

PROPOSITION DE SUJET POUR UN CONTRAT DOCTORAL

<p>Laboratoires Laboratoire LIENSs - UMR 7266 CNRS, La Rochelle Université Laboratoire UR 3795 -GEGENA - Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels Anthropiques et Archéologiques, Université de Reims Champagne-Ardenne</p>
<p>Titre de la thèse CONBACT : Innovations pour la Consolidation Bactérienne dans le Patrimoine Bâti</p>
<p>Direction de la thèse Sophie SABLE, MCF HDR en Microbiologie, Laboratoire Littoral Environnement et Sociétés LIENSs - UMR 7266 CNRS, La Rochelle Université, 50%, sophie.sable@univ-lr.fr Patricia VAZQUEZ, MCF HDR en Géologie-Pétrophysique, UR 3795 -GEGENA - Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et Environnements Naturels Anthropiques et Archéologiques, Université de Reims Champagne-Ardenne, 50%, patricia.vazquez@univ-reims.fr</p>
<p>Adéquation scientifique avec les priorités de l'établissement L'originalité de ce projet doctoral repose sur la mise au point d'une procédure de bio-remédiation et de consolidation de la pierre des monuments historiques par des minéraux biosourcés produits par des bactéries marines. Le projet CONBACT s'inscrit ainsi parfaitement dans les thématiques scientifiques de l'institut LUDI (Littoral Urbain Durable Intelligent) de La Rochelle Université pour plusieurs raisons :</p> <ol style="list-style-type: none">1) Le sujet est en adéquation avec le domaine de la « transition énergétique » autour du développement de procédés durables pour la consolidation du bâti et la durabilité des matériaux employés dans des environnements urbains – milieu littoral et continental. De possibles propositions d'une meilleure gestion du patrimoine bâti seront apportées par ce projet, conduisant à une réduction de la consommation des ressources et à leur gestion plus efficace de celles-ci.2) La « transition environnementale et écologique » sera également au cœur de ce projet au travers de l'étude approfondie des interactions des matériaux avec leur environnement et le climat. Ce projet repose sur la valorisation de ressources naturelles constituées par les bactéries marines et l'exploitation de leurs potentialités biotechnologiques dans la bioprécipitation des minéraux. L'utilisation de bactéries naturellement présentes sur notre littoral et facilement cultivables représente donc une ressource durable dans le temps et sans impact sur l'écosystème marin d'origine. L'approche envisagée de consolidation des roches conduira ainsi à une limitation du rejet de substances chimiques nocives dans l'écosystème et donc à une réduction de l'impact environnemental.3) Enfin, ce projet propose une « vision intégrée et décloisonnée » grâce à une dynamique pluridisciplinaire de la recherche entre les laboratoires LIENSs (microbiologie et biotechnologie) et LaSIE (électrochimie et biophysique) de La Rochelle Université et le laboratoire GEGENA (géologie et pétrophysique) de l'Université de Reims Champagne-Ardenne.
<p>Descriptif du sujet (<i>enjeux scientifiques, applicatifs, sociétaux...</i>) La préservation du patrimoine historique est l'un des sujets de recherche les plus récurrents, tant en raison de l'évolution des techniques d'étude que de la multitude de produits et de procédures testés, dont l'efficacité à long terme ne donne pas toujours les résultats escomptés. Dans une société actuelle axée sur l'éco responsabilité, l'utilisation de produits chimiques nuisibles à l'environnement et à la santé humaine n'est plus recommandée, et des solutions respectueuses de l'environnement sont nécessaires. Au cours des dernières années, l'utilisation de bactéries (d'origine terrestre) dans la consolidation des roches, a connu un grand développement grâce à la biominéralisation produite sous forme de minéraux de type carbonate de calcium (calcite) compatibles avec la pierre à traiter [1-6]. L'efficacité des bactéries dans la consolidation des roches dépend de nombreux facteurs, notamment les conditions environnementales, le type de bactéries et la nature du substrat [3, 5 - 10]. Quelques exemples de monuments traités avec des bactéries sont la Cathédrale de Bordeaux en France [9], le château de Queluz au Portugal [6] ou de nombreux</p>

édifices mayas [10]. Un autre procédé de formation de dépôt minéral existe par polarisation cathodique d'une grille métallique placée dans l'eau de mer et permet ainsi d'obtenir des formations rocheuses très résistantes [11]. L'adaptation de ce procédé électrochimique de formation d'agrégat calcomagnésien, en association avec les bactéries calcifiantes, est également envisageable dans le contexte de la consolidation de roches calcaires en immersion, comme des forteresses ou ports anciens.

L'objectif principal de ce projet réside dans la protection des roches calcaires utilisées majoritairement dans le patrimoine rochelais et rémois par une nouvelle approche de consolidation biologique et électrochimique. Cette étude est subdivisée en trois axes en fonction de son caractère innovant et exploratoire :

1) Bactéries terrestres : nous utiliserons des bactéries naturellement présentes sur les roches en s'intéressant tout particulièrement à leur métabolisme impliqué dans la biocalcification (sans uréase) afin de réduire l'impact sur les roches, sur l'environnement et limiter le rejet de substances nocives dans l'écosystème. [4-6, 12-14].

2) Bactéries marines : nous expérimenterons l'utilisation nouvelle de bactéries marines (possédant d'autres métabolismes que l'uréase), encore peu explorées pour le moment, qui ont des capacités à biominéraliser de façon importante dans les zones immergées, mais qui n'ont jamais été testées dans des zones émergées [15]. De plus, ces bactéries marines peuvent présenter l'avantage d'une plus grande résistance aux polluants de type sels.

3) Polarisation cathodique : c'est un des aspects les plus audacieux de ce projet en raison de son caractère très innovant dans la préservation du patrimoine. Il s'agit de l'application de la protection cathodique, déjà utilisée en milieu marin pour la consolidation de matériaux granulaires et la création de géocoraux [11,16]. Cette technique sera testée sur des blocs de roche afin de créer une couche superficielle plus dure pour son application sur des matériaux submergés.

Contexte partenarial (*cotutelle internationale, EU-CONEXUS, partenariat avec un autre laboratoire, une entreprise...*)

Une des originalités de ce projet réside dans son caractère hautement interdisciplinaire et pluridisciplinaire, ce qui nécessite un partenariat entre plusieurs équipes de recherche. Ce projet s'appuie ainsi sur une collaboration entre l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) avec le laboratoire GEGENA (en co-direction de la thèse) et La Rochelle Université (LRUniv), plus précisément avec les laboratoires LIENSs (en co-direction de la thèse) et LaSIE (en participation à l'encadrement du doctorant).

1) Partenariat LIENSs et LaSIE (La Rochelle Université)

Le laboratoire LIENSs est une unité mixte de recherche (UMRi 7266) qui intègre des compétences dans différents domaines scientifiques dont les sciences de l'environnement (écologie, géophysique), la chimie, la biochimie, la microbiologie, les biotechnologies, et les sciences humaines (géographie, histoire). Elle s'appuie sur cette pluridisciplinarité pour répondre aux enjeux du développement durable dans le cadre de ses recherches avec pour principal objet d'étude le littoral. Sophie Sablé, porteuse de ce projet et co-directrice de cette thèse, travaille depuis plusieurs années sur la biominéralisation par les microorganismes et son développement pour la consolidation des matériaux, en partenariat avec le LaSIE.

Le laboratoire LaSIE (UMR 7356), qui participera à cette thèse, intervient dans plusieurs domaines d'activités tournées autour des sciences de l'ingénieur. Un des axes majeurs de réflexion des chercheurs impliqués dans ce projet (équipe TDVM : Transferts, Dégradation et Valorisation des Matériaux) porte sur la conception d'éco-matériaux et d'éco-procédés pour la consolidation du trait de côte à partir d'un procédé électrochimique et d'éléments naturels (calcium et magnésium de l'eau de mer). Cette équipe mettra son expertise au profit du projet doctoral en testant cette technique innovante sur des blocs de roche immergés pour créer une protection supplémentaire.

2) Partenariat GEGENA (Université de Reims Champagne-Ardenne)

Le GEGENA est une unité de recherche labellisée (UR 3795), spécialisée dans l'anthropisation de l'environnement, avec des études sur les géomatériaux, les sciences du sol, et les risques naturels. Patricia VAZQUEZ, co-directrice de la thèse, est pétrophysicienne et possède une forte expertise dans l'étude des matériaux, ainsi que de leurs formes et des processus de leur altération.

Les zones et les matériaux d'étude diffèrent entre les laboratoires de LRUniv (milieu marin, matériaux granulaires) et de l'URCA (milieu continental, matériaux du bâti) ce qui rend l'interaction entre les laboratoires complémentaire et bénéfique dans les deux cas.

Ce projet doctoral sera réparti équitablement entre les deux universités (cf. diagramme de Gantt). L'étudiant sera basé la moitié de son temps à La Rochelle Université (LIENSs), où il réalisera des essais de consolidation bactérienne et électrochimique en laboratoire (en partenariat avec le LaSIE). L'autre partie du temps, l'étudiant travaillera au GEGENA à l'Université de Reims pour effectuer une caractérisation des matériaux avec une approche géologique et pétrophysique. Les mesures de durabilité sur le terrain seront effectuées par l'étudiant en mission dans les différents lieux d'exposition des roches. Les équipes techniques des deux laboratoires LIENSs et GEGENA et les directrices de

thèse seront également disponibles pour apporter leur assistance dans cette phase. Enfin, l'analyse des données et l'interprétation des résultats, dans le contexte de l'application au patrimoine bâti, seront effectuées en collaboration avec des experts de ce domaine sur le site de Reims. **L'inscription du doctorant est prévue à La Rochelle Université.**

Ces travaux seront menés également en partenariat avec **la ville de La Rochelle** (pour l'accès à la plateforme expérimentale au pied de la Tour Saint Nicolas, gérée par le port de plaisance de La Rochelle) et **la ville de Reims** (pour l'accès à la basilique St-Rémi pour le dépôt d'échantillons consolidés grâce à la collaboration avec la direction Maintenance des bâtiments).

Impacts (*scientifiques, technologiques, socio-économiques, environnementaux, sociétaux...*)

Les objectifs de ce projet sont la consolidation des roches calcaires du patrimoine de La Rochelle et de Reims par des traitements biologiques et écologiques dans différents climats. La pertinence de ce projet repose sur le développement d'un protocole de consolidation bactériologique spécifique et adapté au climat et aux matériaux utilisés dans les deux zones d'étude. Le développement d'une nouvelle technologie par électrochimie sera également expérimenté pour évaluer sa faisabilité dans ce domaine. Ce projet est pertinent car il vise à réaliser une consolidation durable des matériaux sans endommagement de la roche. De plus, une consolidation effective des roches du patrimoine permettrait une réduction dans la consommation de matières premières.

En termes d'**impacts scientifiques, technologiques et environnementaux**, ce projet met en œuvre plusieurs approches innovantes :

- i) le développement d'un procédé écologique par l'utilisation de bactéries naturellement présentes dans ces environnements (matériaux et climats) et qui ne détériorent pas les roches à long terme;
- ii) l'utilisation de bactéries calcifiantes marines plus résistantes aux sels (marins et non marins), encore jamais testées sur des matériaux émergés;
- iii) la mise en œuvre de la technique de protection cathodique entièrement novatrice dans le domaine de la construction. Cette technologie sera testée de façon exploratoire sur des échantillons sains en vue de leur utilisation comme matériaux renforcés dans la restauration, par remplacement de blocs de pierres endommagées, et la consolidation *in situ* des structures avec des blocs de roche immergés (ports, forts...).

L'originalité de ce projet réside également dans **son caractère hautement interdisciplinaire et pluridisciplinaire**, ce qui se reflète dans les domaines de recherche des laboratoires et des chercheurs impliqués, différents et en même temps très complémentaires. Ce projet réunit ainsi la géologie pour l'étude de la caractérisation et de la durabilité des matériaux du patrimoine, menée par le laboratoire GEGENA (URCA), la microbiologie avec l'exploitation du procédé de biocalcification bactérienne développée au laboratoire LIENSs (LRUniv) pour la consolidation des matériaux, ainsi que l'électrochimie et la physico-chimie avec les chercheurs du LaSIE, experts en protection cathodique et en caractérisation des matériaux (LRUniv).

Les résultats attendus comprennent ainsi :

- i) le développement d'un protocole de consolidation de roches *in situ* adapté au substrat et au climat, et doté d'une durabilité dans le temps ;
- ii) un processus pilote de consolidation des blocs immergés des monuments côtiers ;
- iii) la mise en place d'une nouvelle collaboration entre les Universités de La Rochelle et de Reims.

Au niveau des **retombées socio-économiques**, la préconsolidation du patrimoine bâti devrait permettre de réduire la fréquence des interventions de restauration ainsi que les dégradations et dommages pouvant être causés par certains phénomènes climatiques extrêmes. De plus, l'optimisation de la consolidation microbiologique pourrait donner lieu à des brevets ou susciter l'intérêt d'entreprises, offrant ainsi des opportunités professionnelles pour l'étudiant ou des projets de R&D visant à progresser dans ce domaine.

Enfin, sur le **plan sociétal**, ce projet s'inscrit dans l'économie circulaire en favorisant le recyclage des matériaux de construction du patrimoine bâti et leur utilisation responsable, tout en contribuant à la transition écologique grâce à une utilisation plus rationnelle des ressources et à une consommation durable et intelligente.

Programme de travail du doctorant (*tâches confiées au doctorant*)

Ce projet doctoral est structuré en 5 étapes (cf. diagramme de Gantt).

1) Etude bibliographique : un état de l'art complet sera effectué en premier lieu dans le domaine de l'étude du patrimoine bâti, la consolidation des roches et l'utilisation des procédés biologique et électrochimique.

2) Caractérisation des matériaux : les matériaux sélectionnés seront des calcaires locaux utilisés dans les monuments de La Rochelle et de Reims. Une première caractérisation pétrographique sera effectuée et ses propriétés physiques déterminées.

3) Consolidation des matériaux en laboratoire : en laboratoire, des bactéries biocalcifiantes (collection du laboratoire LIENSs) seront cultivées et appliquées sur les calcaires sélectionnés et leur évolution sera étudiée dans un environnement univariable (température, humidité ou UV). Ces tests nous permettront de sélectionner les bactéries optimales en fonction de leur efficacité dans différents environnements et substrats. La mise en œuvre de la technique électrochimique pour la consolidation des blocs des structures immergées sera aussi testée en laboratoire durant les premiers mois du projet. Dans tous les cas, l'augmentation de la dureté et la réduction de la porosité, qui déterminent la consolidation, seront étudiées à l'aide des mêmes techniques de caractérisation utilisées en partie 2. La biominéralisation sera suivie en détail avec la microtomographie par rayons X et l'analyse Raman.

4) Durabilité des matériaux :

4.1) In situ : une fois que les bactéries et les méthodes d'application appropriées auront été sélectionnées, nous procéderons à l'exposition des roches saines, sans et avec traitement microbiologique, *in situ* dans les zones d'étude. Les sites choisis sont la plateforme d'étude de béton au pied de la Tour Saint Nicolas à La Rochelle et la basilique Saint Rémi à Reims. Nous effectuerons un suivi de la durabilité des roches traitées grâce à des techniques portables non destructrices, et des échantillons seront collectés pour une analyse plus approfondie en laboratoire.

4.2) En laboratoire : les conditions environnementales réelles seront obtenues à partir des données météorologiques de capteurs placés sur les deux sites d'étude (en collaboration avec le laboratoire LAB-i, URCA). Ces paramètres seront traités pour la détermination des conditions d'essai réalistes [17] de chaque site d'étude. Celles-ci seront reproduites en laboratoire (conditions marines avec des sels ou continentales) pour une étude plus approfondie du comportement des roches traitées (durabilité et évolution).

5) Valorisation des résultats : rédaction d'articles et de la thèse.

Calendrier de réalisation : le calendrier de réalisation des travaux de recherche suivra le diagramme de Gantt ci-joint.

Trimestre	ANNEE 1				ANNEE 2				ANNEE 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	G	G	L	L	L	L	L	L	G	G	G	G
1. Etude bibliographique												
2. Caractérisation des matériaux												
Préparation et caractérisation des matériaux sains (laboratoire)												
Caractérisation des matériaux consolidés (laboratoire)												
3. Consolidation												
Bactéries												
Exploratoire (électrochimie)												
4. Durabilité												
Caractérisation des matériaux in situ												
Durabilité en laboratoire												
5. Divulgarion												
Congrés - Articles - Partenaires												
Rédaction de thèse												

G : GEGENA ; L : LIENSs

LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES DANS LE TEXTE DU PROJET

- Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Oriol, G., Loubière, J. F., & Perthuisot, J. P. (1999). Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary geology*, 126(1-4), 25-34.
- Rodriguez-Navarro, C., Rodriguez-Gallego, M., Ben Chekroun, K., & Gonzalez-Muñoz, M. T. (2003). Conservation of ornamental stone by Myxococcus xanthus-induced carbonate biomineralization. *Applied and environmental microbiology*, 69(4), 2182-2193.
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., & Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cement and concrete Research*, 38(7), 1005-1014.
- Rodriguez-Navarro, C., Jroundi, F., Schiro, M., Ruiz-Agudo, E., & González-Muñoz, M. T. (2012). Influence of substrate mineralogy on bacterial mineralization of calcium carbonate: implications for stone conservation. *Applied and environmental microbiology*, 78(11), 4017-4029.
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a review. *Frontiers in microbiology*, 4, 314.
- Rodrigues, J. D., & Pinto, A. P. F. (2019). Stone consolidation by biomineralisation. Contribution for a new conceptual and practical approach to consolidate soft decayed limestones. *Journal of Cultural Heritage*, 39, 82-92.
- Lors, C., Ducasse-Lapeyrusse, J., Gagné, R., & Damidot, D. (2017). Microbiologically induced calcium carbonate precipitation to repair microcracks remaining after autogenous healing of mortars. *Construction and Building Materials*, 141, 461-469.
- Ciplak, E. S., Bilecen, K., Akoglu, K. G., & Guchan, N. S. (2023). Use of bacterial binder in repair mortar for micro-crack remediation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(9), 3113-3127.
- Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., Oriol, G., Loubière, J. F., & Perthuisot, J. P. (2000). Bacterial carbonatogenesis and applications to preservation and restoration of historic property. *Of microbes and art: the role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage*, 203-218
- Ortega-Morales, B. O., & Gaylarde, C. C. (2021). Bioconservation of historic stone buildings—An updated review. *Applied Sciences*, 11(12), 5695.
- Zanibellato, A. (2016). Synthèse et études physico-chimiques d'un agglomérat calcomagnésien formé sur acier en milieu marin : un éco-cémentériau pour la protection du littoral. phdthesis. Université de La Rochelle.

12. Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., & Verstraete, W. (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and concrete research*, 40(1), 157-166.
13. Dejong, J. T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., Van Paassen, L. A., Al Qabany, A., ... & Weaver, T. (2014). Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. In *Bio-and chemo-mechanical processes in geotechnical engineering: géotechnique symposium in print 2013* (pp. 143-157). Ice Publishing.
14. Danjo, T., & Kawasaki, S. (2016). Microbially induced sand cementation method using *Pararhodobacter* sp. strain SO1, inspired by beachrock formation mechanism. *Materials Transactions*, 57(3), 428-437.
15. Vincent, J., Colin, B., Lanneluc, I., Sabot, R., Sopéna, V., Turcry, P., ... & Sablé, S. (2021). New biocalcifying marine bacterial strains isolated from calcareous deposits and immediate surroundings. *Microorganisms*, 10(1), 76.
16. Carré, C., Zanibellato, A., Achgare, N., Mahieux, P. Y., Turcry, P., Jeannin, M., & Sabot, R. (2020). Electrochemical limestone synthesis in seawater binds metal grids and sediments for coastal protection. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 1685-1692.
17. Huby, E., Thomachot-Schneider, C., Vázquez, P., Fronteau, G., & Beck, K. (2022). Experimental thermo-hydric study to simulate natural weathering conditions. *Journal of Cultural Heritage*, 58, 12-22.

Accompagnement du doctorant / Fonctionnement de la thèse (*accompagnement humain, matériel, financier, en particulier pour la prise en charge du fonctionnement de la thèse et des dépenses associées*)

Accompagnement humain :

La direction de la thèse sera partagée entre **Sophie SABLE** (microbiologie, LIENSs, LRUUniv, 50%) et **Patricia VAZQUEZ** (géologie-pétrophysique, GEGENA, URCA, 50%). **L'inscription du doctorant est prévue à La Rochelle Université.**

Plusieurs autres enseignants-chercheurs participeront également à ce projet et à l'accompagnement du doctorant :

- Isabelle LANNELUC (biologie moléculaire, MCF LIENSs)
- Béatrice COLIN (microbiologie, MCF LIENSs)
- Marc JEANNIN (physico-chimie et électrochimie, MCF HDR LaSIE)
- Philippe REFAIT (physico-chimie, PU LaSIE)
- Thomas JUNIQUE (pétrophysique – microtomographie à Rayons X, MCF GEGENA)
- Stéphanie ESSYAUTIER (pétrophysique – colonisation biologique, MCF GEGENA)
- Gilles FRONTEAU (pétrologie – caractérisation des carbonates, PU GEGENA)
- Céline SCHNEIDER (pétrophysique – suivi *in situ*, PU GEGENA)

Le doctorant bénéficiera également d'une formation à l'utilisation de toutes les techniques d'analyse et de mesure par les BIATSS et enseignants-chercheurs du LIENSs, LaSIE et GEGENA, pour un travail en complète autonomie.

Concernant l'évolution de la thèse, un comité de suivi scientifique de la thèse se mettra en place avec des experts extérieurs aux unités de recherche (au moins 2 réunions). Les directrices de thèse, les partenaires et le comité de thèse aideront le doctorant sur ses choix d'un point de vue scientifique mais aussi en lui proposant des formations transversales au sein des deux universités.

Accompagnement matériel :

Dans le laboratoire LIENSs, le doctorant disposera de tous les équipements des plateaux techniques de microbiologie/ cultures et incubations/microscopie/biochimie, nécessaires à la culture et caractérisation des microorganismes. Le doctorant bénéficiera également des moyens analytiques de LIENSs via ses plateformes d'Imagerie et Culture Cellulaire, Biologie Moléculaire, Chromatographie, Analyses Haute Résolution de Biomolécules.

Le LaSIE fournira au doctorant tous les moyens dont il dispose en matériel électrochimique et en méthodes de caractérisation des minéraux (micro-spectromètre Raman, IRTF, DRX, MEB, Fluo X, μ CT). Le LaSIE mettra également à disposition ses plateformes expérimentales *in situ* (Port de plaisance, Port Maritime) et accès à la plateforme expérimentale de la ville de La Rochelle au pied de la Tour Saint Nicolas.

Le GEGENA est équipé de tout le matériel nécessaire pour réaliser des descriptions pétrographiques complètes (loupe binoculaire, microscopes en polarisation, analyse d'images, MEB, microscopie de fluorescence, DRX, FRX), ainsi que pour la caractérisation pétrophysique : porosité (porosimétrie au mercure), propriétés hydriques, dynamiques (ultrasons et échographies), mécaniques (microdureté LEEBS), thermiques (caméras infrarouges, capteurs), et esthétiques (couleur, rugosité). Une grande partie de ces équipements sont portables pour la réalisation du suivi de l'altération *in situ*. De plus, les équipements de géochimie seront également disponibles pour les analyses de contamination et de cristallisation des sels des échantillons sur site (ICP, chromatographie ionique). Le GEGENA a établi une convention avec les responsables de la basilique Saint-Rémi et de son musée, ce qui permet l'accès à toutes les pièces nécessaires pour le développement de ce projet.

Accompagnement financier :

Le salaire doctoral est partagé entre La Rochelle Université et l'Université de Reims Champagne-Ardenne* à hauteur de 50% pour chaque établissement. Le fonctionnement de la thèse sera assuré par la participation de chaque partenaire au projet dans le cadre de la collaboration (ressources propres, contrats industriels).

*en attente de confirmation de financement.