

ANR GENEPI – Rapport Public Final

Identité du projet

Code décision ANR : ANR-21-CE06-0003

Titre du projet : Micro-GEnerateurs d'énergie à base de matériaux polymères biosourcés Piezoelectriques

Résumé du projet : Les matériaux piézoélectriques représentent des éléments stratégiques pour développer des capteurs et des récupérateurs d'énergie pour de multiples applications, notamment en lien avec l'émergence des dispositifs IoT auto-alimentés. Cependant, de nouveaux concepts sont nécessaires pour résoudre les problèmes économiques et environnementaux associés aux céramiques à base de plomb et aux fluoropolymères piézoélectriques sans compromettre les performances finales. Dans ce cadre, le projet GENEPI s'intéresse à la piézoélectricité spontanée en cisaillement du poly(L-lactide) (PLA), un polymère biosourcé alternatif possédant de nombreux bénéfices. Un procédé industriel de type extrusion-orientation sans solvant a été développé à l'IMT Nord Europe pour fabriquer aisément des films minces piézoélectriques à base de PLA et plusieurs défis scientifiques ont été relevés pour augmenter significativement les performances de ces matériaux. Dans ce contexte, le premier objectif scientifique du projet GENEPI est d'améliorer les connaissances scientifiques sur les propriétés piézoélectriques en cisaillement du PLA, en particulier sur les relations procédé - structures - propriétés et sur l'utilisation d'additifs pour développer des films piézoélectriques haute-performances à l'échelle laboratoire. Le deuxième objectif scientifique du projet GENEPI est de convertir le comportement piézoélectrique spécifique du PLA en comportement ferroélectrique conventionnel afin d'augmenter les propriétés piézoélectriques du PLA au-delà de la limite théorique. Cette tâche complexe a exploré plusieurs concepts (ferroélectricité à haute température du PLA, pseudo-ferroélectricité des mélanges nanostructurés à base de PLA et cristallisation assistée par champ électrique du PLA) pour révéler des stratégies de recherche à plus long terme.

Site Web du projet : <https://recherche.imt-nord-europe.fr/projets/genepi/>

Titre d'accroche du projet (200 caractères max)

Des polymères biosourcés intelligents pour produire de l'énergie et dépolluer grâce à la piézoélectricité

Sous-titre / Argument du projet (500 caractères max)

Le projet GENEPI explore le potentiel du poly(L-lactide) (PLA), un polymère biosourcé et recyclable, pour développer une nouvelle génération de matériaux piézoélectriques capables de convertir des vibrations mécaniques en énergie électrique. L'objectif est de proposer une alternative durable aux matériaux piézoélectriques conventionnels contenant des éléments critiques ou toxiques.

Enjeux et objectifs (3000 caractères max) - Vers des matériaux piézoélectriques durables pour l'électronique autonome

Les matériaux piézoélectriques permettent de convertir une sollicitation mécanique en signal électrique et constituent des composants-clés pour de nombreuses applications telles que les capteurs, l'électronique flexible ou les systèmes de récupération d'énergie destinés aux objets connectés. Cependant, la majorité des technologies actuelles repose sur des céramiques contenant du plomb ou sur des polymères fluorés issus de ressources fossiles, soulevant des enjeux environnementaux, sanitaires et d'approvisionnement.

Dans ce contexte, le projet GENEPI avait pour ambition de démontrer le potentiel du poly(L-lactide) (PLA), un polymère biosourcé issu de ressources renouvelables, comme alternative durable pour la conversion électromécanique. Contrairement aux matériaux piézoélectriques classiques nécessitant des

traitements électriques complexes, le PLA présente une piézoélectricité intrinsèque pouvant être activée par des procédés industriels d'orientation mécanique sans étape de polarisation électrique.

Le projet poursuivait deux objectifs scientifiques majeurs. Le premier consistait à améliorer la compréhension fondamentale des mécanismes à l'origine de la piézoélectricité en cisaillement dans les films de PLA orientés, en établissant des relations précises entre procédés de mise en forme, structurations multiphasiques du matériau et propriétés fonctionnelles obtenues. Le second objectif visait à dépasser les limitations théoriques connues du PLA en explorant de nouvelles stratégies permettant d'induire des comportements ferroélectriques et d'augmenter significativement les performances électromécaniques.

À travers ces travaux, le projet GENEPI visait ainsi à poser les bases scientifiques et technologiques nécessaires au développement de capteurs et récupérateurs d'énergie durables et compatibles avec des procédés industriels à grande échelle.

Méthodes / Approches (3000 caractères max) - Décrypter et maîtriser la piézoélectricité du PLA par une approche multi-échelle couplant procédé, structure et propriétés

Le projet GENEPI s'est appuyé sur une approche expérimentale et théorique intégrée visant à relier les procédés de transformation des polymères aux propriétés piézoélectriques obtenues. Les travaux ont combiné développement de procédés, caractérisations multi-échelles et modélisation physique afin de lever les verrous scientifiques associés aux matériaux polymères piézoélectriques biosourcés.

Une première étape a consisté à développer un procédé de fabrication fiable et reproductible de films de PLA orientés reposant sur des techniques industrielles d'extrusion suivies d'étirage uniaxial contrôlé (Machine Direction Orientation – MDO). Cette stratégie permet d'induire une organisation moléculaire spécifique responsable de l'apparition d'une piézoélectricité en cisaillement, sans recours à une étape de polarisation électrique. Les paramètres de transformation (température d'étirage, taux d'orientation, vitesse de déformation et traitements thermiques post-procédé) ont été systématiquement étudiés afin de maîtriser la structuration du matériau. En parallèle, des outils expérimentaux avancés ont été développés pour caractériser avec précision l'orientation moléculaire et les coefficients piézoélectriques du PLA, notamment en mode cisaillement. Ces méthodologies ont permis d'améliorer significativement la fiabilité des mesures et de réduire les incertitudes expérimentales, constituant un préalable essentiel à l'établissement de lois prédictives robustes.

Le projet a également intégré une approche de modélisation visant à décrire la contribution respective des différentes phases structurales du polymère (phase amorphe, mésophase et phases cristallines) aux performances piézoélectriques globales. Ces modèles ont permis d'identifier l'influence directe des conditions de mise en forme sur la réponse électromécanique du matériau et d'orienter les stratégies d'optimisation. Enfin, plusieurs voies exploratoires ont été étudiées afin d'augmenter les performances fonctionnelles du PLA, incluant l'utilisation d'additifs et le contrôle de la cristallisation assistée par traitement thermique ainsi que le développement de structures poreuses et architecturées ouvrant la voie à des comportements pseudo-ferroélectriques.

Cette approche multidisciplinaire a permis de faire converger compréhension fondamentale et faisabilité industrielle, condition essentielle pour le transfert futur vers des applications de capteurs, d'actionneurs et de récupération d'énergie.

Résultats (3000 caractères max) - Des avancées majeures vers des polymères piézoélectriques biosourcés performants et industrialisables

Le projet GENEPI a permis de franchir plusieurs verrous scientifiques et technologiques limitant jusqu'à présent l'utilisation de polymères biosourcés dans les applications piézoélectriques, positionnant le poly(l-lactide) (PLA) comme une alternative crédible aux polymères fluorés de référence.

Un premier résultat majeur concerne le développement d'un procédé de fabrication robuste, reproductible et compatible avec des technologies industrielles pour la production de films de PLA orientés présentant des propriétés piézoélectriques élevées. L'utilisation de procédés d'orientation de type extrusion-MDO, opérés à proximité de la transition vitreuse du matériau, a permis d'atteindre un contrôle précis de la déformation et de la structuration moléculaire, démontrant la possibilité de produire à grande échelle des matériaux fonctionnels biosourcés.

Le projet a également conduit à une avancée déterminante dans la compréhension fondamentale de la piézoélectricité du PLA. Grâce au développement d'outils expérimentaux dédiés et de modèles prédictifs multiphasiques, il a été démontré que la réponse piézoélectrique ne repose pas uniquement sur les phases cristallines mais implique de manière significative la phase amorphe orientée. Cette contribution de l'ordre de 20% aux performances finales, jusqu'alors mal comprise, constitue une avancée scientifique majeure permettant d'expliquer et de prédire les performances obtenues en fonction des conditions de mise en forme. Ces travaux ont permis d'atteindre des performances piézoélectriques parmi les meilleures rapportées pour le PLA, avec des propriétés améliorées par rapport à l'état de l'art international ($d_{14} > 13$ pC/N vs. 10 pC/N), tout en conservant des avantages déterminants tels que la transparence, la stabilité thermique élevée et l'absence de polarisation électrique nécessaire.

Au-delà des films denses, le projet a ouvert de nouvelles voies de recherche avec le développement de structures poreuses et architecturées à base de PLA présentant des comportements pseudo-ferroélectriques et des coefficients piézoélectriques élevés. Ces résultats introduisent le concept émergent de matériaux « méta-piézoélectriques », dans lesquels la fonctionnalité résulte conjointement de la structure interne et du matériau constitutif. Enfin, plusieurs démonstrations applicatives ont mis en évidence le potentiel du PLA piézoélectrique pour des applications de récupération d'énergie, de capteurs autonomes et de procédés environnementaux innovants tels que la dépollution par piézocatalyse.

Dans son ensemble, le projet GENEPI établit les bases scientifiques, technologiques et méthodologiques nécessaires à l'émergence d'une nouvelle génération de transducteurs piézoélectriques durables, compatibles avec les exigences de l'électronique flexible et des systèmes énergétiques autonomes.

Perspectives (3000 caractères max) - Vers une nouvelle génération de transducteurs piézoélectriques biosourcés et zéro-carbone

Les résultats obtenus dans le cadre du projet GENEPI ouvrent des perspectives scientifiques, technologiques et industrielles majeures pour le développement de matériaux piézoélectriques durables destinés aux systèmes électroniques autonomes de demain.

Sur le plan scientifique, les travaux réalisés ont mis en évidence de nouveaux mécanismes gouvernant la piézoélectricité des polymères biosourcés, ouvrant plusieurs axes de recherche à fort potentiel. Parmi ceux-ci figurent l'étude du rôle des phases amorphes primitives dans la structuration cristalline, l'analyse des relaxations diélectriques et viscoélastiques dans les polymères orientés, ainsi que le développement de nouvelles stratégies de structuration multi-échelle combinant procédés de transformation, additifs fonctionnels et architectures avancées. Ces recherches visent à dépasser les limites actuelles des polymères piézoélectriques et à concevoir des matériaux ferroélectriques organiques performants sans recours à des composés fluorés ou métalliques critiques.

Au-delà des perspectives académiques, les avancées permettent désormais d'envisager des démonstrateurs industriels de films et transducteurs piézoélectriques à base de PLA fabriqués par des procédés compatibles avec les lignes de production existantes en plasturgie. Cette continuité entre compréhension fondamentale et industrialisation constitue un levier important pour le transfert technologique vers des applications (récupération d'énergie vibratoire, capteurs autonomes, électronique flexible, biomédical, procédés environnementaux de dépollution assistée par piézocatalyse). Le projet GENEPI fait émerger l'opportunité d'une filière de transducteurs piézoélectriques biosourcés et à faible empreinte carbone, reposant sur des matériaux recyclables issus de ressources renouvelables et

transformables par des procédés sobres en énergie. Ces avancées ouvrent la voie à la création potentielle d'une start-up dédiée au développement de dispositifs piézoélectriques « zéro-carbone », capables de répondre aux besoins croissants en capteurs et récupérateurs d'énergie pour l'Internet des objets, la mobilité intelligente et les infrastructures durables.

Les collaborations initiées durant le projet ont déjà conduit au montage de nouveaux projets nationaux et européens portant sur les polymères électroactifs durables, les transducteurs flexibles et les systèmes de récupération d'énergie hybrides. GENEPI contribue ainsi à structurer une communauté de recherche à l'interface entre science des polymères, électronique flexible et transition énergétique, positionnant durablement l'IMT Nord Europe comme un acteur reconnu dans le domaine émergent des matériaux électroactifs durables. À terme, ces travaux pourraient participer à l'émergence d'une nouvelle génération de technologies électroniques respectueuses de l'environnement, conciliant performances fonctionnelles, sobriété matérielle et souveraineté industrielle.

Catchy project title (EN – 200 caractères max)

Smart biobased piezoelectric polymers for energy harvesting and environmental remediation

Basis and Rationale of the project (EN – 500 caractères max)

Piezoelectric materials are key components for sensors and energy harvesters in autonomous systems. However, current technologies rely on lead-based ceramics or fluorinated polymers, raising environmental and supply concerns. GENEPI explores poly(L-lactide) (PLA), a biobased and recyclable polymer, as a sustainable alternative for piezoelectric applications.

Main issues raised & general objectives (EN – 3000 caractères max) - Towards sustainable piezoelectric materials for autonomous electronics and water remediation systems

Piezoelectric materials enable the conversion of mechanical stimuli into electrical signals and are essential for applications such as sensors, flexible electronics and energy harvesting systems for autonomous devices. However, most existing technologies rely on lead-based ceramics or fossil-based fluoropolymers, raising environmental, health and supply chain concerns.

In this context, the GENEPI project aimed to demonstrate the potential of poly(L-lactide) (PLA), a biobased polymer derived from renewable resources, as a sustainable alternative for electromechanical conversion. Unlike conventional piezoelectric materials requiring complex electrical poling processes, PLA exhibits intrinsic piezoelectricity that can be activated through industrial mechanical orientation processes without any electrical treatment.

The project addressed two main scientific objectives. The first was to improve the fundamental understanding of shear piezoelectricity in oriented PLA films by establishing clear relationships between processing conditions, multiphase material structure and resulting functional properties. The second objective was to overcome the intrinsic limitations of PLA by exploring innovative strategies to induce ferroelectric-like behaviour and significantly enhance electromechanical performance.

Through these developments, GENEPI aimed to establish the scientific and technological foundations for the development of sustainable piezoelectric sensors and energy harvesters compatible with large-scale industrial processing.

Methods or technologies used (EN – 3000 caractères max) - Understanding and controlling PLA piezoelectricity through a multi-scale process–structure–property approach

The GENEPI project relied on an integrated experimental and theoretical approach to establish relationships between polymer processing conditions and resulting piezoelectric properties. The work combined process development, multi-scale characterization and physical modelling to address key scientific challenges associated with biobased piezoelectric polymers.

A first step consisted in developing a reliable and reproducible manufacturing process for oriented PLA films using industrial extrusion followed by controlled uniaxial stretching (Machine Direction Orientation – MDO). This approach induces a specific molecular organization responsible for shear piezoelectricity without requiring electrical poling. Processing parameters such as stretching temperature, draw ratio, strain rate and post-processing thermal treatments were systematically investigated to control material structuration. In parallel, advanced experimental tools were developed to accurately characterize molecular orientation and shear piezoelectric coefficients. These methodologies significantly improved measurement reliability and reduced uncertainties, enabling the establishment of robust predictive relationships.

The project also integrated modelling approaches to describe the respective contributions of the different structural phases of the polymer (amorphous phase, mesophase and crystalline phases) to the overall piezoelectric response. These models provided key insights into the influence of processing conditions on electromechanical properties and guided optimization strategies. Finally, several exploratory approaches were investigated to enhance material performance, including the use of functional additives, controlled crystallization and the development of porous and architected structures enabling pseudo-ferroelectric behaviour.

This multidisciplinary approach enabled a strong convergence between fundamental understanding and industrial feasibility, paving the way for future applications in sensing, actuation and energy harvesting.

Main results (EN – 3000 caractères max) - Major breakthroughs towards high-performance and scalable bio-based piezoelectric polymers

The GENEPI project enabled major scientific and technological breakthroughs, positioning biobased polymers as credible alternatives for piezoelectric applications.

A first key achievement is the development of a robust, reproducible and scalable manufacturing process for oriented PLA films with high piezoelectric performances. The use of extrusion–MDO processes, operated close to the glass transition temperature, enabled precise control of deformation and molecular structuration, demonstrating the feasibility of large-scale production of functional bio-based materials.

A major scientific breakthrough was achieved in the understanding of PLA piezoelectricity. Thanks to dedicated experimental tools and multiphase predictive models, it was demonstrated that the piezoelectric response does not solely originate from crystalline phases but also significantly involves the oriented amorphous phase. This contribution, estimated at around 20% of the overall performance, represents a key advance for predicting and optimizing material behaviour. These developments led to state-of-the-art piezoelectric performances for PLA ($d_{14} > 13$ pC/N), exceeding previously reported values, while maintaining key advantages such as transparency, high thermal stability and the absence of electrical poling.

Beyond dense films, the project opened new research directions through the development of porous and architected PLA-based structures exhibiting pseudo-ferroelectric behaviour and high piezoelectric coefficients. These results introduce the emerging concept of “meta-piezoelectric” materials, where functionality arises from both material composition and internal architecture. Finally, several application-oriented demonstrations highlighted the potential of piezoelectric PLA for energy harvesting, self-powered sensing and environmental applications such as pollutant degradation through piezocatalysis.

Overall, GENEPI establishes the scientific and technological foundations for a new generation of sustainable piezoelectric transducers compatible with flexible electronics and autonomous energy systems.

Outstanding feature and future prospect (EN – 3000 caractères max) - Towards a new generation of low-carbon bio-based piezoelectric transducers

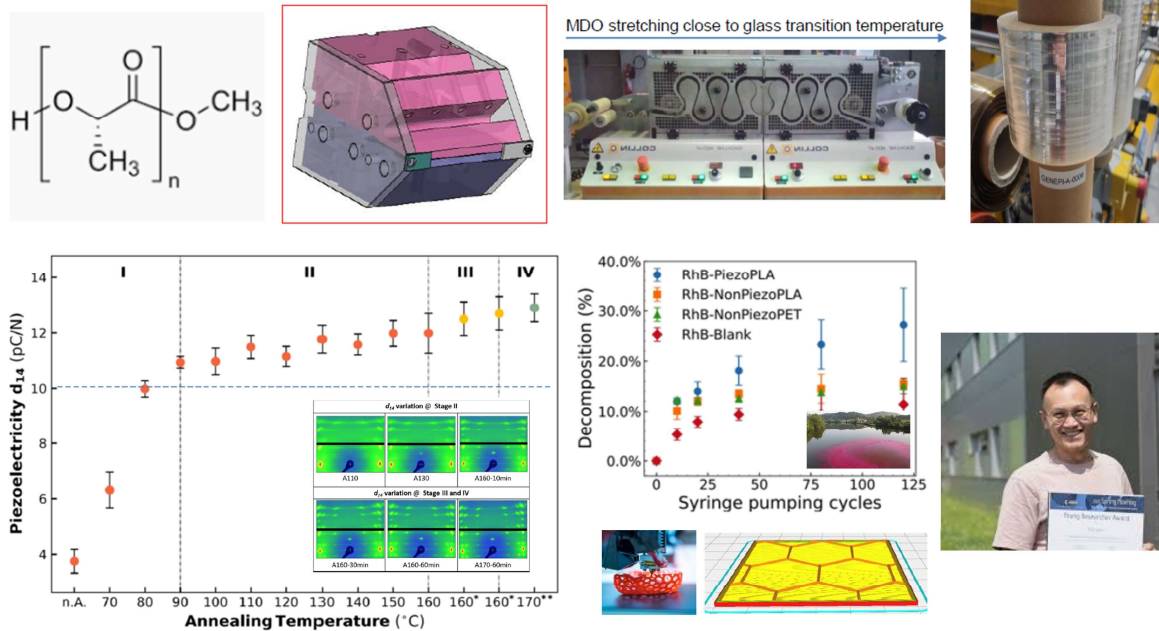
The results of the GENEPI project open major scientific, technological and industrial perspectives for the development of sustainable piezoelectric materials.

From a scientific perspective, the project revealed new mechanisms governing the piezoelectric behaviour of bio-based polymers, particularly the role of structural phases and their dependence on processing conditions. These findings open new research directions, including the study of amorphous and crystalline phase interactions, dielectric and viscoelastic relaxations and advanced multi-scale structuration strategies aimed at developing high-performance electroactive polymers without critical or fluorinated materials.

Beyond academic outcomes, the achieved progress also enables the development of industrial demonstrators of PLA-based piezoelectric films and transducers using processes compatible with existing plastic processing lines. This continuity between fundamental research and industrial implementation is a key driver for technology transfer towards applications such as energy harvesting, self-powered sensors, flexible electronics, biomedical devices and environmental remediation through piezocatalysis. Beyond academic outcomes, the project highlights the potential emergence of a new generation of low-carbon, biobased piezoelectric transducers, relying on recyclable materials and energy-efficient processes. These advances pave the way for the creation of a start-up dedicated to “zero-carbon” piezoelectric devices addressing growing needs in IoT, smart mobility and sustainable infrastructures.

The collaborations initiated during the project have already led to new national and European projects on electroactive polymers, flexible transducers and hybrid energy harvesting systems. GENEPI thus contributes to structuring a research community at the interface of polymer science, flexible electronics and energy transition, positioning IMT Nord Europe as a key player in the emerging field of sustainable electroactive materials.

Illustration du projet



Légende et crédits : Vue d’ensemble du projet GENEPI : poly(L-lactide) biosourcé, procédé industriel d’extrusion–MDO, relations structure–propriétés et performances piézoélectriques. Les applications incluent la récupération d’énergie, l’électronique flexible et la dépollution par piézocatalyse. Crédits : IMT Nord Europe (procédé d’orientation, films orientés de PLA et résultats expérimentaux sur les propriétés piézoélectriques et la dégradation de polluants). Photo: Dr. Hui SHEN (EMRS Young Researcher Award).

Description / crédits photo: Schematic overview of the GENEPI project: biobased poly(L-lactide), industrial extrusion–MDO processing, structure–property relationships and resulting piezoelectric performances. Applications include energy harvesting, flexible electronics and environmental remediation via piezocatalysis. Credits: IMT Nord Europe (orientation processing, oriented PLA films and experimental results on piezoelectric properties and pollutant degradation). Award photo: Dr. Hui SHEN (EMRS Young Researcher Award).