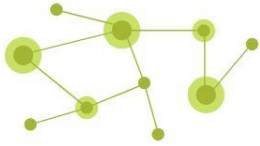


ÉNERGIE
ÉLECTRIQUE 4.0



MEDEE

Maîtrise Energétique des Entraînements Electriques

COMITE DE SUIVI EE4.0-MEDEE

Présentation de VULCAIN

10 avril 2026



Le projet - Vulcain

Nom du projet : Valeur ajoutée de La fabriCation Additive pour les matériaux du génie électrique - VULCAIN

Nom du porteur : Abdelkader Benabou

Partenaires impliqués :

Laboratoires GE :



Laboratoires hors GE partenaires :



Subventions : 2024 : 265 000€

2 postdoct - 22mois

Frédéric Gillon

WP1

Alejandro Ospina

WP2

François Balavoine

Abdelkader Benabou

Oualid Messal

Stéphane Panier

Stéphane Duchesne

Roberto Lombardi

Souad Harmand

Stéphane Vivier

Sébastien Drouart

Nouredine Fenineche

Olivier Marconot

Ronan Corin

Célien Bergeron

Etat de l'art

Laboratoires ayant publié au moins un article sur la fabrication additive (FA) pour les matériaux du génie électrique (FeSi, cuivre)

Acteurs Internationaux

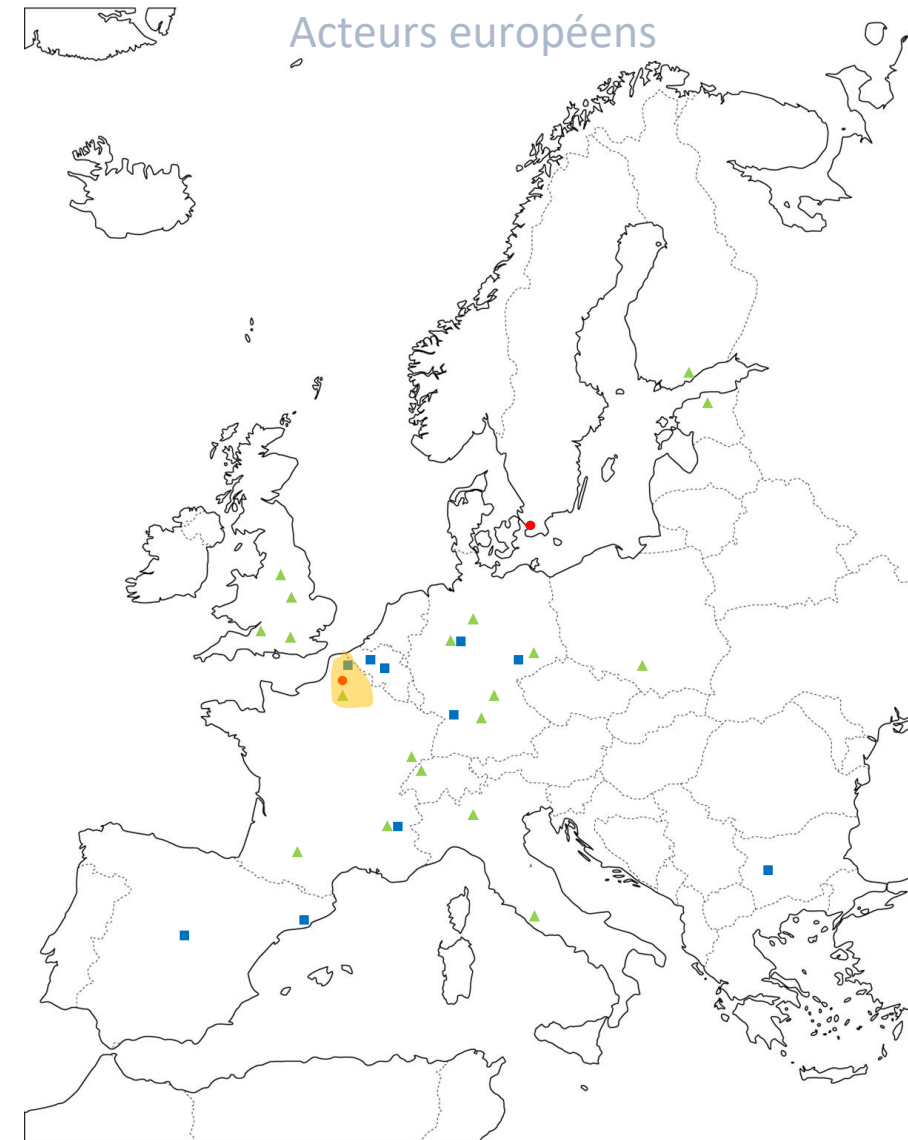
- ▲ + USA (Michigan, Oak Ridge, Wisconsin, Texas, Virginia)
- ▲ + Corée du sud (Séoul, Seongnam, Daejeon)
- ▲ ■ + Chine (Shanghai, Wuhan, Hong Kong)
- + Taïwan (Taïpei)
- ▲ + Singapour

Types d'impression :

- Dépôt de filament
- Projection de liant sur lit de poudre
- ▲ Fusion laser sur lit de poudre

Points saillants :

- **Process laser** domine aujourd'hui les études, en nombre
- **Aucune** analyse inter-process



Avantages du Fe6,5%wtSi

Circuits magnétiques, moteurs et transformateurs = tôles magnétiques Fe3%wtSi

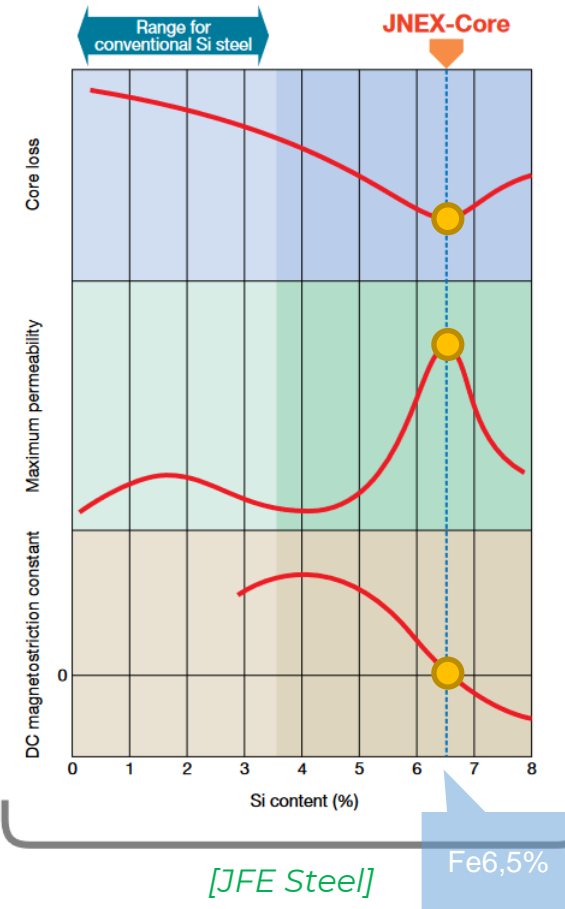


Tôles magnétiques Fe6.5%wtSi = **plus forte résistivité électrique, magnétostriction faible** mais **plus friables**

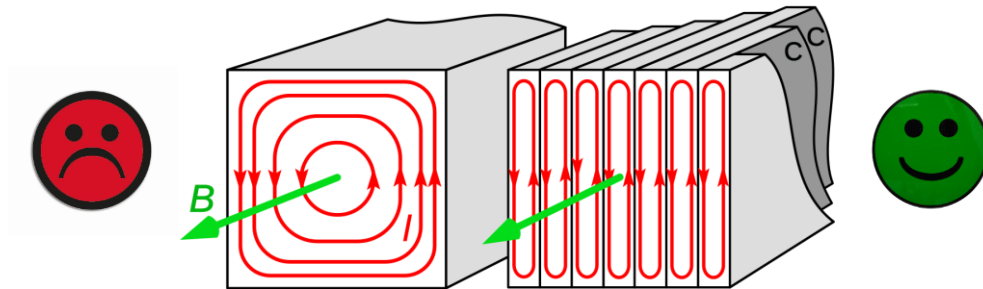
Bcp d'avantage

Comment produire **des pièces** FeSi6,5% : la fabrication additive ?

Variation in magnetic properties of silicon steel by Si content



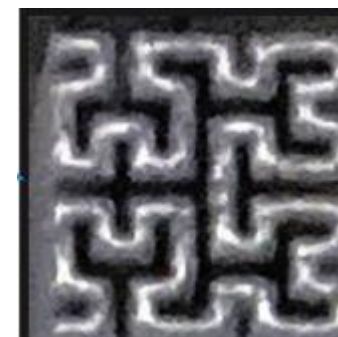
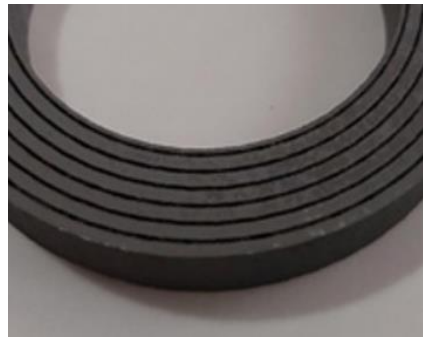
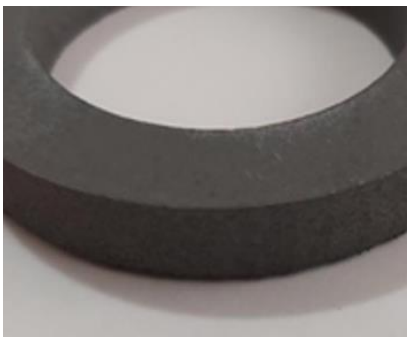
Circuit magnétique avec empilement de tôles = moins de **pertes par courants induits**



Mais faire le même circuit en impression 3D = pas de feuilletage = + de courants induits !

Nécessaire d'avoir des structures imprimées en 3D **ET réduisant les courants induits**

Plusieurs études faites dans d'autres laboratoires : **impact de la géométrie du circuit magnétique sur les pertes par courants induits** [Stornelli et al., 2021] [Plotkowski et al., 2020]



Un projet Structurant : Vulcain

Les laboratoires régionaux GE travaillant ensemble pour les fabrications additives

Une **matière première commune** :

Poudre FeSi6,5%



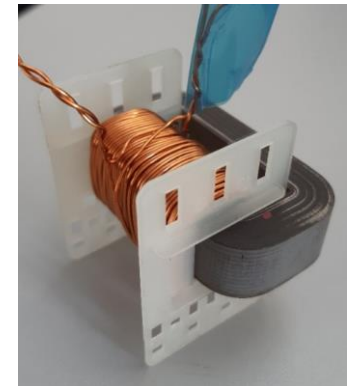
utC Recherche en partenariat avec



LTI LABORATOIRE DES TECHNOLOGIES INNOVANTES



Un **objectif commun** :
imprimer un
composant du génie
électrique **optimisé**



Objectifs

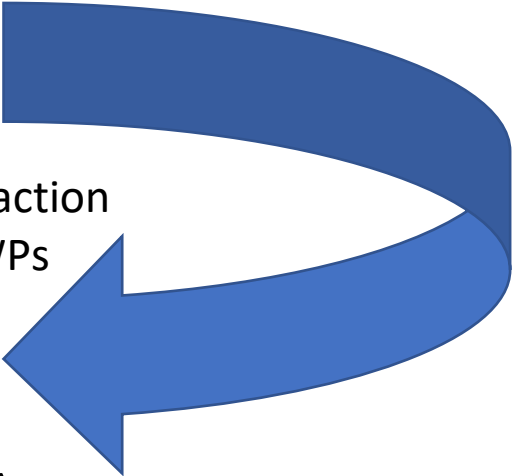
• *Objectifs* WP1

- Modélisation d'une inductance de référence
- Réduction des courants induits
- **Optimisation topologique**
- **FA** d'une forme optimisée

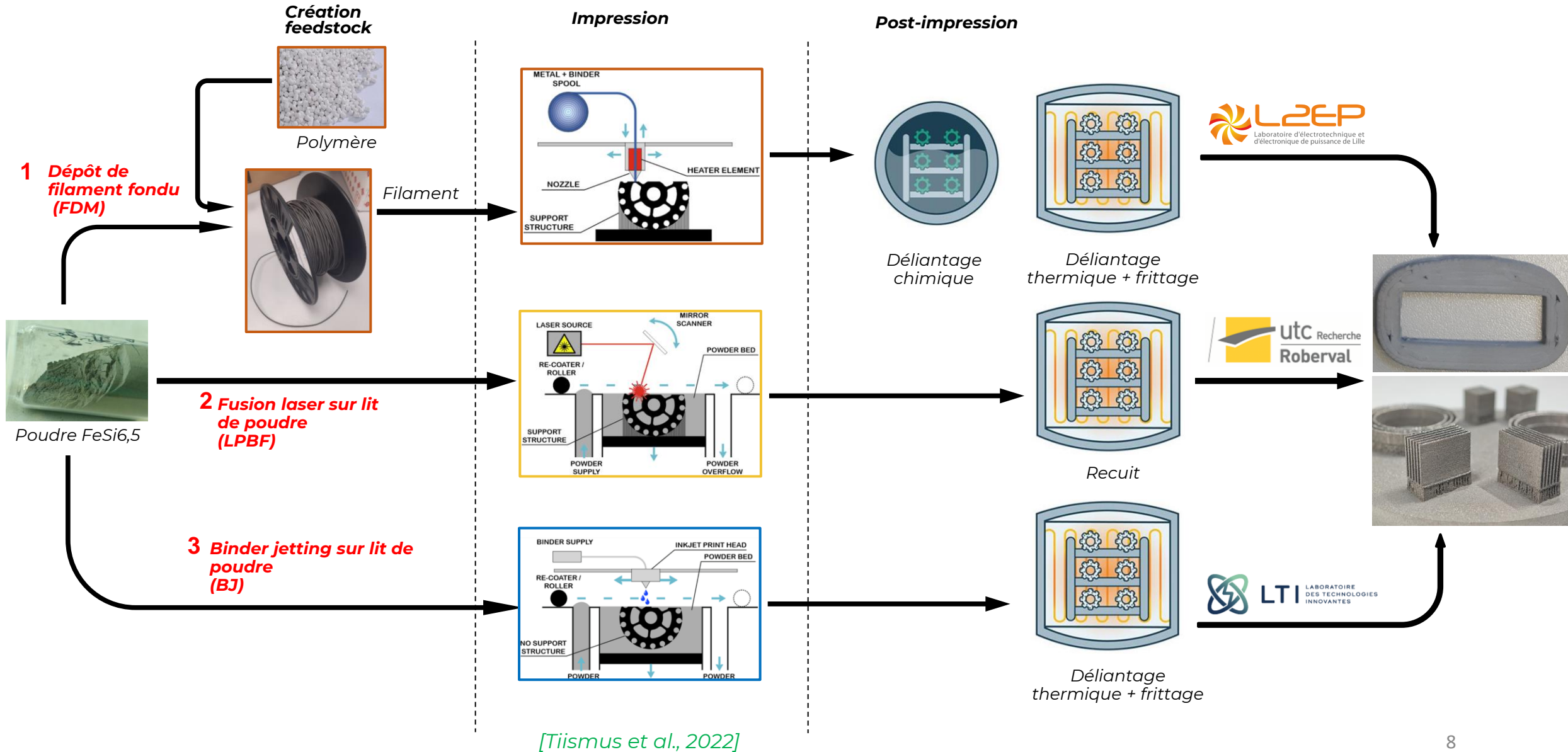
- *Objectifs* WP2

- Obtention de pièces denses pour chaque technique de **FA**
- **Caractérisations multi-physique** des pièces issues des FA
- Réalisation d'une pièce de référence basée sur une inductance commerciale

Forte interaction
entre les WPs



Procédés de FA du projet

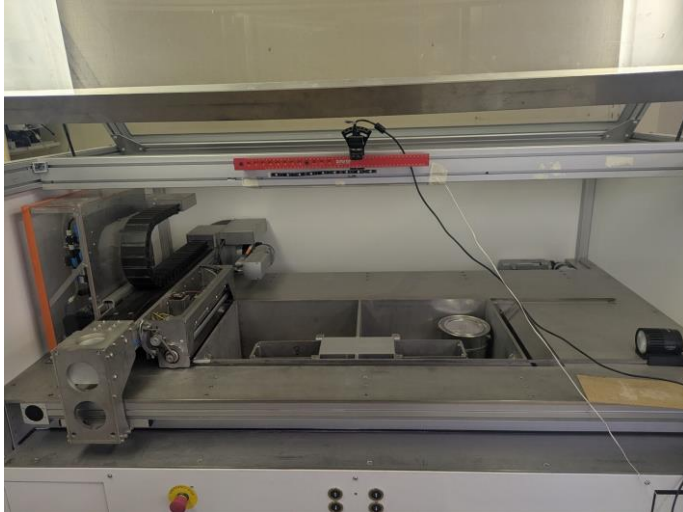


Plateforme/équipements

Équipements pour les 3 procédés de FA métallique

BJ

Binder jetting



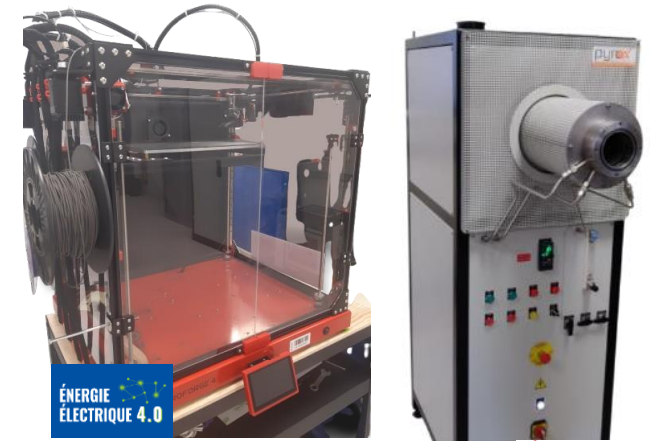
Imprimante

FDM

Dépôt de filament fondu



Extrudeuse Process11



Imprimante ProForge4

Four Pyrox



LPBF

Fusion laser sur lit de poudre



Trumpf TruPrint 1000



Four Hydrogène



Four



Plateforme/équipements

Équipements pour **les caractérisations** multi-physiques

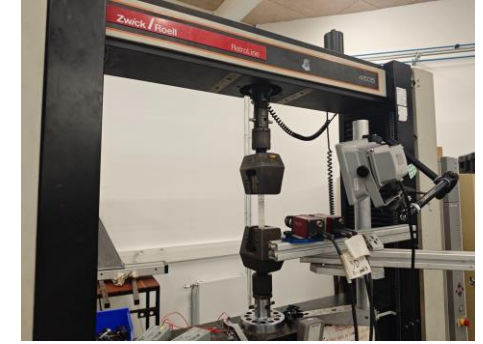


Banc Brockhaus

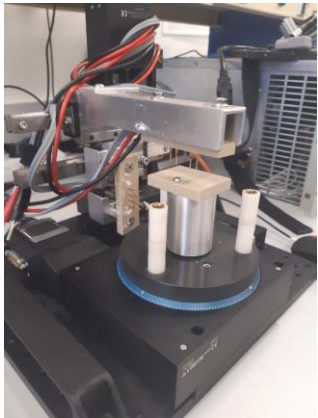
Magnétique



Diélectrique



Mécanique



Mesure Van der Pauw



Électrique



Mesure de conductivité thermique Thermoconcept



Thermique

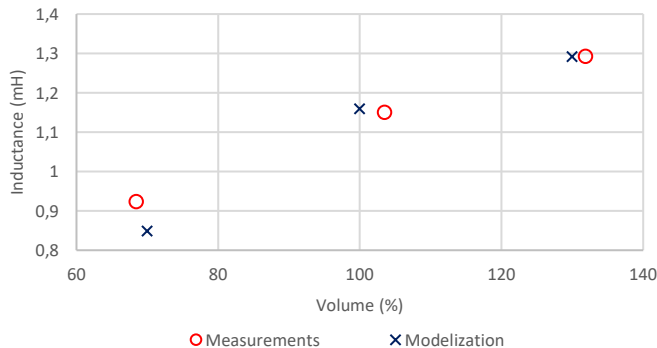
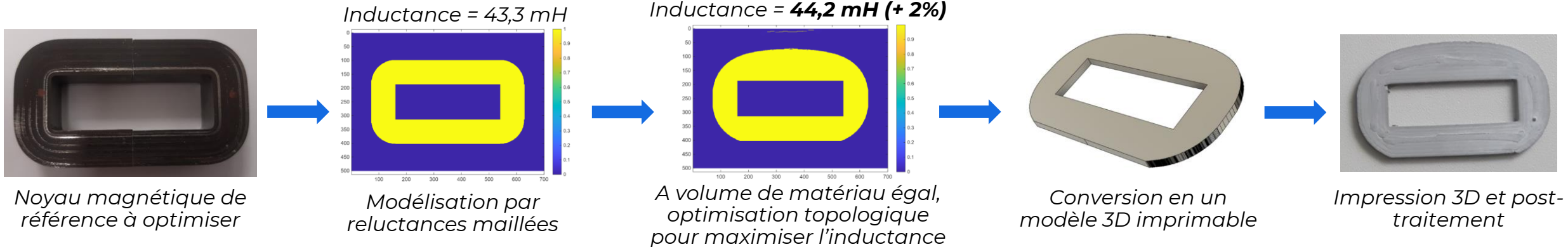


Microscope électronique à balayage Zeiss + sondes EBSD et EDX

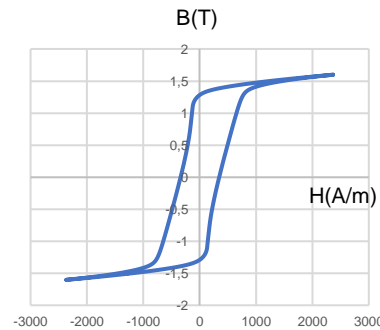


Microstructure

Optimisation topologique pour la maximisation des performances d'un noyau magnétique



Comparaison expérimentation / modélisation



Caractérisations magnétiques



Comparaison avec plusieurs noyaux possédant des volumes différents

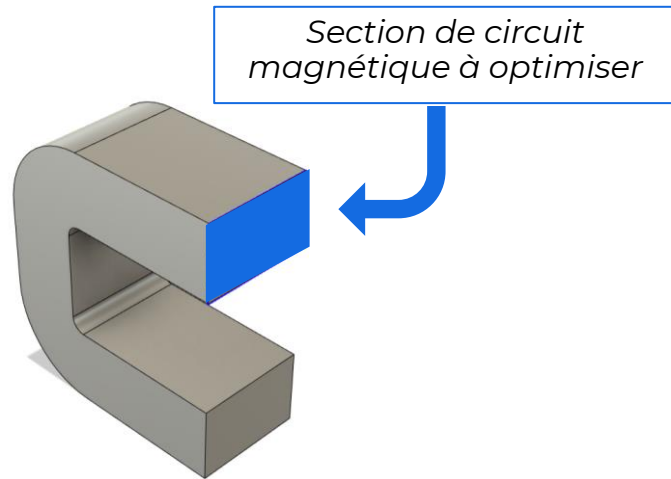
- Optimisation topologique permet de maximiser les caractéristiques du composant pour un volume donné
 - Les formes proposées par l'optimisation sont imprimées et caractérisées
 - Résultats cohérents entre modélisation et caractérisation
- ☐ **chemin complet de l'optimisation d'un composant vers sa fabrication additive**

forme

Travaux effectués – TO courant induite

Optimisation topologique pour la minimisation des courants induits

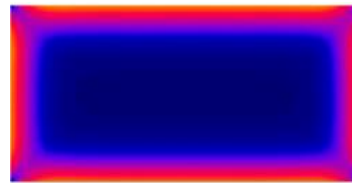
Réduction des courants induits



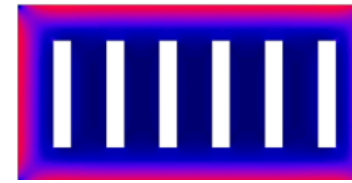
Objectif : réduire les pertes par courants induits

Mais **difficile de modéliser** la répartition des courants induits en 2D □ Recours à la 3D nécessaire, mais couteux (temps)

D'après la littérature, les pertes par courants induits **baissent avec le périmètre externe** de la section [Croset et al., 2024]



Section « pleine »
= **beaucoup de courants induits**



Section avec rainures ajoutées au centre
= **peu d'effets sur courants induits**

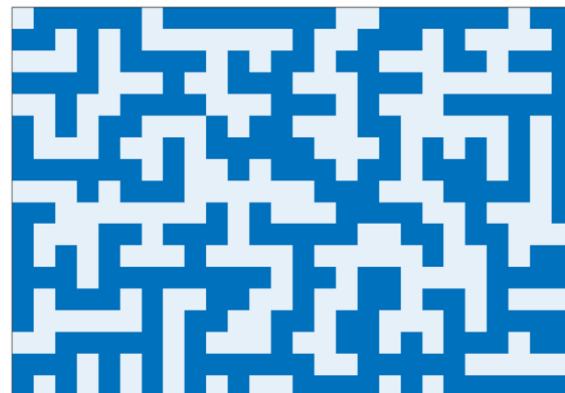


Même rainures placées sur le pourtour
= + de périmètre
= **réduction des courants induits**

Idée : faire une optimisation topologique géométrique

- objectif : **maximiser le périmètre externe**

- contrainte : taux de remplissage de la section



Exemple d'une optimisation sur la section

Obtention de **formes de section de circuits magnétique** permettant de réduire les courants induits

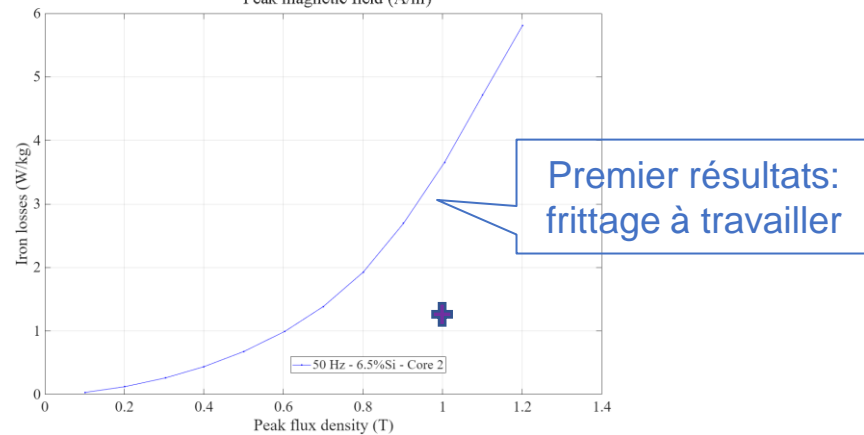
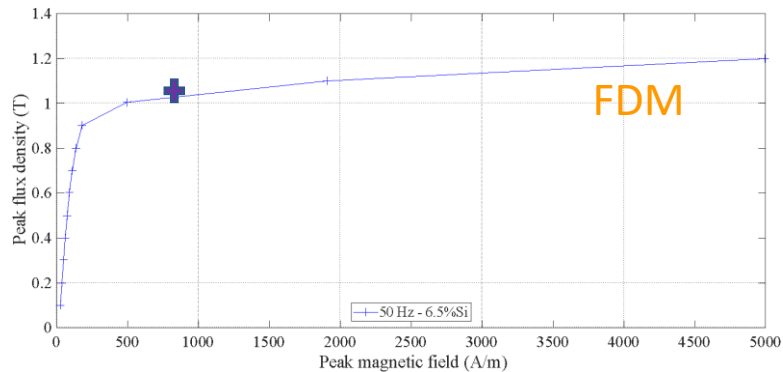
Travaux effectués - caractérisation

Caractérisations du matériau magnétique FeSi6,5%

Des performances

Caractérisation magnétique

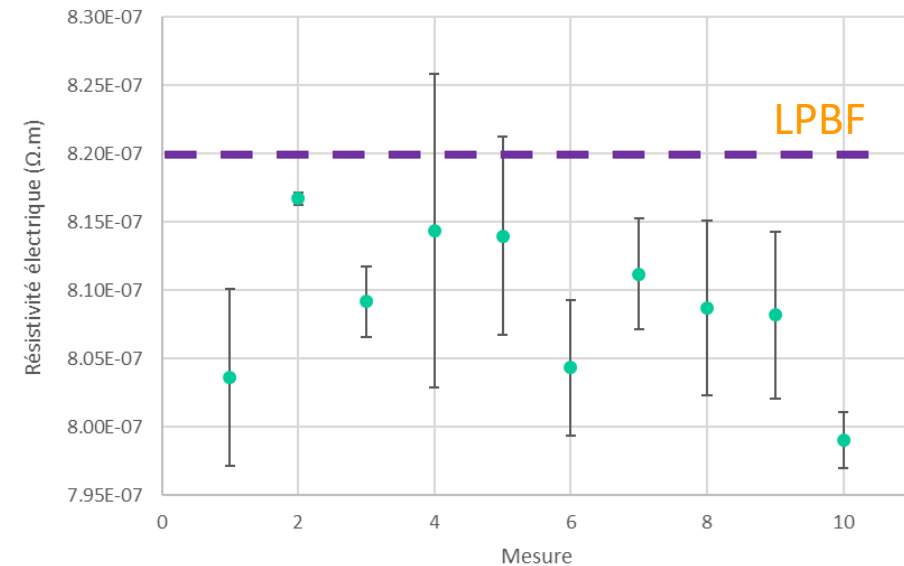
Mesures sur **tore plein** avec banc Brockhaus



✚ Ex: Toile 6,5% 20JNHF1300, **0,2 mm** : $B_{800A/m} = 1,09 T$; $P_{10/50} = 1,2 W/kg$

Caractérisation électrique

Mesures sur banc Van der Pauw avec fines lamelles cubiques



Résistivité électrique moyenne du Fe6,5%Si FA : $80,9 \mu\Omega.cm$

Ex: Toile 6,5% 10JNEX900 : Résistivité électrique : $82 \mu\Omega.cm$

Un matériau FA prometteur... !

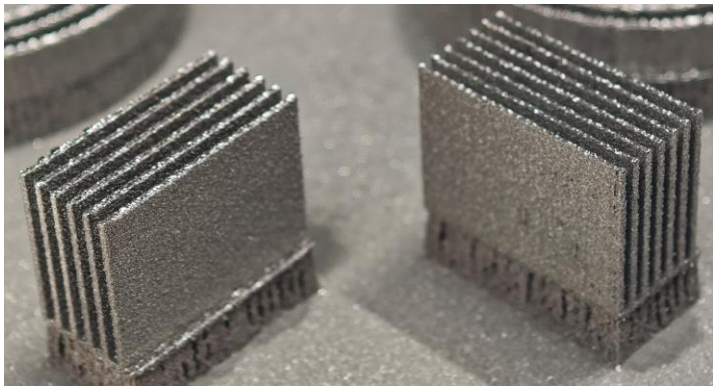
Travaux effectués - Impression

Formes et imprimabilité

FA de **structures fines** et **caractérisation d'un tore à lamelles**

Fabrication de structures fines « peigne »

Murs d'épaisseur $0,48 \text{ mm} < e < 0,68 \text{ mm}$



Densité des pièces > 96%

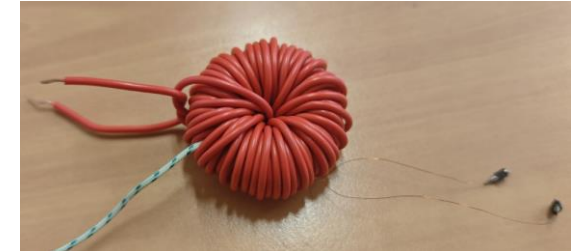
Fabrication d'un tore à lamelles à assembler

Épaisseur des lamelles : 0,63 mm



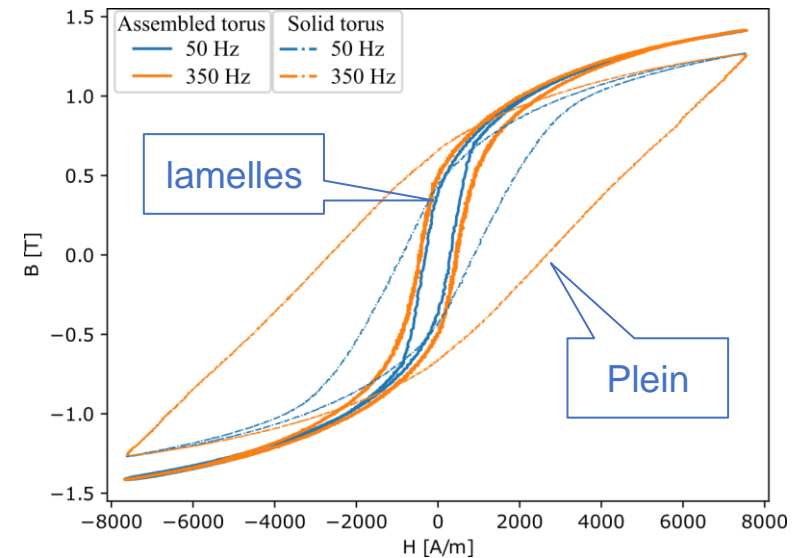
Caractérisation magnétique du tore à lamelles

Bobinage



Assemblage

Isolation sol-gel

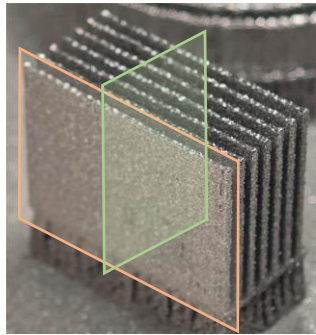


- Jusqu'à 86% de réduction des pertes fer massiques par rapport à un tore plein

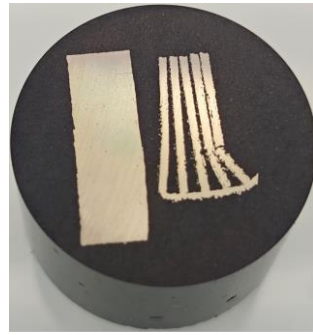
Travaux effectués - Microstructure

Observation de la **microstructure** du FeSi6.5% (MEB + EBSD)

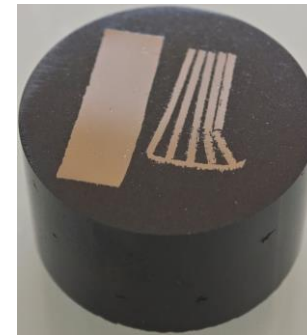
Caractérisation de la microstructure
(pour l'amélioration des performances des matériaux)



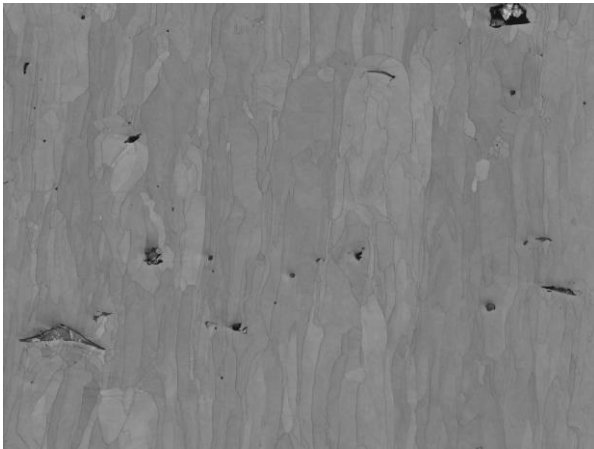
Découpe
Enrobage



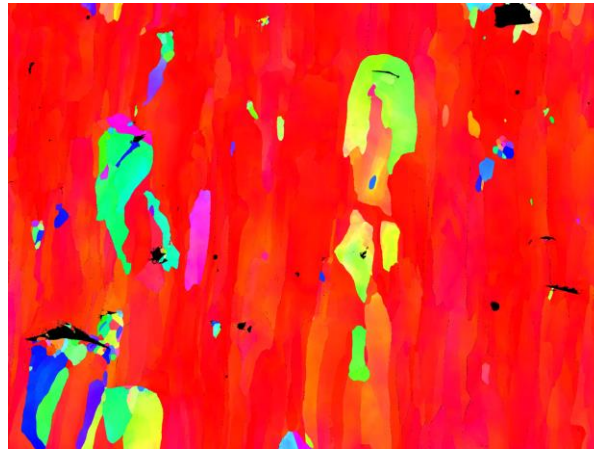
Polissage
Finition miroir



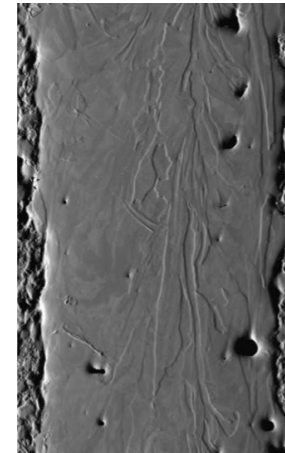
Building direction (BD) ↑



Microstructure



Orientation des grains (selon BD)



Microstructure



Orientation selon BD

- Caractérisation de la microstructure d'un échantillon LPBF cru
- □ **Analyse de la porosité et lien entre microstructure et propriétés magnétiques et électriques**

Va être fait pour les 3 procédés

• **Articles et conférences**

- *Optimisation topologique et impression 3D d'un noyau magnétique*
 - Participation à la conférence OIPE (Pologne, septembre 2025)
 - Post-publication acceptée dans **le journal IJAEM**
- **Deux soumissions acceptées** pour la **conférence EPNC** (Estonie, juin 2026)
 - *Comparaison multi-physique et multi-procédés d'un matériau magnétique fabriqué additivement*
 - Réduction des pertes fer d'un tore fabriqué additivement en Fe6,5%wtSi par assemblage de sous parties

Publications communes

3 procédés de de FA comparés \Rightarrow impacts sur les matériaux et les composants

Proposition de forme fabricable pour la réduction de courants induits (Opti Topo et limite des procédés)

Impression des matériaux en FeSi6,5%

Travail en équipe des laboratoires au sein du projet.

Vers **les matériaux et composants FA** apportant de nouvelles perspectives

Merci
Avez – vous des questions ?



Références bibliographiques

A. Domine, C. Verdy, C. Penaud, L. Vitu, N. Fenineche, L. Dembiski, "Selective laser melting (SLM) of pure copper using 515-nm green laser : from single track analysis to mechanical and electrical characterization", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023

S. Estenlund, E. Adolfsson, S. Hosseini, "A study in additive manufacturing of windings for traction machines", *SPEEDAM*, pp. 1302-1308, 2024

D. Goll, D. Schuller, G. Martinek, T. Kunert, J. Schurr, C. Sinz, T. Schubert, T. Bernthaler, H. Riegel, G. Schneider, "Additive manufacturing of soft magnetic materials and components", *Additive manufacturing*, vol. 27, pp. 428-439, 2019.

B. Koo, M-S. Jang, Y. G. Nam, S. Yang, J. Yu, Y. H. Park, J. W. Jeong, "Structurally-layered soft magnetic Fe-Si components with surface insulation prepared by shell-shaping selective laser melting", *Applied Surface Science*, vol. 553, p. 149510, 2021

T. Q. Pham, H. Suen, P. Kwon, G. Kumari, S. N. Foster, "Reduction in hysteresis loss of binder jet printed iron silicon with boron", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, pp. 4864-4873, 2021

A. Selema, M. Beretta, M. Van Coppenolle, H. Tiismus, A. Kallaste, M. N. Ibrahim, M. Rombouts, J. Vleugels, L. A. I. Kestens, P. Sergeant, "Evaluation of 3D-printed magnetic materials for additively manufactured electrical machines", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 569, p. 170426, 2023

G. Singh, J-M. Missiaen, D. Bouvard, J-M. Chaix, "Copper extrusion 3D printing using metal injection moulding feedstock: Analysis of process parameters for green density and surface roughness optimization", *Additive Manufacturing*, vol. 38, p. 101778, 2021

H. Tiismus, A. Kallaste, A. Belahcen, A. Rassolkin, T. Vaimann, P. Shams Ghahfarokhi, "Additive manufacturing and performance of E-type transformer core", *Energies*, vol.14, p. 3278, 2021.

M. Zaied, "Study of a magnetic material produced by additive manufacturing analysis of the manufacturing process, modeling and characterization", PhD report, UTC, 2022

V. Martin, "Fabrication additive de matériaux magnétiques doux par voie indirecte", Manuscrit de thèse, Centrale Lille Institut, 2023

S. Charrier, S. Panier, P. Rozier, V. Seznec, "Additive manufacturing by binder jetting of thick electrode for Li-ion battery", *Journal of Power Sources*, vol. 670, p. 239420, 2026

[JFE Steel] JFE Steel, "Electrical steel sheets for high frequency application"

[Stornelli et al., 2021] G. Stornelli, A. Faba, A. Di Schino, P. Folgarait, M. R. Ridolfi, E. Cardelli, R. Montanari, "Properties of additively manufactured electric steel powder cores with increased Si content", *Materials*, vol. 14, p. 1489, 2021

[Plotkowski et al., 2020] A. Plotkowski, K. Carver, F. List, J. Pries, Z. Li, A. M. Rossy, D. Leonard, "Design and performance of an additively manufactured high-Si transformer core", *Materials & Design*, vol. 194, p. 108894, 2020

[Croset et al., 2024] G. Croset, U. Soupremanien, T. Baffie, G. Delette, "Designing size-controlled air cavities to reduce iron losses of 3D printed ferromagnetic parts : Modelling and experimental results", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 591, p. 171703, 2024