

**Projet ANR- 15-CE22-007**

**MICRO - Matériaux Innovants Composites pour la  
Réparation d'Ouvrages : Approche fiabiliste du  
dimensionnement pour leur requalification et la  
prédiction de leur durabilité**

Programme 2016-2021

<b>A</b>	<b>IDENTIFICATION</b> .....	<b>2</b>
<b>B</b>	<b>RESUME CONSOLIDE PUBLIC</b> .....	<b>3</b>
	B.1 Instructions pour les résumés consolidés publics .....	3
	B.2 Résumé consolidé public en français .....	4
	B.3 Résumé consolidé public en anglais.....	5
<b>C</b>	<b>MEMOIRE SCIENTIFIQUE</b> .....	<b>7</b>
	C.1 Résumé du mémoire .....	7
	C.2 Enjeux et problématique, état de l'art .....	7
	C.3 Approche scientifique et technique.....	9
	C.4 Résultats obtenus et exploitation des resultats .....	10
	C.5 Discussion .....	17
	C.6 Conclusions.....	19
	C.7 Références.....	20
<b>D</b>	<b>LISTE DES LIVRABLES</b> .....	<b>21</b>
<b>E</b>	<b>IMPACT DU PROJET</b> .....	<b>22</b>
	E.1 Indicateurs d'impact .....	22
	E.2 Liste des publications et communications.....	23
	E.3 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) .....	25

*Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.*

*Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.*

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	MICRO
Titre du projet	Matériaux Innovants Composites pour la Réparation d'Ouvrages : Approche fiabiliste du dimensionnement pour leur requalification et la prédiction de leur durabilité
Coordinateur du projet (société/organisme)	M. Karim BENZARTI, Directeur de Recherche, Université Gustave Eiffel (ex Ifsttar) - Laboratoire Navier (UMR 8205)
Période du projet (date de début – date de fin)	01/01/2016 31/03/2021
Site web du projet, le cas échéant	<a href="https://anr.fr/Projet-ANR-15-CE22-0007">https://anr.fr/Projet-ANR-15-CE22-0007</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Karim BENZARTI, Mme Laurence CURTIL
Téléphone	01 81 66 82 51
Adresse électronique	Karim.benzarti@univ-eiffel.fr
Date de rédaction	Mars 2021

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	<p><u>Partenaires :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- INSA de Lyon (<b>IMP</b>) – Mme Jocelyne Galy</li> <li>- Mines d'Alès (<b>ARMINES</b>) – Mme Anne Bergeret</li> <li>- Université Lyon 1 (<b>LMC<sup>2</sup></b>) – Mme Laurence Curtil</li> <li>- Ecole Centrale de Lyon (<b>LTDS</b>) – Mme Michelle Salvia</li> <li>- Polytech Angers (<b>LARIS</b>) – M. David Bigaud</li> <li>- Université Cergy (<b>L2MGC</b>) – Mme Elhem Ghorbel</li> <li>- Université Gustave Eiffel (<b>UGE/ifsttar</b>, Lab Navier) – M. Karim Benzarti</li> </ul> <p><u>Industriels impliqués :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Freyssinet International – M. Julien Mercier</li> <li>- Sika France – M. Yvon Gicquel</li> </ul>
---	---

## **B RESUME CONSOLIDE PUBLIC**

*Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.*

### **B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RESUMES CONSOLIDES PUBLICS**

*Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.*

**Titre d'accroche du projet** (environ 80 caractères espaces compris)

*Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.*

*Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.*

**Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique** (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 1 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

*Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal*

**Titre 2 : précise les méthodes ou technologies utilisées** (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 2 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

*Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).*

**Résultats majeurs du projet** (environ 600 caractères espaces compris)

*Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.*

*Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.*

**Production scientifique et brevets depuis le début du projet** (environ 500 caractères espaces compris)

*Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation*

#### **Illustration**

*Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.*

#### **Informations factuelles**

*Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »*

## **B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS**

### **MICRO - Matériaux Innovants Composites pour le Renforcement d'Ouvrages**

#### *Approche fiabiliste du dimensionnement et prédiction de la durée de vie*

Face au vieillissement du patrimoine bâti français, le renforcement structural par collage externe de matériaux composites s'est imposé depuis une vingtaine d'année comme une solution de choix pour la réhabilitation d'ouvrages.

Le projet MICRO visait à débloquer les derniers verrous limitant l'utilisation de ces matériaux, et affichait les objectifs principaux suivants :

- Développer et évaluer de nouveaux composites de renforcement plus écologiques afin d'anticiper les évolutions probables des réglementations européennes en matières d'environnement et d'hygiène-sécurité. Ont ainsi été considérés dans ce projet ; i) un système composite de référence déjà couramment utilisé sur chantier (tissu de fibres de carbone / résine époxy), et ii) un système composite à empreinte environnementale réduite (tissus de fibres végétales / résine bio-sourcée).
- Mieux appréhender la durabilité de ces systèmes à travers une approche expérimentale multi-échelle, puis une exploitation statistique et fiabiliste des résultats, de manière pouvoir prédire la durée de vie des réparations et évaluer les risques de défaillance en termes probabilistes,
- Proposer aux maîtres d'ouvrages des règles de dimensionnement basées sur cette démarche probabiliste, et valider la requalification des ouvrages.

#### *Etude de durabilité - Caractérisation mécanique & physico-chimique – Analyse statistique & modélisation fiabiliste – SHM par capteurs piézoélectriques*

Au cours du projet, plusieurs avancées majeures ont été obtenues :

- **Bilan des potentialités de renforts structurels composites à faible impact environnemental,**
- **Meilleure connaissance de leurs mécanismes de vieillissement/dégradation**
- **Constitution d'une base de données expérimentales avec les évolutions de plusieurs indicateurs de performances mécaniques** des composites seuls et de l'interface collée béton/composite en conditions de vieillissements réel et accélérés
- **Traitement statistique de ces données et établissement de lois comportementales et fiabilistes**
- **Développement d'une méthode d'évaluation probabiliste de la durée de vie des systèmes composites**
- **Recalibration des facteurs de sécurité environnementaux dans les principaux codes de dimensionnement internationaux**
- **Démonstration de l'efficacité du monitoring par capteurs piézoélectriques intégrés,** pour le suivi de la polymérisation de la matrice et de l'endommagement.

#### *Productions scientifiques*

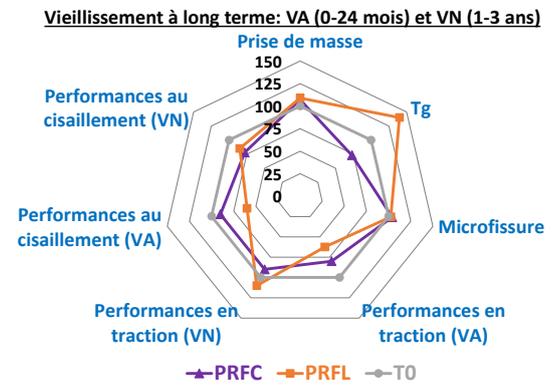
- 5 thèses soutenues dans le cadre du projet (2 financées par l'ANR, 3 hors financement ANR)

- Valorisation dans le cadre de 27 communications (conférences et publications dans des revues internationales)
- Organisation d'une Conférence Internationale à Paris en juillet 2018 (CICE 2018), avec la participation de l'ensemble des partenaires du projet et des industriels impliqués

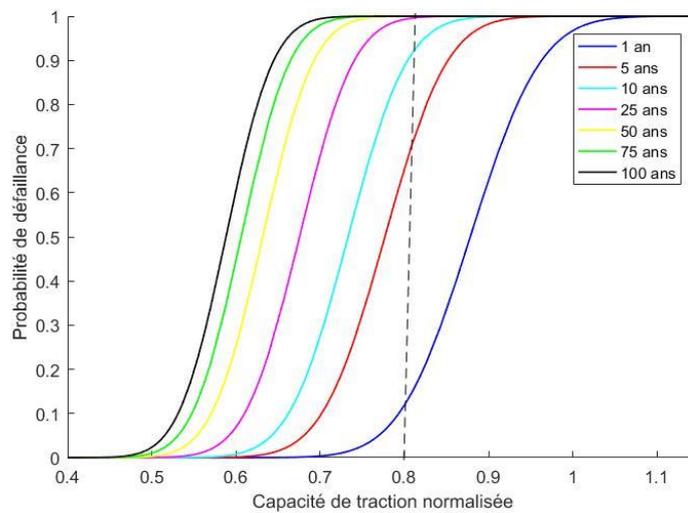
### Illustrations



Site d'exposition pour le vieillissement naturel (VN) des matériaux (Villeurbanne – Région Lyonnaise)



Comparaison des évolutions de différents indicateurs pour les stratifiés à fibres de carbone (PRFC) ou de lin (PRFL), après vieillissements accélérés (VA) ou naturel (VN).



Probabilité de défaillance du système composite à fibres de lin (PRFL) en condition de vieillissement naturel

### B.3 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

*Suivre impérativement les instructions ci-dessus.*

**MICRO - Innovative Composite Materials for the Rehabilitation of Infrastructures**

*Reliability approach for design optimization and lifetime prediction*

The built heritage in France is wide and aging, and structural strengthening by externally bonded Fiber Reinforced polymers (FRP) composites has become an attractive solution to upgrade/repair existing infrastructures and to increase their life-span.

The MICRO Project aimed at removing barriers to the large scale development of FRP strengthening systems, by addressing the following issues:

- To develop and assess innovating FRP strengthening systems showing reduced environmental footprint, in order to anticipate upcoming changes in the European environmental, safety & health regulations. We therefore considered in this project, a reference composite system traditionally used on worksites (carbon fiber fabrics / epoxy matrix) and ii) an innovative eco-friendly system (flax fiber fabrics / biobased epoxy matrix).
- To investigate the durability of these systems through a multi-scale experimental approach, followed by a statistical and reliability analysis of experimental data, in order to predict the lifespan of the repaired structures and evaluate the risk of failure expressed in probabilistic terms
- To establish updated design guidelines based on this probabilistic approach and recalibrate the safety factors.

*Durability study – Mechanical & physico-chemical characterizations – Statistical Analysis & reliability modelling – SHM with piezoelectric sensors*

In the framework of this project, several major advances were obtained:

- **Assessment of composite strengthening systems showing reduced environmental footprint,**
- **Better knowledge regarding their ageing/degradation processes,**
- **Establishment of an experimental database** including the evolutions of several mechanical performance indicators for both the composite laminates and their adhesive bond with concrete when subjected to accelerated and natural ageing conditions,
- **Statistical analysis of experimental data and establishment of behavior and reliability laws,**
- **Development of a probabilistic method to assess the lifespan of repaired structures,**
- **Recalibration of environmental knockdown factors** in the main international design guidelines
- **Demonstration of SHM effectiveness using in-situ piezoelectric sensors,** in view of monitoring both matrix polymerization at early stage and composite damage during service life.

*Scientific outputs*

- 5 PhD theses defended in the framework of this project (2 financially supported by ANR, 3 non supported)
- Valorization of research outcomes in 27 communications (including both conferences and publications international journals)
- Organization of an international conference in Paris on July 2018 (CICE 2018), with the participation of all the academic partners and industrial companies involved in the project.

## C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

*Maximum 5 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.*

*Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.*

*Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.*

**Mémoire scientifique confidentiel** :  oui / non

### C.1 RESUME DU MEMOIRE

*Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public*

Face au vieillissement du patrimoine bâti français, le renforcement structural par collage externe de matériaux composites s'est imposé depuis une vingtaine d'année comme une solution de choix pour la réhabilitation d'ouvrages.

Le projet MICRO visait à débloquer les derniers verrous limitant l'utilisation de ces matériaux, et affichait les objectifs principaux suivants :

- Développer et évaluer de nouveaux composites de renforcement plus écologiques afin d'anticiper les évolutions probables des réglementations européennes en matières d'environnement et d'hygiène-sécurité. Ont ainsi été considérés dans ce projet ; i) un système composite de référence déjà couramment utilisé sur chantier (tissu de fibres de carbone / résine époxy), et ii) un système composite à empreinte environnementale réduite (tissus de fibres végétales / résine biosourcée).
- Mieux appréhender la durabilité de ces systèmes à travers une approche expérimentale multi-échelle et une exploitation fiabiliste des résultats, de manière à garantir leurs performances pendant toute la durée de vie de l'ouvrage renforcé.
- Proposer aux maîtres d'ouvrages des règles de dimensionnement basées sur cette démarche probabiliste, et valider la requalification des ouvrages.

### C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

*Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).*

Au moment de la soumission du projet en 2015, nous avons fait le constat que le patrimoine bâti Français était vieillissant et que nombre d'infrastructures nécessitaient des travaux de maintenance spécialisés, 1% des ouvrages routiers présentant même une déficience structurelle grave requérant des réparations urgentes [1]. Ce constat a été depuis confirmé par plusieurs rapports d'information parlementaires [2-3] ainsi que par la survenue de catastrophes comme l'effondrement du pont de Mirepoix sur Tarn en 2019 ou celui de

bâtiments d'habitations vétustes à Marseille en 2018, et il dépasse largement le cadre national comme en témoigne la catastrophe du pont de Gêne en Italie en 2018.

Dans ce contexte, le renforcement structural par collage externe de matériaux composites s'impose depuis une vingtaine d'année comme une solution de choix pour réparer et réhabiliter des structures anciennes et prolonger leur durée de vie. Le large développement de cette méthode est fondé sur les remarquables performances mécaniques des composites, alliées à leur absence de corrosion, à leur légèreté et à leur facilité d'installation sur chantier [4-5]. Cependant, des incertitudes subsistent sur la durabilité et le comportement à long terme de ces matériaux et de l'interface collé béton/composites dans l'environnement de service [6]. En outre, la plupart des études de durabilité existantes sont basées sur des approches déterministes et ne prennent pas compte l'influence de la variabilité de facteurs multidimensionnels liés aux contraintes environnementales (température, humidité), au procédé de réparation et aux matériaux eux-mêmes sur la durée de vie garantie des ouvrages réparés. Il n'existe pas ou très peu de travaux de recherche traitant ces problématiques de la durabilité sous l'angle fiabiliste même s'il faut toutefois évoquer ceux de KARBHARI et al. (2009) ou de BIGAUD et al. (2012) [7-8]. Une approche fiabiliste permettant d'évaluer à tout instant la probabilité de défaillance de l'ouvrage sur l'ensemble de sa durée de vie restait donc à développer et constituait l'un des objectifs majeurs du projet MICRO.

Par ailleurs, les systèmes composites traditionnels utilisés en construction sont généralement constitués de fibres synthétiques (carbone, verre et aramide) associées à des matrices polymères therm durcissables d'origine pétro-sourcée, et présentent donc un lourd impact environnemental. D'autres systèmes composites constitués de matrices biosourcées et de fibres naturelles (végétales ou à base de basalte) ont fait leur apparition [9-10]. Ils sont déjà présents dans des secteurs industriels comme l'automobile et sont maintenant envisagés en génie civil [11], mais le vieillissement humide de ces composites pose également questionnement [12]. Il paraissait donc important de développer dans ce projet des systèmes de renforcement à empreinte environnementale réduite et répondant aux spécifications de mise en œuvre inhérentes aux chantiers de construction, et d'appliquer également l'étude de durabilité fiabiliste évoquée précédemment sur ces matériaux innovants.

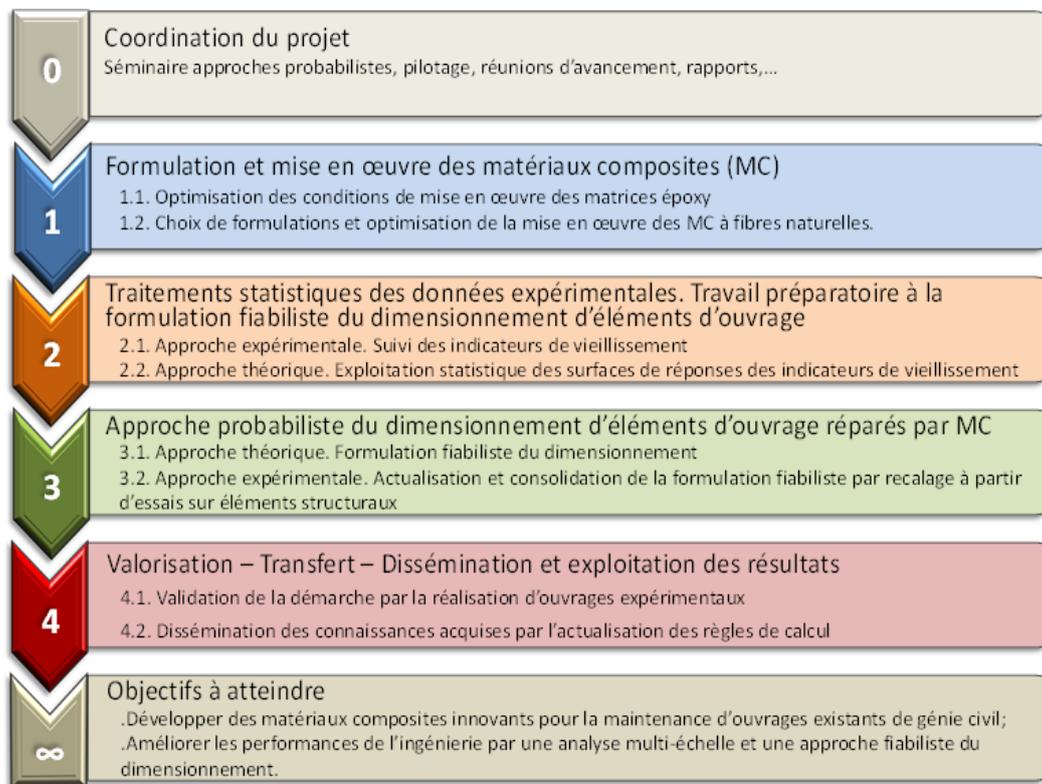
C'est pourquoi les enjeux initiaux de ce projet ont été les suivants :

- Développer des composites à moindre impact environnemental destinés au renforcement structural,
- Proposer une méthodologie d'étude de la durabilité des renforts composites basée sur un plan d'expériences intégrant les principaux facteurs d'influence rencontrés dans les conditions de services,
- Exploiter les résultats expérimentaux par une approche fiabiliste afin de pouvoir prédire leurs performances pendant toute la durée de vie de l'ouvrage renforcé et proposer des règles de dimensionnement afin de valider la requalification des ouvrages

Un objectif complémentaire d'optimisation de la maintenance des ouvrages par la fiabilité était affiché initialement dans le projet. Cependant, en raison de la réduction initiale des moyens alloués, cet axe n'a pas été abordé. Néanmoins, le programme expérimental de l'étude de durabilité a été enrichi (fabrication de lots de matériaux supplémentaires) de manière à pouvoir suivre le vieillissement naturel d'échantillons exposés en extérieur sur une durée longue dépassant la période du projet (durée totale de 10 ans envisagée).

### C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

La réalisation du programme de recherche s'est appuyée sur 4 tâches spécifiques (tâches 1 à 4 décrites dans la figure ci-dessous) réparties entre les différents partenaires du projet.



- La *tâche 1*, a principalement porté sur le développement du matériau composite innovant fibres naturelles/matrice biosourcé (noté système biosourcé par la suite). Ce travail a été principalement réalisé par IMP –INSA Lyon (*tâche 1.1.* - mise au point de la matrice époxy biosourcée) et par ARMINES (*tâche 1.2.* - étude sur le choix du tissu de fibres naturelles et l'influence des traitements de surface des fibres sur les propriétés finales des composites) dans le cadre de 2 post-docs de 6 mois entre février et août 2016 [Viretto, 2016 ; Lacoste, 2016].
- La *tâche 2*, constituant le cœur du projet, a concerné l'étude de durabilité des composites de renforcement (système de référence carbone/epoxy pétrosourcé et système biosourcé) à travers une approche expérimentale multi-échelle (*tâche 2.1*) et à travers une exploitation statistique et fiabiliste des résultats expérimentaux (*tâche 2.2*). Ces recherches ont été menées par le LMC<sup>2</sup> et l'UGE/Ifsttar dans le cadre de 2 thèses financées par l'ANR et une thèse hors-financement [Zombre, 2019 ; Chlela, 2019 ; Nguyen, 2021]. En parallèle, le LTDS a travaillé sur le développement de capteurs piézoélectriques destinés au suivi de la polymérisation de la matrice polymère et au suivi de l'endommagement du composite, dans le cadre d'une thèse hors financement ANR [Zhang, 2020].
- Dans la *tâche 3*, les lois de fiabilité précédemment établies aux échelles du composite seul et de l'interface composite-béton ont été introduites dans le formalisme du dimensionnement d'éléments de structure renforcés par composites (*tâche 3.1*). Cette

partie a été réalisée par le LARIS en collaboration avec l'UGE/Ifsttar et le LMC<sup>2</sup> dans le cadre d'un post-doc de 12 mois financé par l'ANR [Yan, 2020]. Le L2MGC a également mené des recherches visant à vérifier l'efficacité du renforcement/de la réparation par composites collés pour prolonger la durée de vie d'éléments de structures endommagés (poutres en béton armé, colonnes) dans le cadre d'une thèse hors financement ANR [Limaïem, 2019].

- La **tâche 4** visait initialement à i) valider ou actualiser la formulation fiabiliste du comportement à long terme des ouvrages renforcés par composites établie précédemment dans la tâche 3, en s'appuyant sur des relevés d'inspections réalisés sur ouvrages réels, et ii) à définir une stratégie d'inspection et de maintenance optimisée par la fiabilité. L'ANR ayant supprimé le financement du post-doc qui devait être consacré à cette partie spécifique du projet, ce travail n'a pas été réalisé et la tâche 4 a été recentrée sur un effort collectif de valorisation des résultats, notamment à travers l'organisation d'une conférence internationale CICE 2018 qui s'est tenue à l'UGE/Ifsttar en juillet 2018.

Par ailleurs, la gestion administrative du projet (qui constitue la **tâche 0**) a principalement été assurée par UGE/Ifsttar et LMC<sup>2</sup>, avec l'appui du LARIS. Dans ce cadre, 9 réunions de consortium rassemblant l'ensemble des partenaires et des industriels ont été organisées sur la durée du projet (entre janvier 2016 et mars 2021).

Le paragraphe suivant décrit les principaux résultats obtenus à l'issue des travaux menés dans les tâches 1 à 4.

## C.4 RESULTATS OBTENUS ET EXPLOITATION DES RESULTATS

### Tâche 1. Formulation et mise en œuvre des matériaux composites

#### *Tâche 1.1. Développement et mise en œuvre d'une matrice époxy bio-sourcée*

Le laboratoire IMP a formulé une matrice époxy biosourcée qui pourrait se substituer dans le futur aux matrices pétrosourcées utilisées actuellement en construction.

- La stratégie retenue a consisté à caractériser de manière approfondie le système commercial de référence Foreva Epx TFC en termes de composition chimique, de réactivité (suivi de viscosité, temps de gel,  $T_{max}$ ), de propriétés thermo-mécaniques (température de transition vitreuse  $T_g$ , modules  $E'$  et  $E''$ ) et de vieillissement hygrothermique ( $W_{H_2O}$ ). Il s'agit d'un système époxy bi-composant très complexe, avec une partie A 'résine' constituée principalement de Diglycidyl-éther de bisphénol A (DGEBA) et de charges minérales (calcite), et une partie B 'durcisseur' constituée d'un mélange d'amine dont la principale est une polyetheramine (jeffamine T403). A l'issue de ces nombreuses caractérisations, un cahier des charges a été établi (tableau 1), répertoriant les propriétés ciblées pour la mise au point d'une formulation biosourcée.
- Compte tenu des quantités importantes de matière dont il fallait disposer pour réaliser le plan d'expérience prévu dans la tâche 2 du projet (étude de durabilité), il a fallu se tourner vers des produits biosourcés déjà disponibles commercialement. La phase de sélection a donc consisté à formuler judicieusement des mélanges résine/durcisseur à partir de 18 résines et 3 durcisseurs amines biosourcés disponibles sur le marché, puis à caractériser ces formulations selon le protocole établi pour le système commercial TFC.

- Au final une formulation s'est dégagée de l'étude en présentant d'excellentes performances tant du point de vue de la mise en œuvre/réactivité que sur les propriétés après réticulation. Cette formulation est composée de deux monomères biosourcés : une résine DGEBA synthétisée à partir d'épichlorhydrine biosourcée (EnviPOX G520, Spolchemie) et un durcisseur phenalkamine (NX 5619, Cardolite) synthétisé à partir de cardanol, lui-même issu de noix de cajou. Ses performances sont reportées dans le tableau 1, en comparaison avec celles de la matrice TFC. Ce système a ensuite été associé à des fibres de lin pour réaliser les matériaux composites à empreinte environnementale réduite nécessaires dans la suite du projet.

**Tableau 1 :** Caractérisation du système commercial TFC (23 wt% calcite) et de la formulation biosourcée développée au cours du projet (0 wt% calcite)

	T <sub>max</sub> (°C) DSC	Pot life 25°C/40°C	t <sub>gel</sub> 40 °C	T <sub>g</sub> (°C) DSC	T <sub>α</sub> (°C) DMA 1Hz	E' (GPa) 20°C	E' (MPa) T <sub>α</sub> +30°C	W <sub>H2O</sub> (%) 25°C
<b>TFC</b>	117	1 h / 30'	1 h 20	50	59	3,85	21,9	6
<b>Bio époxy</b>	119	ND / 90'	2 h 20	54	61	2,78	8,8	0,87

### *Tâche 1.2. Formulation et optimisation de la mise en œuvre des matériaux composites à fibres naturelles*

L'objectif de la sous-tâche 1.2 réalisée par ARMINES était de rechercher un tissu innovant et éco-responsable en substitution du tissu en fibres de carbone actuellement utilisé pour la réparation d'ouvrages.

- Des tissus en fibres de basalte ont montré un bon potentiel en termes de performances mécaniques mais ne présentant pas de caractère bio-sourcé, le choix s'est porté sur des tissus unidirectionnels en fibres de lin aux propriétés mécaniques cependant inférieures au composite de référence carbone/époxy. C'est pourquoi une étude portant sur l'amélioration de l'interface fibre de lin/matrice époxy a été menée.
- La stratégie de compatibilisation des tissus de lin s'est focalisée sur le greffage chimique de différents silanes présélectionnés pour leur caractère hydrophobe (n-octadecyl(triethoxy) silane noté C18, [3-(triethoxysilyl)propyl] amine noté PA, et [3-(triethoxysilyl)propyl] tetrasulfide noté PS) ou pour leur réactivité (aminopropyltriethoxy-silane noté APS, et glycidoxypropyltriethoxy-silane noté GPS) vis-à-vis de la résine époxy.

Dans un premier temps, un procédé par trempage a été utilisé. Les conditions de traitement (temps, concentration de la solution de silane) ont été optimisées pour chaque silane considéré. Une amélioration de l'adhésion interfaciale a été remarquée pour le traitement GPS et une forte hydrophobation des tissus de lin a été obtenue par les silanes C18 et PS. En revanche, les performances mécaniques des composites renforcés par ces tissus n'ont pas montré d'amélioration significative du fait des fortes contraintes

appliquées sur les fibres naturelles lors du procédé de trempage (gonflement/retrait, hydrolyse). La mise en place d'un procédé de traitement par foulardage, issu de l'industrie textile, a permis de traiter efficacement les tissus de lin avec les silanes sélectionnés. Une méthodologie par tensiométrie a pu être développée par ailleurs pour caractériser l'efficacité du greffage chimique sur les fibres de lin.

- La caractérisation des propriétés mécaniques des composites lin/époxy à l'état initial a montré une augmentation de la rigidité et de la résistance en traction transversale pour les composites renforcés par des tissus de lin traités comparé aux tissus de lin non traités, notamment avec le traitement par le silane C18. Des essais de vieillissement par immersion dans l'eau sur 3 mois ont montré une limitation de la prise en eau pour ces composites à fibres traitées. De manière générale, le vieillissement par immersion induit une diminution des propriétés mécaniques des composites, mais les pertes de résistances en traction sont moindres lorsque les fibres de lin sont traitées que lorsqu'elles restent brutes.

Les trois molécules de couplage (GPS, C18 et PS) appliquées sur des tissus par foulardage ont donc révélé une action efficace sur l'interface fibre/matrice en augmentant les propriétés mécaniques des composites lin/époxy à l'état initial et limitant l'endommagement des composites dans des conditions de vieillissement sévères. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer la tenue en service des bio-composites renforcés par des fibres naturelles, et en particulier pour leur utilisation dans la réparation d'ouvrages.

## **Tâche 2. Traitement statistique des données expérimentales. Travail préparatoire à la formulation fiabiliste du dimensionnement d'éléments d'ouvrages.**

Cette partie a constitué le cœur du projet MICRO. L'objectif principal a été de mieux appréhender la durabilité et la fiabilité des réparations par composites collés à travers **une analyse multi-échelle** des mécanismes de vieillissement et **une approche fiabiliste**. La relative méconnaissance de la fiabilité et des facteurs complexes régissant la durabilité de ces réparations est en effet considérée comme le principal verrou par les praticiens.

### *Tâche 2.1. Approche expérimentale – Suivi des indicateurs de vieillissement*

- **2 systèmes de renforcement composites ont été étudiés en parallèle.** Le système de référence TFC Foreva (matrice époxy /fibres de carbone), déjà couramment utilisé sur chantier par la société Freyssinet, a été étudié au LMC<sup>2</sup> dans le cadre de la thèse de S. Zombre. Le système de renforcement composite innovant à empreinte environnementale réduite (matrice biosourcée et fibres de lin), précédemment développé dans la tâche 1 du projet, a quant à lui été étudié à l'UGE/Ifsttar dans le cadre de la thèse de R. Chlela. Une thèse additionnelle hors financement ANR (C. Nguyen) a ensuite permis de compléter l'étude du vieillissement à long terme de ces 2 systèmes et d'évaluer l'impact des traitements de surface du béton sur la durabilité des collages béton/composites.
- Un plan d'expériences optimisé a démarré au printemps 2017, et consistait à étudier la durabilité des 2 systèmes soumis à des vieillissements accélérés (VA) (6 conditions hygrothermiques différentes) et à un vieillissement naturel (VN) extérieur en région Lyonnaise. Les investigations réalisées sur une durée totale de 2 ans pour les VA et 3 ans pour VN, ont permis de suivre les évolutions au cours de ces vieillissements de plusieurs indicateurs de performances mécaniques des stratifiés composites (propriétés

en traction et en cisaillement interlaminaire CIL) et des interfaces béton/composites (contrainte d'adhérence par essai de traction directe). Des caractérisations complémentaires par différentes techniques d'analyses microstructurales et physico-chimiques (gravimétrie, tomographie X, MEB, calorimétrie différentielle à balayage, spectroscopie IRTF, émission acoustique) ont également permis de relier ces évolutions de performances mécaniques à des phénomènes d'endommagement ou à des évolutions microstructurales à différentes échelles du composite (au sein de la matrice polymère, au niveau des fibres, ou à l'interface fibres/matrice) ou à l'interface béton/composite.

- **Concernant le système traditionnel (matrice époxy/fibres de carbone)**, les analyses microstructurales réalisées sur les composites vieillissés en conditions accélérées montrent que les dégradations interviennent principalement au sein de la matrice (dégradation thermique lors des expositions aux températures élevées de 40 et 60°C, plastification du polymère lors des vieillissements par immersion dans l'eau) ou à l'interface fibre/matrice (décohésions localisées). Ces endommagements induisent des évolutions notables mais limitées des propriétés mécaniques en traction et CIL par rapport à l'état initial, essentiellement en milieu immergé (diminution de la résistance et du module en traction allant jusqu'à 12% et 18% respectivement, diminution de résistance CIL jusqu'à 10%). L'interface collée béton/composite est en revanche plus impactée par les vieillissements accélérés, avec une diminution de la résistance à l'arrachement pouvant atteindre 70% en immersion à 60°C, et un mode de rupture qui passe d'un mode cohésif dans le béton à un mode adhésif. De manière générale, le vieillissement naturel induit des évolutions limitées des indicateurs de performances, y compris de la résistance à l'arrachement de l'interface collée béton/composite, suggérant que les vieillissements accélérés, en particulier par immersion, sont sévères et peu représentatifs des conditions de service.
- **Pour le système « vert » (matrice bio-sourcée/fibres de lin)**, les analyses microstructurales montrent que les vieillissements accélérés conduisent à des dégradations des fibres de lin (thermo-dégradation ou hydrolyse de constituants peu cristallisés comme l'hémicellulose ou la pectine), et révèlent au contraire une bonne résistance de la matrice biosourcée (augmentation de Tg liée à une post-réticulation aux conditions de températures élevées, absence de phénomènes d'hydrolyse).

Les vieillissements par immersion induisent en particulier un gonflement important des composites résultant de l'absorption d'eau par les fibres végétales, et conduisent en quelques mois à des fissurations aux interfaces fibres/matrice et dans la matrice située au sein des mèches de fibres. Ces endommagements s'accompagnent de chutes importantes des indicateurs de performances mécaniques du stratifié (pertes de résistance et de raideur en traction pouvant atteindre respectivement -20% et -40%, et perte de résistance CIL pouvant atteindre -30% après 24 mois) et de l'interface béton/composite (pertes de résistance allant jusqu'à -70% après 24 mois en cas d'immersion à 60°C, et évolution du mode de rupture d'un mode cohésif dans le support béton à un mode adhésif à l'interface). Les mécanismes mis en jeu ici semblent à nouveau peu représentatifs du vieillissement naturel, car ce dernier n'induit que des évolutions très modérées des indicateurs de performance après 24 mois d'exposition (pas d'effet sur les propriétés en traction, perte limitée à 15% pour la résistance CIL et la résistance à l'arrachement de l'interface béton/composites).

- De manière générale, les évolutions normalisées des indicateurs de performances dans les différentes conditions de vieillissement (en dehors de l'immersion directe à haute température) sont apparues assez comparables pour les deux systèmes étudiés, et même plus favorables pour le système bio-sourcé en ce qui concerne la résistance à l'arrachement de l'interface béton/composite. **Ce résultat prometteur en termes de durabilité semble lié à la très bonne tenue environnementale de la résine époxy bio-sourcée DGEBA /phénalkamine développée dans le cadre du projet MICRO.**
- Les investigations ont également montré que l'état de surface du béton a une influence notable sur la durabilité de l'interface composite/béton, en particulier lors des vieillissements accélérés par immersion. Les traitements de surface conduisant à une rugosité élevée du béton (comme le sablage) augmentent la résistance à l'arrachement avant vieillissement, et tendent à retarder l'apparition de ruptures adhésives.

Ces différentes investigations expérimentales ont permis de constituer une vaste base de données sur la durabilité des 2 systèmes. Une exploitation statistique a été ensuite réalisée en tâche 2.2. On notera par ailleurs qu'il est prévu de continuer le suivi des propriétés des 2 systèmes exposés au vieillissement naturel sur une période de 10 ans après la fin du projet.

### *Tâche 2.2 "Approche théorique. Exploitation statistique des surfaces de réponses des indicateurs de vieillissement"*

Cette tâche visait à estimer la durée de vie garantie sous conditions d'usage ou nominales, de composites ou systèmes composite-béton vis-à-vis de sollicitations mécaniques diverses (traction, cisaillement interlaminaire, arrachement) à partir de l'exploitation des données expérimentales précédentes. La notion de "garantie" revient à associer une valeur de probabilité à l'hypothèse d'atteinte d'une durée de vie pour un seuil de performance visé. Ce travail a été réalisé en collaboration entre le LARIS, l'Ifsttar/UGE et le LMC<sup>2</sup>.

Pour estimer la durée de vie des PRF, deux voies ont ainsi été explorées :

- La première s'est appuyée sur la construction d'un modèle physique à partir des données des essais réalisés dans la sous-tâche 2.1. Différents modèles physiques ont été testés ; tous sont construits sur la forme générale  $\frac{P(t,T,H)}{P_{0,r\grave{e}f}} = R_1(T,H) + R_2(T,H) \times \ln(t+1)$  où  $P(t,T,H)$  est l'indicateur de performance suivi dans le temps sous conditions de température  $T$  et d'humidité relative  $H$ .  $P_{0,r\grave{e}f}$  est ce même indicateur au temps initial sous les conditions de références, prises ici à 20°C et 50% d'humidité relative.  $R_1(T,H)$  et  $R_2(T,H)$  représentent respectivement l'ordonnée à l'origine (qui peut être considérée comme différente de 1 si des phénomènes post-réticulation interviennent) et le taux de dégradation (adapté à l'échelle logarithmique) pour les conditions  $(T,H)$ . Les modèles particuliers de ces deux fonctions  $R_1$  et  $R_2$  peuvent être sélectionnés parmi les lois de Peck ou d'Eyring I et II après identification des facteurs expliquant les variabilités observées expérimentalement. Dans cette approche basique, c'est le paramètre  $P_{0,r\grave{e}f}$  qui sera probabilisé et propagera son incertitude dans le modèle. Cette approche présuppose qu'un grand nombre d'essais soient disponibles pour identifier la loi de distribution. Considérant la possible limitation du nombre de données issues de l'observation, nous

avons proposé un prétraitement des données observées par actualisation bayésienne<sup>1</sup> dont l'intérêt est d'enrichir notre base de données expérimentales par des valeurs dites "non observées", et, de fait, de réduire les incertitudes d'ajustement des modèles de dégradation et d'accélération. La première voie présentée ci-dessus a également pour limite de ne pas fournir de formulation explicite des distributions des durées de vie et requiert donc des simulations nombreuses pour reconstruire les lois statistiques.

- Pour contourner ce problème, une seconde voie pour l'estimation de la durée de vie des PRF a été proposée. Elle s'appuie sur le concept des processus stochastiques. La voie choisie a été de développer une forme particulière de processus stochastique à base de distribution exponentielle, et fondée plus particulièrement sur celle de Tweedie, dans une tentative de proposer une approche plus générale intégrant en une seule analyse les processus de Wiener, Gamma et Inverse Gaussien qui sont les plus représentés dans la littérature. Des formes explicites approximées des densités de distribution de la performance à chaque pas de temps et, surtout, de la densité de distribution des durées de vie existent. Elles sont exploitables pour la détermination directe de différents indicateurs de la durée de vie (MTBF,  $u^{\text{th}}$ -quartile). La construction de ces formes explicites requiert l'identification d'une vingtaine de paramètres, identification réalisée par optimisation en deux étapes suivant une approche robuste de type EM (Expectation-Maximization).

### **Tâche 3. Approche probabiliste du dimensionnement d'éléments d'ouvrage réparés par matériaux composites**

#### *"Approche théorique. Formulation fiabiliste du dimensionnement"*

Sur la base de l'identification du processus stochastique Tweedie réalisée en tâche 2.2, une étude de la calibration de quatre codes de dimensionnement internationaux (ACI 440 2R-17, TR55, Fib Bulletin 40, AFGC) a été conduite. Redéfinissant en termes statistiques la notion du seuil de performance acceptable pour chacun des quatre codes investigués, il a été possible de proposer de nouveaux coefficients / facteurs de réduction environnementaux pour les PRF à base de fibres de lin. Plus précisément, des abaques sont proposés pour identifier les valeurs des coefficients à utiliser selon la durée de vie à garantir. En cela, nous faisons évoluer le paradigme utilisé dans les codes existants. Notre approche a également pour originalité de proposer une approche qualifiable de "probabiliste complète" (ou "fully-probabilistic") par opposition à l'approche semi-probabiliste aujourd'hui adoptée.

#### **Etudes complémentaires réalisées dans le cadre des tâches 2 et 3 (L2MGC Cergy, et LTDS)**

- **Les travaux menés au L2MGC** avaient pour objectif « *d'étudier la possibilité d'allonger la durée de vie d'une structure en béton endommagée par un système composite collé, efficace, facile, peu coûteux et surtout moins polluant* », et se sont déroulés dans le cadre de la thèse de M. Limaiem en adoptant la démarche suivante :
  - Une étude comparative a été réalisée entre 3 produits composites (systèmes traditionnels carbone/époxy commercialisés par Freyssinet et Sika, et système « vert » matrice époxy

---

<sup>1</sup> L'échantillonnage des données non observées est réalisé par une méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov avec un opérateur de rejet-acceptation fondé sur le Maximum de l'A Posteriori.

bio-sourcée/fibres de lin développé dans le projet MICRO) et leur efficacité à renforcer le béton. Ce travail a mis en exergue la nécessité d'utiliser 2 plis pour le composite bio-sourcé alors qu'un seul pli est suffisant pour les composites traditionnels pour obtenir un niveau de réparation quasi-équivalent. Ceci a été adopté par la suite.

- Une étude sur l'efficacité de la réparation d'un béton endommagé mécaniquement par fissuration à des niveaux se situant avant et après la déformation au pic a été menée. Cette étude a ainsi montré que les composites traditionnels permettent de restituer et d'améliorer les propriétés mécaniques de façon un peu plus significative que le composite bio-sourcé.
- La durabilité a été envisagée selon l'angle gel/dégel. Les colonnes en bétons élaborées selon l'EN206-1 (4% d'air occlus) ont été soumises à 100, 200 et 300 cycles gel/dégel puis réparées avec les différents systèmes composites. De même, des colonnes en bétons réparées ont été soumises à des cycles gel/dégel (100, 200 et 300) puis testées pour estimer les propriétés résiduelles. La réparation des bétons exposées à un environnement gélif par le composite bio-sourcé est apparue satisfaisante et comparable à celle des composites traditionnels.
- Une modélisation analytique a été réalisée pour la prédiction du comportement en compression des différentes formulations de bétons réparés par composites.
- Le L2MGC a également réalisé des essais sur poutres endommagées, en vue d'étudier la possibilité de réparer des poutres en béton armé ayant subi un endommagement mécanique en flexion 4 points. Ces poutres avaient été confectionnées et endommagées dans le cadre de projet ANR ECOREB en juin 2015, puis avaient été exposées à l'air libre dans la cour de CY Université jusqu'à Mai 2017. Elles ont ensuite été réparées avec le composite TFC Foreva de Freyssinet, puis maintenues à l'air libre pendant 3 mois, et finalement testées vis-à-vis de la flexion 4 points en décembre 2017. L'application du composite sur la face tendue ainsi que sur les faces latérales a ainsi permis de restaurer la rigidité initiale des poutres et d'améliorer la résistance à la flexion.
- **Les travaux menés au LTDS à l'EC Lyon** ont porté sur la « *Fabrication intelligente et surveillance de la santé de composites lin/résine bio-époxy pour la réparation des infrastructures à l'aide de capteurs PZT* ». Dans ce travail, une technique de surveillance en continu a été mise au point à partir d'éléments piézoélectriques intégrés dans les stratifiés composites (disque PZT de 0.2 mm d'épaisseur et de diamètre 7 mm). Dans la perspective d'une mise en œuvre in-situ sur ouvrage, une attention particulière a été portée à la méthode d'intégration du capteur : soit à cœur dans la structure composite, soit collé en surface.
- Dans le contexte d'une intégration permanente des capteurs dans le composite lors de la mise en œuvre de la solution de réparation d'un ouvrage, cette instrumentation permet de suivre l'évolution du composite durant deux phases distinctes de son cycle de vie : la polymérisation à température ambiante, et le vieillissement sous contraintes. Le mécanisme de polymérisation de la résine bio-sourcée renforcée par fibres de lin est suivi in-situ (fabrication intelligente) par la mesure de l'impédance électrique. Après durcissement de la matrice, les capteurs sont utilisés comme détecteurs de dommages pour la surveillance de la santé structurelle (SHM) ou pour suivre la prise d'humidité.
- Durant la première phase du cycle de vie, les résultats du durcissement comparés à l'analyse DMA montrent que les cellules piézoélectriques intégrées permettent de

surveiller in situ la progression de la réaction de polymérisation de la matrice. Ensuite, lors la phase de service du composite en tant qu'élément de réparation de l'ouvrage, cette technique s'est avérée fiable pour détecter le signal préliminaire de l'état critique du composite en comparaison avec l'émission acoustique et la corrélation d'images numériques (DIC). Par conséquent, cette méthode de surveillance semble bien adaptée pour garantir des performances structurelles à long terme des composites destinés au renforcement/à la réparation des infrastructures.

#### Tâche 4. Valorisation – Transfert – Dissémination des résultats

Comme indiqué dans la partie C.3., cette tâche a été recentrée exclusivement sur des activités de valorisation, car la partie concernant la réalisation d'ouvrages expérimentaux instrumentés afin de suivre les performances des ouvrages et d'établir des plans stratégiques de maintenance a été rendue impossible par la réduction des moyens demandés notamment humains. Toutefois, grâce à un programme expérimental très ambitieux et enrichi de nombreux essais complémentaire, nous avons à notre disposition une base de données expérimentales robuste, susceptible d'alimenter l'actualisation des règles de calcul et de dimensionnement.

La valorisation des travaux est en cours car des travaux doivent encore être publiés. Toutefois de nombreuses actions de valorisation ont déjà été engagées :

- L'ensemble des membres ont participé à la conférence internationale CICE 2018 co-organisée par l'UGE/IFSTTAR et le LMC<sup>2</sup> et à 10 séminaires du projet (plus 3 formations organisées par le LARIS).
- 2 thèses entièrement financées par l'ANR ont été soutenues
- 3 autres thèses ont alimenté les travaux de l'ANR
- 27 publications ont été réalisées à ce jour

#### C.5 DISCUSSION

*Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.*

- **Au cours du projet, plusieurs avancées majeures étaient attendues et ont été réalisées :**
  - **Bilan des potentialités de matériaux innovants à faible impact environnemental,**
  - **Meilleure connaissance des mécanismes de vieillissement des composites** dans un environnement spécifique au domaine de la construction et du génie civil,
  - **Traitement statistique** des mesures d'évolution des propriétés des composites seuls et de l'interface collée composite-béton en conditions de vieillissement réelles et accélérées, et établissement des lois comportementales et des lois de fiabilité,
  - **Développement d'une méthode probabiliste d'étude des matériaux.**
  - **Définition des variables** à considérer dans la formulation fiabiliste des lois de comportement à partir de deux approches complémentaires expérimentale et statistique, pour aboutir à la modélisation

• **Nous avons partiellement pu avancer dans les objectifs suivants :**

- Modélisation afin d'**optimiser le dimensionnement des structures réparées,**
- **Actualisation de la fiabilité par les résultats d'inspections,**
- Intégration des résultats dans les codes de calcul afin de **calibrer les coefficients de sécurité,**
- **Diffusion des connaissances** et établissement d'un **protocole intelligent de suivi des ouvrages.**

• A l'issue du projet, **les partenaires académiques continuent à travailler ensemble** afin de lever quelques verrous restant à franchir :

- Au niveau matériau, ARMINES continue ses recherches sur les traitements des fibres de lin,
- L'UGE/IFSTTAR et le LMC<sup>2</sup> poursuivent les essais de vieillissement naturel des composites (échéances 5 et 10 ans),
- L'UGE/IFSTTAR et le LMC<sup>2</sup> souhaitent réaliser des essais à l'échelle poutre puis ouvrage. Les capteurs développés par l'Ecole Centrale de Lyon seront alors utilisés,
- Le LARIS continue d'exploiter les nombreuses données de l'UGE et du LMC<sup>2</sup> afin d'optimiser la connaissance de la durée de vie,
- Une réflexion est en cours sur l'intégration de résultats dans les codes de calcul.

• **Les perspectives du projet sont les suivantes :**

- Diffusion d'un protocole de vieillissement des matériaux de renfort
- Sélection des meilleures conditions de vieillissement accéléré
- Amélioration des produits de renfort
- Diffusion de l'approche fiabiliste

• **Les impacts scientifiques du projet sont les suivants :**

- Approche fiabiliste intéressante pour de nombreux domaines du génie civil
- Méthodes d'essais plus reproductibles
- Conditions de vieillissement accéléré mieux maîtrisées

• **Au niveau industriel, 2 possibilités ont été démontrées :**

- Intérêt des composites à moindre empreinte environnementale
- Intérêt des capteurs piézoélectriques pour le suivi de polymérisation sur ouvrage

Au niveau sociétal, nous avons tout intérêt pour l'environnement à réparer au lieu de remplacer des ouvrages et ce projet a démontré le bon comportement des matériaux de réparation dans le temps.

## C.6 CONCLUSIONS

Depuis 2015, nous avons établi un consortium entre 7 laboratoires universitaires ou semi-industriel aux thématiques différentes (chimie des matériaux et optimisation ; comportement mécanique des matériaux du génie civil et ingénierie ; sûreté de fonctionnement et aide à la décision). Le financement de l'ANR nous a permis de renforcer ce partenariat et a permis un véritable travail collaboratif de ces 7 laboratoires, avec l'accompagnement de plusieurs industriels (Freyssinet, Sika, Depestelle). Ce consortium a permis de créer une vraie synergie, dans laquelle chaque partenaire a pu apporter ses compétences propres et son savoir-faire.

Le programme expérimental initial était très ambitieux. A titre d'exemple, nous avons planifié plus de 900 essais mécaniques au cours de la tâche 2, afin de pouvoir exploiter les résultats selon une approche probabiliste. Afin de procéder à des vérifications de résultats et de méthodes d'analyse, nous avons enrichi notre programme au cours du projet de plus de 480 essais mécaniques. En parallèle, nous avons mené de nombreux essais physico-chimiques (suivi gravimétrique, DSC, Tomographie ...).

A l'issue de ces 6 années de recherches financées par l'ANR, nous pouvons affirmer que les principaux objectifs initiaux du projet ont bien été atteints, avec notamment une meilleure connaissance des potentialités de matériaux innovants à faible impact environnemental et des mécanismes de vieillissement des composites du génie civil. Le traitement statistique des données relatives à l'évolution des propriétés des composites seuls et de l'interface collée composite-béton en conditions de vieillissement réelles et accélérées, et l'établissement des lois comportementales et des lois de fiabilité ont pu être menés à terme. Nous avons développé une méthode probabiliste d'étude des matériaux et défini les variables à considérer dans la formulation fiabiliste des lois de comportement à partir de deux approches complémentaires expérimentale et statistique, pour aboutir à la modélisation.

Certains objectifs ont été partiellement atteints et sont toujours en cours de réflexion. Ils font l'objet de travaux en cours et d'études complémentaires : Modélisation afin d'optimiser le dimensionnement des structures réparées, Actualisation de la fiabilité par les résultats d'inspections, Intégration des résultats dans les codes de calcul afin de calibrer les coefficients de sécurité, diffusion des connaissances et établissement d'un protocole intelligent de suivi des ouvrages. A l'issue de ce projet, les partenaires académiques continuent à travailler ensemble afin de lever quelques verrous restants.

A court terme, nous allons poursuivre la valorisation des connaissances acquises sur les systèmes composites à fibres végétales, sur les méthodes d'essais et les conditions de vieillissement accéléré jugées les plus reproductibles, ainsi que sur l'approche fiabiliste, outil très intéressant pour de nombreux domaines du génie civil.

A plus long terme, nous espérons pouvoir étendre les méthodologies développées dans ce projet à d'autres matériaux du génie civil.

## C.7 REFERENCES

- [1] Sétra (Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements), IQOA Ponts, Campagne d'évaluation 2011, *Dossier National*, juillet 2012, 45 pages. [http://piles.cerema.fr/IMG/pdf/2011-IQOAPONTS-Rapport\\_national\\_v0\\_cle5c37ba.pdf](http://piles.cerema.fr/IMG/pdf/2011-IQOAPONTS-Rapport_national_v0_cle5c37ba.pdf)
- [2] Commission de l'aménagement du territoire et du développement durable du Sénat, Les infrastructures routières et autoroutières: un réseau en danger, *rapport d'information n°458*, 2017, 41 pages. <https://www.senat.fr/notice-rapport/2016/r16-458-notice.html>
- [3] Commission de l'aménagement du territoire et du développement durable du Sénat, Sécurité des ponts : éviter un drame, *rapport d'information n°609*, 2019, 148 pages. <https://www.senat.fr/notice-rapport/2018/r18-609-notice.html>
- [4] Hollaway LC. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Constr Build Mater*, 24(12), 2419–45, 2010
- [5] Bank LC. Composites for construction – structural design with FRP materials. John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [6] S. Cabral-Fonseca et al., Durability of FRP - concrete bonded joints in structural rehabilitation: A review, *Int. Journal of Adhesion and Adhesives* 83, 153–167, 2018
- [7] V.M. Karbhari et A.A. Atadero, Sources of uncertainties and design values for field-manufactured FRP, *Composites Structures* 89, 83-93, 2009
- [8] D. Bigaud, O. Ali et E. Ferrier, Comparative durability analysis of CFRP-strengthened RC highway bridges, *Construction and Building Materials* 30, 629-642, 2012
- [9] V. Dhand, G. Mittal, K. Y. Rhee, S-J. Park et D. Hui, A short review on basalt fiber reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180, 2015
- [10] L. Yan, N. Chouw et K. Jayaraman, Flax fibre and its composites - A review, *Compos Part B Eng*, 56, 296-317, 2014.
- [11] A. Hallonet, E. Ferrier, L. Michel et B. Benmokrane, Durability and tensile characterization of wet lay-up flax/epoxy composites used for external strengthening of RC structures, *Construction and Building Materials*, 205, 670-698, 2019
- [12] A. Le Duigou, P. Davies et C. Baley, Exploring durability of interfaces in flax fibre/epoxy micro-composites, *Composites Part A: Appl. Sci. Manufacturing*, 48, 121-128, 2013

## D LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	N°	Titre	Nature	Partenaires (souligner le responsable)
30/08/2016	1	Etude bibliographique de 1ere année de thèse de S. Zombre « Analyse multi-échelle des mécanismes de vieillissement des composites dans un environnement spécifique au génie civil par une approche fiabiliste – Etat de l'art », 25 pages	Rapport	<u>Lyon 1 (LMC2)</u>
16/01/2017	2	Rapport de post doc d'Amandine Viretto « Sélection et Optimisation des conditions de mise en œuvre des matrices époxy », 58 pages	Rapport	<u>INSA Lyon (IMP)</u>
28/04/2017	3	Rapport de post doc de Clément Lacoste « Formulation et optimisation de la mise en œuvre des matériaux composites à fibres naturelles », 57 pages	Rapport	<u>ARMINES</u>
21/06/2017	4	Résultats d'essais « caractérisation des matériaux en vue du choix du système bio »	Rapport	<u>EC Lyon (LTDS)</u>
08/09/2017	5	Compte rendu intermédiaire du projet MICRO à 18 mois	Rapport	<u>UGE (coordinateur)</u>
17 au 19/07/2018	6	Organisation d'un mini symposium lors de la conférence CICE 2018 à Paris (17-19 juillet 2018) – Proceedings en ligne sur le site de l'IIFC (International Institute for FRP composites in Construction) <a href="https://www.iifc.org/publications/proceedings-iifc-official-conferences/">https://www.iifc.org/publications/proceedings-iifc-official-conferences/</a>	Evènement	<u>UGE et LMC<sup>2</sup></u> tous partenaires
30/07/2018	7	Compte rendu intermédiaire du projet MICRO à 30 mois	Rapport	<u>UGE (coordinateur)</u>
10/06/2019	8	Soutenance et mémoire de thèse de Mariem Limaiem « Etude de durabilité des ouvrages en béton réparés par des matériaux composites » <a href="http://www.theses.fr/2019CERG1025">http://www.theses.fr/2019CERG1025</a>	Rapport	<u>L2MGC - Univ Cergy</u>
09/07/2019	9	Soutenance et mémoire de thèse de Serge Zombre « Durabilité des matériaux composites dans un environnement Génie Civil : expérimentation multi-échelle et analyse statistique » <a href="https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02312031">https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02312031</a>	Rapport	<u>Lyon 1 (LMC<sup>2</sup>)</u> UGE
29/11/2019	10	Soutenance et mémoire de thèse de Robert Chlela « Durabilité d'un système composite bio-source (matrice époxyde-fibres de lin) pour applications de renforcement structural : approches expérimentale et fiabiliste » <a href="https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02894653">https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02894653</a>	Rapport	<u>UGE (coordinateur)</u> LMC <sup>2</sup> - Lyon 1
18/12/2020	11	Soutenance et mémoire de thèse de Minfa Zhang, « Composite patches for enhancing application on civil infrastructures » <a href="http://www.theses.fr/s275348">http://www.theses.fr/s275348</a>	Rapport	<u>EC Lyon (LTDS)</u>
21/01/2021	12	Soutenance et mémoire de thèse de Chuyen Nguyen « Durabilité des structures renforcées dans le génie civil » <a href="http://www.theses.fr/s200972">http://www.theses.fr/s200972</a>	Rapport	<u>Lyon 1 (LMC2)</u> UGE
30/03/2021	13	Séminaire de clôture du projet ANR MICRO	Evènement	Tous partenaires
31/03/2021	14	Compte rendu de fin de projet	Rapport	<u>UGE (coordinateur)</u>

## E IMPACT DU PROJET

*Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.*

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

#### **Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)**

*Comptabiliser séparément les actions monopartenaire, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaires résultant d'un travail en commun.*

***Attention** : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).*

Les résultats du projet MICRO ont à ce jour fait l'objet de **valorisations multipartenaires** sous la forme de :

- 3 publications internationales,
- 1 communication invitée dans une conférence internationale,
- 9 communications dans des conférences internationales avec actes
- 3 communications dans des colloques nationaux avec ou sans actes

Les résultats obtenus individuellement par les différents partenaires ont également fait l'objet de **valorisations monopartenaire** dans le cadre de :

- 5 publications internationales,
- 5 communications dans des conférences internationales avec actes
- 1 communications dans un colloque national sans actes

**Le projet MICRO a donc donné lieu à un total de 27 publications et communications.**

Par ailleurs, il faut souligner que certains résultats obtenus à la fin du programme de recherche n'ont pas encore été valorisés au moment de la clôture officielle du projet MICRO et feront l'objet de **publications ultérieures** (ces dernières sont en cours de rédaction par différents partenaires).

#### **Autres valorisations scientifiques**

*Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).*

	<b>Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)</b>
<b>Colloques scientifiques</b>	<b>Séminaire de clôture du projet ANR Micro</b> impliquant les partenaires académiques et les industriels impliqués (Freyssinet, Sika), réalisé par visioconférence le 30 mars 2021
<b>Autres (préciser)</b>	<b>Journées de formation « Traitement des données et Approches fiabilistes »</b> dispensées par le LARIS (D. Bigaud et H. Riahi) auprès des doctorants du projet MICRO et des permanents des différents laboratoires partenaires. Effectuées en 3 sessions de 2 jours (en juin 2017, mars 2018 et février 2020).

## E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet.

Liste des publications multipartenaires (résultant d'un travail mené en commun)		
International	Revues à comité de lecture	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>K. Benzarti, R. Chlela, W. Zombre, M. Quiertant &amp; L. Curtil</b>, Durability of flax/bio-based epoxy composites intended for structural strengthening, <i>MATEC Web of Conferences</i> 199, 07014 (2018)</li> <li>2. <b>K. Benzarti, R. Chlela, M. Quiertant, S. Zombre, L. Curtil &amp; M. Michel</b>, Durability of flax/bio-epoxy composites intended for strengthening applications in construction, <i>Academic Journal of Civil Engineering</i>, 37(2), 420-425 (2019). <a href="https://doi.org/10.26168/icbbm2019.60">https://doi.org/10.26168/icbbm2019.60</a></li> <li>3. <b>W. Yan W, H. Riahi, K. Benzarti, R. Chlela, L. Curtil &amp; D. Bigaud</b>, Lifetime prediction of flax fiber reinforced composites using Tweedie Exponential Dispersion Degradation process, <i>Mathematical Problems in Engineering</i>, vol. 2021, 6629637 (2021)</li> </ol>
	Conférences	<p><b>Symposium Euro-Japonais sur les matériaux composites. Conférence invitée de K. Benzarti</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. <b>K. Benzarti, R. Chlela, M. Quiertant, S. Zombre, L. Curtil, A. Viretto and J. Galy</b>, Durability of flax/bio-based epoxy FRP composites intended for structural strengthening: presentation and first results of the Micro Project, London 25-26 September 2017</li> </ol> <p><b>Conférence Internationale CICE2018</b> organisée par Ifsttar et UCLB à Paris du 17 au 19 juillet 2018. Six communications relatives au projet MICRO y ont été effectuées, et les articles correspondants ont été publiés dans <i>Proceedings of the 9th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2018), Paris, France, 17-19 July 2018</i> : <a href="https://www.iifc.org/publications/proceedings-iifc-official-conferences/">https://www.iifc.org/publications/proceedings-iifc-official-conferences/</a></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>5. <b>C. Lacoste and A. Bergeret</b>, Basalt, flax and hybrid reinforced epoxy composites to repair concrete structures, p. 258.</li> <li>6. <b>R. Chlela, S. Zombré, M. Quiertant, L. Curtil, K. Benzarti</b>, Hygrothermal ageing of flax fibre reinforced composites intended for the strengthening of concrete structures, p. 242</li> <li>7. <b>J. Galy, A. Viretto</b>, biobased epoxy networks for civil engineering applications, p. 264</li> <li>8. <b>S. Zombré, R. Chlela 2, M. Michel, J. Mercier, K. Benzarti, L. Curtil</b>, Environmental durability of hand layup carbon/epoxy composites intended for the strengthening of concrete structures, p. 96</li> <li>9. <b>M. Limaïem, E. Ghorbel, O. Limam, J. Mercier</b>, Experimental study on CFRP repairing plain concrete, p. 460</li> <li>10. <b>O. Bareille, M. Salvia, M. Zhang, F. Benezra-Maia</b>, Embedded piezo micro-patches for cure monitoring of fiber-reinforced epoxy in civil engineering repairs, p. 177</li> <li>11. <b>K. Benzarti, R. Chlela, S. Zombré, M. Quiertant, L. Curtil</b>, Durability of flax / bio-based epoxy composites intended for structural strengthening, 5th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting) ICCRRR2018, Cape Town, South Africa, 19-21 November 2018</li> <li>12. <b>R.Chlela, M. Quiertant, W. Zombré, L. Curtil, D. Bigaud, K. Benzarti</b>, Lifetime prediction of flax fibre reinforced composites, 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2019), Potsdam (Germany) 1 au 4 juillet 2019</li> <li>13. <b>R. CHLELA, D. BIGAUD, H. RIAHI, M. QUIERTANT, L. CURTIL, K. BENZARTI</b>, Durability and Lifetime Prediction of Flax Fiber Reinforced Polymer Composites, <i>10th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2020)</i>, Istanbul (Turkey), 8-10 December 2021</li> </ol>

National	Communications (colloques nationaux)	<p>14. <b>R. Chlela</b>, Durabilité des matériaux composites dans un environnement spécifique au génie civil, Journées Jeunes Chercheurs Eco-composites et Composites Bio-sourcées JJC-ECOCOMP 2018, Tarbes, France, 15-16 mars 2018.</p> <p>15. <b>W. Zombre, M. Michel, R. Chlela, K. Benzarti, L. Curtil</b>, Durabilité des matériaux composites réticulés à l'ambiante pour des applications de renforcement par collage structural : Analyse statistique des résultats expérimentaux, <i>37èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC</i>, Sophia Antipolis du 19-21 juin 2019, <i>Academic Journal of Civil Engineering</i>, 37(1), 52-56 (2019). <a href="https://doi.org/10.33557/ajce.37.1.10">https://doi.org/10.33557/ajce.37.1.10</a></p> <p>16. <b>R. Chlela, W. Zombre, M. Quiertant, L. Curtil, K. Benzarti</b>, Influence du vieillissement hygrothermique sur le comportement mécanique de composites conventionnels ou biosourcés destinés au renforcement de structures, JNC 21, Bordeaux 1-4 juillet 2019. <a href="https://jnc21.sciencesconf.org/246073/document">https://jnc21.sciencesconf.org/246073/document</a></p>
----------	--------------------------------------	--

Liste des publications monopartenaires (impliquant un seul partenaire)		
International	Revue à comité de lecture	<p>17. <b>R. Sonnier, A. Viretto et al.</b>, Prediction of thermosets flammability using a model based on group contributions, <i>Polymer</i>, vol. 127 (3), 203-213 (2017)</p> <p>18. <b>A. Viretto, J. Galy</b>, Development of biobased epoxy matrices for the preparation of green composite materials for civil engineering applications, <i>Macromolecular Materials and Engineering</i>, vol 303(5), 1700521 (2017)</p> <p>19. <b>M. Limaiem, E. Ghorbel, O. Limam</b>, Comparative experimental study of concrete repair with carbonepoxy &amp; bio-resourced composites, <i>Construction and Building Materials</i>, vol 210, 312-323 (2019)</p> <p>20. <b>M. Zhang, O. Bareille, M. Salvia</b>, Cure and damage monitoring of flax fiber-reinforced epoxy composite repairs for civil engineering structures using embedded piezo micro-patches, <i>Construction and Building Materials</i>, vol 225, 196-203 (2019)</p> <p>21. <b>E. Ghorbel, M. Limaiem, G. Wardeh</b>, Mechanical performance of bio-based FRP-confined recycled aggregate concrete under uniaxial compression, <i>Materials</i>, vol 14(7), 1778 (2021)</p>
	Conférences	<p>22. <b>A. Viretto, J. Galy</b>, Epoxy networks from renewable resources for civil infrastructure applications, European Polymer Federation Congress 2017, Lyon 2-7 juillet 2017</p> <p>23. <b>O. Bareille, M. Salvia, M. Zhang</b>, Embedded curing and life-time monitoring of fiber-reinforced epoxy in civil engineering repairs by distributed piezo sensors, <i>9th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2018</i>, Manchester (UK), 10-13 Juillet 2018, Code 149614</p> <p>24. <b>C. Nguyen, N. Reboul, L. Curtil</b>, Composites reinforced flax or carbon fibers under hygrothermal ageing: Follow of durability by Acoustic Emission monitoring and tensile tests, <i>5th Engineering Mechanics Institute (EMI) International Conference</i>, Lyon 3-5 Juillet 2019, <a href="https://emilyon2019.sciencesconf.org/data/pages/book_emilyon2019_en_final.pdf">https://emilyon2019.sciencesconf.org/data/pages/book_emilyon2019_en_final.pdf</a></p> <p>25. <b>M. Zhang, O. Bareille, M. Salvia</b>, Natural Fiber-Reinforced Epoxy For Civil Engineering Repairs: Cure Monitoring And Damage Monitoring Using Embedded Piezoelectric Micro-Sensors, <i>ICCE-27</i>, Granada (Spain) July 14-20, 2019</p> <p>26. <b>C. Nguyen, N. Reboul, L. Curtil</b>, Use of acoustic emission monitoring to follow durability of flax and carbon fibre reinforced polymers under hygrothermal ageing, <i>Emerging Technologies and applications for green infrastructure</i>, Ha Long (Vietnam), October 28-29, 2021</p>
National		<p>27. <b>M. Limaiem, E. Ghorbel, O. Limam</b>, Etude comparative de l'efficacité de la réparation du béton avec des matériaux composites bio ressourcés et des composites carbone-époxyde. <i>Academic Journal of Civil Engineering</i>, 36(1), 21-24. <a href="https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.6">https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.6</a></p>

### E.3 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
VIRETTO Amandine	F	amandine.viretto@gmail.com	Avril 2021	Doctorat	France	3 ans (thèse)	IMP (INSA Lyon)	Post-doc	6 mois	Fin aout 2016	CDD	Mines Alès	Post-doc	Oui	Oui
LACOSTE Clément	H	Clement.Lacoste@mines-ales.fr	Avril 2021	Doctorat	France	3 ans (thèse)	ARMINES	Post-doc	6 mois	Fin aout 2016	CDI	Mines Alès	Enseignant-Chercheur	Oui	Oui
ZOMBRE Wendlmita Serge	H	christian.zombre@hotmail.fr	Avril 2021	Master	France	-	LMC2 – Lyon 1	Doctorant	45 mois	Fin Juillet 2019	Cycle de Formation (Centre des hautes Etudes de la construction)	-	-	-	-
CHLELA Robert	H	robert.chlela@ifsttar.fr	Avril 2021	Master	France	-	UGE (ex Ifsttar)	Doctorant	38 mois	Fin Novembre 2019	CDD	Recherche publique – UGE (ex Ifsttar)	Post-doc	Oui	Oui
NGUYEN Chuyen	H	chuyenksxd@gmail.com	Avril 2021	Master	France	-	LMC2 – Lyon 1	Doctorant	40 mois	Fin mars 2021	CDI	Université - Vietnam	Enseignant-Chercheur	Non	Oui
ZHANG Mingfa	H		Avril 2021	Master	Hors UE	-	LDTS – EC Lyon	Doctorant	38 mois	Fin décembre 2020	CDI	Grande Entreprise (en Chine)	Ingénieur	Non	Non
LIMAIEM Mariem	F	mariemlimaiem@gmail.com	Avril 2021	Ingénieur	Hors UE	-	L2MSG - Univ Cergy	Doctorante	36 mois	Fin juin 2019	CDI	Grande Entreprise	Ingénieur	Non	Oui
YAN Wean	M	yanweian86@163.com	Avril 2021	Doctorat	Hors UE	3 ans (thèse)	LARIS Angers	Post-doc	12 mois	Fin septembre 2019	CDI	Université	Professeur Associé	Oui	Non

### **Aide pour le remplissage**

- (1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

*Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).*