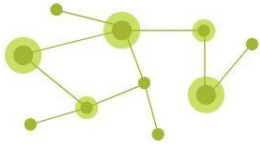


ÉNERGIE
ÉLECTRIQUE 4.0



MEDEE

Maîtrise Énergétique des Entraînements Electriques

COMITE DE SUIVI EE4.0-MEDEE

Présentation de SOUTENAVIB

10 avril 2026



Données du projet

Nom du projet : SOUTENAVIB (Soutenabilité d'un système de récupération vibratoire pour la maintenance prédictive des machines électriques)

Nom du porteur : Mohamed Rguiti

Partenaires impliqués :

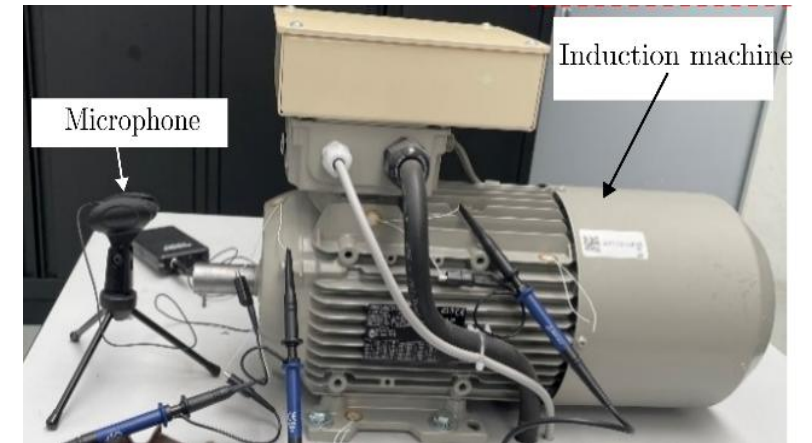
Laboratoires GE : Roberval

Laboratoires hors GE : CERAMATHS – IEMN

Autres partenaires : -

Subventions (2024) : 165 000€

- **Maintenance prédictive :**
 - Evaluer l'état de fatigue des matériels
 - Garantir un usage soutenable et pérenne.
 - Assurer une meilleure disponibilité
- **Différentes méthodes :**
 - Analyse acoustique
 - Mesure du courant dans le stator
 - Caractérisation vibratoire : accéléromètres



🔗 Objectif 1 : Matériau/prototype

- Concevoir un capteur piézoélectrique :
 - **détecter** les anomalies vibratoires des machines électriques
 - **s'auto-alimenter** par récupération d'énergie vibratoire, afin de proposer des solutions de monitoring autonomes.
- Lever les verrous scientifiques et technologiques :
 - évaluer l'efficacité de **nouveaux matériaux** piézoélectriques
 - concevoir et **optimiser l'architecture** du capteur et **traitement du signal**
 - valider les performances par **modélisation, prototypage et essais** sur machines



🔗 Objectif 2 : ACV

- Analyser **l'impact environnemental** sur l'ensemble du cycle de vie afin de proposer des **solutions performantes, durables** et compatibles avec les objectifs de la transition énergétique.

Projet repose sur la synergie de trois laboratoires complémentaires :

- CERAMATHS - UPHF : Matériaux / Mise en forme / Prototype
- IEMN (site de Valenciennes - UPHF) : Prototype / Modélisation / Essais
- ROBERVAL-UTC (laboratoire GE) : Essais / ACV

Deux post-docs :

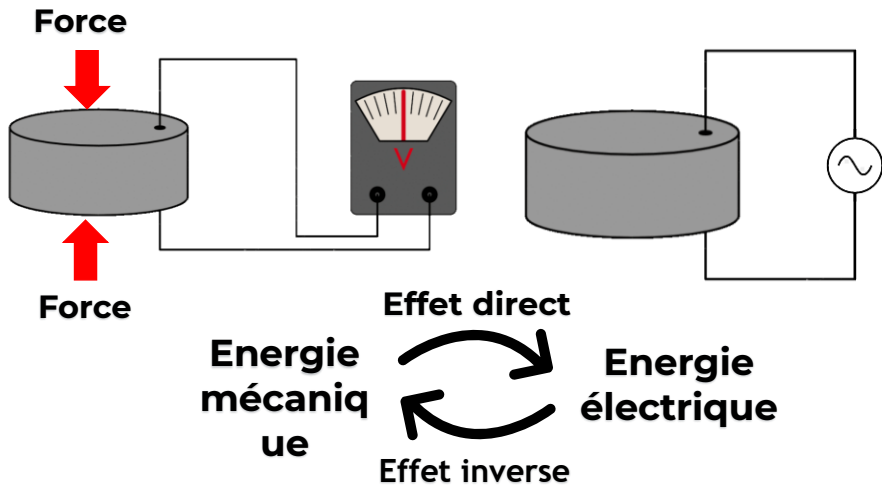
- Anass CHRIR (CERAMATHS)
- Rabie ALOUI (ROBERVAL et IEMN)

Partenaire industriel :

- Parker Hannifin , site de Vierzon



■ Piézoélectricité



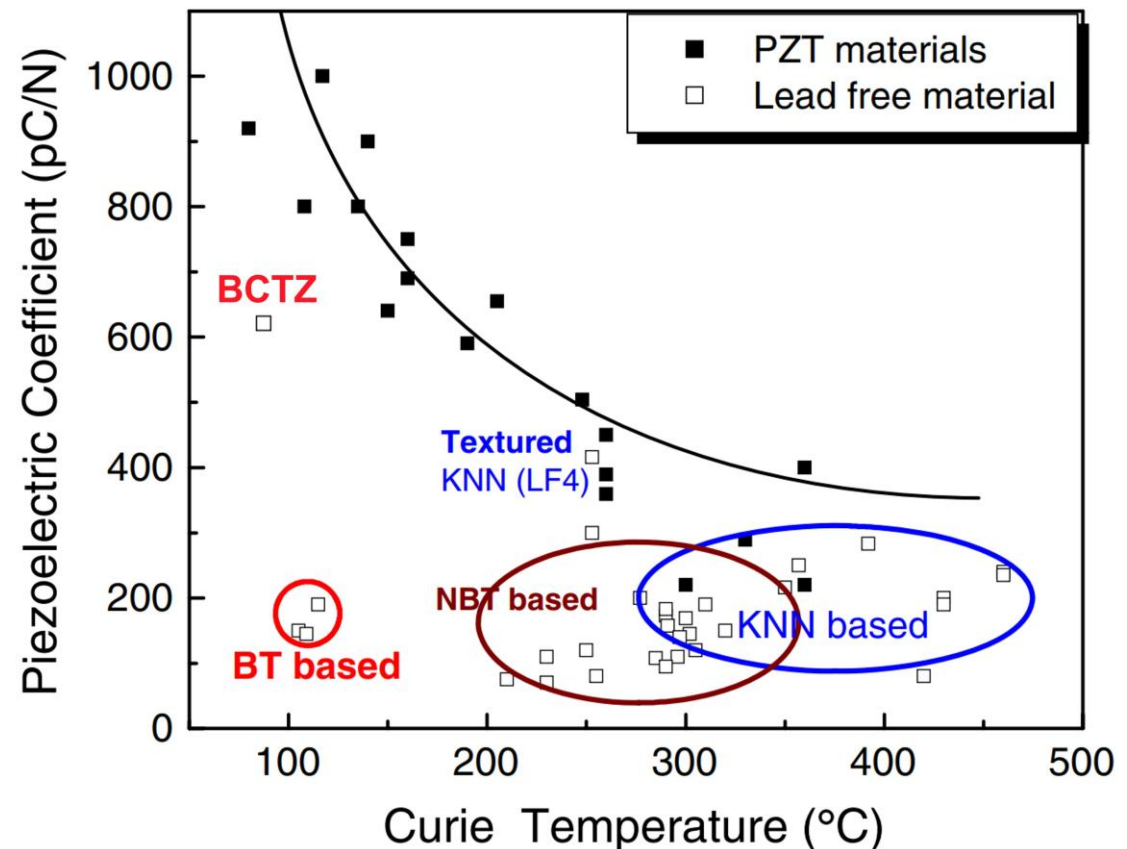
■ Alternatives sans plomb

- ➔ BaTiO_3 (BT) et dérivés
 - ➔ BaTiO_3
 - ➔ $(\text{Ba}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})(\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1})\text{O}_3$
- ➔ $(\text{A,Bi})\text{TiO}_3$ / (A=Na,K,..) ➔ $(\text{Na}_{0,47}\text{Bi}_{0,47}\text{Ba}_{0,06})\text{TiO}_3$
- ➔ $(\text{K,Na})\text{NbO}_3$ (KNN) et dérivés
- ➔ Phase d'Aurivillius ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12..}$)

■ Les plus performants : **PZT = $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$**



- Réglementation européenne (RoHS, WEEE, REACH en cours) sur les éléments chimiques nocifs : **Pb**, Hg, Cd...
- Plomb normalement interdit, mais toujours toléré.



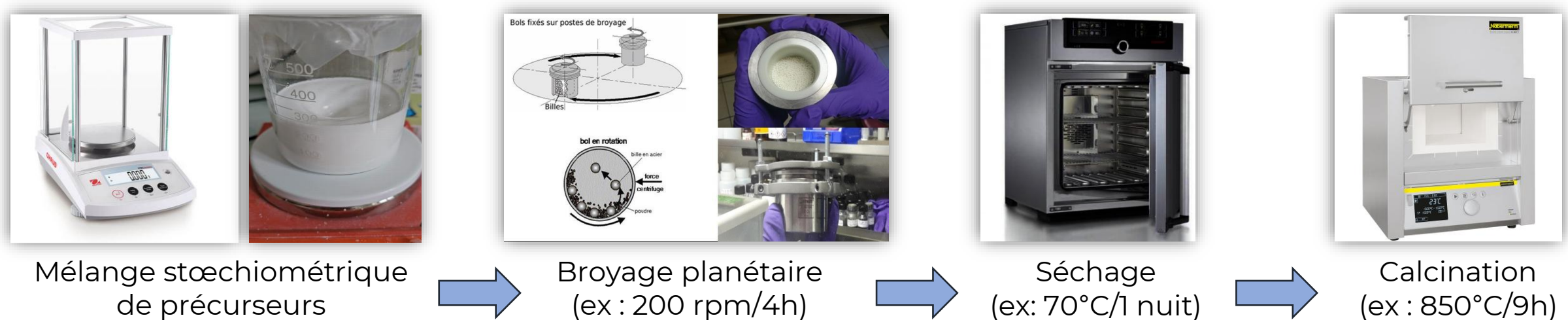
Travaux effectués

■ Etapes de fabrication



- ✓ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{TiO}_3$ (PZT) : synthétisé au CERAMATHS
- ✓ BaTiO_3 (BT) : poudre commerciale
- ✓ $(\text{Ba}_{0,85}\text{Ca}_{0,15})(\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1})\text{O}_3$ (BCTZ) : synthétisé au CERAMATHS
- ✓ $(\text{Na}_{0,47}\text{Bi}_{0,47}\text{Ba}_{0,06})\text{TiO}_3$ (NBT-6BT) : synthétisé au CERAMATHS

■ Exemple

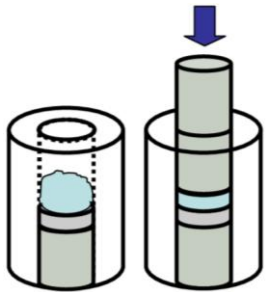


Étapes de fabrication



1

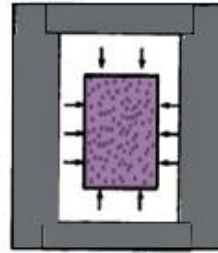
Pressage uniaxial



- Matrice cylindrique
- $\phi = 13-25$ mm
- 100-125 MPa
- 3 min + 2 min

2

Pressage isostatique

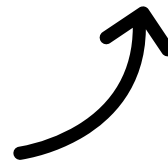


- 2500 bar
- 5 min

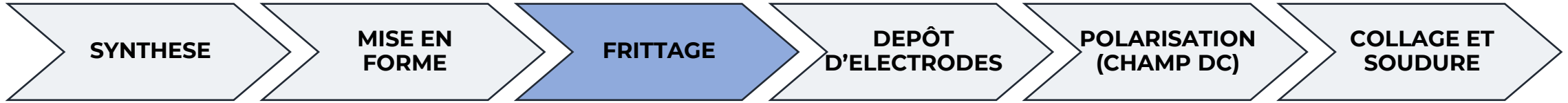
→ Pastille de 1-2 mm



→ Bloc de > 4 mm



■ Etapes de fabrication



3

Frittage

1160°C_2h30

3°C/min

3°C/min

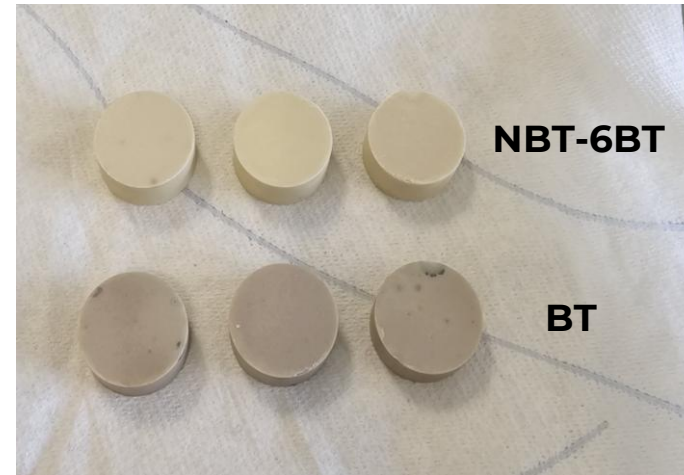
Creusets d'alumine

Pastille

Poudre de NBT-6BT

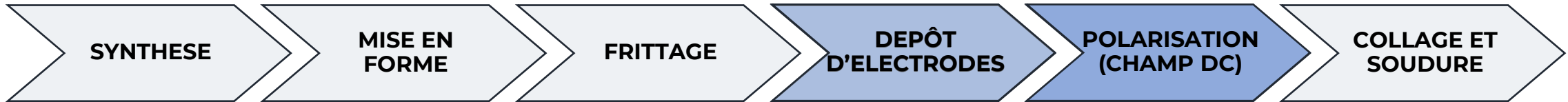


■ Exemple de blocs frittés



Travaux effectués

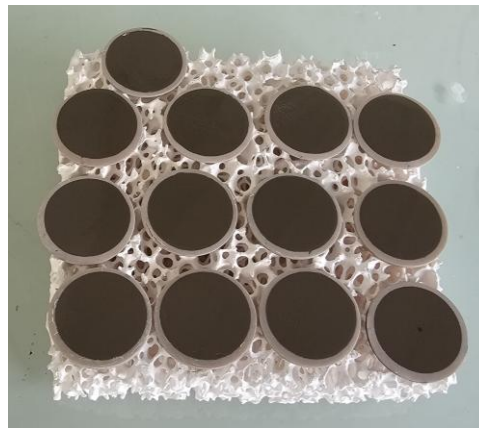
Étapes de fabrication



Sérigraphie

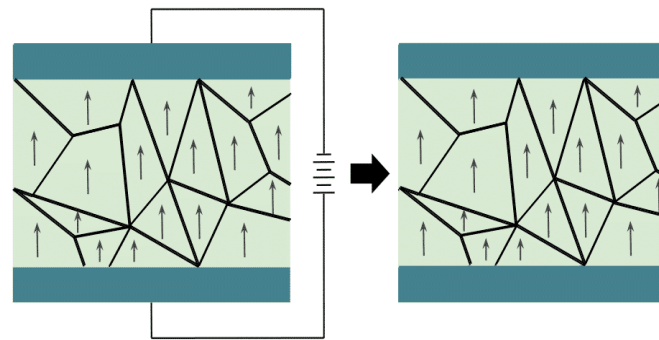


Masque de sérigraphie



Disque piézo. après dépôt d'Ag

Polarisation



Application d'un E de qlq kV/mm
=> Axes de polarisation orientés

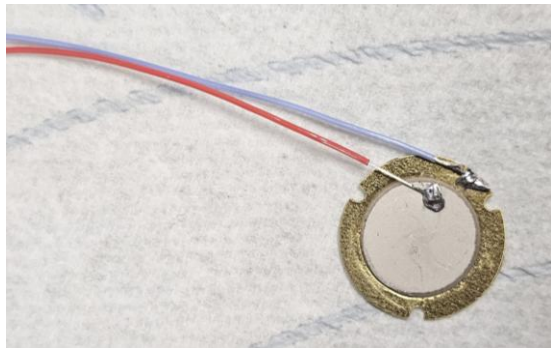


Disque piézo. sous champ

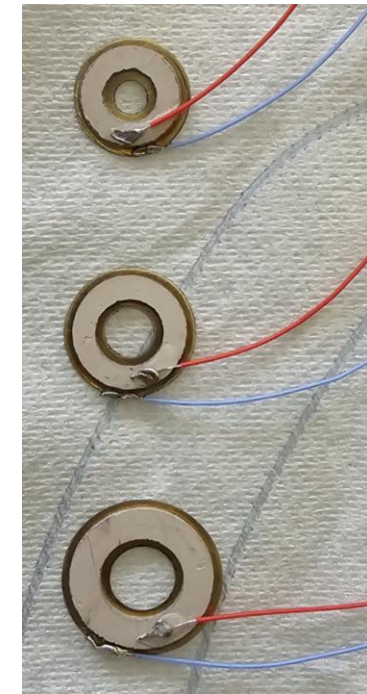
Étapes de fabrication



Buzzer final



Découpe au Laser



Découpe Laser



Mesure du d_{33}

Travaux effectués

Étapes de fabrication

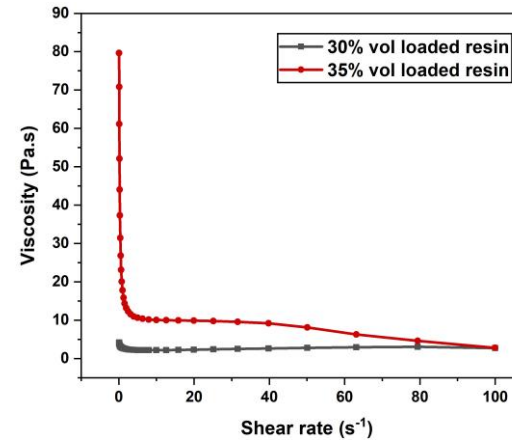
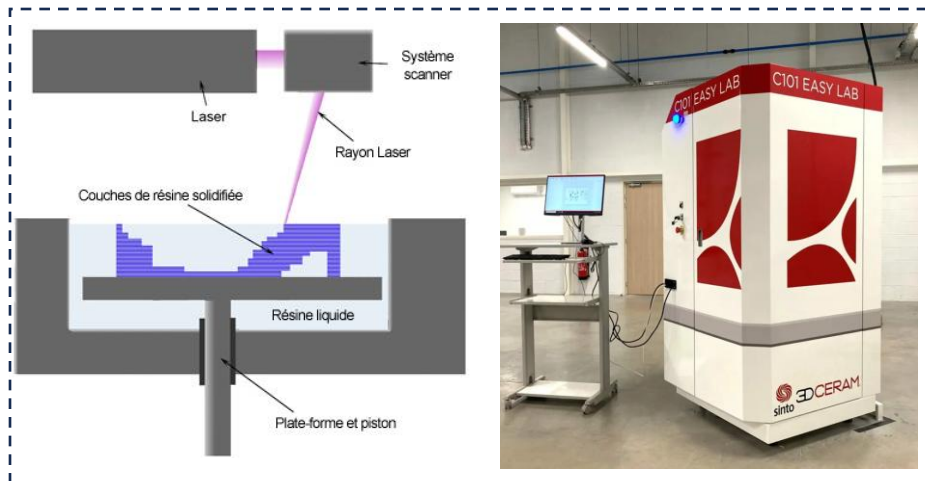


Fabrication additive

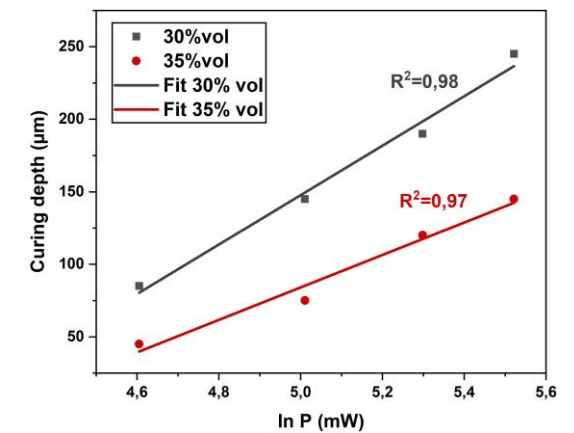
→ Stéréolithographie (SLA):

- Formulation des résines
- Paramétrage du procédé
- Post-traitement des pièces

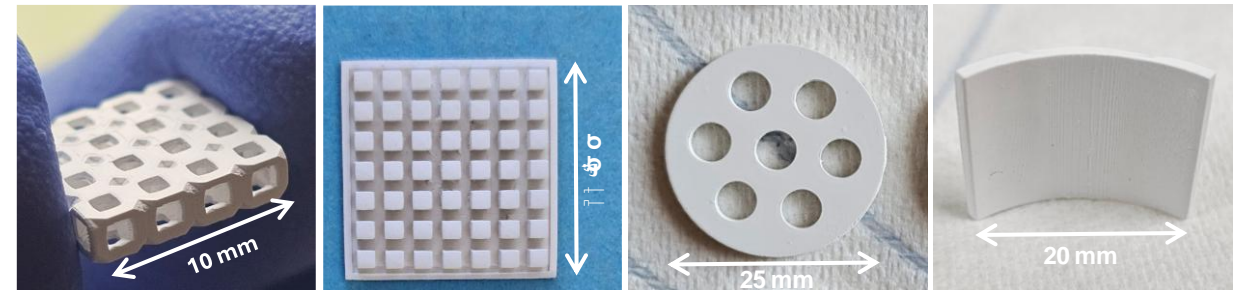
BT
NBT-6BT



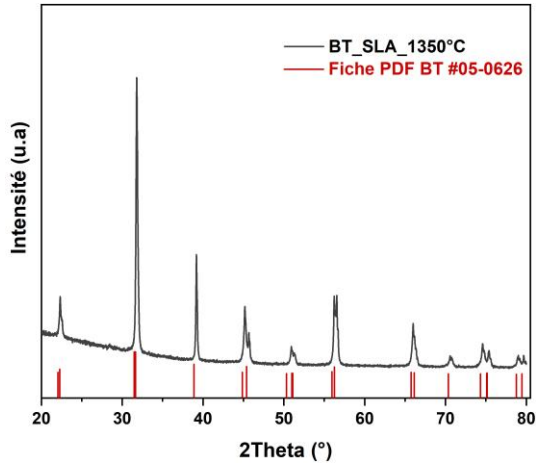
Comportement rhéologique



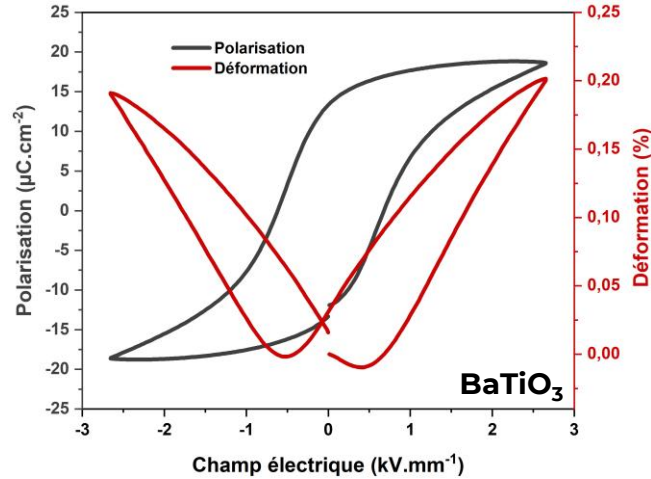
Photopolymérisation



Exemples de caractérisations



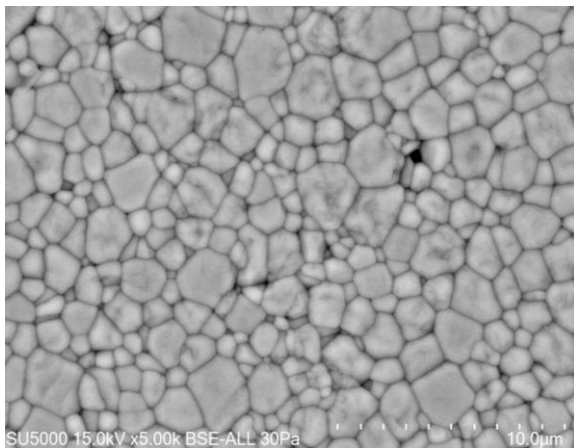
Diffraction des RX



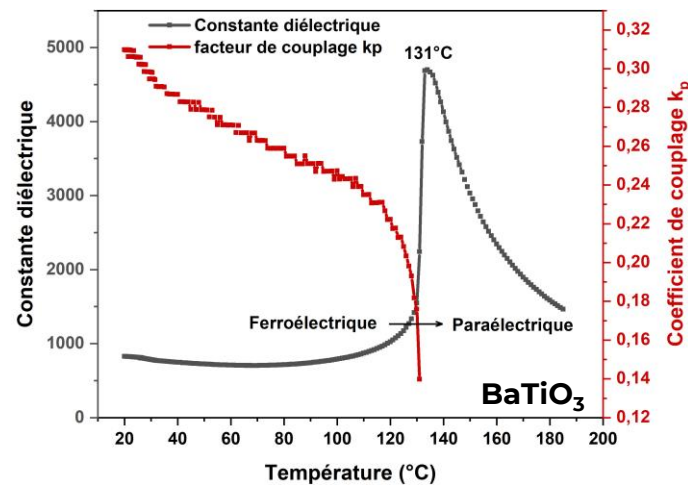
Mesures ferro/piézoélectriques



Mesures du coefficient piézoélectrique d_{33}



Microscopie électronique MEB



Mesures en température

Matériau	d_{33} (pC/N)	
	Notre étude	Littérature
BaTiO ₃	200	190
BCTZ	350	300-500
NBT-6BT	125	120-130
PZT	500	350-600

❑ Méthodologie expérimentale

Instrumentation de machines électriques

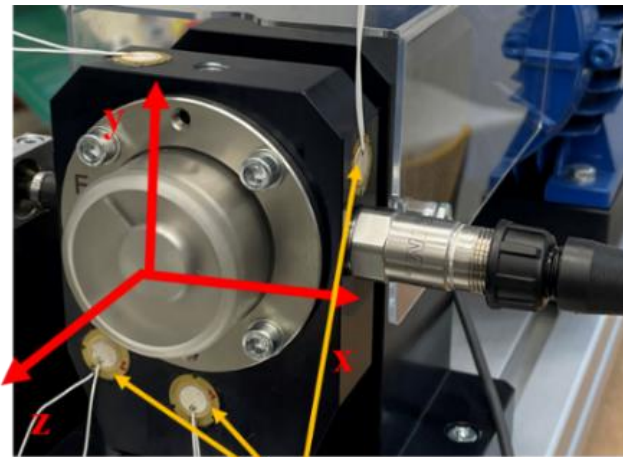


Mesures vibratoires

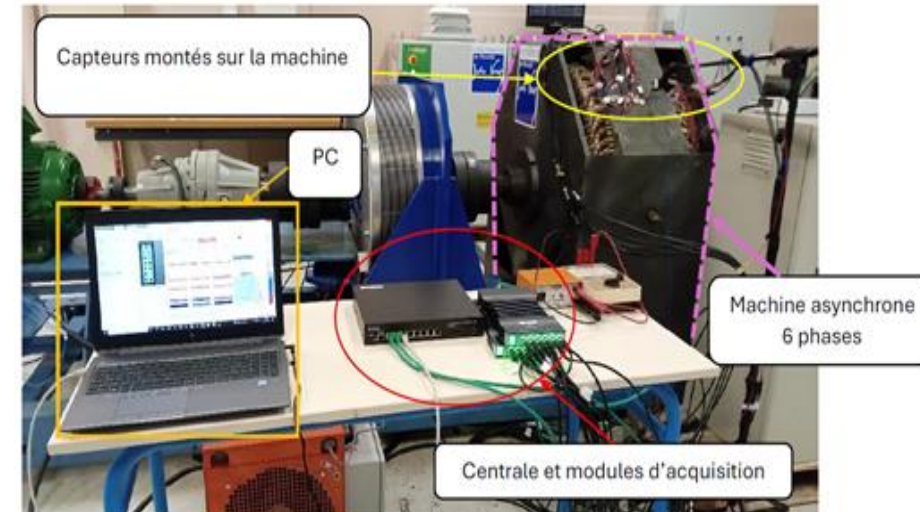
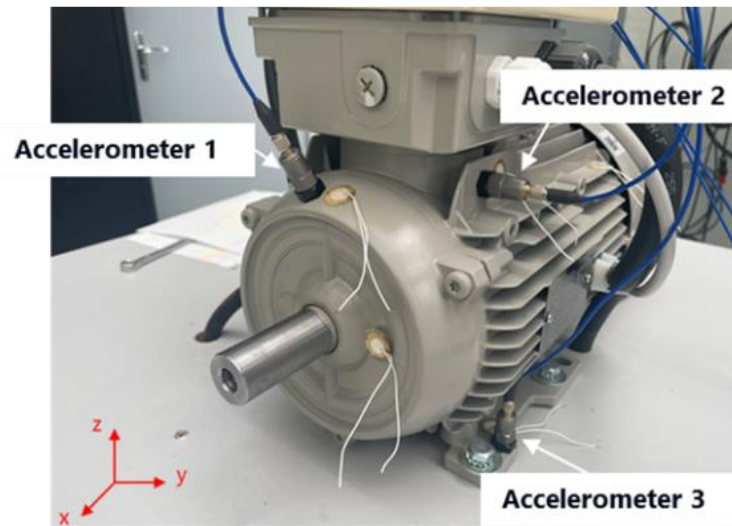


Interprétations des résultats expérimentaux

❑ Instrumentation de machines électriques



Capteurs – type buzzer



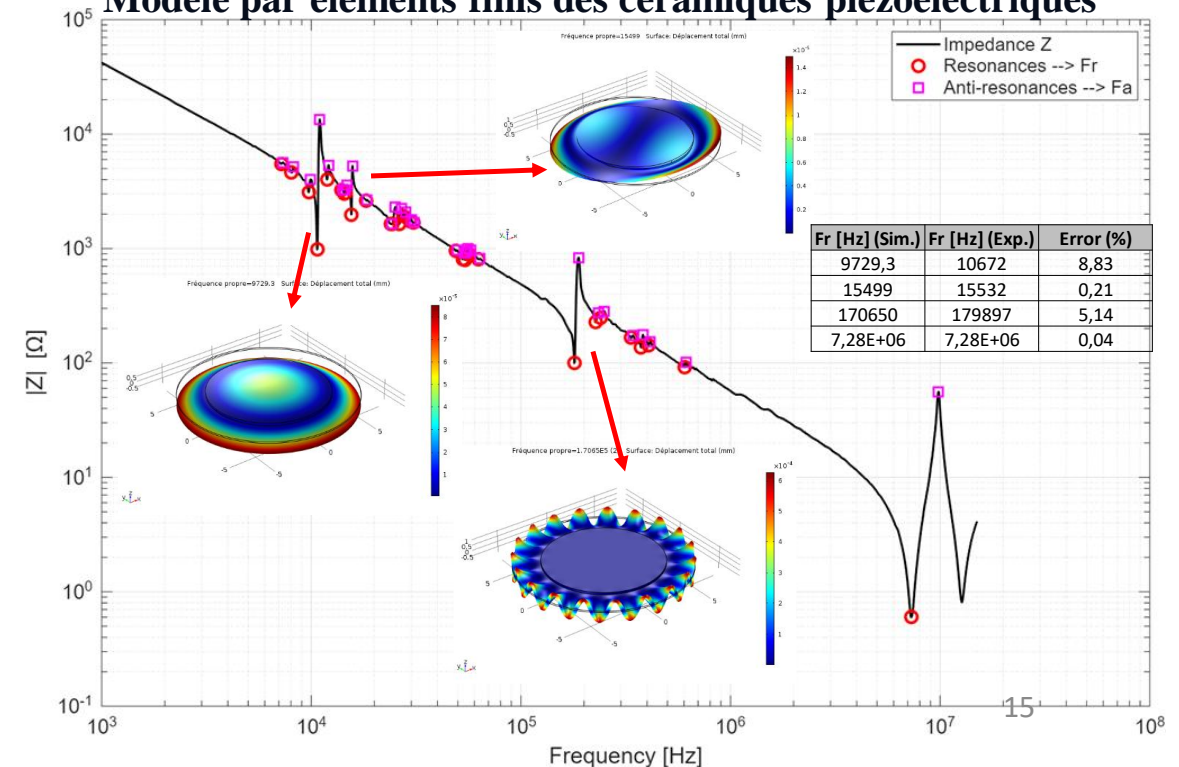
Travaux effectués

Les vibrations mécaniques sont générées par le fonctionnement de la machine électrique.

Disques piézoélectriques économiques collés sur la carcasse de la machine :

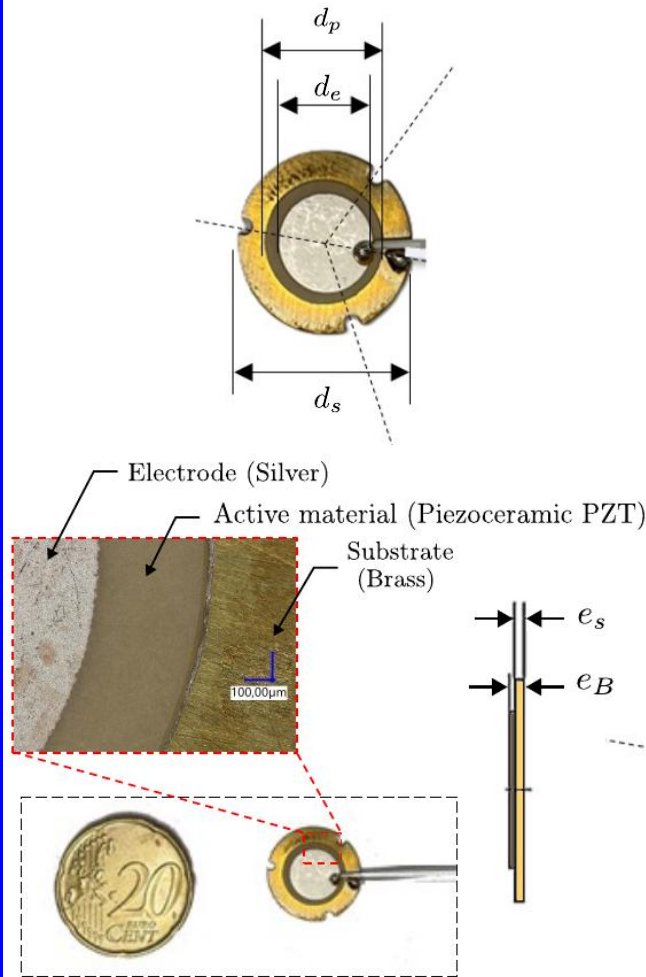
- Réponse à large bande, robuste aux variations de vitesse
- Déploiement et maintenance aisés
- Puissance de sortie faible mais stable

Modèle par éléments finis des céramiques piézoélectriques



Machine électrique

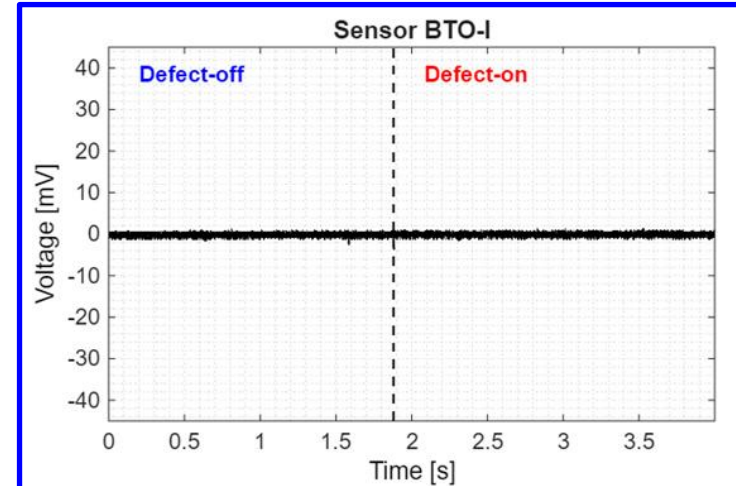
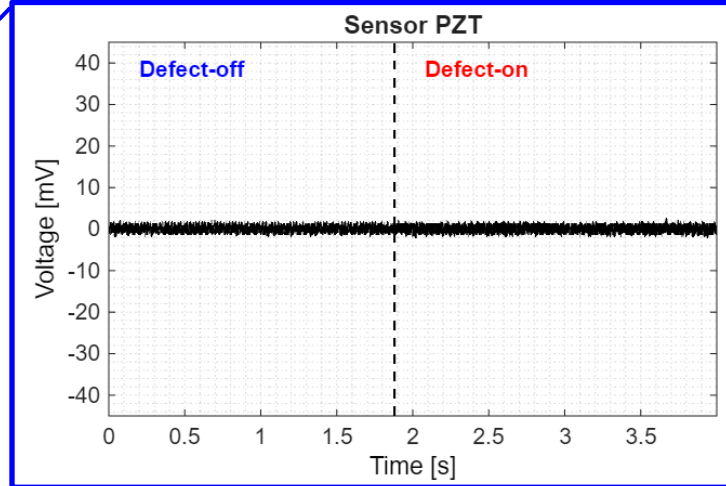
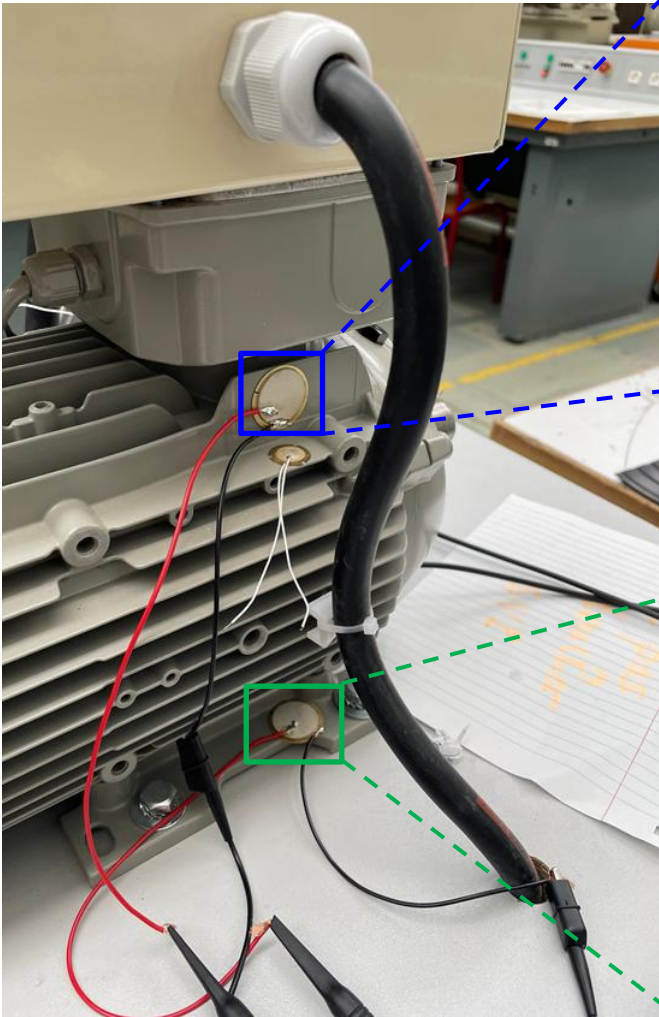
Capteur piézoélectrique



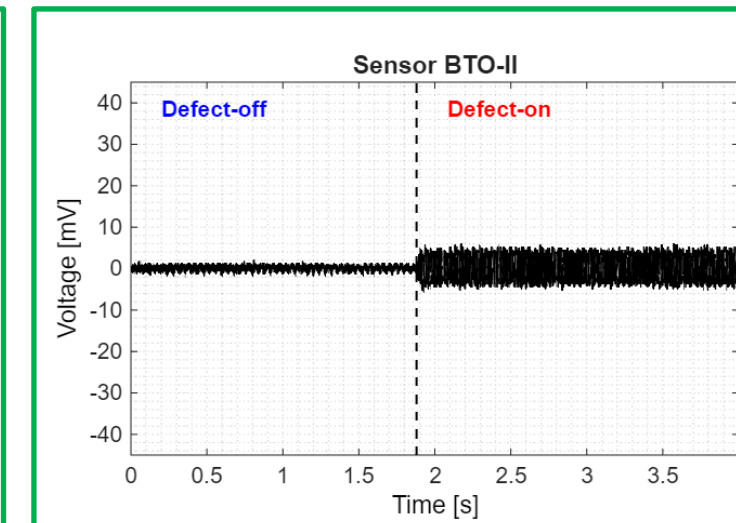
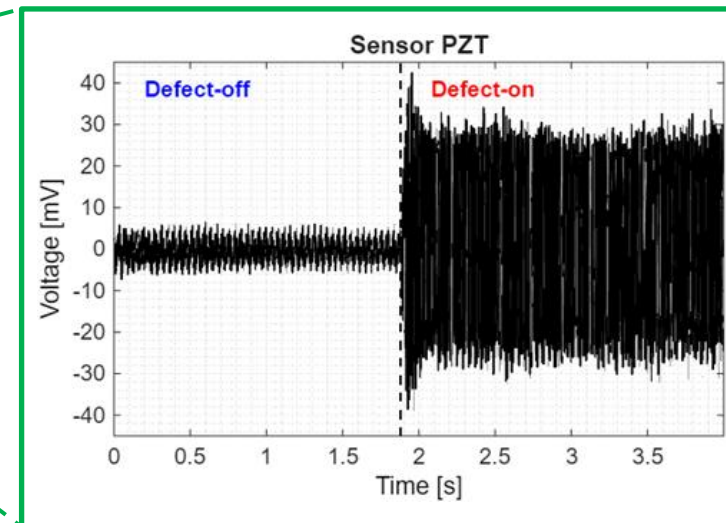
Piezoelectric patch locations

Travaux effectués

□ Domaine temporel



Moteur asynchrone avec défaut d'enroulement
(résistance ajoutée)



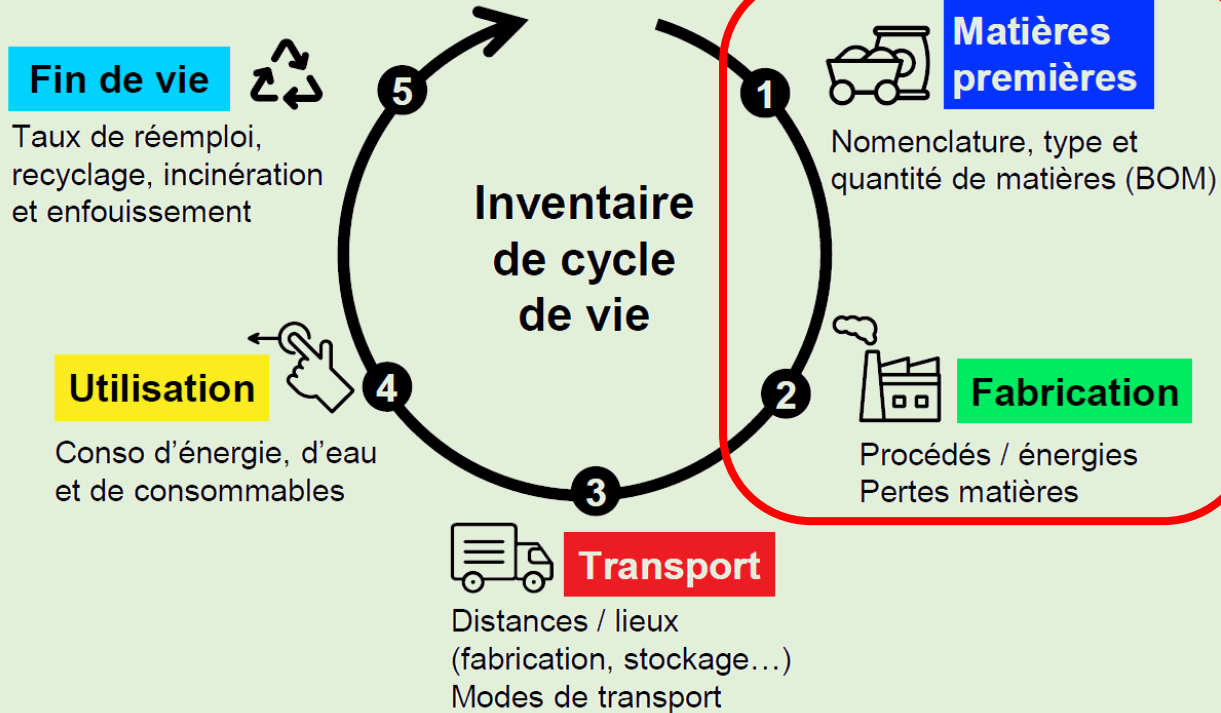
Travaux effectués



Analyse du Cycle de Vie



Evaluation environnementale multi-étapes & multicritères



Méthodologie générale



Normes **ISO 14040** et **ISO 14044**

Référentiels de calcul

EN 15804 (produits de construction), PEP Ecopassport, PEF-CR (product environmental footprint - category rules)

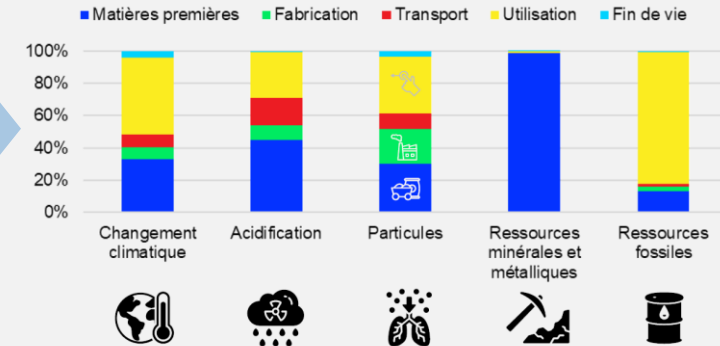
Logiciel



Base de données



Impacts environnementaux



+ eutrophisation, utilisation des terres, toxicité, rayonnement ionisant, appauvrissement de la couche d'ozone, consommation d'eau...

2. Catégories d'impacts - ILCD

Climat



Changement climatique

Ressources



Consommation d'eau



Épuisement des ressources,
minéraux et métaux



Utilisation des ressources,
matières fossiles

*Catégories d'impacts de la méthode EF
(Environmental Footprint) préconisée par la
commission européenne*

Biodiversité



Acidification



Écotoxicité, eaux douces



Eutrophication, terrestre



Eutrophication, eaux douces



Eutrophication, marine



Utilisation des terres

Santé



Particules



Toxicité humaine, cancer



Toxicité humaine, autre
que cancer



Rayonnement ionisant



Appauvrissement de la
couche d'ozone



Formation photochimique
d'ozone

Endpoint : 4 catégories d'impact (Climat, ressources, biodiversité et santé)

Midpoint : 16 catégories d'impact (changement climatiques, consommation d'eau, acidification, particules ...)

Travaux effectués

Impacts environnementaux correspondant aux matériaux pour l'obtention de céramique BaTiO₃

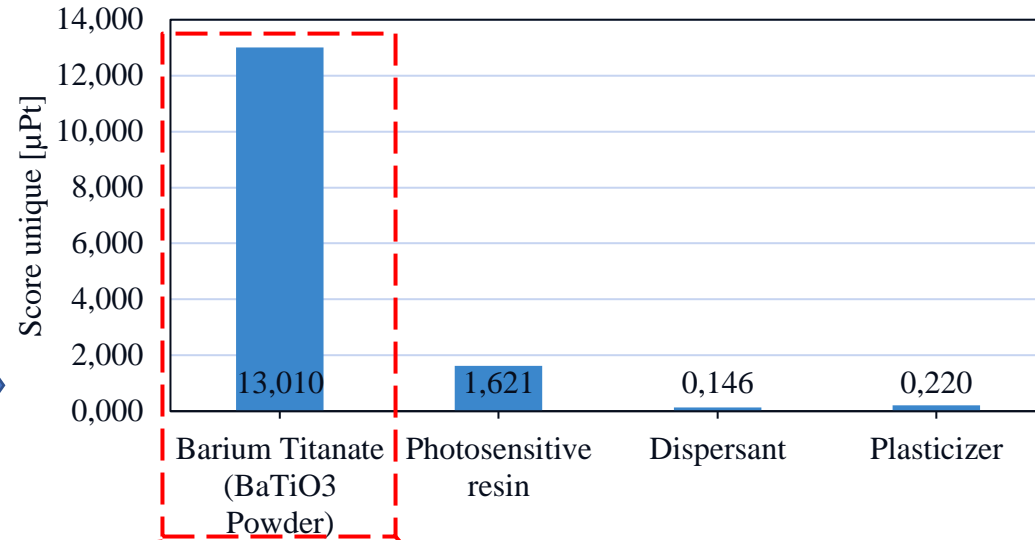
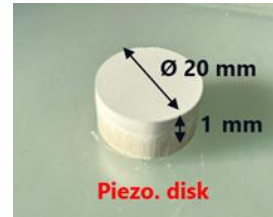
Procédé SLA

Matériaux

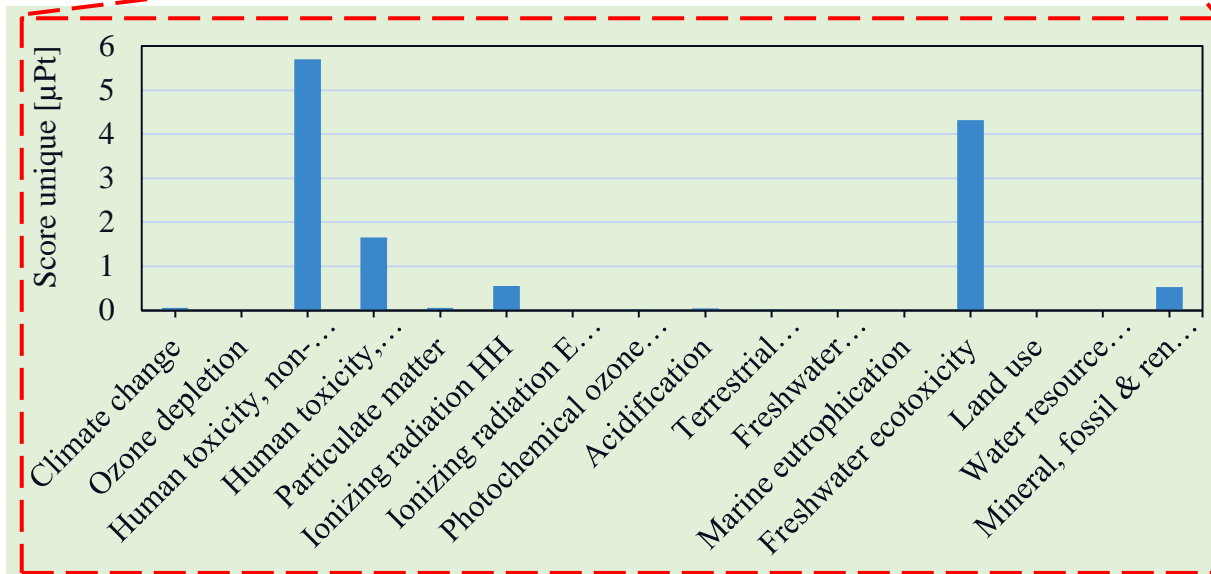


(1) Poudre BaTiO₃, (2) Résine photosensible, (3) Dispersant/agent de rhéologie, (4) Plastifiant

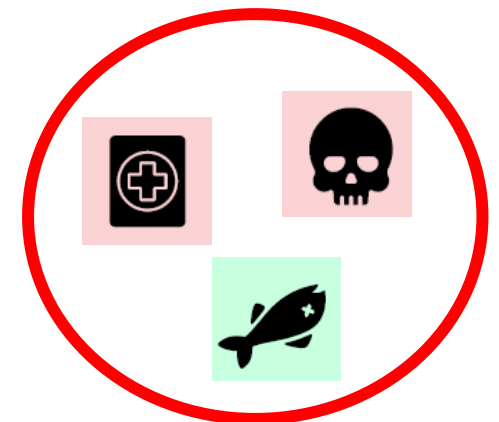
Sans les électrodes



Barium Titanate BaTiO₃



Hotspots :



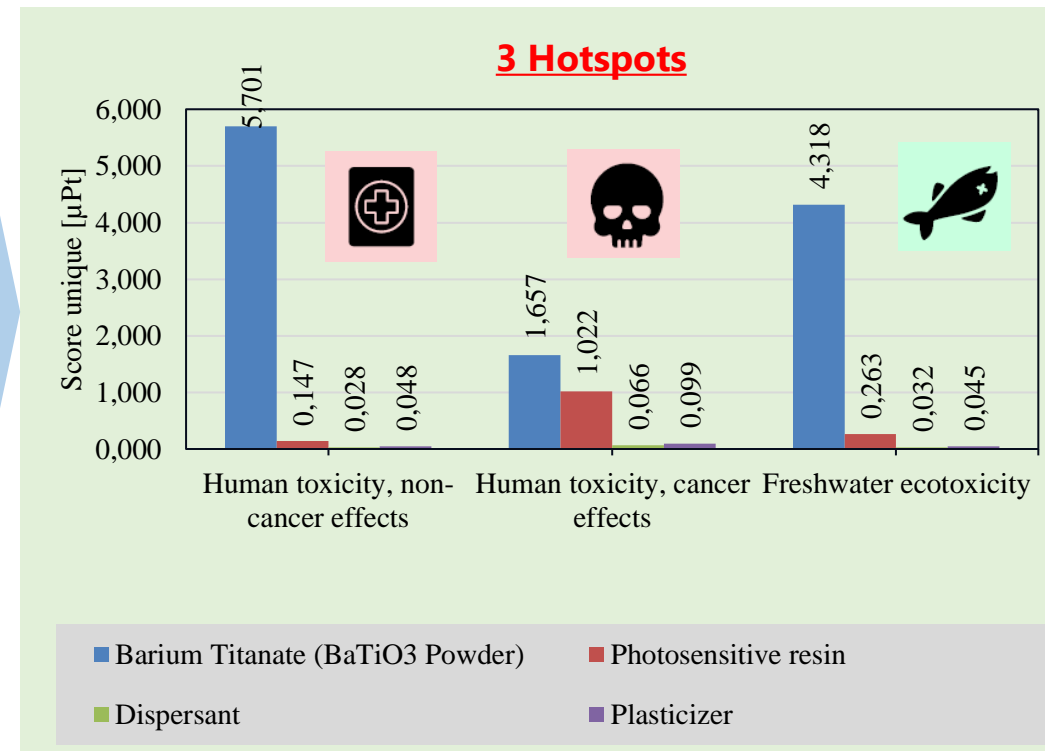
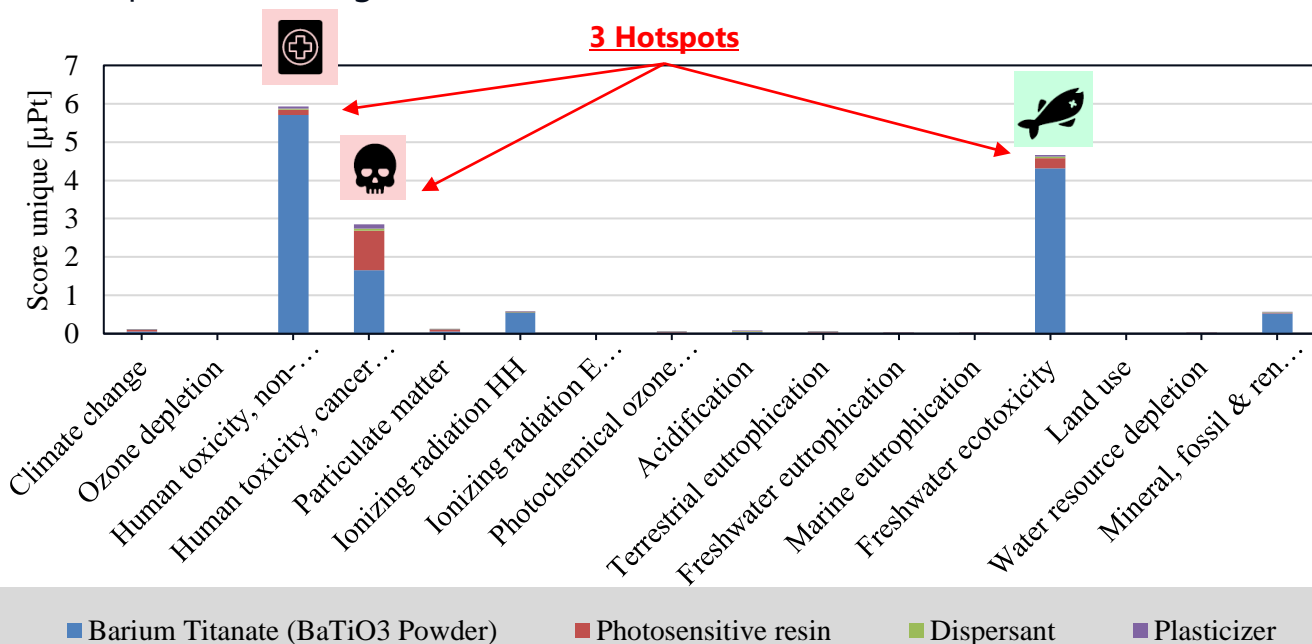
- Toxicité humaine (non cancérigène)
- Toxicité humaine (cancérigène)
- Eau douce écotoxicité

Travaux effectués

Comparaison des catégories d'impacts environnementaux vs. des divers produits commerciaux entrant dans la composition de la céramique BaTiO₃

Forte domination du Titanate de Baryum (BaTiO₃) dans plusieurs catégories.

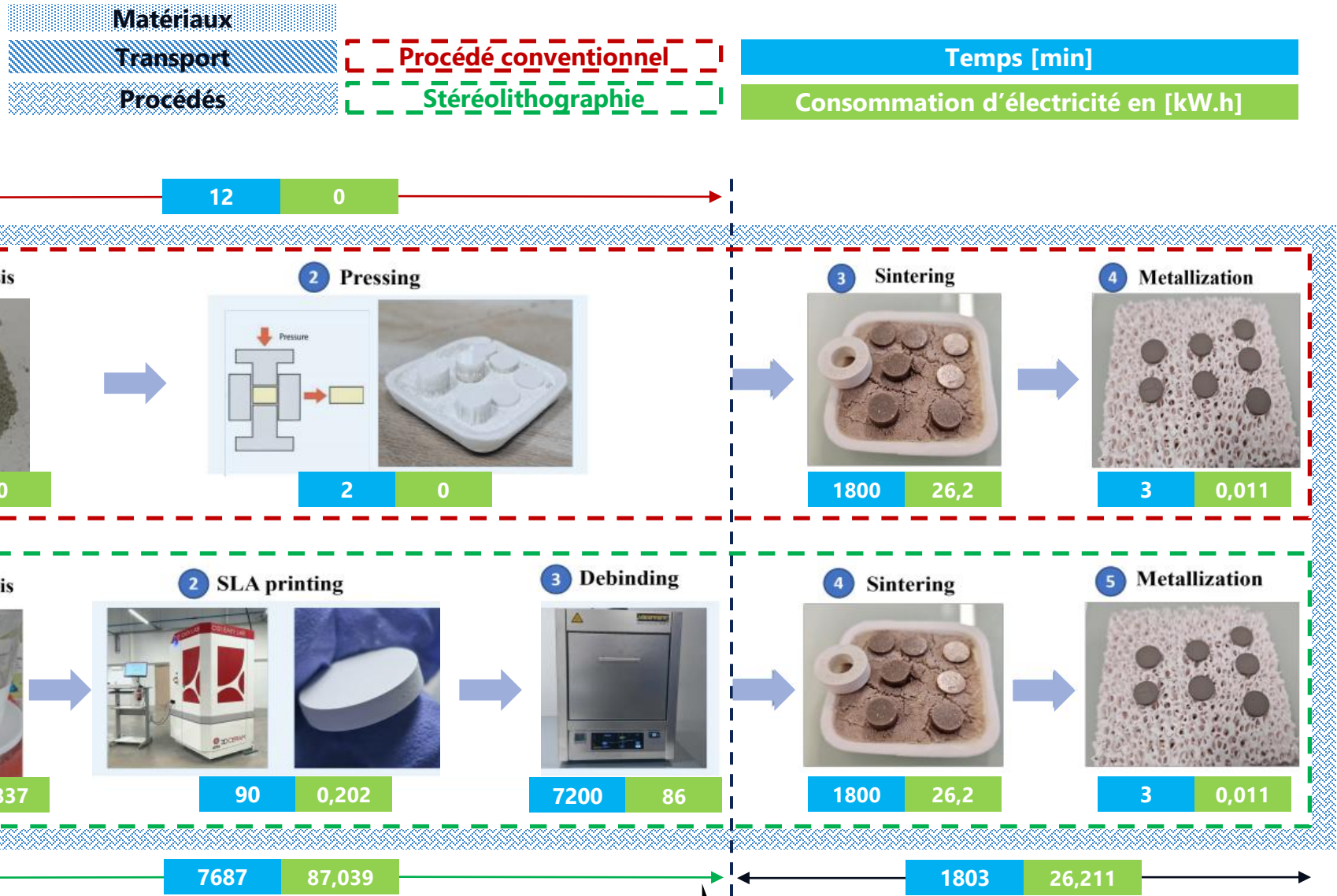
Matériaux



- **BaTiO₃** est le principal facteur d'impact environnemental, surtout pour les catégories liées à la santé humaine et à l'écotoxicité.
- Les autres matériaux : **résine photosensible, dispersant, plastifiant** présentent des **contributions faibles** pour la plupart des catégories.
- Les catégories "climate change" et "land use" restent modérées.

Travaux effectués

Comparaison des procédés de fabrication conventionnel + SLA



À partir de ce point, les étapes sont identiques pour les deux processus.

Conclusions et perspectives

➤ Conclusions :

- Elaboration de capteurs par techniques conventionnelles et essais par fabrication additive.
- Caractérisations de capteurs avec et sans plomb.
- Modélisation électromécanique de capteurs piézocéramiques.
- Analyse vibratoire sur machines : défauts électriques/mécaniques ; capteurs avec et sans plomb.
- Analyse du Cycle de Vie : identification des « leviers » afin de réduire les impacts environnementaux tout en garantissant les performances et la durabilité des systèmes finaux.

➤ Perspectives :

- Modélisation de capteurs sans plomb, permettant de prédire finement l'interaction matériau-structure-signal.
- Optimisation d'élaboration 3D des matériaux sans plomb : barbotine, taux de charges, propriétés plus adaptées.
- Optimisation des chaînes de mesure et auto-alimentation des capteurs.
- Analyse du Cycle de Vie : réduction de contribution énergétique des procédés, impacts des électrodes et des substrats, colles d'accroches substrat/matériaux/électrodes
- Étendre l'ACV jusqu'à la recyclabilité des capteurs finaux

2 Publications (soumises)

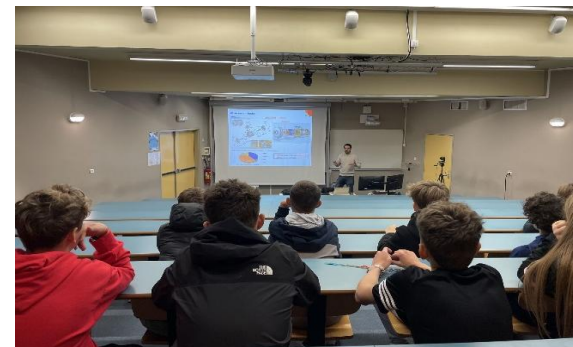
- « *Condition monitoring and diagnosis of induction machines with electrical faults using piezoelectric sensors* », soumise le 15 février 2026 au **Mechanical Systems and Signal Processing journal**
- « *Additive manufacturing of NBT-6BT piezoceramics by stereolithography (SLA): processing window, post-treatment optimization and functional properties* », soumise le 05 avril 2026 au **Journal of the European Ceramic Society**

Communications orales :

- **Matelec 2026**, « Colloque national sur les matériaux électro actifs et leurs applications », 9 et 10 juillet 2026 (partie élaboration et caractérisation de nouveau matériaux, et ACV)
- **Matériaux 2026** « Fabrication additive de céramiques piézoélectriques sans plomb par stéréolithographie (SLA) », du 16 au 20 novembre à Grenoble
- **Fêtes de la science 2025** : 2 conférences grand public sur la « Surveillance soutenable des machines électriques à l'aide de capteurs piézoélectriques autonomes ».

Posters :

- **Matelec 2026** : poster collaboratif interlaboratoire sur les matériaux électroactifs éco-responsable



Fin de la présentation

