyclage des composites « historiques »

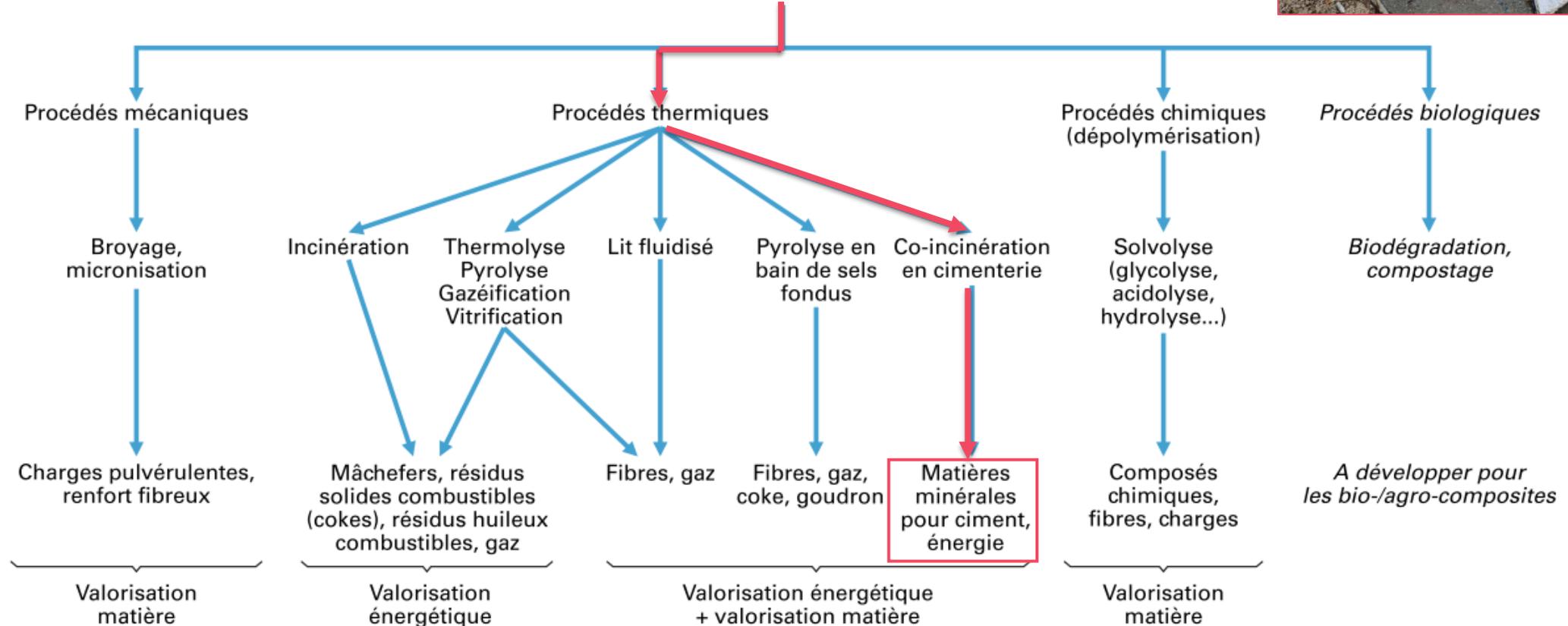
Centre de traitement des BPHU



UP/verre  
VE/verre



Procédés de recyclage des composites



# Recyclage des composites « historiques »

## Projet THANABOAT (2023-2025)



UP/verre



Procédés de recyclage des composites

Procédés mécaniques

Broyage, micronisation

Charges pulvérulentes, renfort fibreux

Valorisation matière

Incorporation dans matrice cimentaire

Procédés thermiques

Incinération

Thermolyse  
Pyrolyse  
Gazéification  
Vitrification

vapothermolyse

Mâchefers, résidus solides combustibles (cokes), résidus huileux combustibles, gaz

Valorisation énergétique

Lit fluidisé

Fibres, gaz

Pyrolyse en bain de sels fondus

Fibres, gaz, coke, goudron

Co-incinération en cimenterie

Matières minérales pour ciment, énergie

Valorisation énergétique + valorisation matière

Procédés chimiques (dépolymérisation)

Solvolyse (glycolyse, acidolyse, hydrolyse...)

Solvolyse eau super-critique

Composés chimiques, fibres, charges

Valorisation matière

- Evaluation du comportement des fibres recyclées
- Analyse des résidus liquides

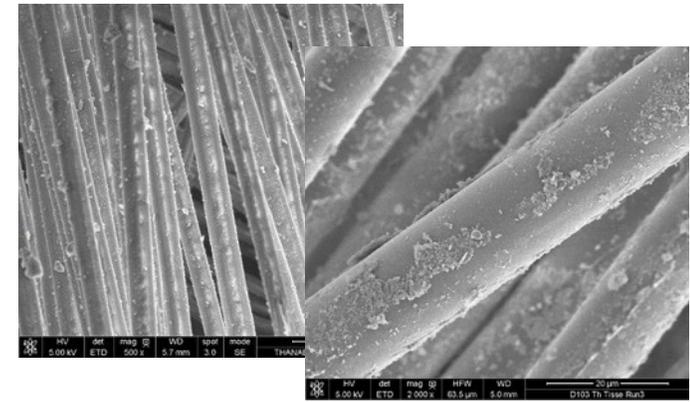
Procédés biologiques

Biodégradation, compostage

A développer pour les bio-/agro-composites

# Recyclage des composites « historiques »

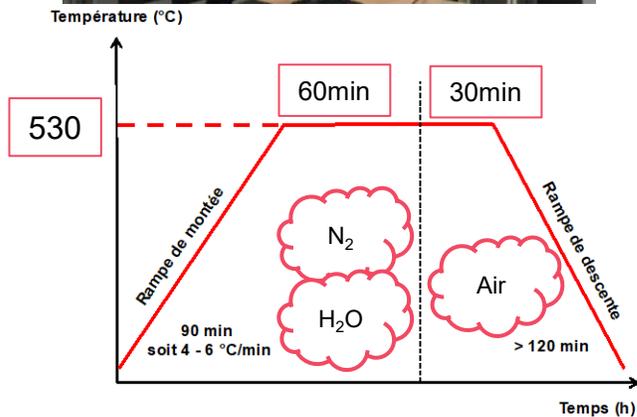
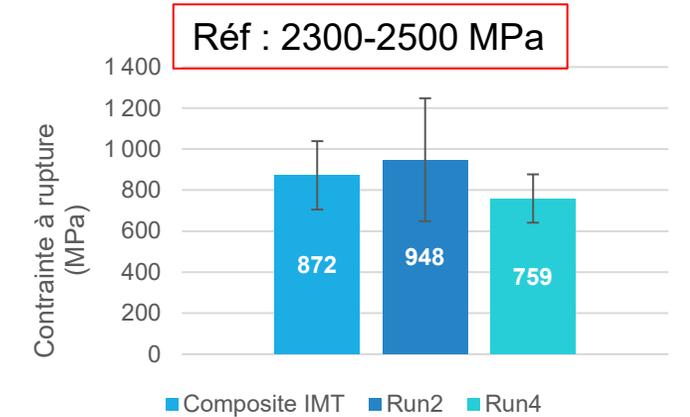
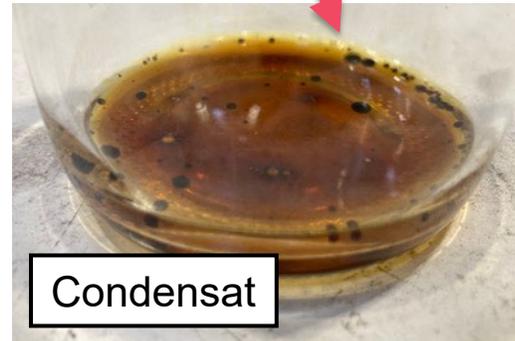
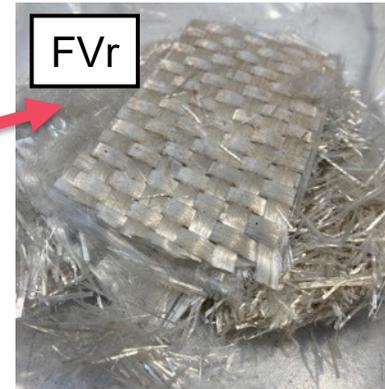
## Projet THANABOAT (2023-2025)



### Valorisation composite par recyclage thermique : vapothermolyse



#### Résultats :



✓ Produits de dégradation du polyester : diacides, diols, styrène et dérivés

Exemple RUN 2 :

- Phtalique anhydride (50.73%) : Composé aromatique, anhydride d'acide dicarboxylique.
- 1,2-Ethanediol, monobenzoate (7.35%) : Ester d'un diol et d'un acide benzoïque.
- Benzeneacetic acid,  $\alpha$ -oxo-, ethyl ester (5.51%) : Ester d'un acide  $\alpha$ -céto-phénylacétique.
- Propylène Glycol (17.03%) : Diol

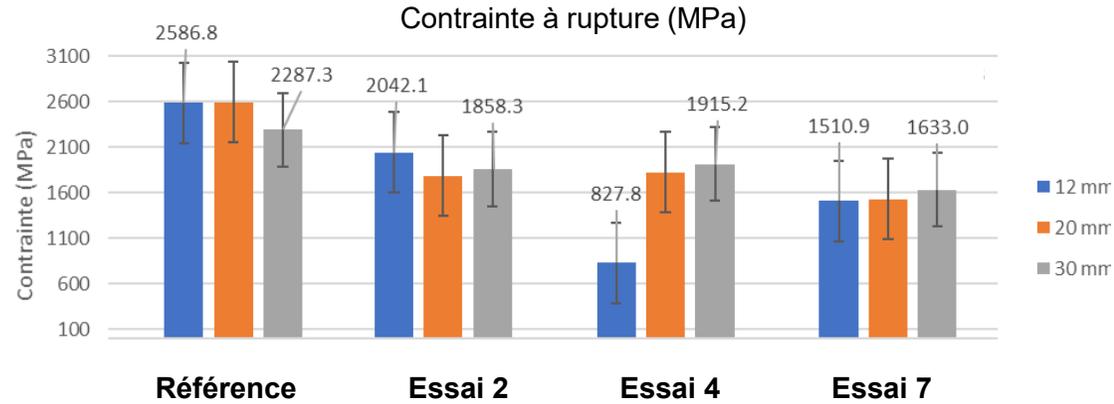
✗ Problématique système de condensation sur le pilote de laboratoire pour établir un bilan matière complet

# Recyclage des composites « historiques »

## Projet THANABOAT (2023-2025)

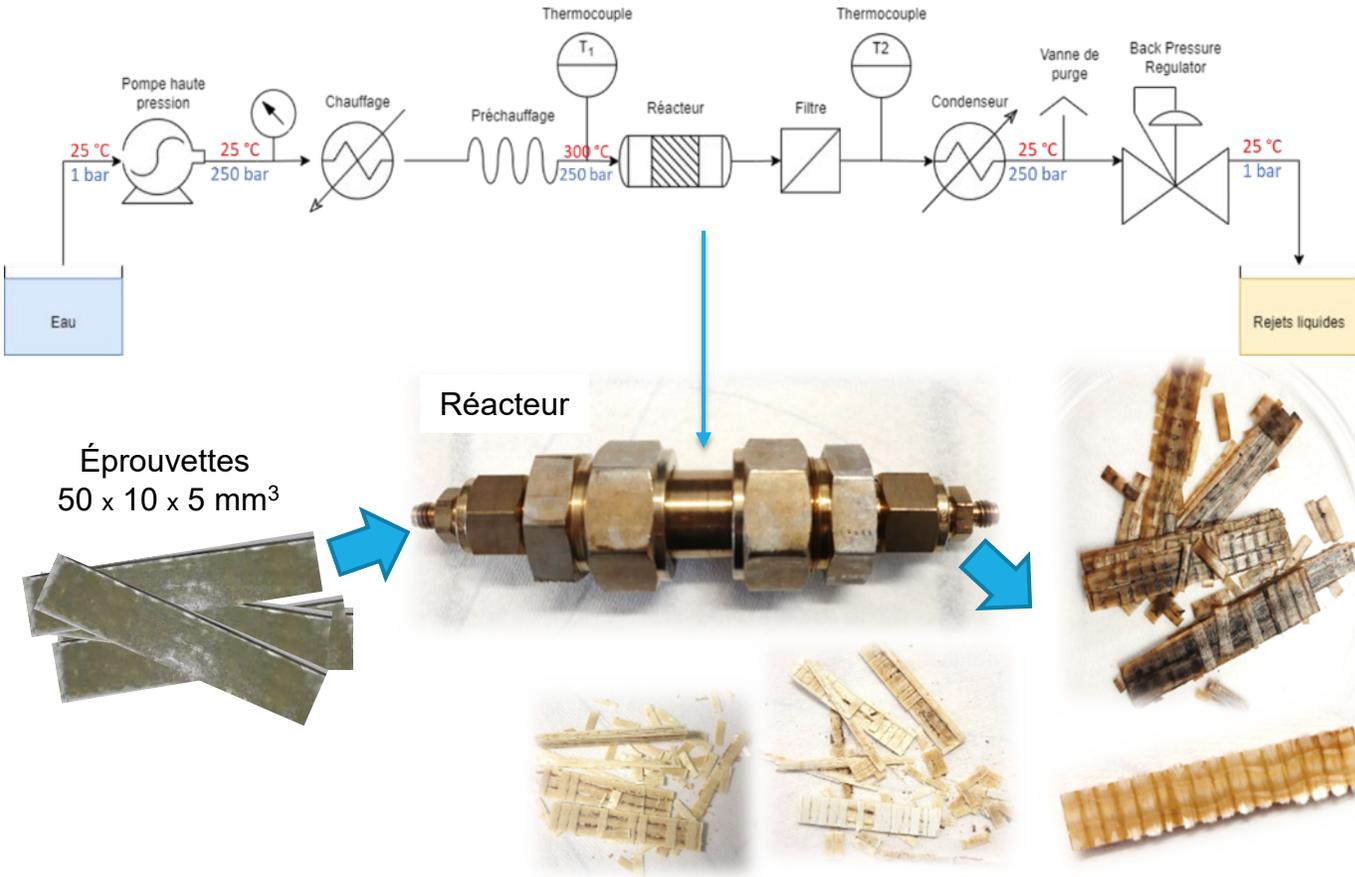


### Valorisation composite par recyclage chimique : eau super-critique



	Essai 2	Essai 4	Essai 7
<b>Température :</b>	270°C	300°C	275°C
<b>Pression :</b>	250 bar	250 bar	250 bar
<b>Durée :</b>	30 min	90 min	30 min
<b>Débit :</b>	10 ml/min	8 ml/min	5 ml/min
<b>Agent nucléophile :</b>	Absent	Absent	NaOH 0,02 mol/L
<b>Efficacité :</b>	29%	62%	34%

- Endommagement des fibres lors de l'extraction FV
- Perte prop. méca > 50% => Efficacité > 95%
- Compromis efficacité / prop. méca



# Recyclage des composites « historiques »

## Projet THANABOAT (2023-2025)

### Valorisation composite par recyclage mécanique (broyage) et incorporation dans une matrice cimentaire

- 1ère approche : **Substitution** d'une **partie des granulats fins** (Sable)
- 2ème approche : **Utilisation** comme **renforts** (mortiers et bétons fibrés)

#### Problématiques

- Fibres plus ou moins dégradées (vieillesse en service et broyage)
- Présence de résine organique et éventuellement de produits de traitement de surface
- Perte d'ouvrabilité (agglomérations des broyats qui empêche l'absorption d'eau par le ciment)
- Dégradation possible des fibres de verre (E) dans la pâte cimentaire (car pH élevé)
- Cadre réglementaire : maximum 3%<sub>m</sub> de FV



Fibres de verre alcali-résistantes pour mortiers et bétons (20-40 euros/kg)

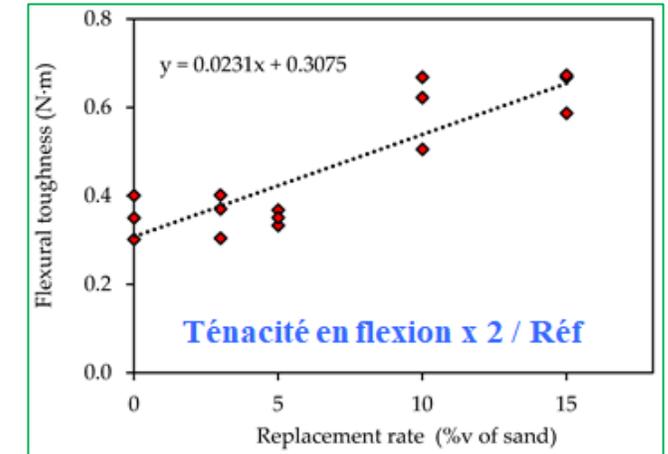
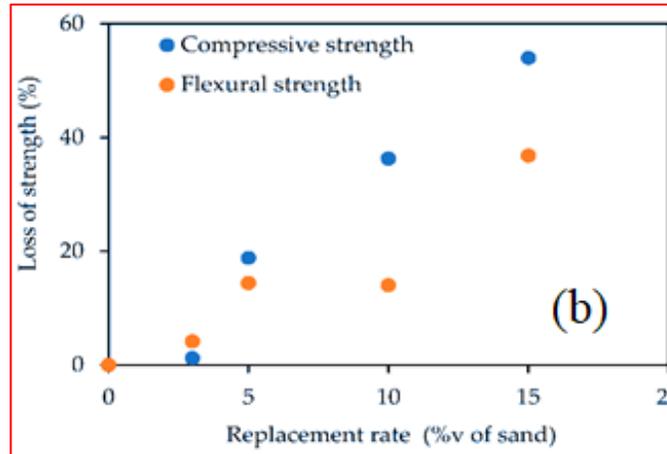
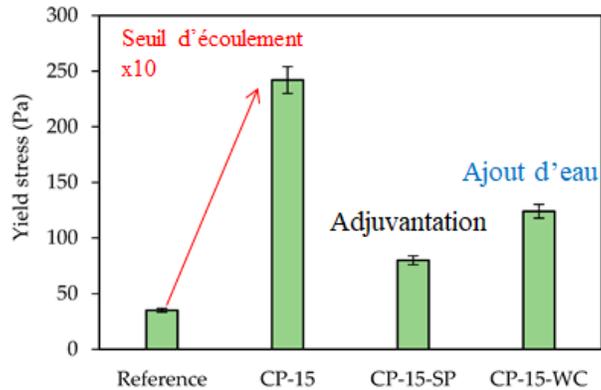
# Recyclage des composites « historiques »

## Projet THANABOAT (2023-2025)

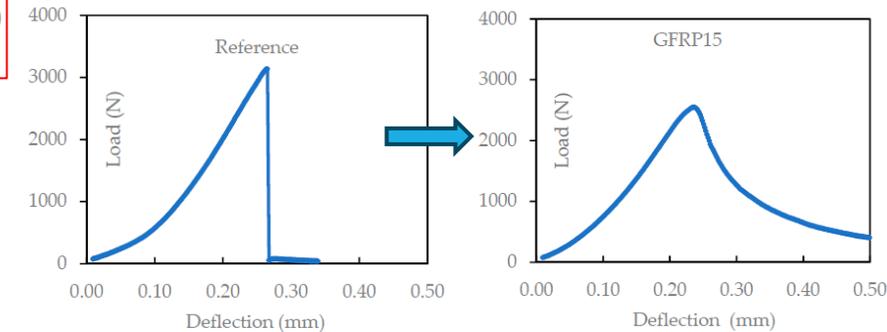
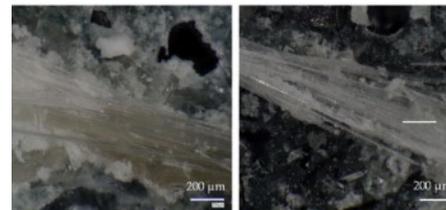
Valorisation composite par recyclage mécanique (broyage) et incorporation dans une matrice cimentaire

- 1ère approche : Substitution d'une partie des granulats fins (Sable)

**Mortier** = Ciment Portland CEM I 52,5R + eau + 85% sable + 15% broyats BPHU (0/2mm)



7 mois



# Recyclage des composites « historiques »

## Projet THANABOAT (2023-2025) : Bilan et perspectives

### Extraction des FV par procédé chimique et thermique :

- Fibres discontinues aux propriétés mécaniques affaiblies :
  - Réutilisation sous forme de fibres courtes ou de charges : à tester dans le cadre de **RECYCOMP**. Coût / bilan carbone à évaluer.
  - Réutilisation sous forme de fibres longues discontinues : ré-ensimage à prévoir, cardage, tissage : **peu pertinent du point de vue économique**.
- Valorisation de la résine complexe



### Incorporation de broyats dans matrices cimentaires :

- Adjuvantage <3% déjà possible : mais gains faibles sur les propriétés mécaniques
- Nouvelle certification permettant des taux d'incorporation >3% : **Projet CIMPLAST** (Thèse W.M.Kabore) / CEREMA + Région Occitanie : **Faisabilité technico-économique et environnementale en vue d'une filière régionale de valorisation des composites issus de BPHU**

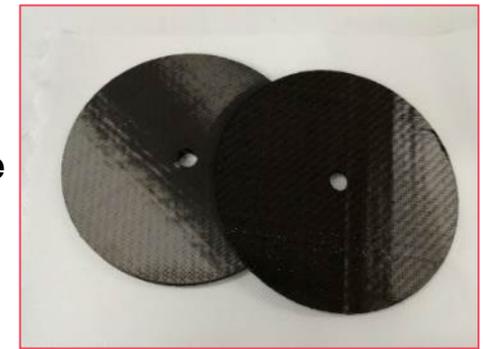


# Eco-composites recyclables

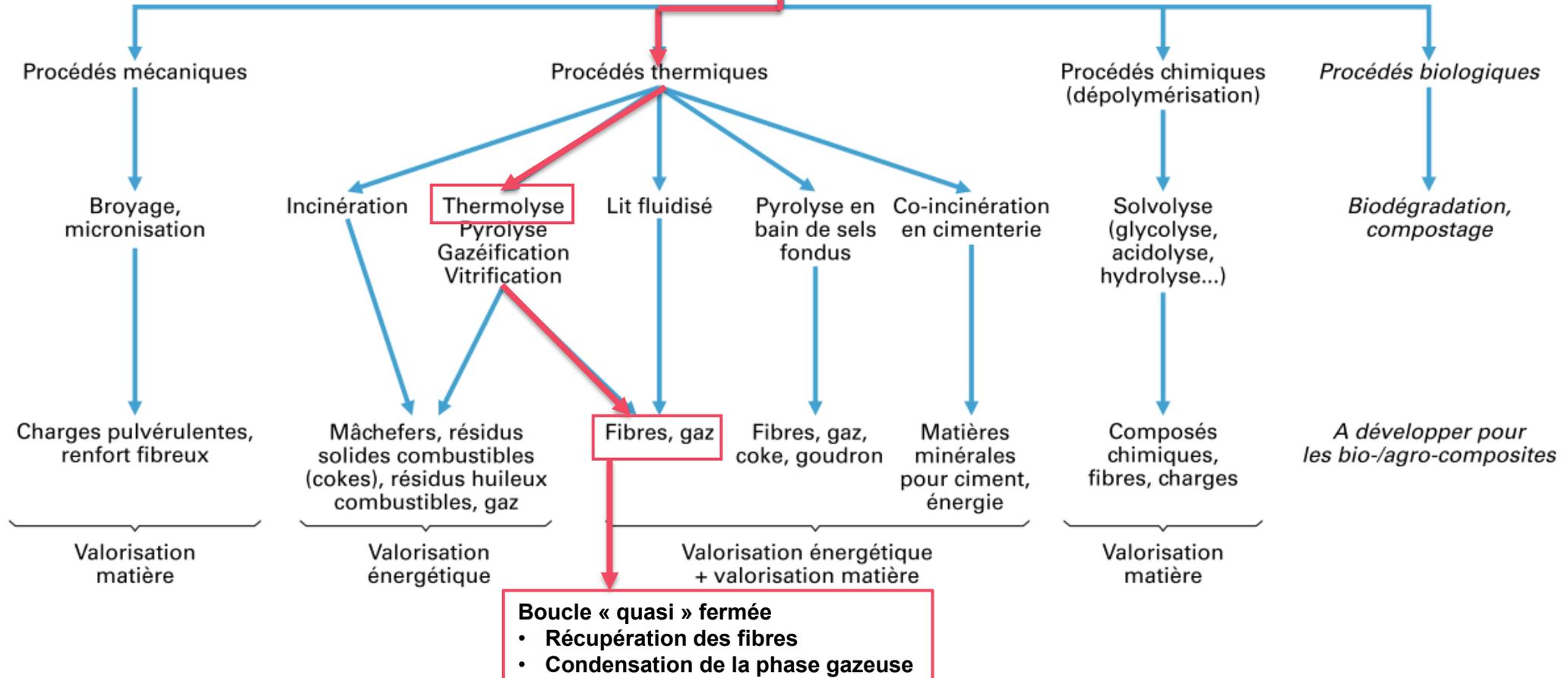
Projet DURACOMP (2017-2020)



Elium 188-O/Carbone



Procédés de recyclage des composites



# Eco-composites recyclables

## Projet DURACOMP (2017-2020)

## Méthode de recyclage (en collaboration avec ARKEMA/CRRA)



Température  
350-450 °C

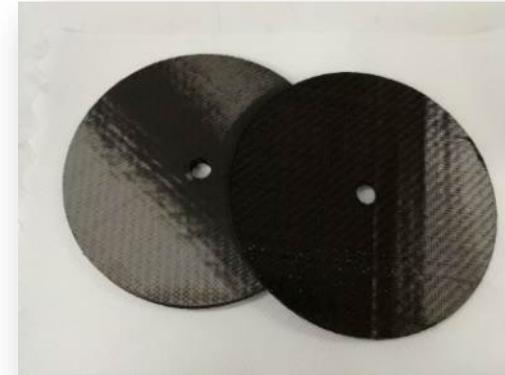
Pression

Gaz  
Inerte

Pyrolyse dans un réacteur sous atmosphère inerte

FC recyclées  
72%<sub>m</sub>

Condensat  
25%<sub>m</sub>



### Composite FC/Elium 188-O (renfort Cbx600 24k T620 Sicomin)

Taux massique des fibres : 70,9 %

$Tv_f = 61,9 \%$  ;  $Tv_m = 36,6 \%$  ;  $Tv_p = 1,5 \%$

3200 g composite

- 930 g de résine
- 2270 g de fibres



Colonne de distillation  
avec tête à reflux



### Chromatographie du condensat

- MAM (75%)
- Impuretés : Méthanol, Acide méthacrylique...



MAM (pureté > 99,5%)  
13%<sub>m</sub>

**ARKEMA**

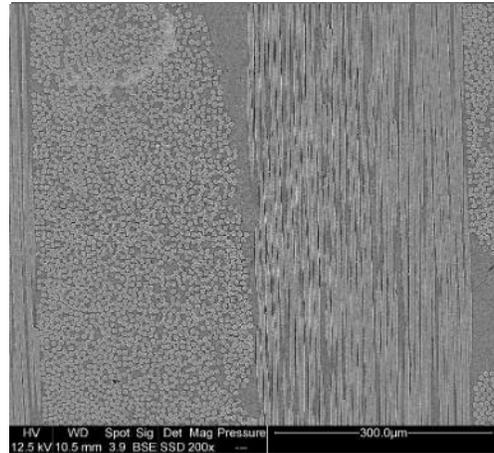


ELIUM recyclé  
500 g

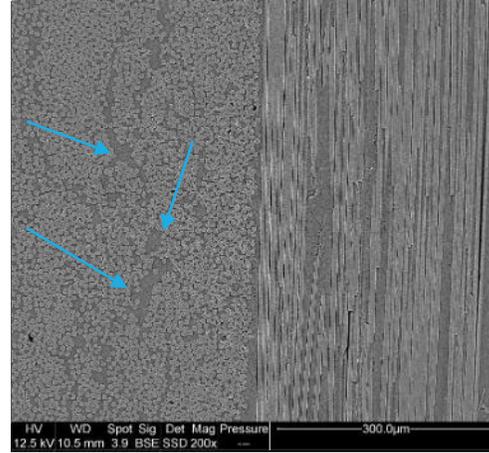
# Eco-composites recyclables

## Projet DURACOMP (2017-2020)

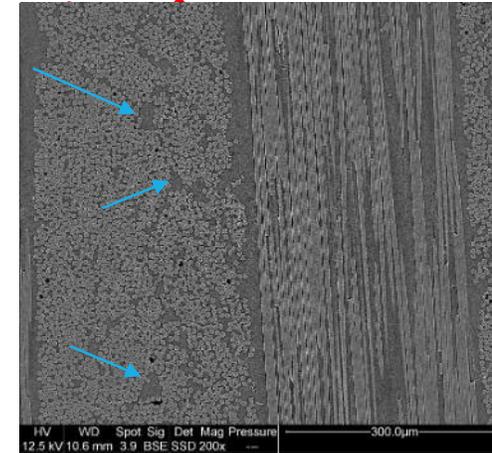
Réf : FCv / vElium



FCr / vElium



FCr / rElium



Infusion des FCr

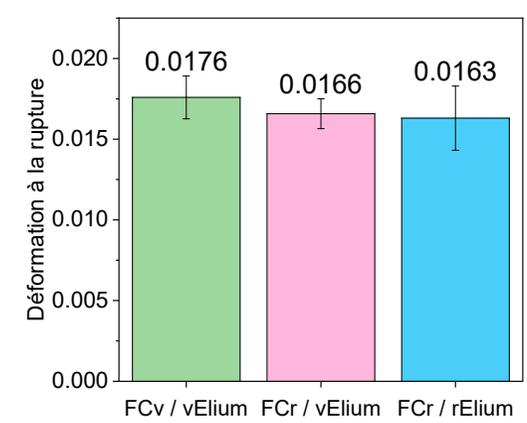
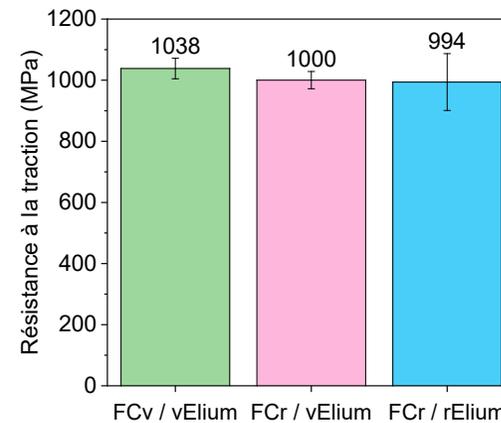
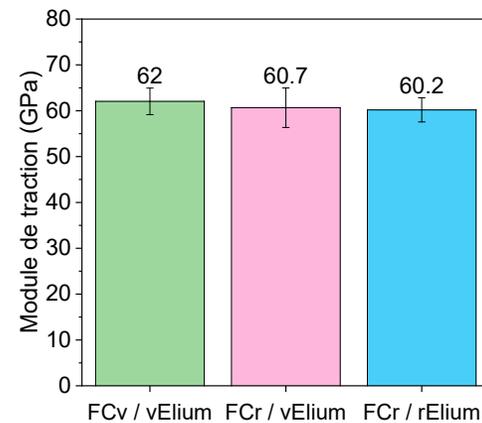
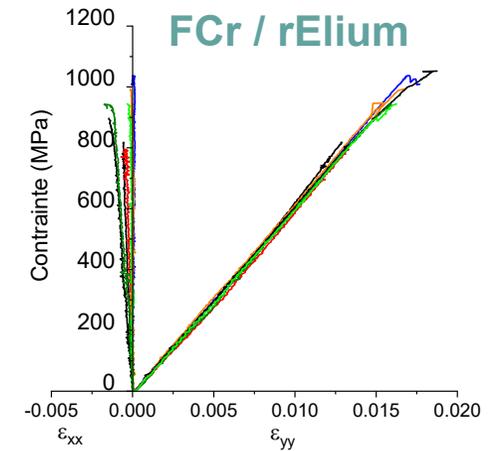
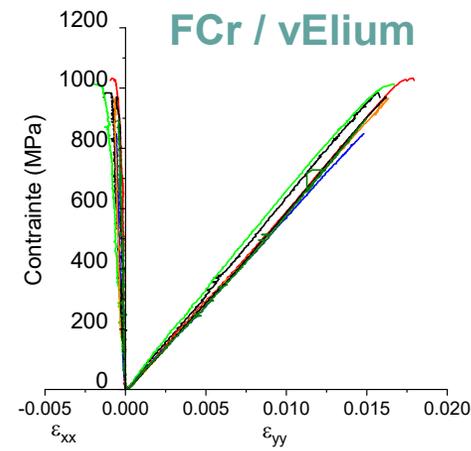
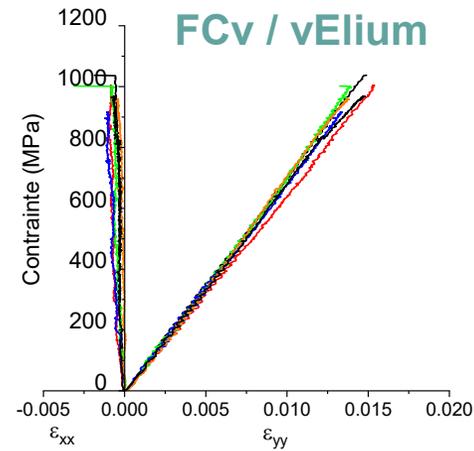
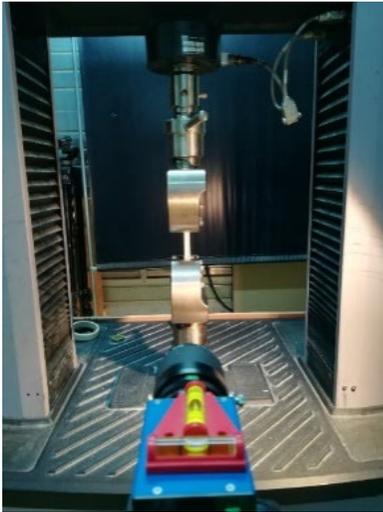
Zones inter-plis et intra-mèches riches en résine  
dégradation du fil de liage : 9 g/m<sup>2</sup>

Matériau	TV <sub>f</sub> (%)	TV <sub>r</sub> (%)	TV <sub>p</sub> (%)	TM <sub>f</sub> (%)	Densité surfacique (g/m <sup>2</sup> )
FCv / vElium	61 (1,8)	35,1 (1,2)	3,8 (1,27)	70,9 (0,41)	640,5 (2,66)
FCr / vElium	54,8 (1,1)	43,6 (1,27)	1,6 (0,16)	66,4 (1,14)	631,4 (4,89)
FCr / rElium	55,4 (1,12)	42,9 (1,9)	1,7 (0,77)	67,1 (0,38)	628,2 (1,08)

# Eco-composites recyclables

## Projet DURACOMP (2017-2020)

## Caractérisation mécanique : Essais de traction 0/90



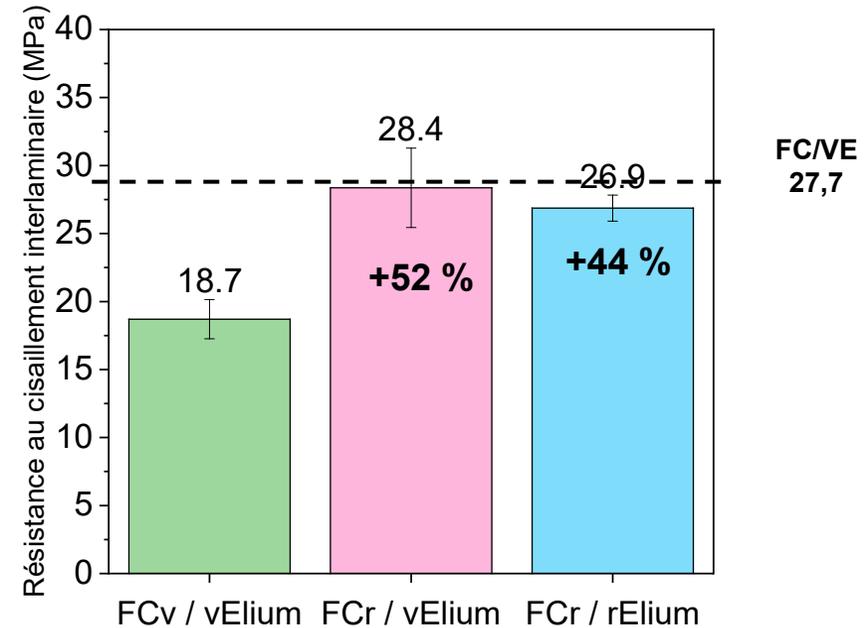
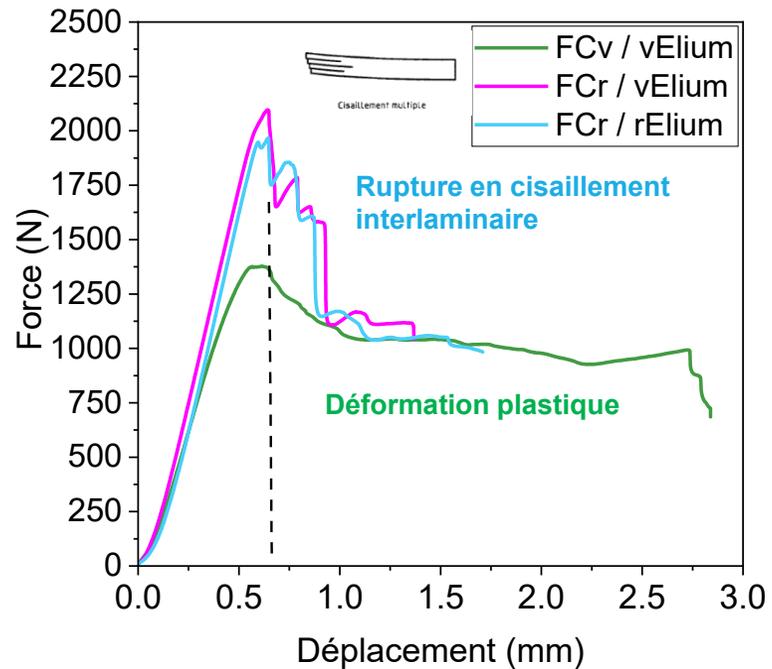
Bel Haj Frej et al. Resources, Conservation and Recycling **2021**, 173, 105705

# Eco-composites recyclables

## Projet DURACOMP (2017-2020)

## Résistance au cisaillement interlaminaire - ILSS

- ▶ Essai de flexion rapproché: Norme **ASTM D2344** (1 mm/min) ; Écartement entre appuis = 21 mm (4 × épaisseur)
- ▶ Dimensions des éprouvettes: 30 × 10 × ~5,25 mm<sup>3</sup>



# Eco-composites recyclables

## Projet DURACOMP (2017-2020) : Bilan et perspectives

### Extraction des FC par thermolyse, récupération MAM et remise en forme :

- Démonstration réussie en laboratoire d'un recyclage en boucle quasi-fermée d'un éco-composite
- Composite FCr / rElium : excellentes propriétés mécaniques

### Perspectives :

- Fibres de carbone discontinues : ensimage, cardage, tissage, remise en œuvre
  - Durabilité du composite recyclé à évaluer
  - Coût / Bilan carbone
- 
- **RECYCOMP** : Développement de nouveaux matériaux composites avec focus sur la fin de vie par recyclage.  
**Composites à base Elium et renforts de verre, basalte, lin et carbone** (post-doc M.Asseko Ella)

# Merci de votre attention