

Cartographie des forces du réseau des Instituts Carnot en Fabrication Additive

I. Introduction

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

III. Notre empreinte industrielle

IV. Fiches portraits des Carnot

Sommaire

I. Introduction

Fabrication additive : de promesse à levier stratégique

Jadis technologie émergente, la fabrication additive (FA) poursuit sa trajectoire, gagnant en maturité et en impact au sein des filières industrielles. Elle s'impose comme un levier technologique de premier plan pour relever les défis industriels, environnementaux et stratégiques de notre époque. En s'appuyant sur ses avantages multiples – réduction de masse, personnalisation, rapidité de prototypage, ajout de fonctions, optimisation des coûts – la FA contribue à la montée en gamme de l'industrie française et à sa relocalisation. Fort de ce constat, le Réseau thématique Carnot Industrie du futur publie une nouvelle édition de la cartographie des acteurs de la R&D en fabrication additive, enrichie d'un volet de transfert industriel (recherche partenariale). Onze instituts, membres de ce Réseau thématique Carnot, y présentent une vision consolidée de leurs expertises, de leurs forces en présence et de leur contribution concrète au transfert technologique vers les entreprises.

En quelques chiffres : 618 équivalents temps plein mobilisés (+67 % depuis 2017), près de 59 millions d'euros d'équipements, 930 projets industriels réalisés, 2273 publications scientifiques et 258 brevets déposés. Plus encore, les instituts Carnot ont renforcé leur capacité d'accompagnement sur toute la chaîne de valeur, du design à l'intégration, en couvrant l'ensemble des TRL et en adressant 14 filières stratégiques, de l'aéronautique au nucléaire, en passant par le médical ou l'automobile.

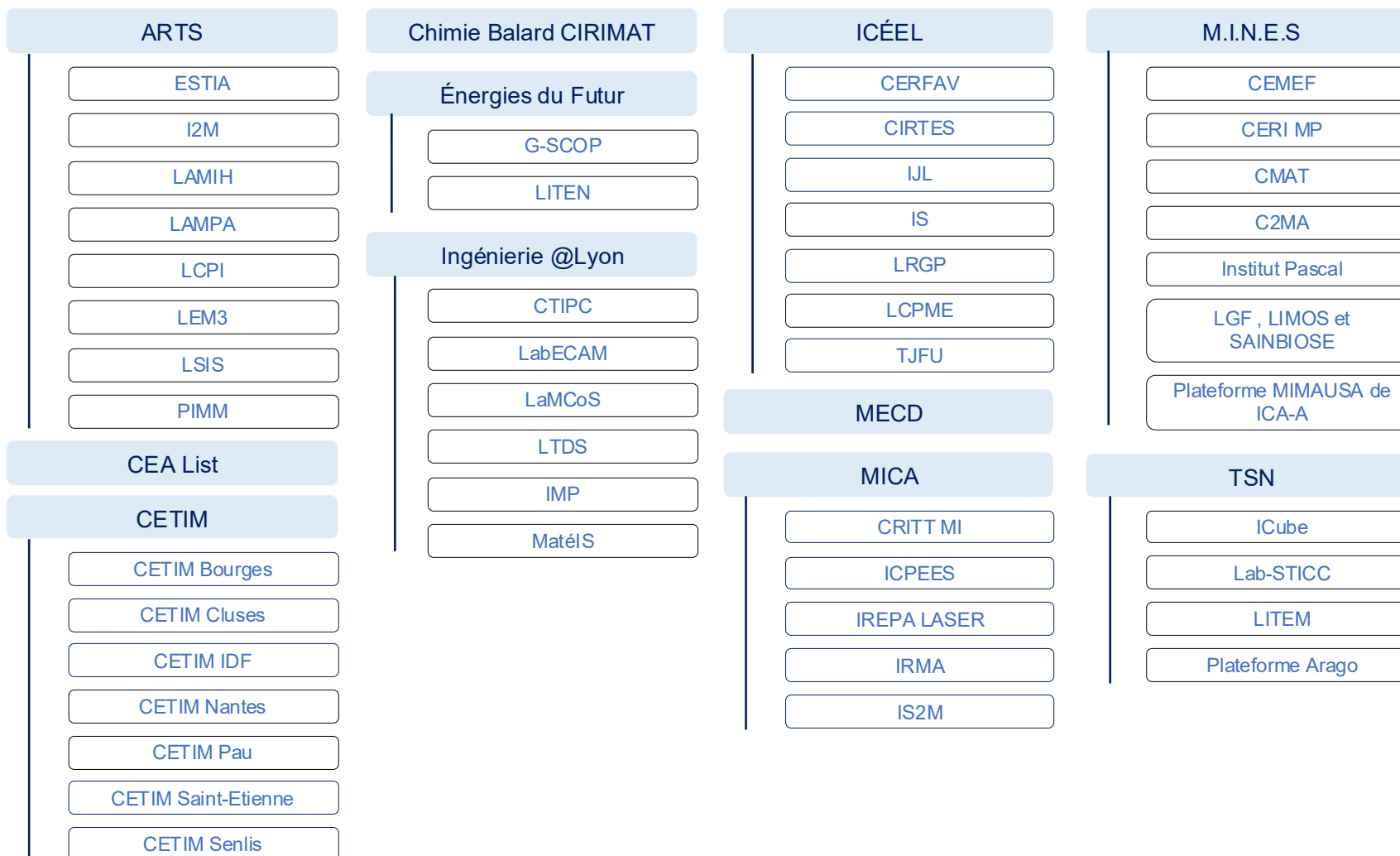
Cette cartographie met en lumière une France qui reste un terreau fertile pour la fabrication additive. La France dispose d'un écosystème solide, reconnu en Europe et au-delà. Plus que jamais, cette technologie constitue un objet emblématique des réseaux thématiques Carnot. En pleine croissance, avec un marché mondial estimé à 20 milliards d'euros à l'horizon 2028, la fabrication additive est plus qu'une opportunité, c'est un atout stratégique pour la compétitivité et un levier structurant pour une industrie innovante, durable, souveraine.

Philippe Lubineau
Directeur de l'Institut Carnot Cetim
Vice-président de l'Association des Instituts Carnot

Le périmètre de l'étude

I. Introduction

Les 11 instituts Carnot ont mobilisé 49 laboratoires et/ou plateformes R&D établissements





- Ce travail consolide les résultats d'une enquête et d'une réflexion mutualisée conduites en 2024 et 2025 auprès de 11 instituts Carnot membres du réseau thématique Carnot Industrie du Futur.
- Il correspond à l'actualisation d'une cartographie des forces de R&D en fabrication additive établie en 2017 en y intégrant un volet de transfert industriel (recherche partenariale) .

Le périmètre de l'étude



En quoi ce rapport peut vous servir

Ce rapport vous offre la possibilité de :

- **Disposer d'une vision d'ensemble des chiffres-clés des instituts Carnot dans le domaine de la fabrication additive** : budgets, projets, moyens humains et matériels, ...
- **Comprendre quels sont les domaines d'expertise des instituts Carnot, avec des déclinaisons métiers / marchés**: compétences disponibles, matériaux et technologies maîtrisés, ...
- **Accéder à une fiche-portrait détaillée de chaque institut Carnot**, récapitulant ses domaines de spécialité, ses chiffres-clés, ses expertises, ses réalisations et ses perspectives de développement

Un contexte favorable pour la Fabrication additive

- La fabrication additive, bien que faisant encore l'objet de travaux de recherche, est désormais **une technologie mature dans l'industrie**, pour certains procédés. Elle peut notamment être utilisée pour produire des **pièces certifiées , en production série**, dans une **diversité de secteurs**.
- Les **avantages technico-économiques** sont démontrés et positionnent cette technologie comme un des leviers clés pour **la compétitivité et la transition environnementale** : réduction de masse, économie de consommation de matières premières et limitation des déchets, pièces complexes, légères et personnalisées, ajout de fonctions, flexibilité, optimisation des coûts, accélération des délais de conception et de prototypage, réduction du délai d'approvisionnement (lead time), réparation – service après vente, relocalisation des fabrications ...
- Les **perspectives de marché** annoncées à l'échelle internationale sont porteuses : 14Md€ évalués en 2023 et des projections à 20Md€ en 2028.

Sources : Entretiens CMI, Xerfi, A3DM, ResearchGate, France Additive

I. Introduction

Un marché en forte croissance reposant sur une chaîne de valeur diversifiée

Maillons de la chaîne de valeur de la FA	Types d'acteurs clés	Exemples d'acteurs français et européens (non exhaustif)	Chiffres clés
Design Chaîne numérique FA	> Bureaux d'études et d'ingénierie > Editeurs de logiciels		Marché mondial En 2023, la valeur du marché mondial a été estimée à 14 Md€ et devrait atteindre 20 Md€ d'ici 2028, soit une croissance annuelle moyenne de 8%.
Matériaux Fab. 3D/Procédés	> Producteurs de matériaux > Fournisseurs d'équipement > BER (<i>prototypage, impression</i>)		
Post-Traitement Contrôle & caractérisation	> Laboratoires de contrôle qualité > Fournisseurs de capteurs > Prestataires de services (<i>post-traitement des pièces</i>)		
Normalisation FA Impact environnemental HSE	> Organismes de normalisation et de certification		
Accompagnement à l'intégration de la solution FA	> Prestataires d'intégration > Clusters		Marché français Le marché national de la fabrication additive est estimé entre 600 et 800 M€ en 2023, avec une croissance moyenne annuelle de 7 % attendue entre 2024 et 2026.

Sources : Entretiens CMI, Xerfi, A3DM, ResearchGate, France Additive

Les avancées techniques et économiques

Pièces fonctionnelles

La FA, mobilisée jusqu'alors fortement pour le prototypage de pièces et d'éléments d'outillage, est **désormais utilisable pour le développement et la production de pièces série fonctionnelles mais également pour des applications SAV et de réparation.**

Diversification sectorielle, technologique et matérielle

Un phénomène de diversification à la fois sectorielle, technologique, et matérielle :

- Par exemple, pour les secteurs : au-delà de l'aéronautique et du médical, un élargissement à ce jour vers la construction, le nucléaire, et une utilisation plus circonscrite dans le luxe et l'énergie. Le principal moteur d'adoption recensé est l'optimisation de fonctionnalités (allègement des pièces, amélioration des performances thermique&fluidique, personnalisation,...) permis par la FA, mais aussi la réduction des délais de fabrication ainsi que la réduction des stocks (fabrication à la demande).
- Pour les matériaux : une forte maturité historique des polymères, mais un rattrapage en cours du métal (malgré son coût élevé) et un développement de nouveaux matériaux (alliages complexes, composites, biosourcés, recyclés, multi-matériaux...)

Normalisation

Les **travaux de normalisation se poursuivent** au fur et à mesure de la maturité des technologies, et avec des besoins de normalisation croissants secteur par secteur (notamment l'aéronautique, le nucléaire et le médical).

Sources : Entretiens CMI, Xerfi, A3DM, ResearchGate, France Additive

Les trois principaux défis de développement

1

Un enjeu d'industrialisation et de passage à l'échelle

- **Un coût d'accès à la technologie encore significatif (notamment pour les PME) :** coût d'achat des matériaux et des équipements, coût d'investissement pour intégrer la FA dans les chaînes de production industrielle et transiter vers des chaînes hybrides associant FA et procédés conventionnels.
- **Un enjeu de monitoring et de contrôles post-fabrication adaptés et qualifiés (nécessitant des cadres réglementaires, notamment l'établissement des critères d'acceptabilité des défauts)**
- **Une consolidation de l'analyse technico-économique** sur les pièces et usages en fabrication additive **pour identifier les ROI** (procédé de fabrication additive parfois long et coûteux mais autorisant une reconception des pièces par optimisation topologique, d'allègement de structures, de fonctionnalisation des pièces)
- **Des niveaux de réusage de matériaux et de valorisation de déchets à amplifier**
- Pour certains secteurs industriels souverains, une nécessité de **disposer de machines permettant la fabrication de composants métalliques de grandes dimensions**

2

Un enjeu d'adoption de la technologie

Plusieurs enjeux restent à adresser :

- **Démontrer la rentabilité et les avantages de la FA :** objectiver les gains de valeur indirects générés par l'exploitation du composant FA et venant compenser le coût initial d'investissement/production.
- **Structurer les bases de données représentatives** permettant de qualifier les normes et procédés (courbes et lois statistiques...) : normes des matériaux FA, propriétés mécaniques et comportement des pièces associées, impacts des défauts.
- **Développer des outils démontrant le bon monitoring des processus** (contrôles *in situ*, cartographie des pièces en sortie de machine), et faire adopter ces outils et méthodes par les bureaux d'étude.
- **Lever les contraintes réglementaires**, par la codification des matériaux FA et procédés dans les référentiels ad'hoc sectoriels, encore fortes freinant l'adoption dans les secteurs critiques comme le nucléaire.

3

Un enjeu national à poursuivre la structuration de la filière FA

- **Développer la supply chain** (fournisseurs, bureaux d'étude et réalisation - BER, éditeurs logiciels,...) pour répondre aux besoins des grands industriels,
- **En parallèle, développer la commande privée des leaders industriels** (exemple : utilisation de la FA en R&D, passage d'applicatifs à un usage de production...).

Sources : Entretiens CMI, Xerfi, A3DM, ResearchGate, France Additive

Une trajectoire de l'Alliance Carnot qui s'est étoffée ces dernières années

L'enquête 2024-2025 menée auprès des 11 instituts Carnot met en évidence la poursuite de la dynamique Carnot dans le domaine de la Fabrication Additive, avec tout particulièrement :

- **Un net renforcement des moyens humains investis par les instituts Carnot** (618 ETP en 2024, contre 370 en 2017) **et des équipements** (58,7 M€ de valeur d'équipement en 2024 contre 34 M€ en 2017) ;
- Une **progression naturelle des activités de recherche académique**, avec à ce jour un total de 2 273 publications scientifiques et 258 brevets actifs ;
- Une **offre de service complète** sur la chaîne de valeur de la Fabrication additive (du design à l'accompagnement à l'intégration) ;
- Une **capacité à intervenir sur l'ensemble de l'échelle TRL**, du concept à l'industrialisation ;
- **L'intégration de compétences à la pointe de l'état de l'art du secteur**, couvrant à la fois les matériaux (alliages complexes, composites, biosourcés, recyclés, multi-matériaux...), les techniques/technologies (design FA 4D, biocompatibilité, blockchain, IA...) et les nouveaux besoins exprimés par les industriels (méthodes de test, benchmark, formulation de matériaux recyclés...) ;
- Une **expertise nationale et internationale** reconnue en design, matériaux, maîtrise des procédés de fabrication 3D, post-traitement, contrôle et caractérisation ;
- **Une empreinte industrielle** aujourd'hui élargie à **14 filières industrielles**, parmi lesquelles les Instituts adressent plus spécifiquement l'aéronautique, le médical, l'oil & gas, le nucléaire et la défense, la chimie & matériaux, l'automobile.

Sources : Entretiens CMI, Xerfi, A3DM, ResearchGate, France Additive

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Ce que vous pourrez consulter dans cette partie

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Repères

- Quelques données-clés générales pour l'ensemble des Instituts Carnot
- Une présentation de la chaîne de valeur FA

Expertises et compétences

- **Le niveau d'expertise des instituts Carnot et de leurs établissements, par maillon de la chaîne**
- **Les domaines et niveaux d'expertise des équipes**
 - Nombre d'ETP (permanents + doctorants) par maillon de la chaîne de valeur
 - Nombre d'ETP et Antériorité cumulée en FA, par maillon de la chaîne de valeur (et Comparaison 2024 vs 2017)
 - Niveau d'expertise (maîtrise, expert national, international) de l'ensemble des Carnot, par maillon de la chaîne de valeur
- **Les principales compétences maîtrisées par maillon de la chaîne**
 - Compétences x maillon de la chaîne
 - Repérage des principales compétences maîtrisées par les Carnot (top 3)
 - Nouvelles compétences identifiées en 2024 par rapport au référentiel de 2017

Matériaux et technologies

- **Les matériaux utilisés par technologie**
- **Les compétences mobilisées par technologie**
- **Le niveau de couverture des technologies de FA, par Institut Carnot**
- **Les matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires**

Autres

- **Le niveau de maturité technologique (TRL moyen) en FA, par Carnot**

Les données clés

Budget et projets FA



Total des budgets annuels
(alloués par les instituts à la FA)*

24,4 M€

Nombre de projets
académiques financés depuis 2017

459

Projets FA académiques financés /
projets totaux

37%

Ticket moyen du projet FA académique
financé

380 k€

Moyens humains et matériels



ETP totaux (permanents et doctorants)

618

+67% vs 2017

Valeur des équipements

58,7 M€

+70% vs 2017

Production scientifique



Nombre total de publications

2 273

+84% vs 2017

Nombre total de brevets

258

+180% vs 2017

Partenariats industriels



Nombre de filières CNI
adressées

14

Volume de projets industriels réalisés
depuis 2017 (recherche contractuelle
bilatérale)

930

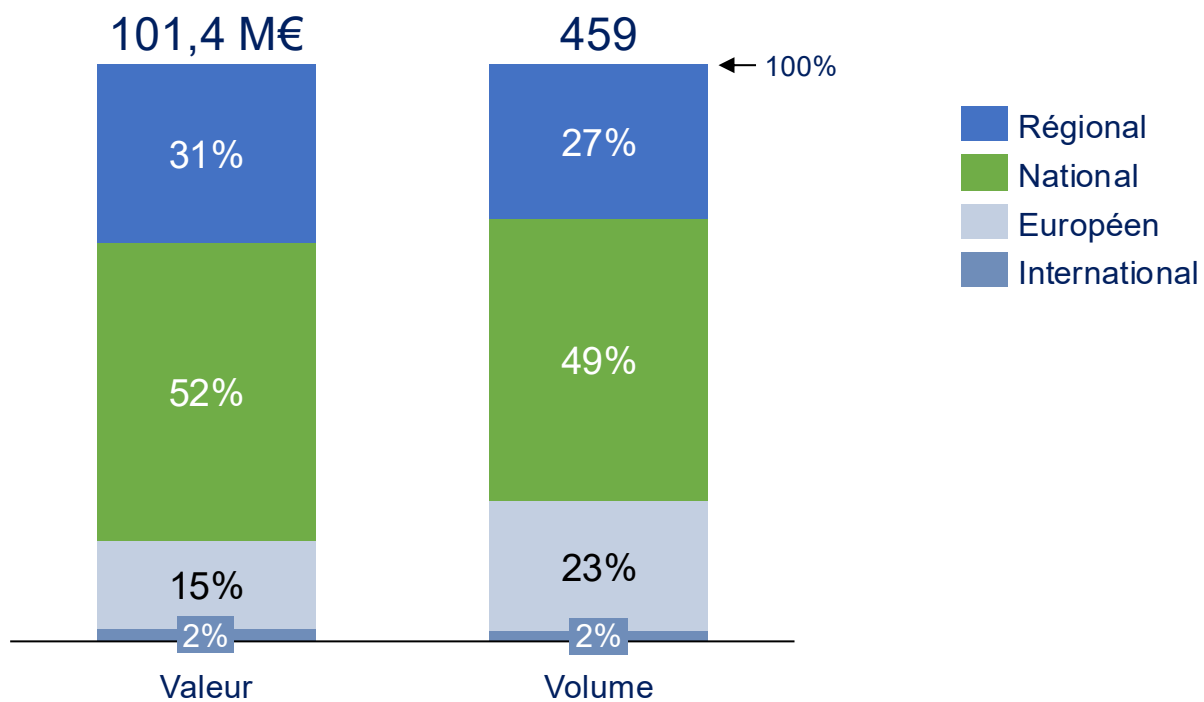
*Budget hors investissement : Frais de fonctionnement, charges RH, projets, consommables

Les données de référence 2017 sont établies sur un périmètre Carnot (avec quelques évolutions dans le périmètre des établissements qui en font partie)

Les projets académiques des Carnot depuis 2017

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

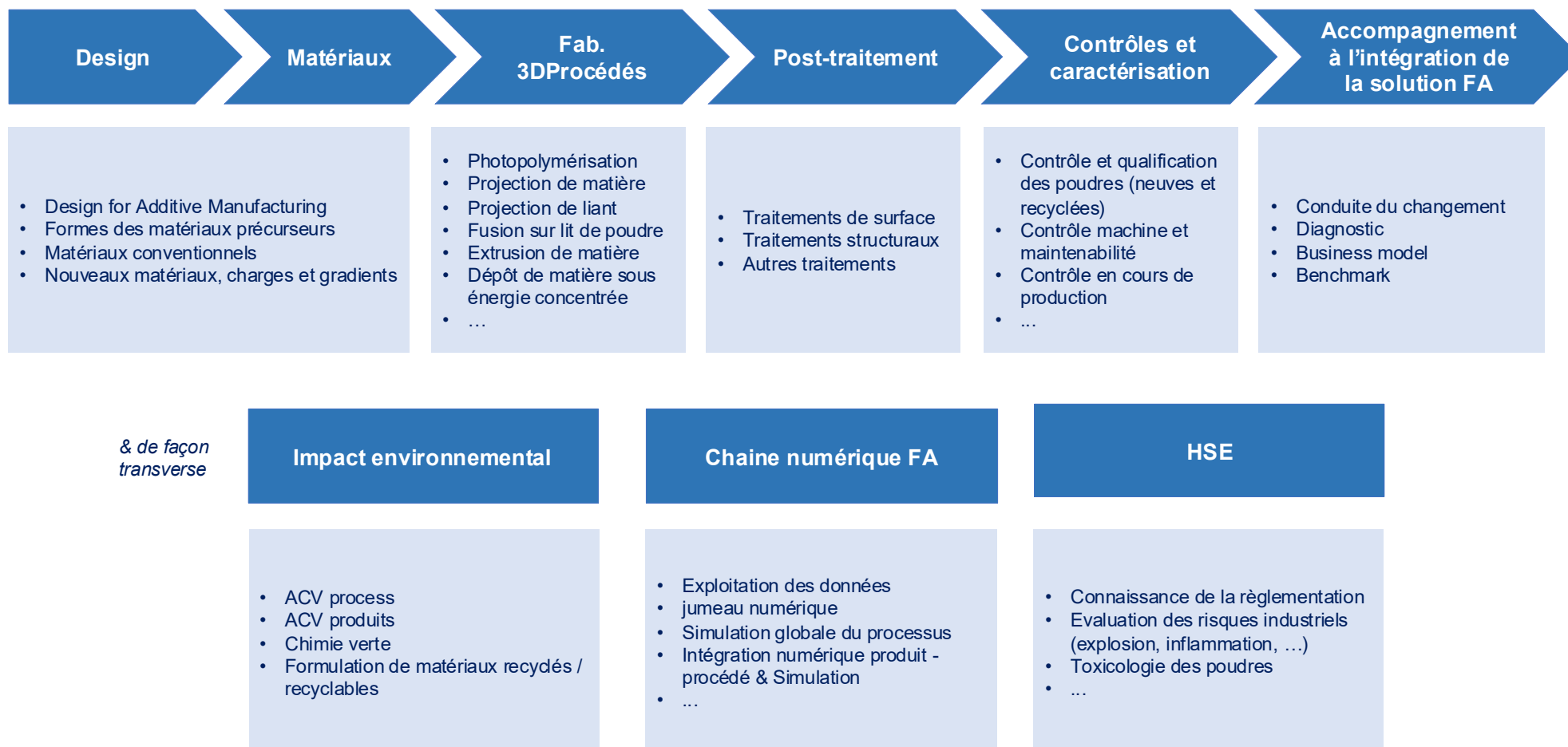
Echelle des projets académiques depuis 2017 ⁽¹⁾



Notes : (1) via ANR, France 2030, financements européens etc.

La chaîne de valeur de la FA et les compétences associées

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Description des niveaux d'expertise

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Expertise internationale	Mobilisation de la compétence dans : - des projets de recherche partenariale intégrant des entreprises étrangères (projets de recherche contractuelle bilatérale et projets collaboratifs subventionnés) ; - les activités des structures internationales de référence dans le domaine de la FA (sociétés savantes, associations ou organisations internationales, comités de normalisation) ; - l'édition de publications scientifiques de niveau international et/ou la conduite d'HDR dans le champ de compétence ; - le dépôt de brevets à portée internationale.
Expertise nationale	Mobilisation de la compétence dans : - des projets de recherche subventionnés (ANR, France 2030) et des projets de recherche contractuelle avec des industriels français ; - les travaux de structuration de la filière en France (ex. France Additive) ; - l'édition de publications scientifiques dans des revues d'envergure nationale ; - le dépôt de brevets en France.
Maîtrise	- Expérience prouvée dans la mobilisation des compétences ; - Présence de ressources humaines et d'équipements mobilisables sur le champ de compétences.

* Les critères sont cumulatifs

Niveau d'expertise des Instituts Carnot par maillon de la chaîne (1/4)

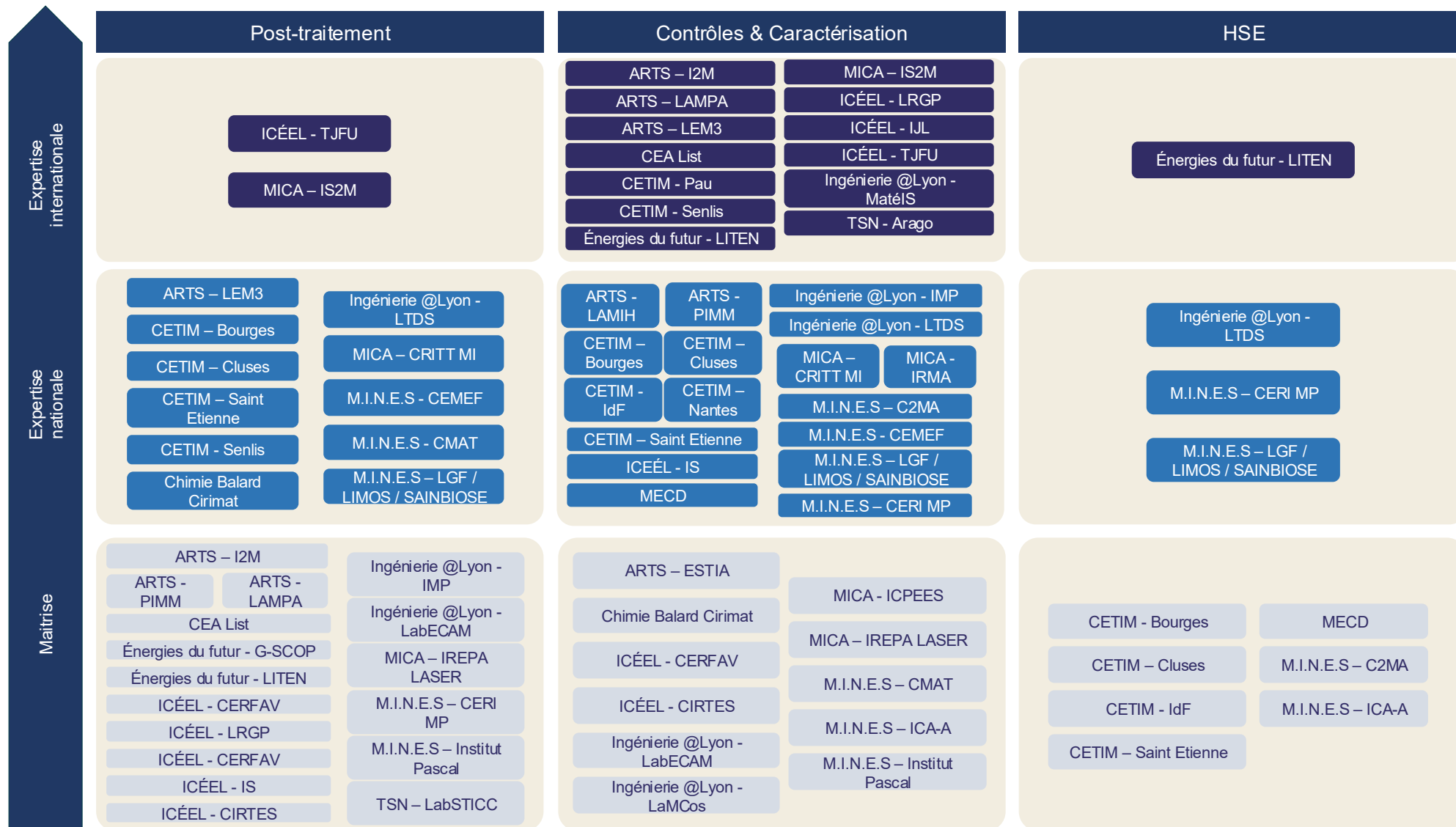
II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

	DESIGN	MATERIAUX	FAB. 3D
Expertise internationale	ARTS – ESTIA ARTS – I2M ARTS – LAMIH ARTS – LAMPA ARTS – LCPI ARTS – LEM3 Chimie Balard Cirimat ICÉEL – CIRTES TSN - Arago	ARTS – LEM3 ARTS – PIMM CETIM – Saint Etienne Chimie Balard Cirimat Énergies du futur - LITEN ICÉEL – TJFU ICÉEL – CERFAV ICÉEL – IJL ICÉEL – LRGP Ingénierie @Lyon - MatéIS MICA – IS2M M.I.N.E.S – CERI MP M.I.N.E.S – CMAT TSN - Arago	ARTS – I2M ARTS – PIMM CETIM – Bourges CETIM – Cluses CETIM – IdF CETIM – Saint Etienne Chimie Balard Cirimat ICÉEL – TJFU MICA – IREPA LASER M.I.N.E.S – CERI MP M.I.N.E.S – CMAT MICA – IS2M TSN - Arago
Expertise nationale	ARTS – LISPEN CETIM – Bourges CETIM – Cluses CETIM – IdF CETIM – Saint Etienne CETIM – Senlis Énergies du futur - LITEN Ingénierie @Lyon - LaMCos Ingénierie @Lyon - LTDS MICA - IRMA M.I.N.E.S – LGF / LIMOS / SAINBIOSE TSN – ICube TSN – LabSTICC	CETIM - Bourges ARTS – I2M CETIM – Cluses CETIM - IdF CETIM – Nantes Ingénierie @Lyon - IMP Ingénierie @Lyon - LaMCos Ingénierie @Lyon - LabECAM Ingénierie @Lyon - LTDS MICA – CRITT MI MICA - IRMA M.I.N.E.S – CEMEF M.I.N.E.S – LGF / LIMOS / SAINBIOSE	ARTS – ESTIA Énergies du futur - G-SCOP Énergies du futur - LITEN ICÉEL – CERFAV ICÉEL – CIRTES Ingénierie @Lyon - LaMCos Ingénierie @Lyon - LTDS MICA – CRITT MI MICA - IRMA M.I.N.E.S – CEMEF M.I.N.E.S – LGF / LIMOS / SAINBIOSE TSN – LabSTICC
Maitrise	CEA List Énergies du futur - G-SCOP ICÉEL – CERFAV ICÉEL – IS ICÉEL – LCPME ICÉEL – LRGP MICA - ICPEES MICA – IS2M MICA – IREPA LASER M.I.N.E.S – CERI MP M.I.N.E.S – C2MA M.I.N.E.S – Institut Pascal	ARTS – ESTIA ARTS - LAMPA ICÉEL – CIRTES ICÉEL – IS ICÉEL – LCPME M.I.N.E.S – C2MA M.I.N.E.S – ICA-A M.I.N.E.S – Institut Pascal	Ingénierie @Lyon - MatéIS Ingénierie @Lyon - LabECAM MICA - ICPEES CEA List ARTS - LAMPA M.I.N.E.S – C2MA M.I.N.E.S – ICA-A M.I.N.E.S – Institut Pascal TSN – ICube

Les instituts Carnot ont été positionnés par expertise en fonction des critères présentés page 19

Niveau d'expertise des Instituts Carnot par maillon de la chaîne (2/4)

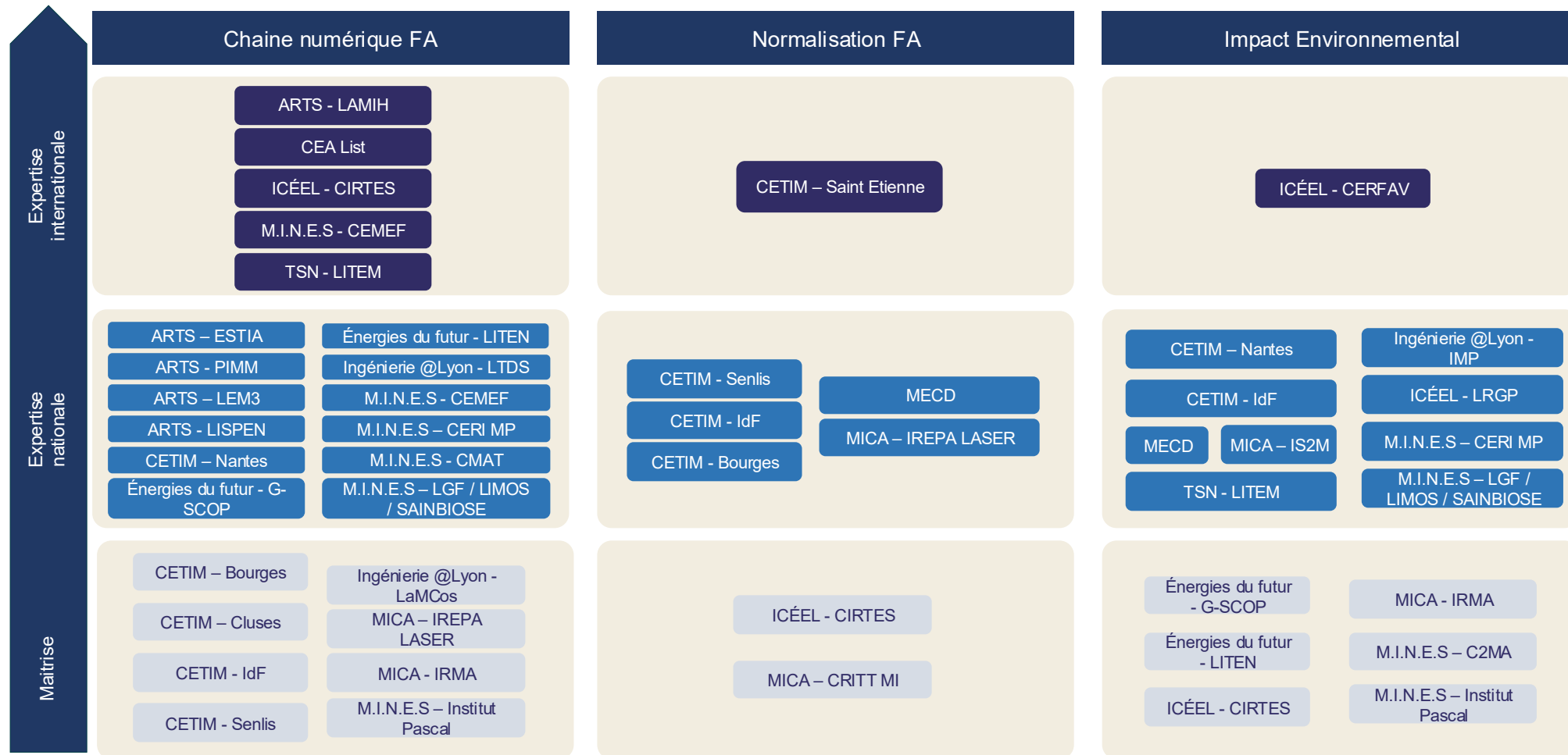
II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Les instituts Carnot ont été positionnés par expertise en fonction des critères présentés page 19

Niveau d'expertise des Instituts Carnot par maillon de la chaîne (3/4)

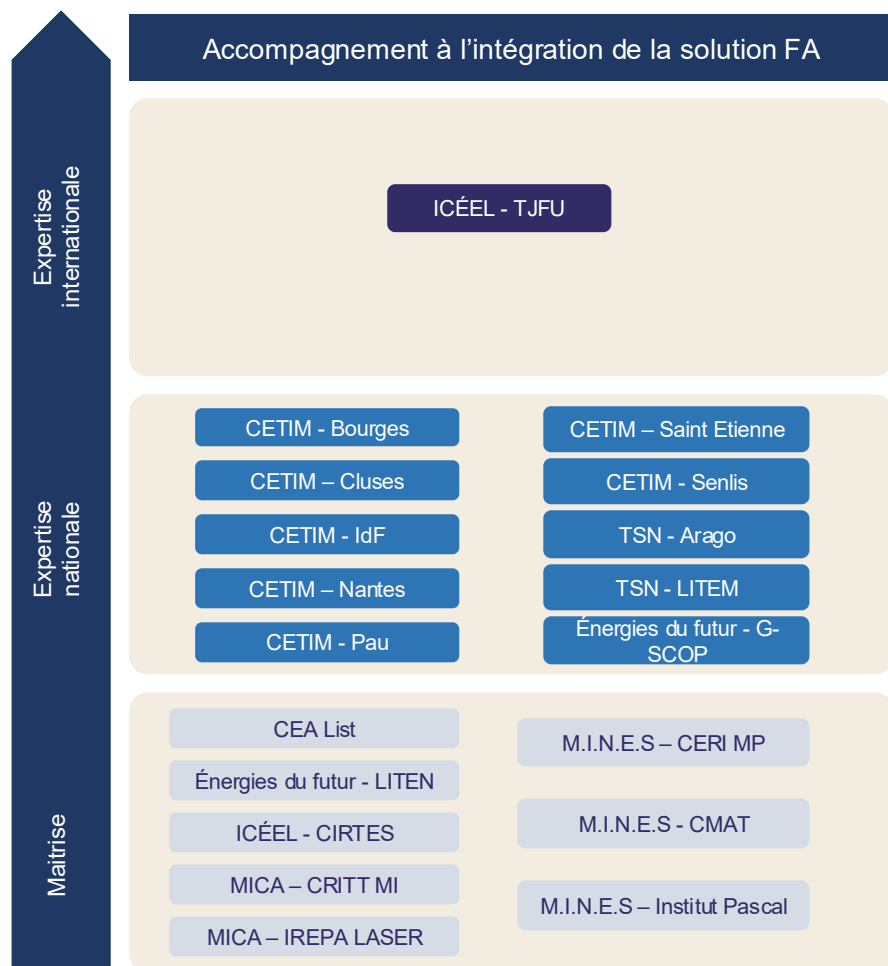
II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Les instituts Carnot ont été positionnés par expertise en fonction des critères présentés page 19

Niveau d'expertise des Instituts Carnot par maillon de la chaîne (4/4)

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

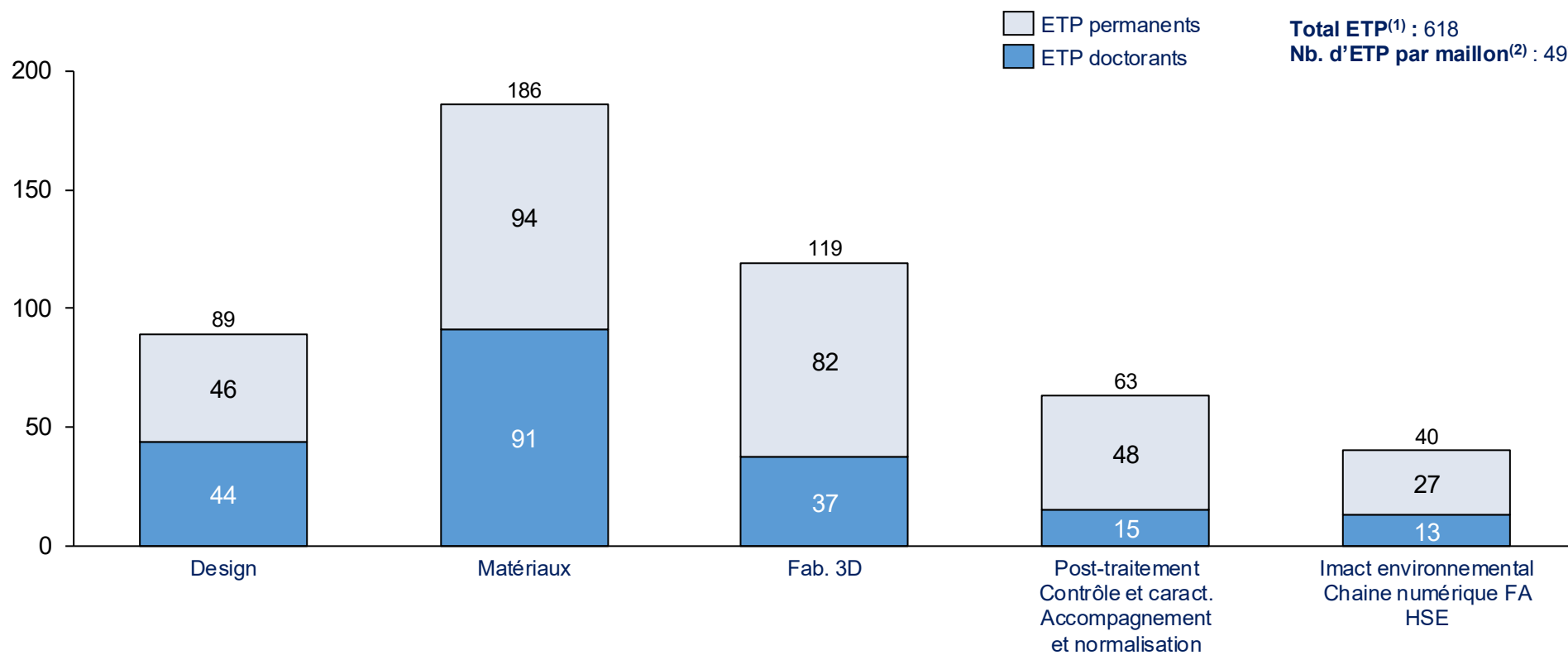


Les instituts Carnot ont été positionnés par expertise en fonction des critères présentés page 19

Domaines et niveau d'expertise des équipes

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Nombre d'ETP (permanents + doctorants) 2024

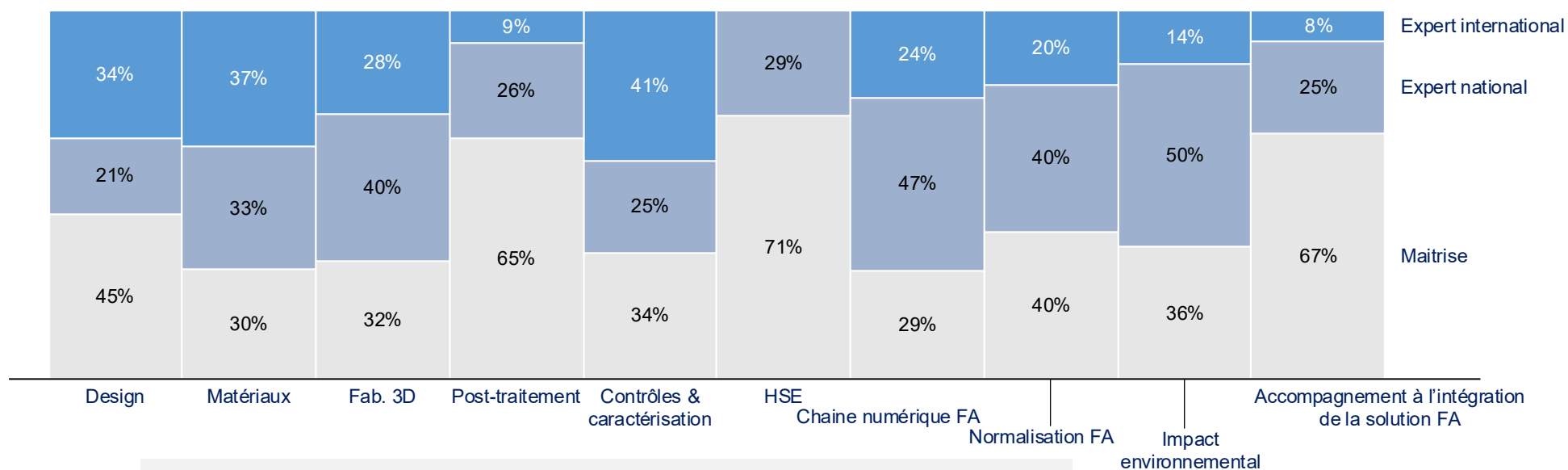


(1) Le nombre total d'ETP, incluant ceux que certains Carnot n'ont pas ventilés par maillon de la chaîne de valeur.

(2) Le nombre d'ETP spécifiquement ventilés par maillon de la chaîne de valeur.

Niveau des expertises

Niveaux d'expertise de l'ensemble des Carnot par maillon de la chaîne de valeur



* Aide à la lecture : 34% des établissements des Carnot présents sur le maillon « design » déclarent disposer d'une expertise internationale en la matière

Principales compétences par maillon de la chaîne [1/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

Design

- Outil expert aide à la décision / choix procédé
- Conception Fiabiliste
- Règles de conception en lien avec les procédés FA
- Optimisation topologique / multiphysique
- Calcul / Simulation multiphysique
- Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS)
- Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle
- Eco conception et cycle de vie
- "Reverse engineering"
- Conception multimatériaux / matériaux architecturés
- Hybridation technologique
- Design FA 4D



Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Calcul / Simulation multiphysique
- Règles de conception en lien avec les procédés FA
- Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS)



- Optimisation topologique / multiphysique
- Eco conception et cycle de vie
- Conception multimatériaux / matériaux architecturés
- Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle



- Hybridation technologique
- Reverse engineering
- Design FA 4D

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaîne [2/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

Matériaux (1/2)

- Atomisation
- Obtention / production de poudres
- Nouvelles nuances de poudres
- Caractérisation des poudres
- Tamisage
- Fonctionnalisation des poudres
- Production de fil
- Caractérisation des fils
- Connaissance comportement des fils
- Production pellet
- Maîtrise de l'agrégation
- Mise en solution
- Maîtrise des concentrations
- Alliages d'aluminium
- Alliages base Titane
- Aciers pour traitement thermique / Aciers à outils
- Aciers inoxydables
- Alliages base Nickel
- Alliages de cuivre
- Alliages Chrome-Cobalt
- Métaux réfractaires (Mo, W,...)
- Aimants durs et doux
- Autres matériaux métalliques (Au, etc.)
- Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes
- Verre
- Autre (sable, géopolymères, argile, etc.)
- Ciment, mortier, béton...
- Mortier et béton à base de liant hydraulique (ciment, additions minérales)
- Mortier et béton à base de résine de synthèse
- Béton cellulaire autodavé
- Béton de géopolymère
- Béton de terre
- Formulation des encres cimentaires
- Polymères thermoplastiques semi-cristallins
- Alliages renforcés par dispersion de particules dures (Céramiques, ODS)

Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Caractérisation des poudres
- Obtention / production de poudres
- Nouvelles nuances de poudres



- Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes ; Verre
- Polymères thermoplastiques



- Fonctionnalisation des poudres
- Production de fil
- Alliages d'aluminium
- Alliages base Titane

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaîne [3/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

Matériaux (2/2)

- Polymères thermoplastiques amorphes
- Elastomères thermoplastiques (TPE, TPU ...)
- Polymères thermodurcissables (UP, EP etc.)
- Polymère photo-récurable
- Biopolymère
- Hydrogel
- Emulsion / latex
- Résines photopolymérisables
- Matériaux stimulables (température, pH, environnement, électromagnétique...)
- Formulations, mélanges
- Matériaux biologiques
- Matériaux biosourcés
- Cermets
- Composés avec nanocharges, nanocomposites
- Matériaux hybrides (ex : sol-gel)
- Gradients de propriété
- Composites à renforts fibreux continus (fibres continues, rovings, rubans)
- Composites à renforts fibreux discontinus (fibres coupées courtes ou longues, centièmes de mm à dizaine de mm)"
- Béton
- Matériaux architecturés / métamatériaux
- Alliages polymétalliques à haute entropie HEA
- Verres métalliques BMG"
- Oxydes métalliques
- Précurseurs, Oxydes mixtes, matériaux réfractaires, photoamorceurs
- Aliments (sucre ...)
- Matières vivantes/cellules (bio impression)



Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Caractérisation des poudres
- Obtention / production de poudres
- Nouvelles nuances de poudres



- Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes ; Verre
- Polymères thermoplastiques



- Fonctionnalisation des poudres
- Production de fil
- Alliages d'aluminium
- Alliages base Titane

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaîne [4/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

Fab. 3D/
Procédés

- Interaction énergie / matière (procédés haute énergie, base frittage, base déformation plastique, ...)
- Simulation et modélisation des procédés / Simulation métallurgie du composant / échelle micro-meso-macro
- Développement / Effet des paramètres opérationnels
- Règles de conception des pièces finies
- Instrumentation pour mesures et contrôles en cours de production
- Monitoring du procédé & traitement de données associées
- Capabilité, répétabilité, reproductibilité
- Automatisation
- Adaptation du process pour multi-matériaux

Principales compétences par maillon de la chaine [5/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaine

Post- traitement

- Usinage
- Traitements mécaniques
- Traitements chimiques
- Traitements physiques
- Revêtement de surface
- Fonctionnalisation de surface
- Maîtrise du dimensionnel
- Traitements thermiques
- Dépoudrage des pièces
- Délantage
- Post-imprégnation
- Frittage
- Extraction
- Evaporation
- Post-curing
- Propreté de surface

Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Traitements thermiques
- Frittage
- Traitements mécaniques



- Fonctionnalisation de surface
- Revêtement de surface
- Traitements chimiques
- Usinage



- Maîtrise du dimensionnel
- Délantage

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaîne [6/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

Contrôles et caractérisation

- Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées)
- Contrôle machine et maintenabilité
- Contrôle en cours de production
- Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie)
- Caractérisation matériau et microstructure
- Caractérisation mécanique
- Caractérisation des états de surface
- Caractérisation de la propreté (risque de relargage de poudres)
- Caractérisation des pièces (surfaique, volumique)
- Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...)
- Contrôles Non-Destructifs volumiques
- Contrôles Non-Destructifs surfaiques
- Densité de réticulation
- Biocompatibilité
- Tenue au feu
- Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...)

Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Caractérisation matériau et microstructure
- Caractérisation mécanique



- Caractérisation des états de surface
- Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...)
- Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées)



- Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie)
- Caractérisation des pièces (surfaique, volumique)
- Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...)
- Contrôles Non-Destructifs volumiques

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaîne [7/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

HSE

- Connaissance de la réglementation
- Evaluation des risques industriels (explosion, inflammation, ...)
- Toxicologie des poudres
- Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité)
- Mesures de l'exposition
- Sécurité des opérateurs
- Formation aux problématiques HSE
- Vapeur de solvant et/ou substance chimique



Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Connaissance de la réglementation
- Sécurité des opérateurs
- Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité)



- Evaluation des risques industriels (explosion, inflammation, ...)
- Mesures de l'exposition
- Formation aux problématiques HSE



- Toxicologie des poudres

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaine [8/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaine

Chaînes numériques pour la FA

- Exploitation des données
- Jumeau numérique
- Simulation globale du processus
- Intégration numérique produit - procédé & Simulation
- Continuité numérique / Traçabilité numérique
- Protection des données
- PLM
- Format des données
- Blockchain
- IA dédiée à la FA



Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Intégration numérique produit - procédé & Simulation
- Jumeau numérique
- Simulation globale du processus



- Exploitation des données
- Continuité numérique / Traçabilité numérique
- IA dédiée à la FA



- Format des données
- Protection des données
- PLM

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaîne [9/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

Normalisation

- Méthodes de spécification
- Méthodes de test



Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Méthodes de spécification
- Méthodes de test

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaîne [10/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaîne

Impact environnemental

- ACV process
- ACV produits
- Chimie verte
- Formulation de matériaux recyclés / recyclables



Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Formulation de matériaux recyclés / recyclables
- ACV produits
- ACV process



- Chimie verte

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Principales compétences par maillon de la chaine [11/11]

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Maillon de la chaine

Accompagnement
à l'intégration de
la solution FA

- Conduite du changement
- Diagnostic
- Business model
- Benchmark



Principales compétences⁽¹⁾ maîtrisées par les instituts Carnot en 2024



- Benchmark
- Conduite du changement
- Diagnostic
- Business model

(1) Les compétences sont classées selon l'ordre de récurrence chez les différents instituts Carnot
xxx : les nouvelles compétences 2024

Matériaux utilisés par technologie

Récurrence des matériaux selon les technologies employées par les laboratoires Carnot

+ ● ● ● - Niveau de récurrence

Aide à la lecture : sur la Photopolymérisation, le matériau polymère est utilisé par de nombreux Carnot

	Polymères et composites	Métaux	Céramiques et verre	Matériaux cimentaires	Matériaux biologiques	Matériaux biosourcés
Photopolymérisation	●	●	●	●	●	●
Projection de matière	●	●	●		●	●
Projection de liants	●	●	●		●	●
Fusion sur lit de poudre	●	●	●			●
Extrusion de matière	●	●	●	●	●	●
Dépôt de matière sous énergie concentrée	●	●	●	●		●
Stratification de couches	●	●			●	
Combinaison de technologies	●	●	●	●		●

Compétences mobilisées par technologie

Récurrence des compétences selon les technologies employées par les laboratoires Carnot

+ ● ● ● - Niveau de récurrence

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

	Intéract. énergie/ matière	Simulation & modél.	Développement	Règles concept.	Instrumentation	Monitoring procédé	Capabilité	Automatisation	Adaptation process
Photopolymérisation	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Projection de matière	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Projection de liants	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Fusion sur lit de poudre	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Extrusion de matière	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Dépôt de matière sous énergie concentrée	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Stratification de couches	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Combinaison de technologies	●	●	●	●	●	●	●	●	●

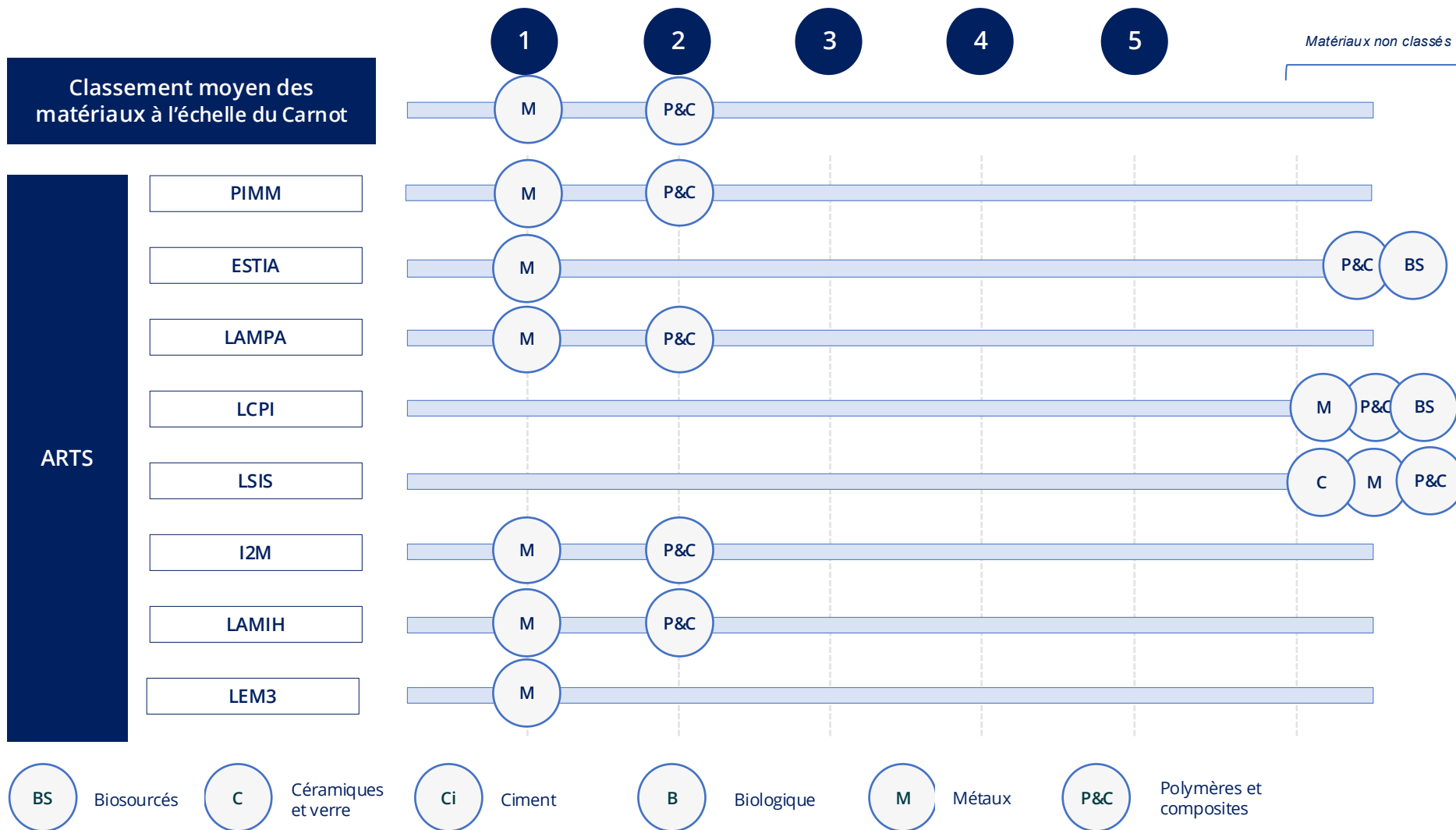
Niveau de couverture des technologies de FA

Positionnement des Carnot x technologies FA

	Photopolymérisation	Projection de matière	Projection de liant	Fusion sur lit de poudre	Extrusion de matière	Dépôt de matière (fil ou poudre) sous énergie concentrée	Stratification de couches	Combinaison de technologies
ARTS	☒	☒	☒	☒	☒	☒		
CEA List				☒		☒		
CETIM			☒	☒	☒	☒	☒	
Chimie Balard Cirimat	☒	☒	☒	☒	☒	☒		
Énergies du futur	☒		☒	☒				☒
Idéel	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Ingénierie @ Lyon	☒	☒		☒	☒	☒		☒
MECD					☒			
MICA	☒				☒	☒		☒
M.I.N.E.S	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
TSN	☒	☒		☒	☒			☒
TOTAL	8	6	6	9	9	8	3	6

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



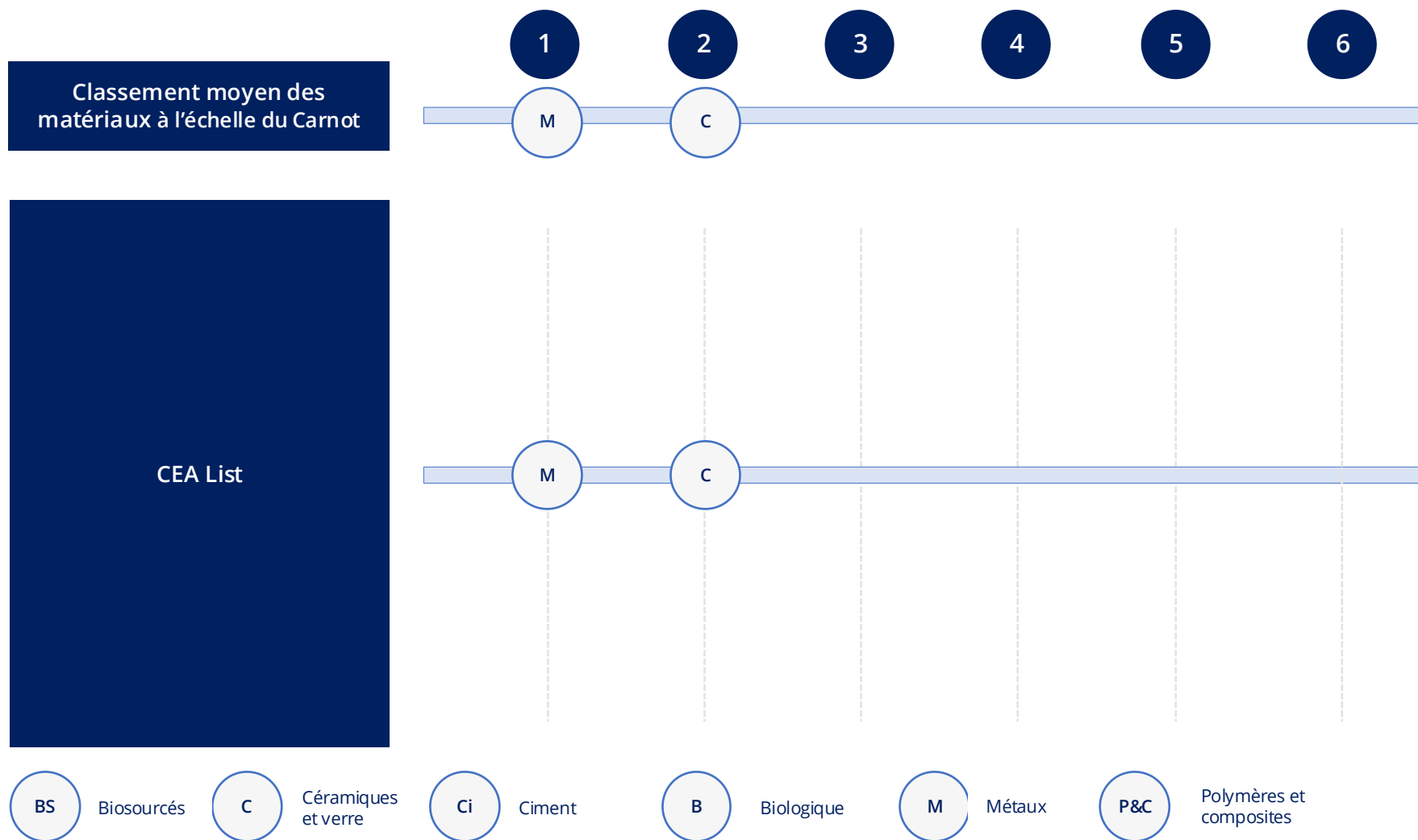
Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Classement moyen des matériaux à l'échelle du Carnot



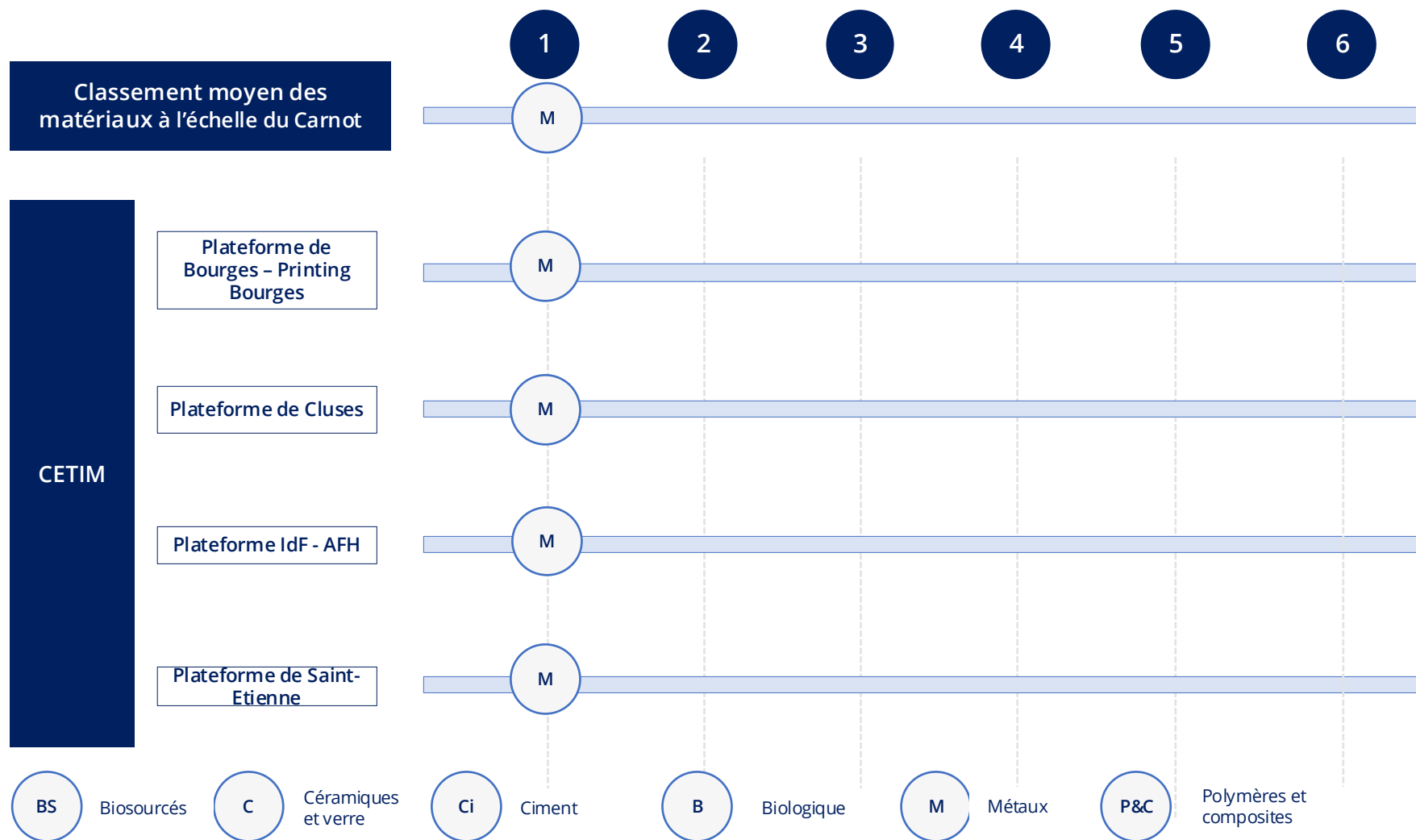
Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Classement moyen des matériaux à l'échelle du Carnot

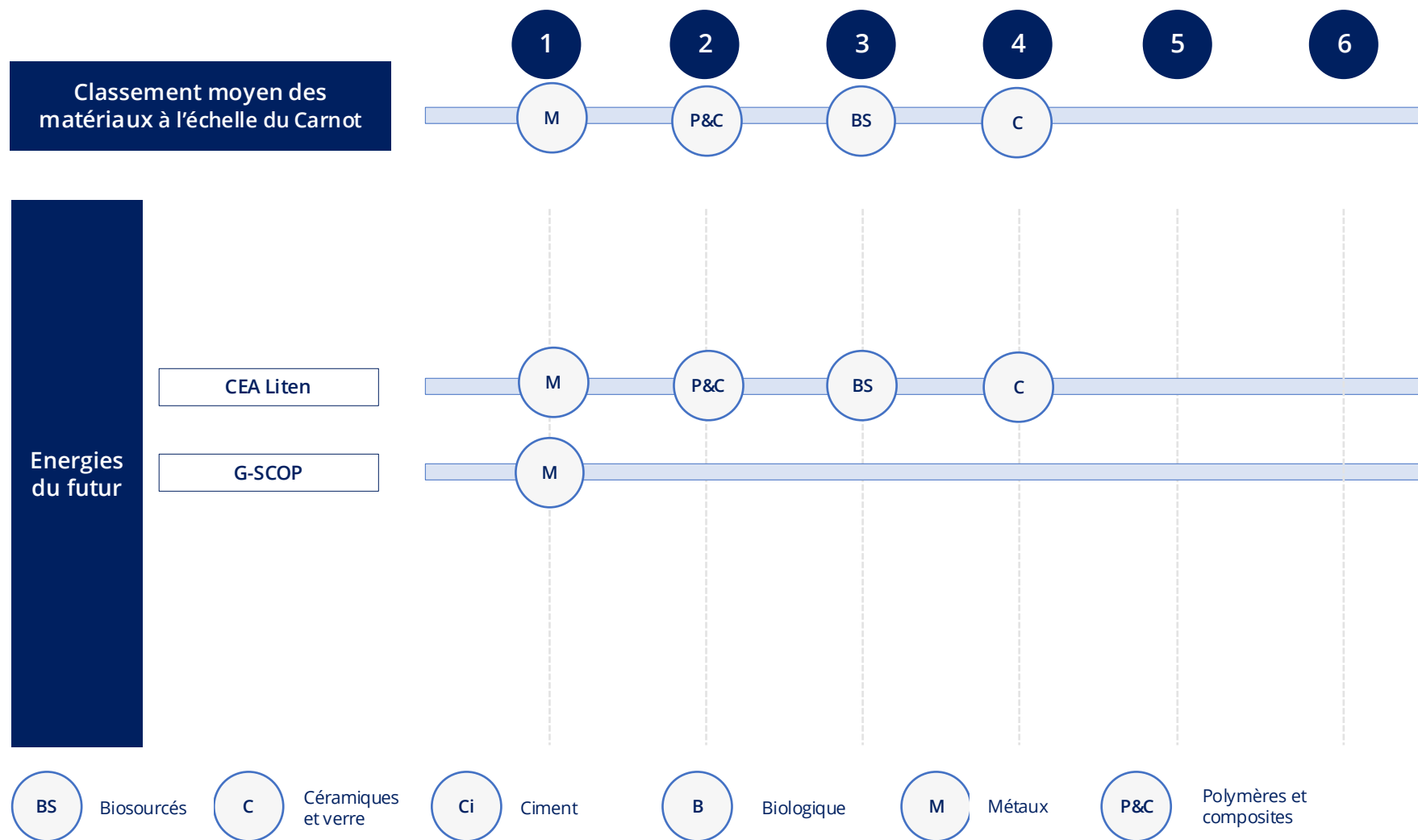
Chimie Balard Cirimat



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

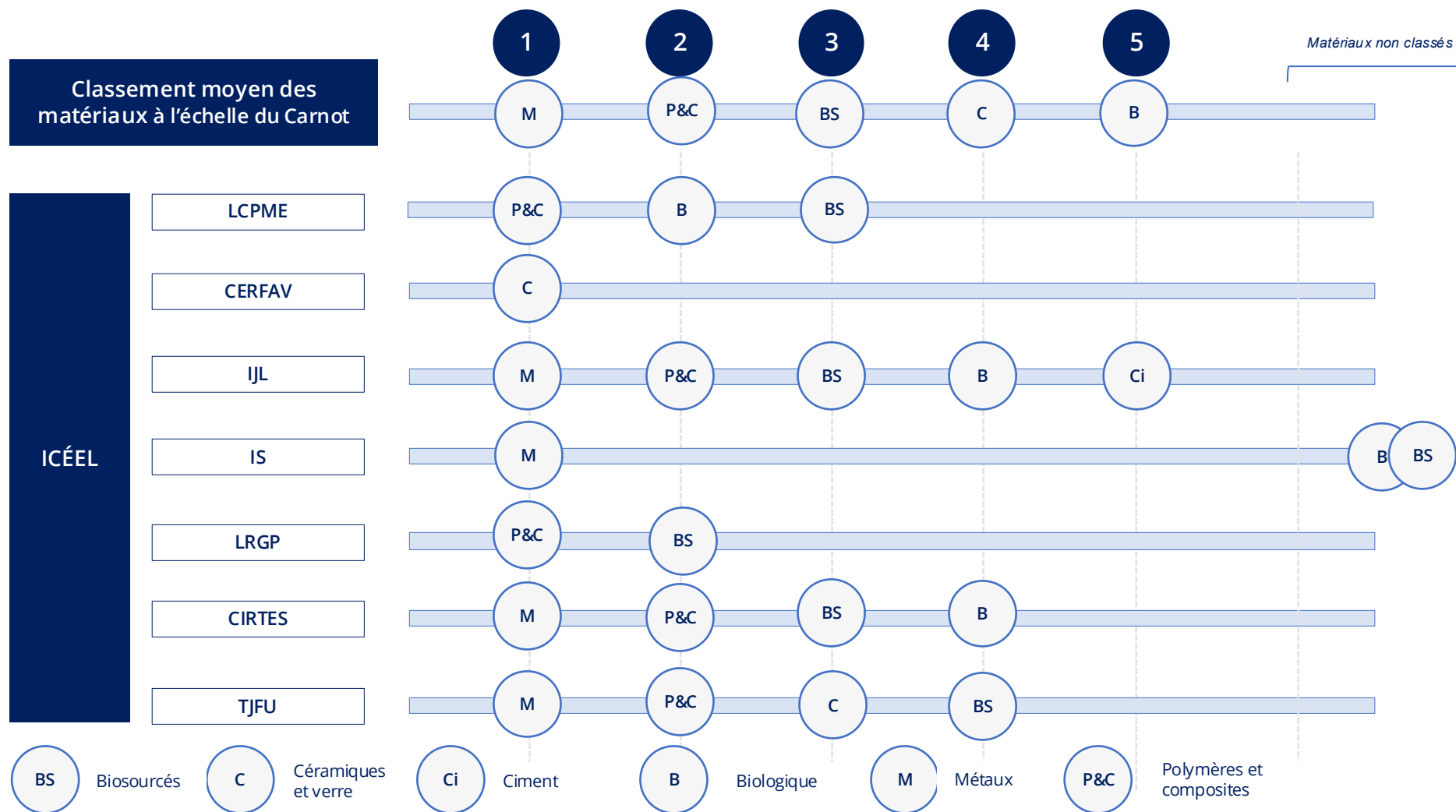
II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

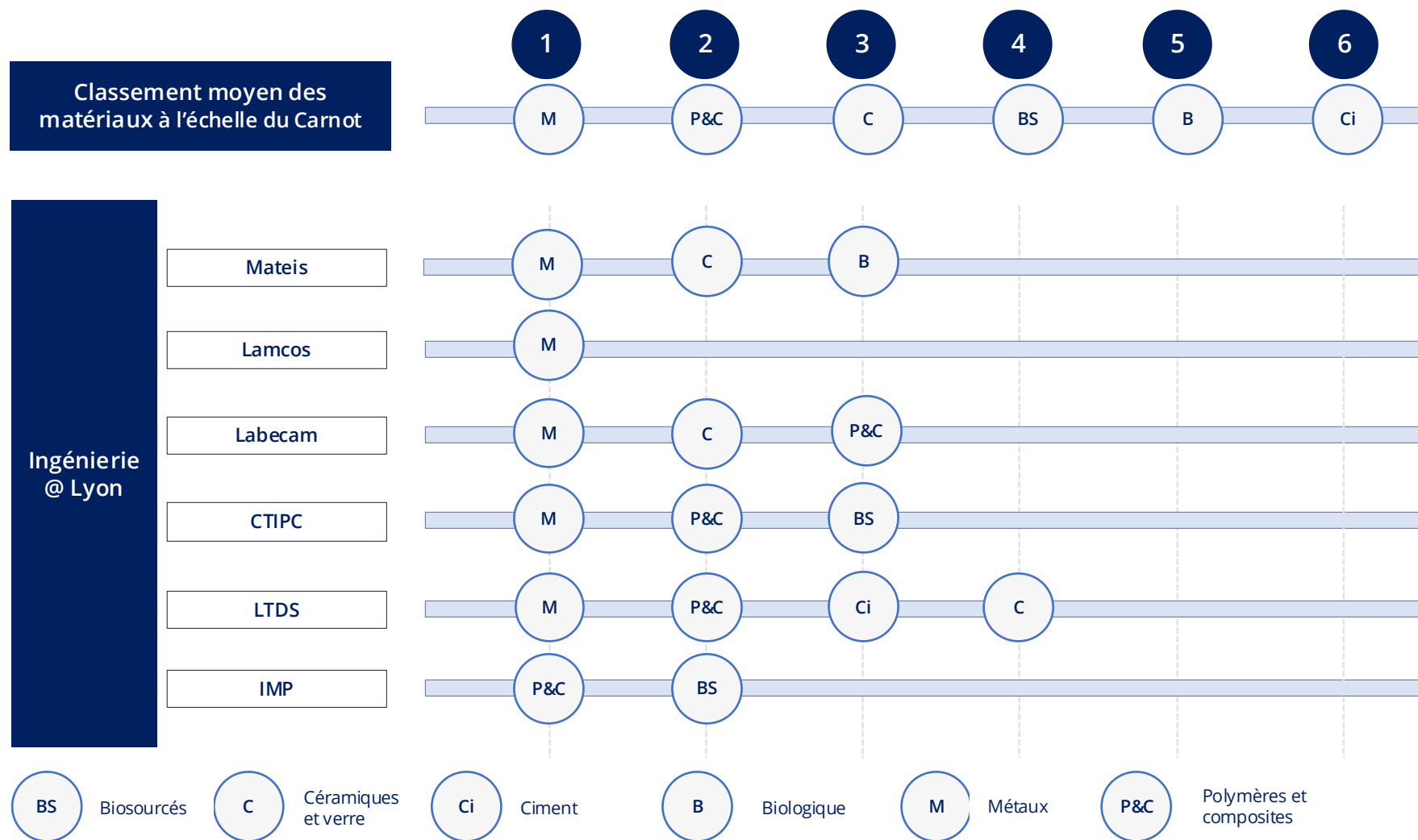
II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Classement moyen des matériaux à l'échelle du Carnot

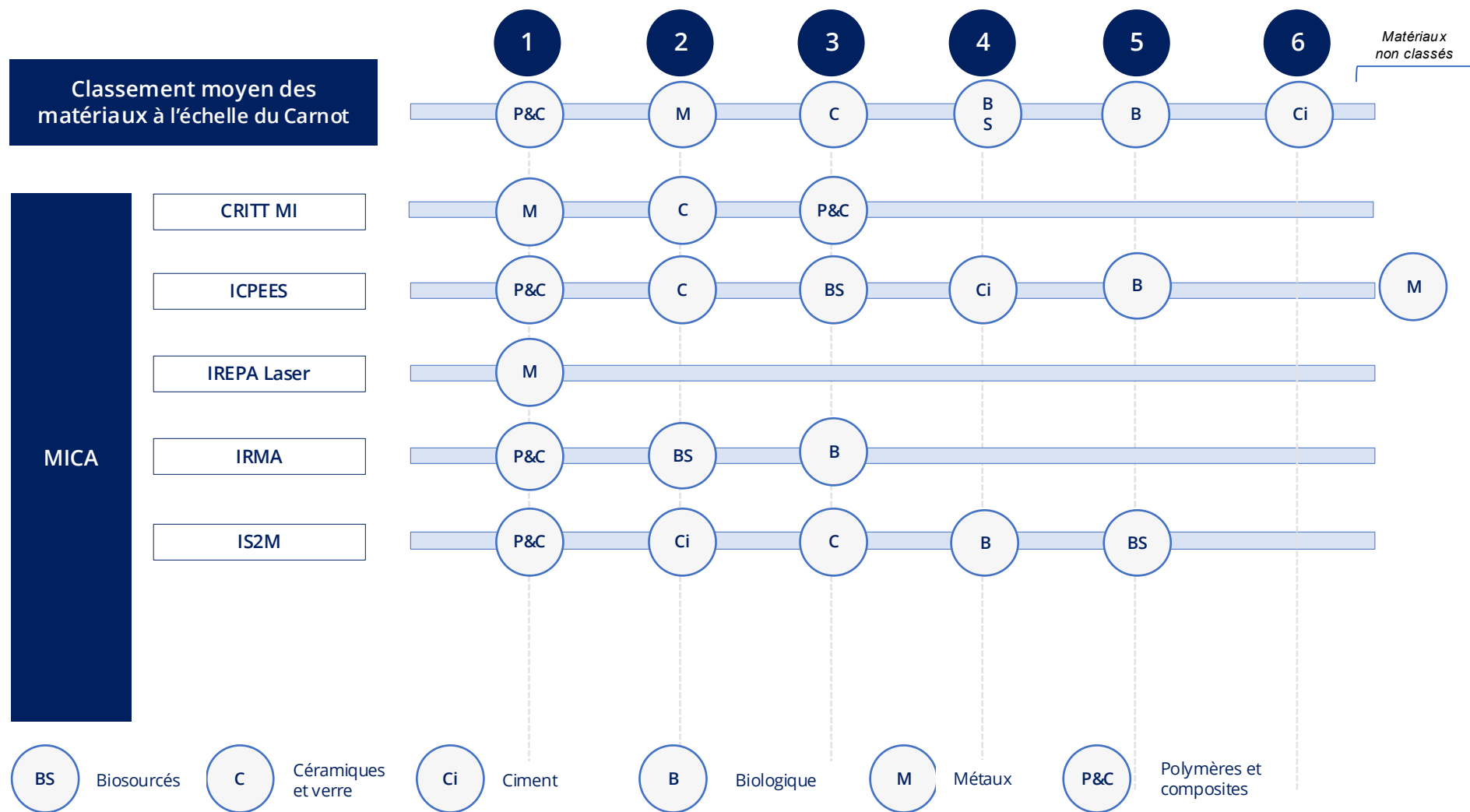
MECD



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

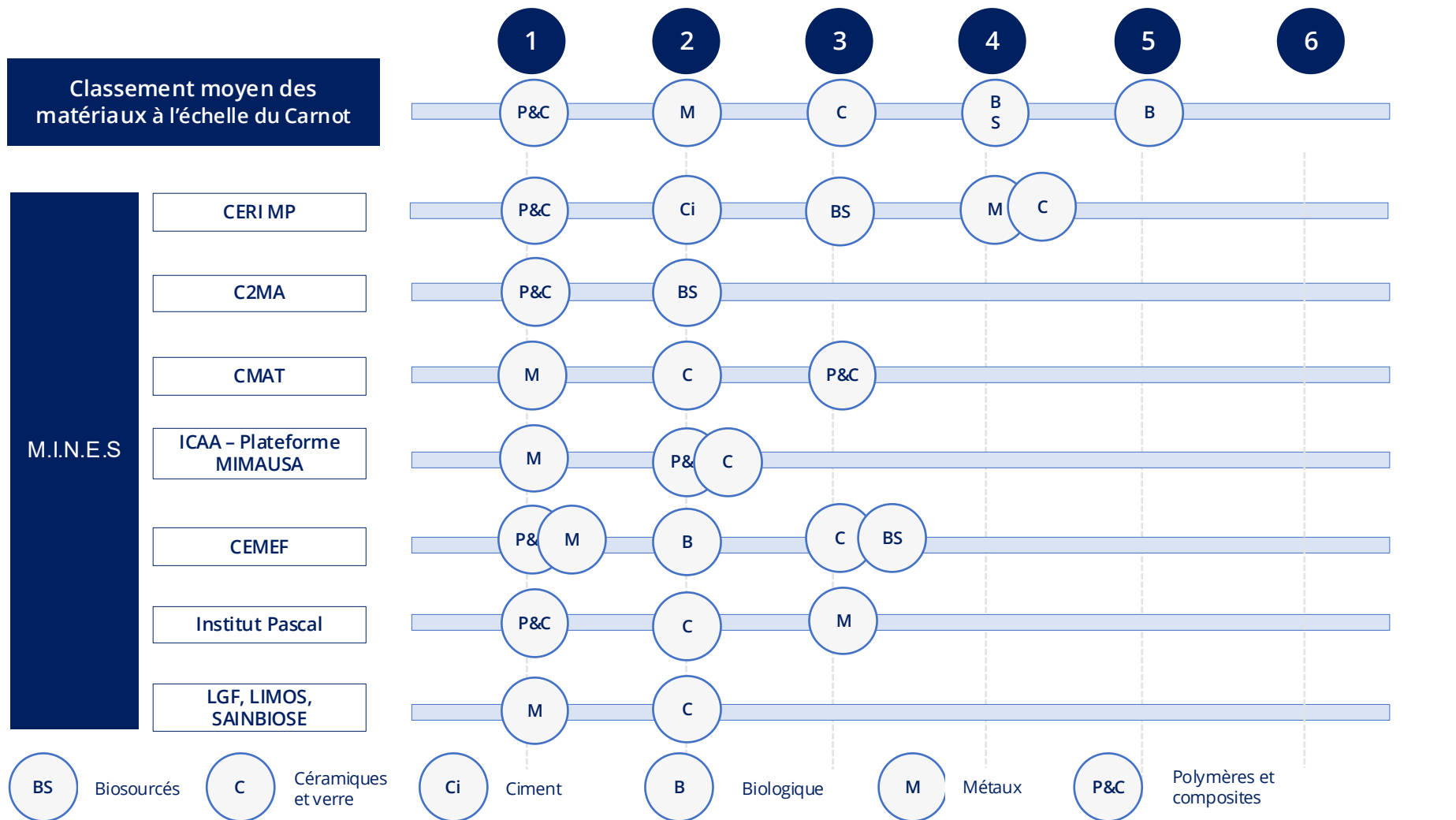
Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Matériaux adressés par les Carnot et leurs laboratoires

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

Classement moyen des matériaux à l'échelle du Carnot

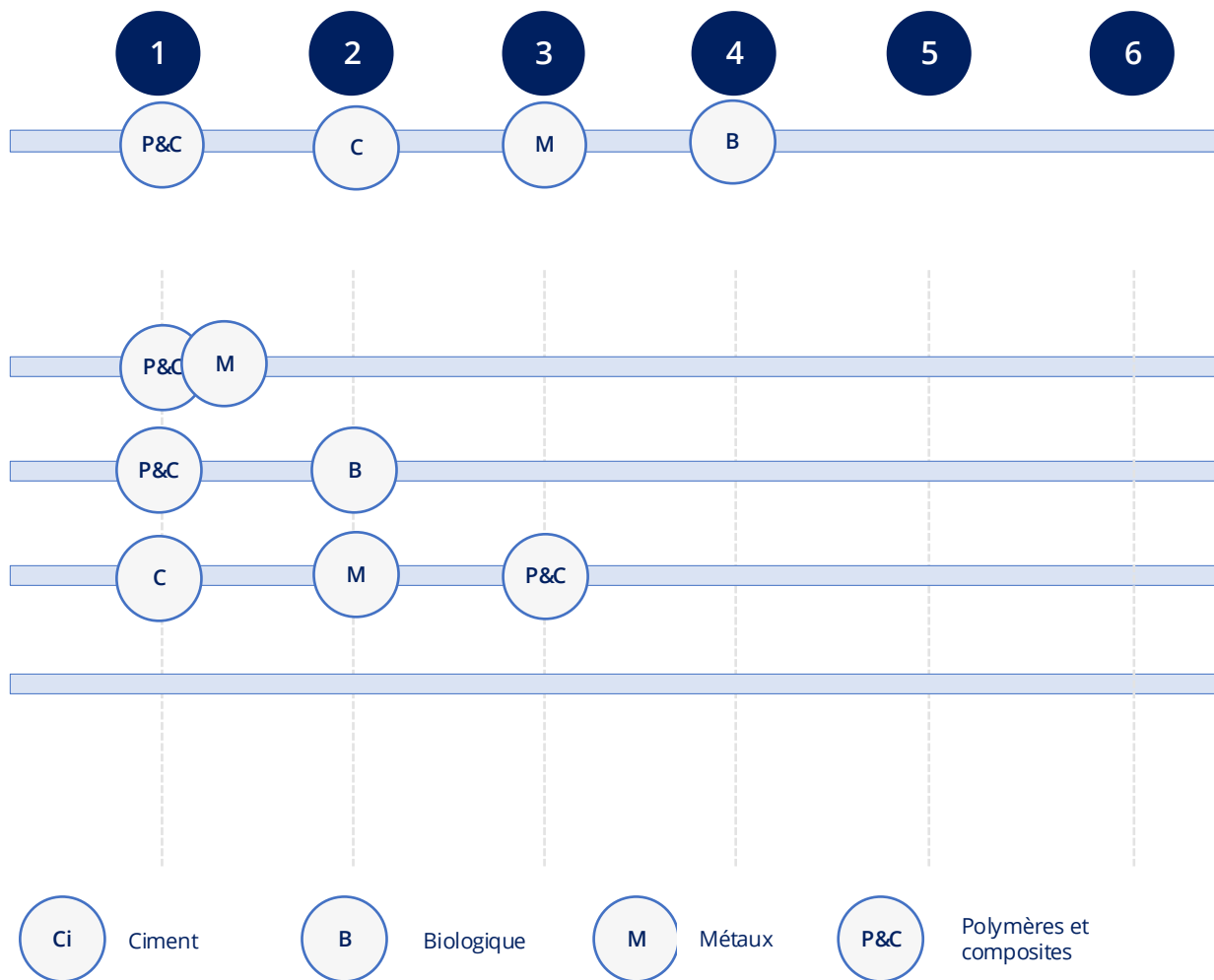
TSN

ICUBE

Plateforme Arago

LabSTICC

LITEM



Le classement est établi par ordre de priorité, où 1 représente la priorité la plus élevée et 6 la plus faible.

Niveau de maturité technologique en FA

II. Nos chiffres-clés et nos domaines d'expertise

TRL moyen exprimé par Carnot

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ARTS									
CEA List									
CETIM									
Chimie Balard Crimat									
Énergies du futur									
ICÉEL									
Ingénierie @ Lyon									
MICA									
M.I.N.E.S									
MECD									
TSN									

III. Notre empreinte industrielle

Ce que vous pourrez consulter dans cette partie

- Les filières économiques adressées par les Instituts Carnot
 - Les filières les plus largement adressées et jugées prioritaires par les Instituts Carnot sont l'aéronautique, le médical, l'oil & gas et le nucléaire, la défense
 - Le spectre de filières couvertes s'étend aujourd'hui à 14 filières
- Implantation des partenaires industriels par rapport aux sites Carnot (régional, national, international)
- La typologie des partenaires industriels adressés par les Carnot (TPE/PME vs ETI/grands groupes)
- Le volume de projets industriels et leur poids dans l'ensemble des actualités de FA, pour chaque Carnot
 - On compte près de 930 projets depuis 2017
- La perception des Carnot sur les principaux moteurs d'adoption de la FA, secteur par secteur

Adressage des filières par les Carnot

III. Notre empreinte industrielle

	Aéronautique / Spatial	Médical	Oil & gas / nucléaire	Défense	Naval	Automobile	Chimie & matériaux	Ferroviaire	Construction	Electronique	Mode & Luxe	Valorisation des déchets	Alimentaire	Cosmétique
ARTS														
CEA List														
CETIM														
Chimie Balard Cirimat														
Énergies du futur														
ICÉEL														
Ingénierie @ Lyon														
MICA														
M.I.N.E.S														
MECD														
TSN														

Niveau d'activité
exprimé par les Carnot

1 2 3

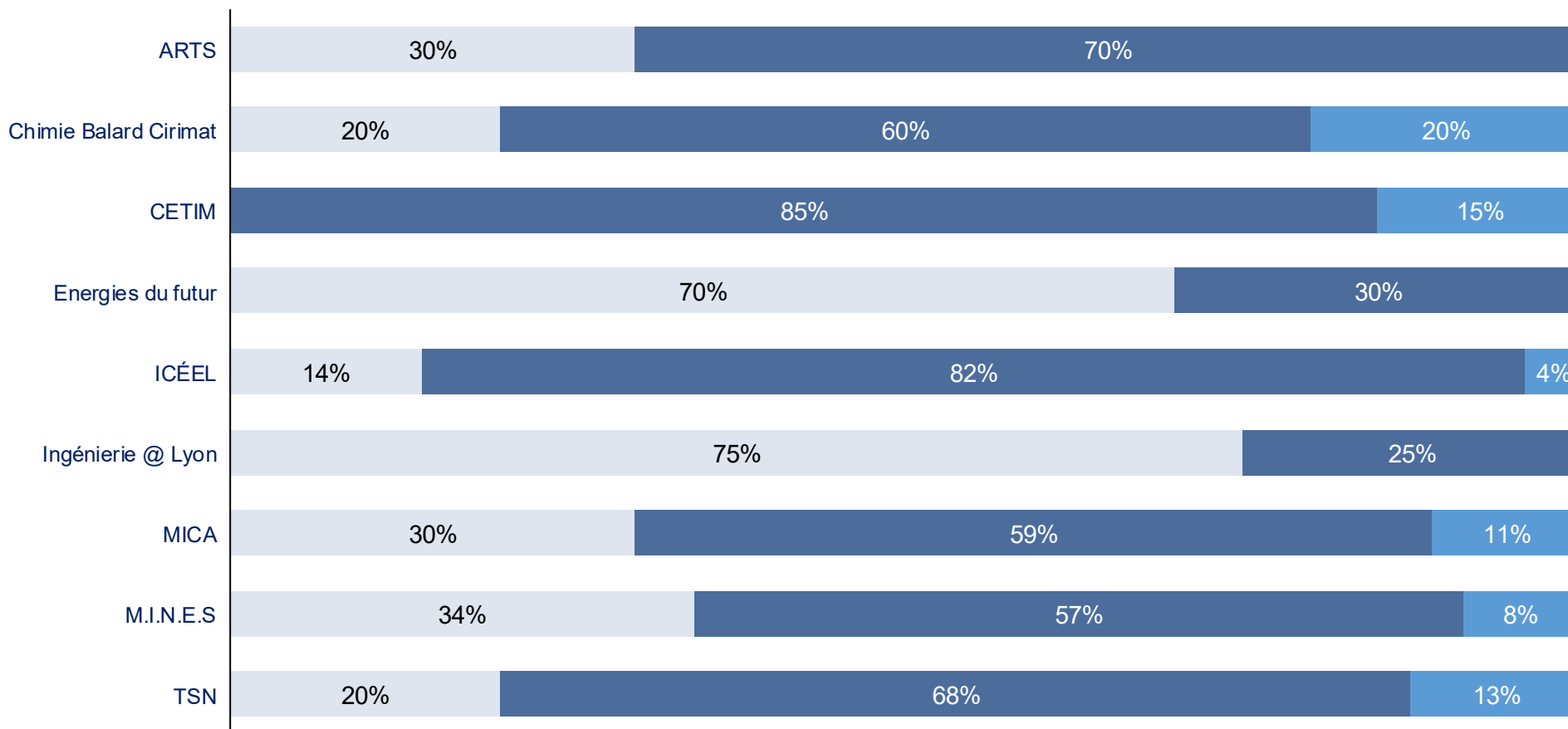
Filière non couverte

Implantation des partenaires industriels en 2024, par Carnot

III. Notre empreinte industrielle

Ventilation territoriale des contrats industriels par Carnot

■ Régional
 ■ National
 ■ International



Typologie de partenaires industriels : TPE/PME vs ETI/grands groupes

III. Notre empreinte industrielle

Profil de partenaire le plus récurrent, par filière et pour l'ensemble des Carnot
En 2024

	TPE/PME	ETI / Grands groupes
Aéronautique/ Spatial	★★★	★★★★
Médical	★★★	★★★
Oil & gas / nucléaire / autres	★★★	★★★★
Défense	★★★	★★★★
Naval	★★★	★★★★
Automobile	★★★	★★★★
Chimie & matériaux	★★★	★★★★
Ferroviaire	★★★	★★★★
Industries pour la construction	★★★	★★★★
Industries électroniques	★★★	★★★★
Mode & Luxe	★★★	★★★★
Solutions industrie et transformation et valorisation des déchets	★★★	★★★
Alimentaire	★★★	★★★
Cosmétique	★★★	★★★

1. ARTS
2. CEA List
3. CETIM
4. Chimie Balard Cirimat
5. Energies du futur
6. Ingénierie @Lyon
7. ICÉEL
8. MECD
9. MICA
10. M.I.N.E.S
11. TSN

IV. Fiches portraits Carnot

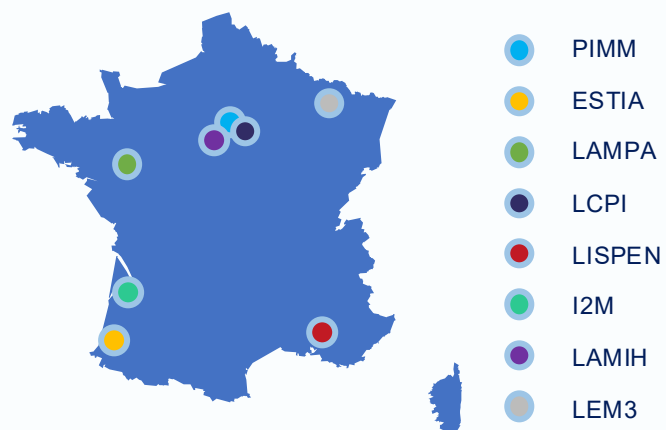
1 Fiche Portrait du Carnot ARTS

Carnot ARTS

Eléments clefs à l'échelle de l'institut Carnot

Référence à destination des secteurs de l'aéro-spatial, l'institut Carnot ARTS fait du métal son matériau de prédilection en FA, avec un positionnement fort en termes de matériaux, de fabrication 3D et procédés ainsi que le contrôle de caractérisation.

Localisation des laboratoires

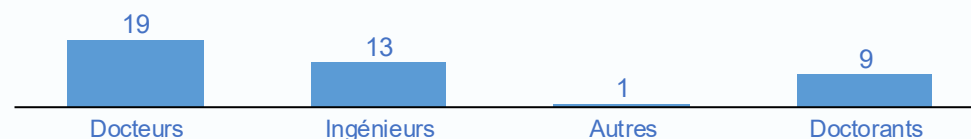


Contacts de l'équipe

- Nicolas SAINTIER : Nicolas.SAINTIER@ensam.eu
- Pierre MICHAUD : p.michaud@estia.fr
- Patrice PEYRE : patrice.peyre@ensam.eu
- Bruno Fayolle : bruno.fayolle@ensam.eu

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



15 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

212 ans d'ancienneté cumulée des équipes

3,73 M€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 3 à 6 (*moyenne de tous les établissements*)

12 projets scientifiques financés depuis 2017

6,25 M€ d'équipements dédiés à la FA

+11 machines de production

1 machines SLM Solutions (Plateau 125 mm) + 1 banc instrumenté de SLM (couches simples) + 1 machine de Projection LMD OPTOMECH LENS 850 R + 1 banc instrumenté de LMD, 1 projet 460Plus, 1 projet 3510SD, 3 Makerbot Replikator, Machine AddUp Magic 800, Tête Coaxprinter PRECITEC (sur robot COMAU-SIEMENS), Tête Meltio Engine (sur robot Kuka), WAAM CMT Fronius sur Robot kuka, Lynxter S300D 1 machine FDM (dépôt de fil fondu) STRATASYS Dimension Elite + 1 machine STRATASYS Objet 260 Connex (projection de matière) multi-matériaux synchrone (polymères) ...

123 publications scientifiques en matière de FA

4 brevets en matière de la FA

Carnot ARTS

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Secteurs adressés



Réalisations industrielles

Chaires industrielles:

- Chaire ARKEMA Fabrication additive de polymères thermoplastiques hautes performances
- Chaire DREAM - Develop Responsive Emergent and Additive Manufacturing process avec SIGMA Clermont.
- Chaire CESAM – SAFRAN Additive Manufacturing (SAMC) / ENSAM, la Chaire industrielle porte sur la maîtrise des procédés de fabrication additive jusqu'au propriétés d'usage des matériaux et structures

Exemple de projets avec PME

- Projet WAAMOLD: Des outillages de moulage en impression 3D: <https://youtu.be/Ezn1kwOrdG0>

Projets internationaux

- Interreg SUDOE ADDISPACE et Interreg POCTEFA TRANSFRON 3D
- Porteur d'une action (international Research Project) IRP CNRS AMHELIE entre l'Australie et la France (Université de Monash, Université de Swinburn, Université de Sydney, RMIT, Cambera University, I2M)

Réalisations scientifiques et techniques

- Membre fondateur du réseau national Groupement d'intérêt scientifique (GIS CNRS) GIS AHEAD ((porteurs I2M/LMS polytechnique). Son objectif est de débloquent les verrous scientifiques de l'impression 3D métallique et céramique pour faire progresser ses usages sans l'industrie (Laboratoires I2M et PIMM)
- Membre fondateur et Participation active à la plateforme Additive Factory Hub (AFH) en Ile de France.
- Membre fondateur du Réseau Fabrication additive ADDIMALLIANCE (Aquitaine et Occitanie)
- Participations à plusieurs projets collaboratifs autour des procédés de fabrication additive : PSPC FAIR (2015-2019), FUI AMBITION sur le cuivre pur (2018-2022), ANR NOCOLOX sur Aluminium (2022-2026), ANR Dalailama sur aluminium,
- ANR DYNAM (2025-) Machine de micro-fabrication additive
- Projet européen Addilanza (2023-), qui porte sur la réparation d'engrenages grâce à la fabrication additive, Projet Européen ADDITOOL (2020-2024) Fabrication additive métallique appliquée au secteur de l'outillage

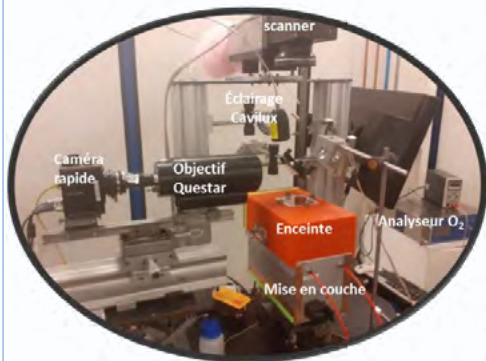
Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Modélisation du procédé / Monitoring et contrôle in -process. Depuis 1 an l'aspect impact environnemental devient important avec plusieurs actions de recherches trans-disciplinaires au sein d'ESTIA Recherche
- Modélisation de l'effet des modifications microstructurales et des défauts induites par les procédés sur le comportement mécanique des matériaux hautes performances
- Optimisation du comportement des structures lattices sous chargements complexes, fatigue et sollicitations dynamiques hautes vitesses

Carnot ARTS Équipements & Moyens emblématiques

Mini-Machine LPBF MiMas



Scanner scanlab + lentille Z-théta (P < 200 W).
Laser SPI 1 kW (l=1.07 μm), Logiciel DMC de contrôle scanner + laser
Caméra rapide (< 50 kHz) + objectif fort grossissement (champ ~ 2 mm)
Éclairage CaviLux (0.81 μm) des zones fondues
Suivi du taux d'O₂

Conception-Design PIMM (F. Coste)
Grande flexibilité
Petits volumes de poudre
Mise en forme de faisceau (DOE)
Contrôle de fabrication couche par couche
Diagnostics autour de ZF (éjectas, ZF)
Préchauffage radiants en cours d'installation
Version SLS pour les polymères (Chaire ARKEMA)

Micro-Fabrication Additive



Structure lattice à barreaux à l'échelle micrométrique

Banc de FA instrumentés et développement de matériaux à hautes performances pour les applications aéronautiques. Exemple de structures architecturées micrométriques à propriétés mécaniques spécifiques optimales.

Chaire CESAM – avec SAFRAN ADDITIVE MANUFACTURING .

Fabrication Additive Grandes Dimensions



https://youtu.be/_OT_PUNa6mQ

Robot WAAM Kuka KR50 R2500-HA + positionneur 1T
Fronius – iWave Multi process CMT Additive Pro
Permettant le développement de structures de grande dimension pour l'industrie mécanique avec monitoring

Chaire DREAM - Develop Responsive Emergent and Additive Manufacturing process avec SIGMA Clermont.



Carnot ARTS / Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux (PIMM)

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design		
Matériaux	Expert international	Alliages base Titane ; Propriétés optiques (absorption) ; Aciers ; Matériaux architecturés ; Alliages base Nickel
Fab. 3D	Expert international	-
Post-traitement	Maîtrise	Usinage ; Traitements thermiques ; Dépoudrage des pièces
Contrôles et caract.	Expert national	Caractérisation des états de surface ; Caractérisation mécanique ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...)
HSE	Connaissance	Connaissance de la réglementation
Chaîne numérique	Expert national	Simulation globale du processus
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation en cuve		
Projection de matière	Multi jet modeling	Résine
Projection de liant	Poly jets modeling	Poudre de cellulose
Fusion sur lit de poudre	SLM (métaux), SLS (Polymères)	Ti, Aciers, Ni, Cr/Co, Aluminium, cuivre, poly.
Extrusion de matière	FDM	Thermoplastiques
Dépôt de matière sous éner. conc.	LMD	Ti, Aciers, Ni, Cr/Co
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		
Matériaux		
Polymères et composites	<input type="range"/>	
Métaux	<input type="range"/>	
Céramiques et verres		
Matériaux cimentaires		
Matériaux biologiques		
Matériaux biosourcés		
	+	Priorité +++
Pièces réalisées (mm) : Taille min. : 1 (SLM) , 10 (LMD), 30 (WLAM) // Taille max. : 150 (SLM), 400 (LMDp), 400 (WLAM)		

Carnot ARTS / École supérieure des technologies industrielles avancées (ESTIA)

Expertises à l'échelle des établissements

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Expert international	Simulation / Modélisation procédé inherent strain
Matériaux	Maîtrise	Alliage Ti ; Aciers ; Base Ni ; Composites
Fab. 3D	Expert national	-
Post-traitement		
Contrôles et caract.	Maîtrise	Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique
HSE	Connaissance	Connaissance des réglementations ; En relation régulière avec la CARSAT Aquitaine pour des plans de prélèvement/analyse
Chaine numérique	Expert national	Programmation robots / Trajectoire (maîtrise de différentes solutions) ; Centre d'excellent EDU pour 3D expérience
Normalisation		
Impact env.	Maîtrise	Cellules instrumentées en consommation énergétique ; Recherche sur les impacts globaux (recyclage, réutilisation, consommation)
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Accompagnement de PME pour l'intégration de solution WAAM robotisée

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation en cuve		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière	FDM	Thermoplastiques (potentiellement chargé)
Dépôt de matière sous éner. conc.	WAAM ; WLAM ; LMD (poudre)	Titane, Aciers, Invar Aluminium, Base Ni
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		
Matériaux		
Polymères et composites	<input type="range"/>	
Métaux	<input type="range"/>	
Céramiques et verres		
Matériaux cimentaires		
Matériaux biologiques		
Matériaux biosourcés	<input type="range"/>	
	+	Priorité +++
Pièces réalisées : Taille min. : 0,6mm épaisseur (réparation) Taille max. : D=800mm x H=800mm		

Carnot ARTS / Institut de mécanique et d'ingénierie (I2M)

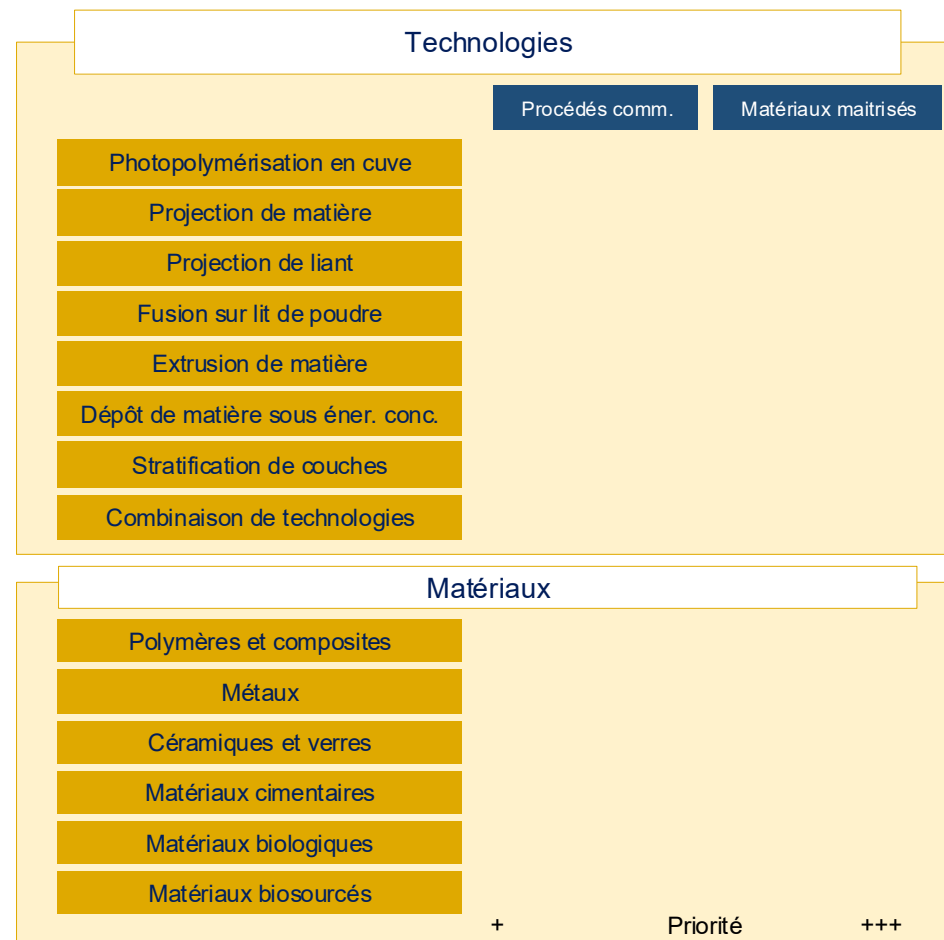
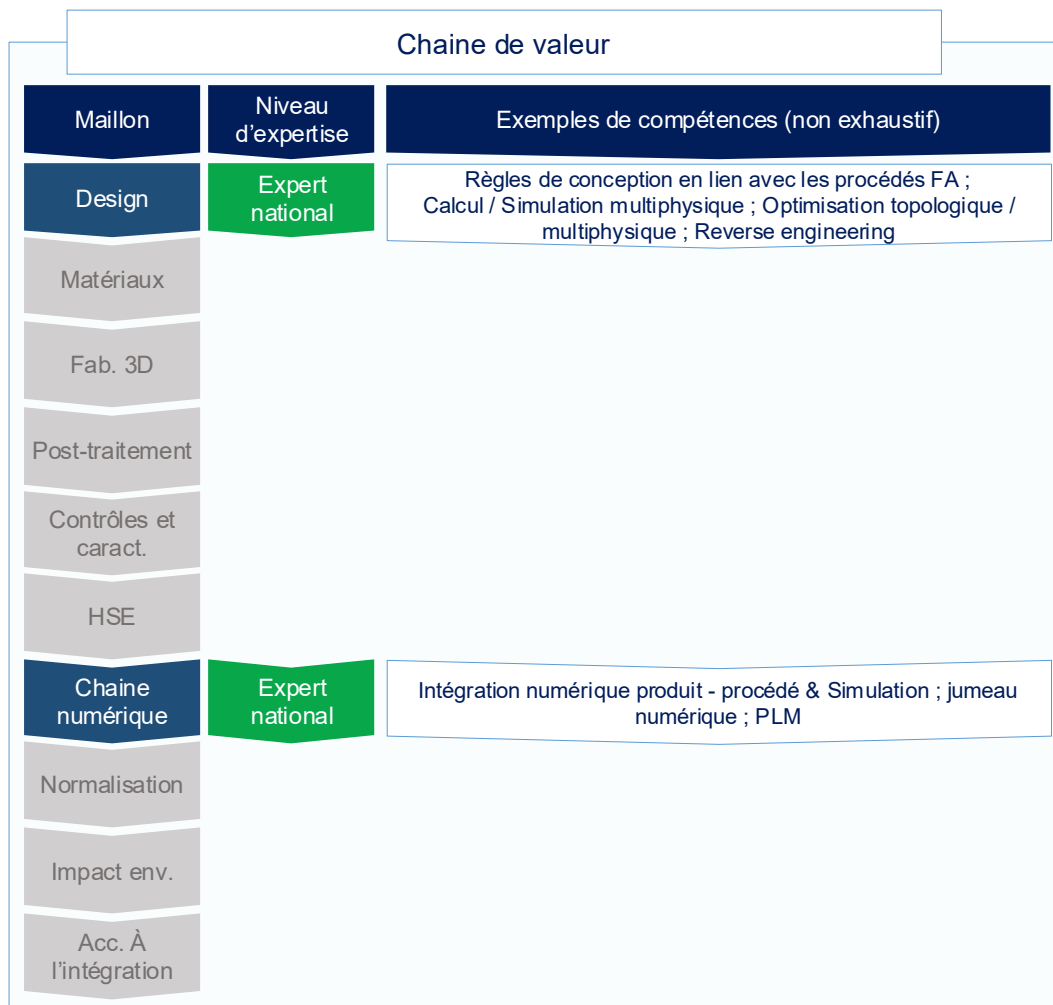
Expertises à l'échelle des établissements

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Expert international	Optimisation topologique ; Calcul / Simulation / Modélisation ; Optimisation paramétrique ; Intégration multiphysique
Matériaux	Expert national	matériaux architecturés ; Alliages d'aluminium ; Alliages base Titane ; Base nickel ; Aciers (316/304, etc) ; Polymères thermodurcissables
Fab. 3D	Expert international	-
Post-traitement	Maîtrise	Usinage ; Traitements thermiques ; Traitements chimiques
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...) ; Contrôles Non-Destructifs volumiques
HSE		
Chaine numérique	Connaissance	Intégration numérique produit - procédé & Simulation ; Continuité numérique
Normalisation		
Impact env.	Expert international	Évaluation environnementale des procédés & matériaux – Économie Circulaire / Écoconception
Acc. À l'intégration		

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation en cuve	Photopolymérisation de résine	Résine Thermodurs
Projection de matière	FDM	Biopolymères
Projection de liant	SLM Solution, SLM 280, bancs expérimentaux pour le développement process	alu, aciers, base nickel, alliages de titane
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		
Matériaux		
Polymères et composites	<input type="range"/>	
Métaux	<input type="range"/>	
Céramiques et verres		
Matériaux cimentaires		
Matériaux biologiques		
Matériaux biosourcés		
+ Priorité +++		
Pièces réalisées : Taille min. : 0,5 mm // Taille max. : 280 mm		

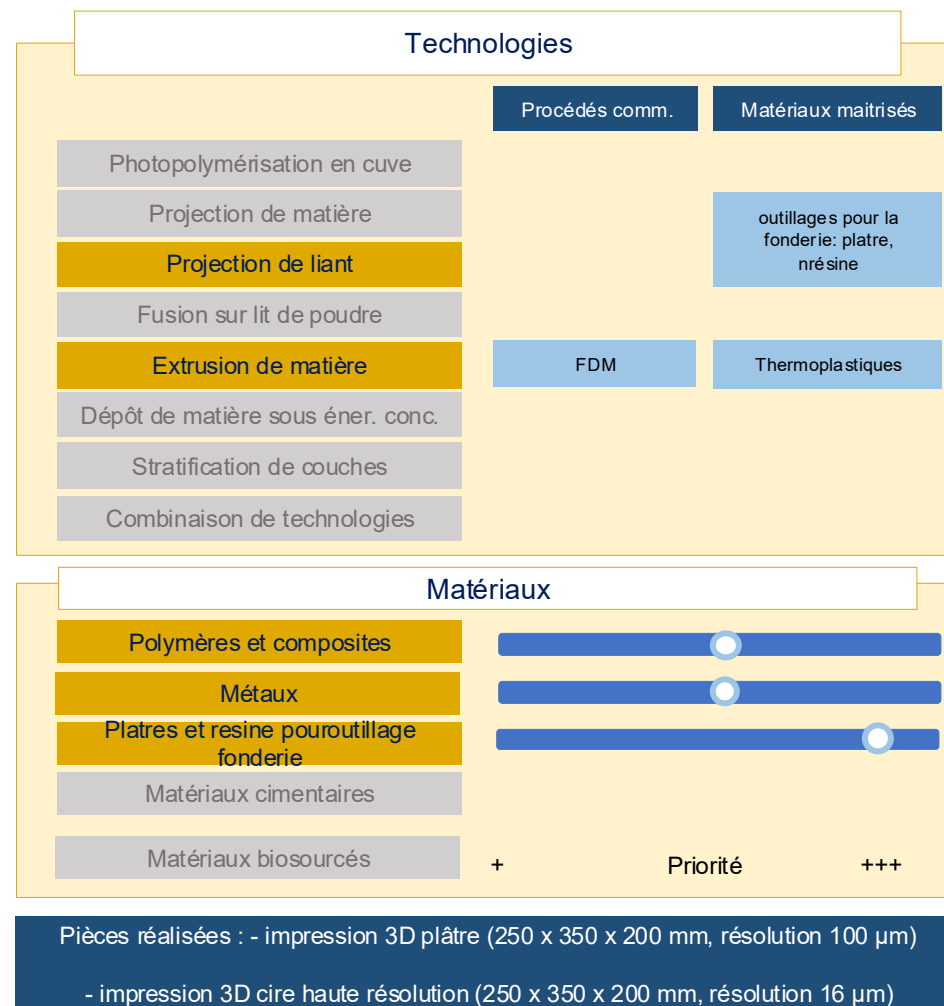
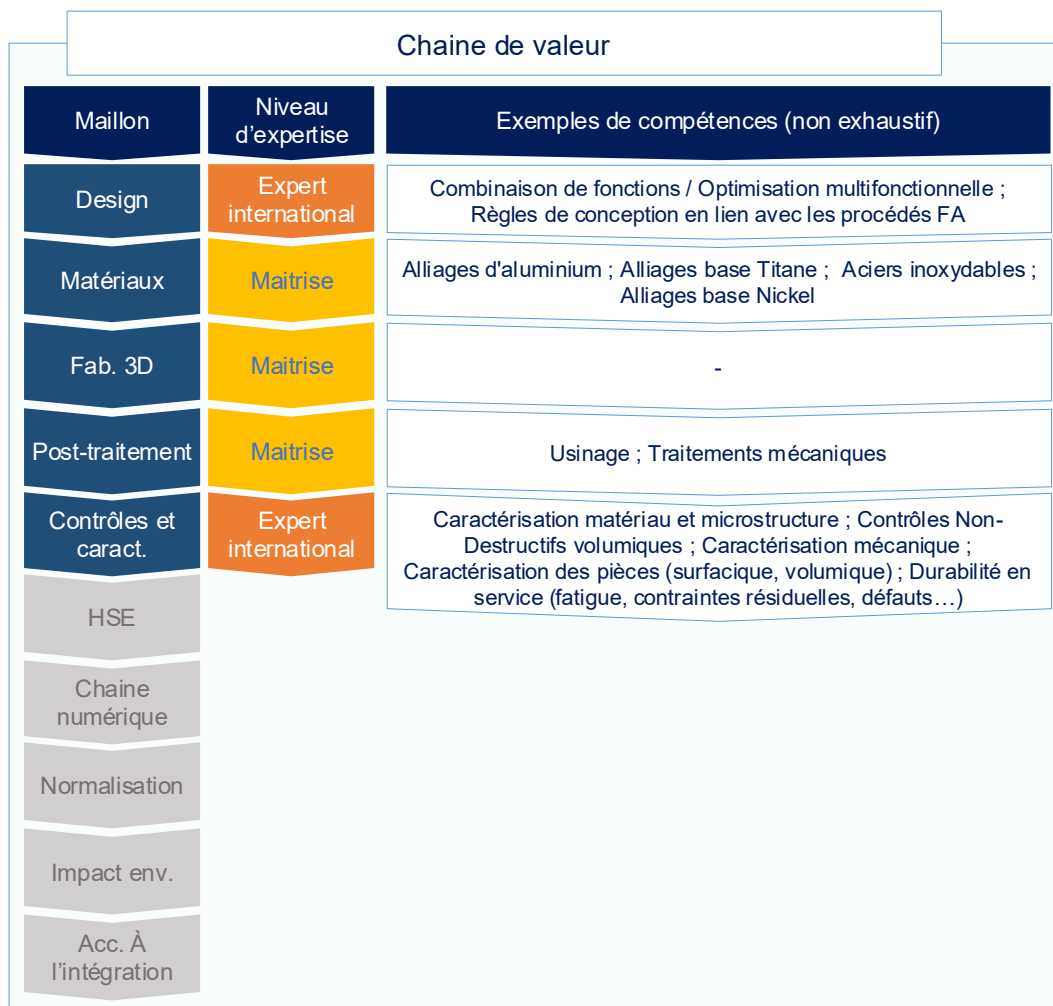
Carnot ARTS / Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques (LISPEN)

Expertises à l'échelle des établissements

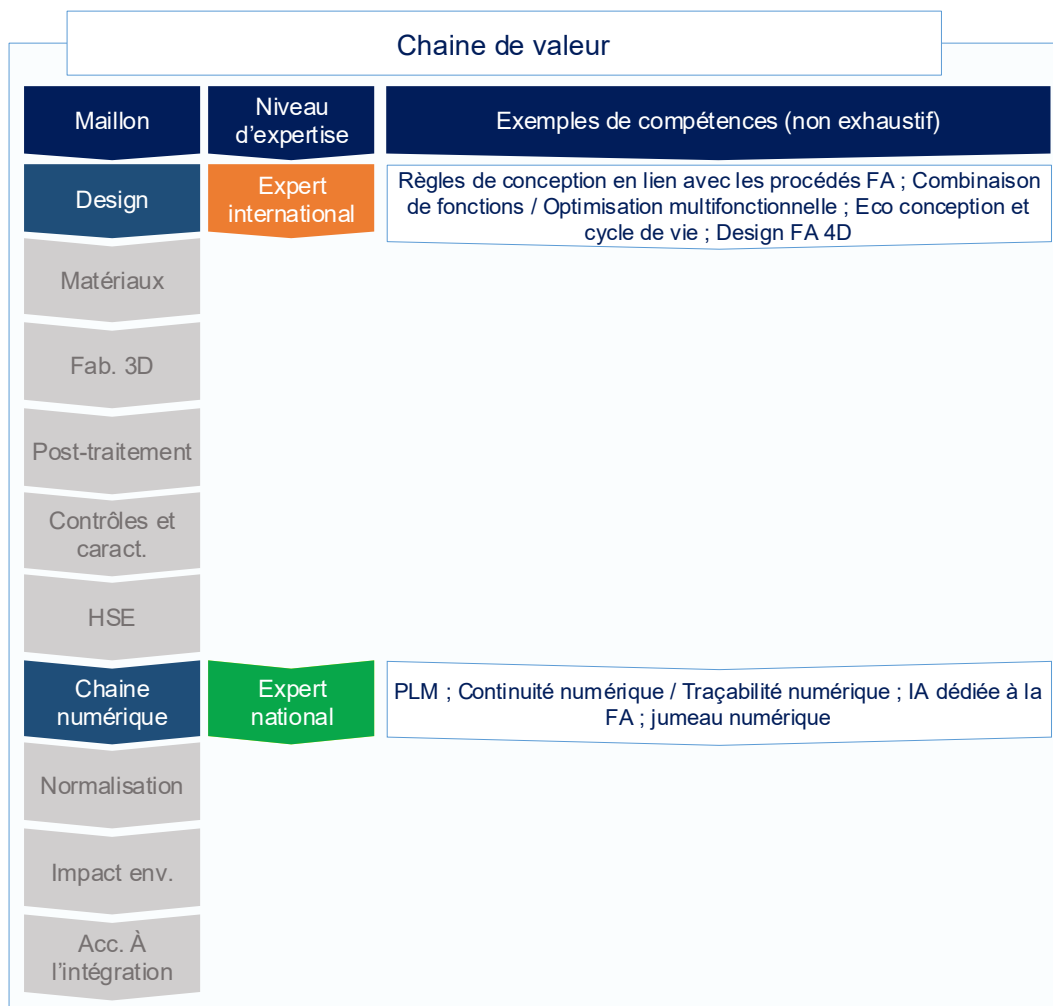


Carnot ARTS / Laboratoire d'angevin de mécanique, procédés et innovation (LAMPA)

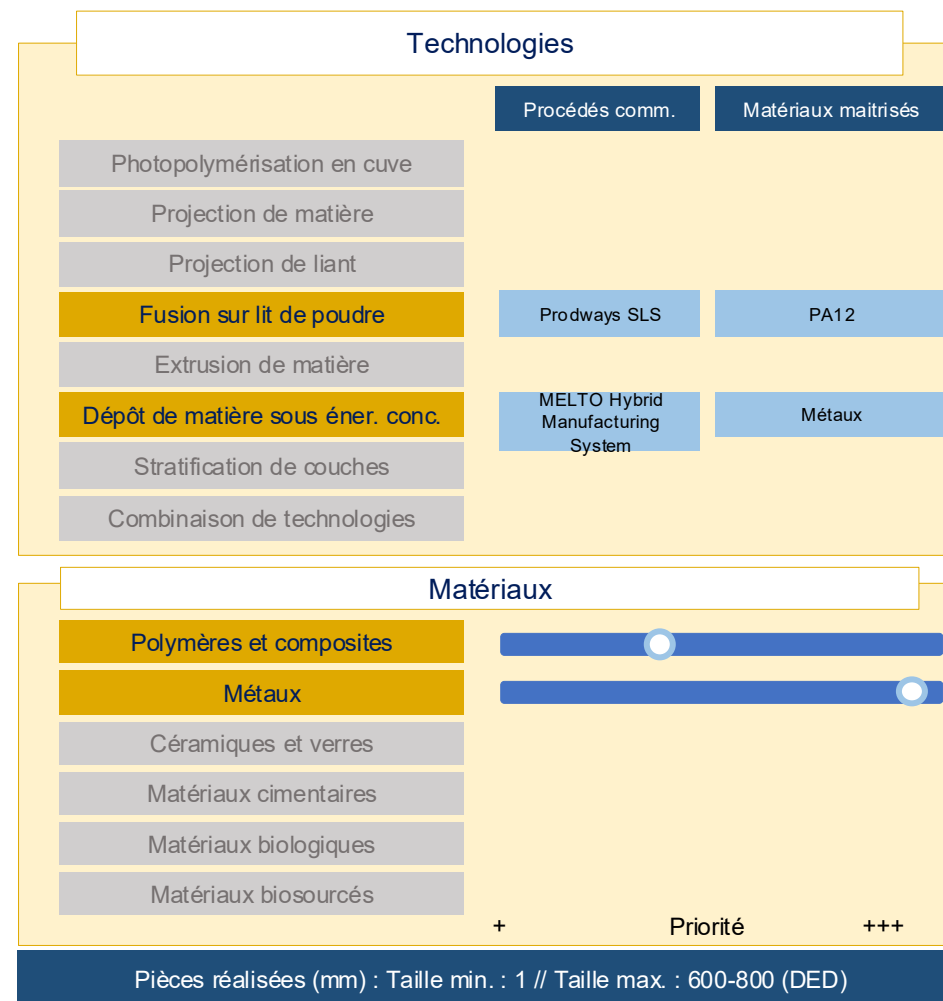
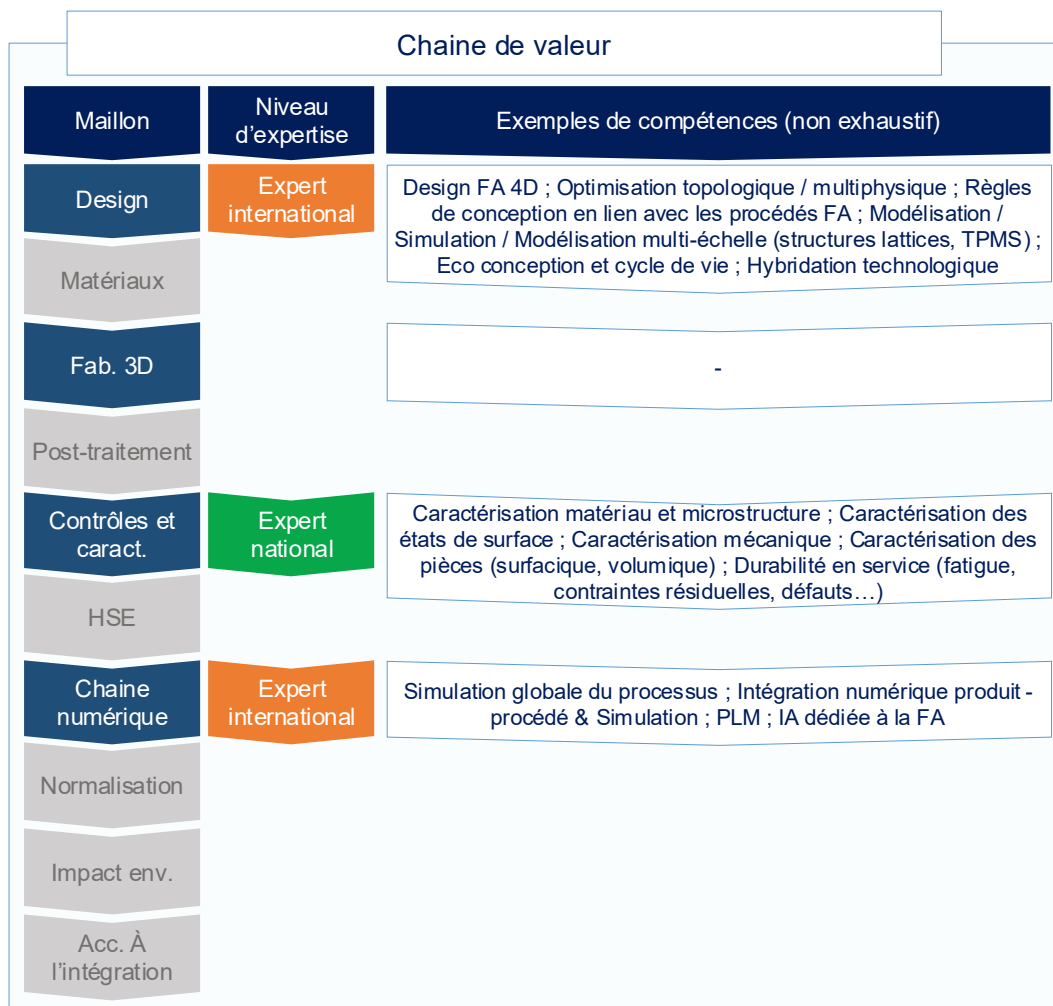
Expertises à l'échelle des établissements



Carnot ARTS / Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI) Expertises à l'échelle des établissements



Carnot ARTS / Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH) Expertises à l'échelle des établissements



Carnot ARTS / Le laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3) Expertises à l'échelle des établissements

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Expert international	Calcul / Simulation multiphysique ; Optimisation topologique / multiphysique
Matériaux	Expert international	Obtention / production de poudres ; Nouvelles nuances de poudres ; Alliages base Titane ; Caractérisation des poudres
Fab. 3D		-
Post-traitement	Expert national	Traitements mécaniques ; Traitements thermiques ; Fonctionnalisation de surface
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...)
HSE		
Chaine numérique	Expert national	Continuité numérique / Traçabilité numérique ; Simulation globale du processus
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Technologies	
	Procédés comm. Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation en cuve	
Projection de matière	
Projection de liant	
Fusion sur lit de poudre	SLM solution Alliages de titane
Extrusion de matière	
Dépôt de matière sous éner. conc.	
Stratification de couches	
Combinaison de technologies	
Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	☒
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	
	+ Priorité +++
Pièces réalisées : Taille min. : 0,5 mm // Taille max. : 280 mm	

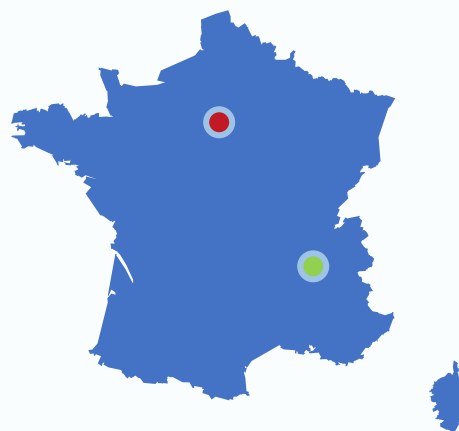
2 Fiche Portrait du Carnot CEA List

Carnot CEA List

Éléments clefs de l'institut Carnot

Le Carnot CEA List possède des compétences variées en instrumentation et simulation, et des plateformes ouvertes permettant d'adresser différents secteurs industriels exigeant en FA métallique notamment, sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Localisation des établissements



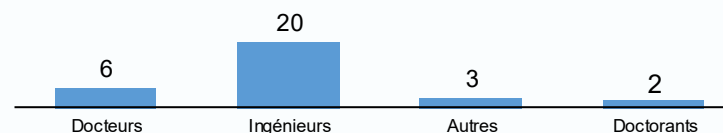
- CEA List / Saclay
- CEA List / Grenoble

Contacts de l'équipe

- Steve Mahaut – Chef de Service, Expert Senior CEA – steve.mahaut@cea.fr, (+33) (0)6 33 53 28 73
- Anaïs Baumard – responsable opérationnelle PRISMA – anais.baumard@cea.fr, (+33) (0)6 52 16 82 48

Chiffres clefs

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



10 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

105 ans d'ancienneté cumulée des équipes

1,2 M€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 3 à 7

15 projets scientifiques financés depuis 2017

3 m€ Investissement R&D (machines ouvertes, instrumentation R&D) :
Plateforme PRISMA (Saclay) WAAM, **Plateforme TIRREX** (Grenoble et Saclay) WAAM et FA polymères

1,5 m€ Machines prototypage/outillage et équipements pour besoins internes/accompagnement de projets :
8 machines FA, polymères (SLS, FDM, SLA)

Moyens spécifiques de l'institut: caractérisation et contrôle non destructif, monitoring, simulation et jumeau numérique, bases de données, IA et traitement de données, supervision procédés

41 publications scientifiques en matière de FA

12 brevets possédés sur la FA

Carnot CEA LIST

Expertises à l'échelle des établissements

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Connaissance	Optimisation topologique / multiphysique ; Calcul / Simulation multiphysique ; Eco conception et cycle de vie
Matériaux	Maîtrise	Matériaux métalliques, polymères et structures vitreuses (silice)
Fab. 3D	Maîtrise	Procédés WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), Polymérisation
Post-traitement	Maîtrise	Délicatage ; Frittage ; Traitements thermiques ; Revêtement de surface ; Traitements mécaniques ; Usinage
Contrôles et caract.	Expert international	Contrôle non destructif (santé matière, défauts) ; Contrôle et caractérisation de pièces (composition chimique, dimensionnel)
HSE	Connaissance	Connaissance réglementation
Chaine numérique	Expert international	Jumeau numérique, simulation des procédés et des contrôles, bases de données, outils d'analyse et plan d'expérience, Machine Learning
Normalisation	Connaissance	Connaissances internes CEA (DES/ISAS)
Impact env.	Connaissance	Connaissance méthodes et déploiement ACV
Acc. À l'intégration	Maîtrise	-

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA	Polymères, verres
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	SLM, LPBF	Métaux
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.	WAAM	Métaux
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux	
Polymères et composites	<input type="range"/>
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	<input type="range"/>
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	
+ Priorité +++	

Pièces réalisées : Taille min. : <0,1mm ⁽¹⁾ // Taille max. : plusieurs milliers de mm ⁽²⁾	
---	--

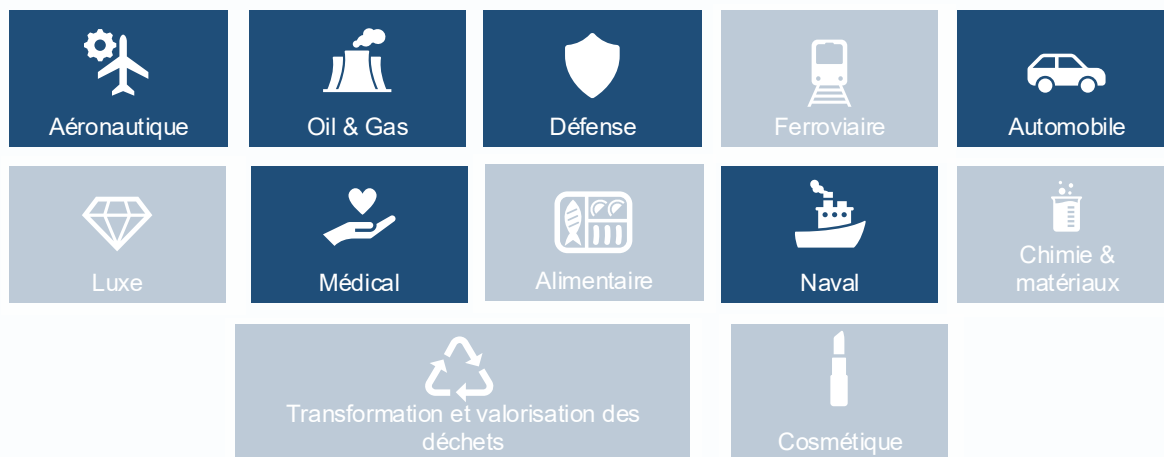
(1) Capteurs intégrés en bout de fibre optique

(2) (WAAM) dispositif capable de réaliser des pièces jusqu'à 2 m de dimensions (largeur; longueur ou hauteur) et jusqu'à 2T

Carnot CEA List

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Secteurs adressés



Réalisations industrielles

- Participation à la caractérisation/qualification de pièces/démonstrateurs industriels dans le cadre de projets collaboratifs (projet AeroPrint - Aéronautique, projets ARQANE/NUCOBAM - nucléaire, AFH - défense, nucléaire, Grade2XL - tous secteurs industriels dont naval et aéronautique)
- Faisabilité de fabrication de pièces complexes - collaborations avec l'entreprise VLM robotics sur la plateforme PRISMA
- Intégration d'outils de monitoring sur machines de fabrication additive avec des partenaires (consortium AFH / 3D systems, projet Grade2XL/ WAAM RAMLAB, projet Integrade, projets internes CEA - avec institut CEA-LITEN/Energies du futur / Farsoon)
- Participation à la montée en maturité des contrôles non destructifs des pièces et procédés via le GT COFREND (Confédération Française des Essais Non Destructifs)

Réalisations scientifiques et techniques

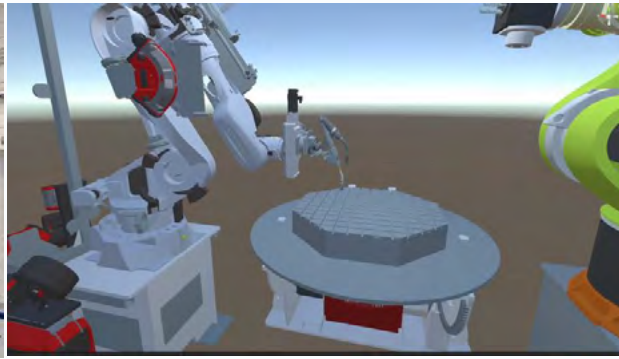
- Instrumentation et monitoring de pièces et procédés FA (majoritairement métalliques, moyens également compatibles polymères et vitreuses)
- Synchronisation du pilotage robotique pour la fabrication et le monitoring in-process
- Contrôle non destructif et caractérisation de pièces finies
- Évaluation des propriétés mécaniques par moyens non destructifs
- Caractérisation de poudres métalliques
- Corrélation paramètres de fabrication et santé matière sur pièces finies
- Gestion de bases de données et outils d'analyse/exploitation associés
- Simulation des contrôles (évaluation contrôlabilité, optimisation, prédiction des performances, analyse de sensibilité)
- Jumeau numérique du procédé (simulation du procédé - avec outils existants ou partenaires) pour le monitoring
- Outils d'analyse (méthodes IA connexionnistes - basées sur données et IA symbolique - basée sur règles métier)
- Bases de données / capitalisation connaissances
- Moyens robotiques avancés en manipulation et parachèvement

Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

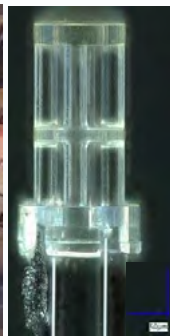
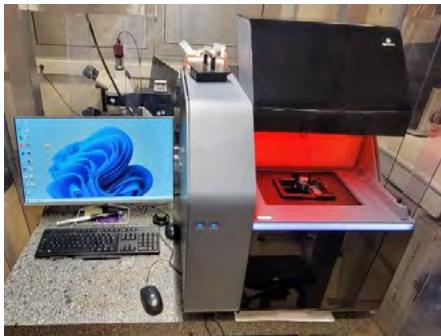
- Intégration et combinaison des outils/méthodes déjà évalués (encart ci-dessus) sur machines ouvertes (Plateforme PRISMA) avec capacités de rétroaction pour maîtrise du procédé de bout en bout
- Jumeau numérique du procédé (briques existantes à adapter/optimiser pour les cas d'application)
- Exploitation de ces moyens pour cas d'usage industriels

Carnot CEA List Equipements & Moyens emblématiques



- Fabrication de pièces de grandes dimensions (diamètre 2m x2m, poids maximal 3T)
- Technologies de soudage : Mig-MAG et CMT
- 2 robots : fabrication et usinage/CND
- Jumeau numérique de la fabrication (avec CEA/DES/ISAS)
- Intégration d'outils de monitoring et CND post-fabrication

Plateforme PRISMA (Wire Arc Additive Manufacturing)



- Polymérisation à deux photons (TPP) pour structures vitreuses (silice) et polymères
- Intégration de capteurs en bout de fibre optique

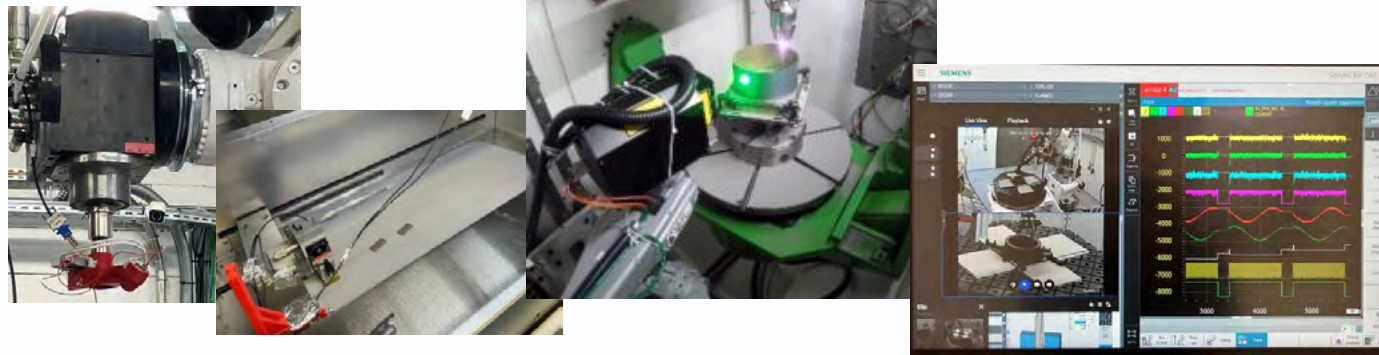
Polymérisation à 2 photons



- Moyens d'usinage et capacités associées
- Manipulation robotisée (trajectoires, préhenseurs)

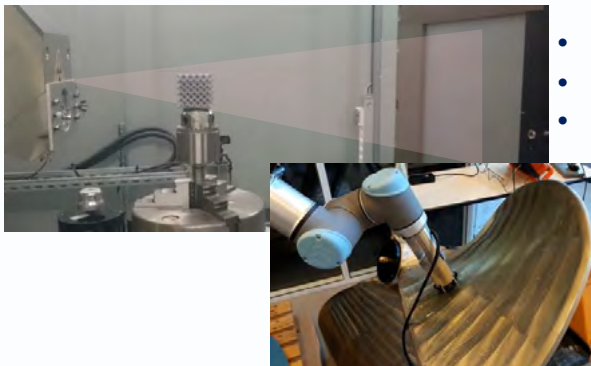
Moyens de parachèvement (manipulation et usinage)

Carnot CEA List Equipements & Moyens emblématiques



- US lasers (Laser-ultrasons)
- Vibromètres optiques et acoustiques
- Fluorescence et spectro-imagerie X
- Profilométrie laser
- Ultrasons contact
- Capteurs électromagnétiques
- Données et supervision paramètres machines
- Bases de données

Outils monitoring (instrumentation en ligne)

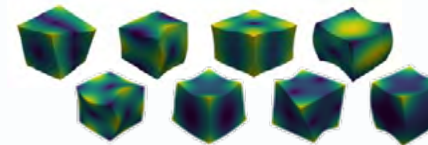


- Tomographie avancée
- Contrôle ultrasons adaptatif
- Contrôle post-fab par US laser

CND post-fabrication



- Caractérisation de poudres
- Caractérisation non destructive de propriétés mécaniques par résonance ultrasonore



Caractérisation

3 Fiche Portrait du Carnot CETIM

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) Éléments clefs à l'échelle de l'institut Carnot

Référence à destination du secteur de la mécanique, le Carnot CETIM couvre globalement l'ensemble de la chaîne de valeur de la fabrication additive métallique par la réalisation d'études dont la finalité doit permettre l'accélération de l'adoption de ces technologies par l'industrie

Localisation des établissements



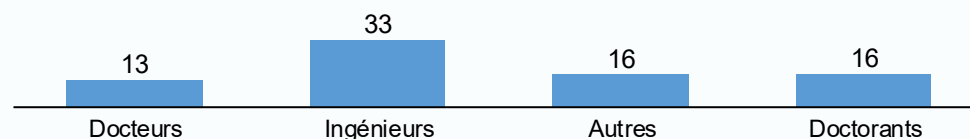
- CETIM / Laboratoire de Senlis
- CETIM / Plateforme de Saint-Etienne
- CETIM / Plateforme de Bourges
- CETIM / Plateforme de IdF
- CETIM / Plateforme de Cluses
- CETIM / Laboratoire de Nantes
- CETIM / Laboratoire de Pau

Contacts de l'équipe

- Benoît Verquin - Fellow Expert – benoit.verquin@cetim.fr – 06 07 44 74 14
- Christophe Reynaud – resp. développement – christophe.reynaud@cetim.fr – 06 83 58 13 89
- Quentin Charron - Référent technique Carnot – quentin.charron@cetim.fr – 07 85 74 52 14

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



16 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

792 ans d'ancienneté cumulée des équipes

8,5m€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 3 à 9

17 projets scientifiques financés depuis 2017 (projet > 150k€)

13m€ d'équipements dédiés à la FA

16 machines de production (8 PBF-LB, 3 MBJ, 1 M-FDM, 1 DED-P, 2 WAAM, 1 MELD)

2 fours de frittage

+ moyens de parachèvement génériques (usinage, finition des surfaces), moyens de caractérisation génériques (traction, dureté, ...) et spécifiques poudre (diffraction laser, rhéologie, chimie), moyens de contrôles produit & monitoring procédé, bancs d'essais.

45 publications scientifiques en matière de FA

4 brevets possédés sur la FA

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) Expertises à l'échelle de l'institut Carnot - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Outil expert aide à la décision / choix procédé ; règles de conception en lien avec les procédés FA ; optimisation topologique statique, fluide & thermique ; calcul/ simulation multi-physique, mécanique statique/dynamique ; Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS) ; Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle ; Reverse engineering ; Hybridation technologique ; Eco conception et cycle de vie ; Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle
Matériaux	Expert international	Caractérisation des poudres; nouvelles nuances de poudres; Matériaux métalliques : Aciers, Ti & alliages, Al & Alliages, Ni & Alliages, BMG, métaux réfractaires
Fab. 3D	Expert international	R&D relative à l'étude des stratégies de fabrication en lien avec les spécificités fonctionnelles des composants, à la maîtrise et répétabilité des procédés FAM basés sur le frittage et haute énergie
Post-traitement	Expert national	Usinage ; Traitements mécaniques ; Traitements physiques ; Traitements chimiques ; Traitements thermiques ; Fonctionnalisation de surface ; Revêtement de surface ; Frittage ; Dépoudrage des pièces ; Propreté de surface
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Contrôle en cours de production ; Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie) ; Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface ; Caractérisation de la propreté (risque de relargage de poudres) ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...) ; Contrôles Non-Destructifs volumiques ; Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...)
HSE	Maîtrise	Recyclage des poudres ; connaissance de la réglementation
Chaîne numérique	Maîtrise	Exploitation des données ; jumeau numérique ; simulation soudage & WAAM
Normalisation	Expert international	Membre UNM 920 ; animation ISO TC 261 - WG3 et participation à d'autres WG ; méthode de test et de spécification
Impact env.	Expert national	ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration	Expert international	Conduite du changement ; diagnostic ; business model ; benchmark

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) Expertises à l'échelle de l'institut Carnot – Technologies et matériaux

Technologies

	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière	DED-P	Métaux
Projection de liant	MBJ	Métaux
Fusion sur lit de poudre	PBF-LB	Métaux
Extrusion de matière	M-FDM	Métaux
Dépôt de matière sous éner. conc.	WAAM / DED-P	Métaux
Stratification de couches	MELD	Métaux
Combinaison de technologies		

Matériaux

Polymères et composites	
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+
Priorité
+++

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm x 5mm x 1mm // Taille max. : 8m x 1,5m x 1,5m

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Secteurs adressés



+ solutions industrie du futur

Réalisations industrielles

- **Premières industrialisations de la technologie sinter based MBJ** : Plusieurs projets multipartenaires adossés au 2 plateformes de Cluses et St Etienne pour évaluation de cette technologie et favoriser sa diffusion dans différents secteurs industriels (aéronautique, médical, luxe, énergie) ; des résultats marquants avec l'adoption et l'industrialisation de cette technologie par plusieurs acteurs industriels dont notamment dans le secteur Mode et Luxe (EAC), et le secteur aéronautique.
- **Qualification de la Fabrication additive** : Définition des procédures et méthodes pour les problématiques de réception machine, de bonnes pratiques de mise en œuvre de la technologie y compris contrôle à réception de la matière première, surveillance du procédé / capitalisation des données de fabrication, maintenance du procédé, capacité du procédé, qualification. Ces travaux sont déclinés à différentes filières souveraines : aéronautique / défense / nucléaire
- **Mise en place d'une plateforme d'appropriation et de transfert** pour le secteur industriel de la défense associant plus de 45 entreprises (DO et supply chain) : Printing Bourges

Réalisations scientifiques et techniques

- Etablissement base de données matériaux & procédés
- Création de 2 nouvelles plateformes technologiques
 - plateforme AFH –IdF à destination des secteurs industriels aéronautique (Ex Safran), chimie (Ex Air Liquide), énergie (Ex EDF) qui regroupent des centres techniques et laboratoires (CDM, PIMM, LNE, ONERA, CEA). 20 thèses réalisées dans le cadre du partenariat AFH1.0
- Structuration de la cohésion nationale autour de la fabrication additive métallique avec comme objectifs de soutenir les acteurs de la filière, supporter l'émergence de nouveaux acteurs, partager les connaissances etc. 2 éditions du symposium international METAL AMS organisées par le CETIM (périodicité : 2ans)
- Très forte implication du CETIM en normalisation au sein de la commission UNM920 et de groupes internationaux ISO/TC 261 et du CEN/TC 438 . WG3 ISO/TC261 présidé par CETIM.

Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Conception : DFAM – conception générative – optimisation multiphysique
- Maîtrise des procédés & industrialisation : mise sous contrôle du procédé via contrôle en ligne, développement de méthodes de contrôle, monitoring via traitements de données par des outils ML/IA, simulation numérique des procédés / jumeau numérique

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) Equipements & Moyens emblématiques



Desktop Metal Shop



Digital Metal DMP2500



Desktop Metal PF1



Elnik MIM3015



Desktop Metal P1



Développement acier 304L sur technologie SHOP, CETIM – Desktop Metal



Système de verrouillage en position avec partie mobile, CETIM – Mantion



Embouts de pince chirurgicale, CETIM – Innovapeek



Démonstrateur Bloc hydraulique, CETIM – PTT FA

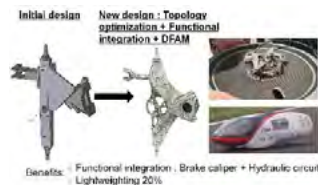
Lignes pilotes en Metal Binder Jetting : 3 imprimantes représentatives des différentes technologies + 2 fours de frittage + équipements périphériques pour réalisation d'études de développement & caractérisations matériaux / de mise sous contrôle du procédé / de développement produit



Moyen PBF-LB Aconity 2 lasers + beam shaping + préchauffage Hte T° (1000°C)

Et Module multi-matériaux AEROSINT

Développement paramétrie haute productivité alliage CP1 et mise en application produit

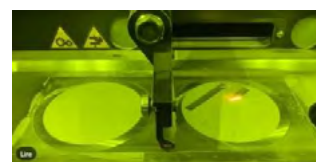


Bénéfices : Functional integration, Brake caliper + Hydraulic circuit, Lightweighting 20%



Moyen PBF-LB TRUPRINT 1000 Laser 200W – Ø laser 50µm

Développement de la mise en œuvre de verres métalliques, CETIM – Consortium industriels



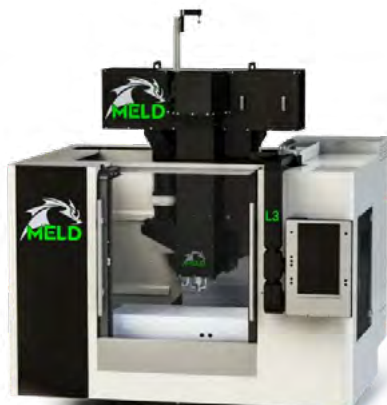
AddUp FormUp350 V2 4 lasers + monitoring in situ

Développement de paramétries et de stratégies de fabrication en super alliage base Ni pour des applications d'Echangeur Thermique CETIM – Partenaire industriel



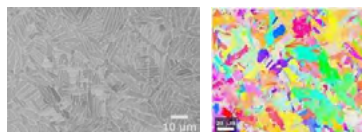
Des moyens spécifiques en PBF-LB pour développer la mise en œuvre de matériaux et des stratégies de fabrication spécifiques pour répondre à des enjeux de singularité géométrique des produits (ex. parois minces), de productivité, de santé et de structure métallurgique sur des alliages sensibles à la fissuration

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) Equipements & Moyens emblématiques



L3

Développement Composant Tuyère – 56kg



Etude des conditions de mise en œuvre de l'alliage TA6V – Relations microstructure-propriétés. Thèse IZ Kolimi / . UTC



Nikon SLM NXG XII 600
4 lasers - Zone fabrication 600x600x600mm

MELD : une technologie innovante basée sur le dépôt additif par friction malaxage et potentiellement très vertueuse par sa capacité à employer des copeaux recyclés

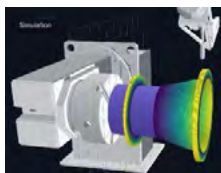
Des moyens PBF-LB XXL et multi-lasers pour étudier les conditions de mise en œuvre, développer les solutions de monitoring pour la mise sous contrôle du procédé, qualifier la technologie



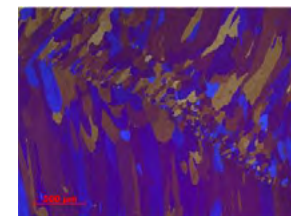
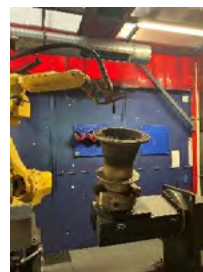
Prodways FANUC - FRONIUS



VLM Robotics



Etude et développement de la fabrication hybride d'une tuyère en 316L



Etude des conditions de mise en œuvre de la nuance d'alliage d'aluminium 5356 par WAAM

Des cellules WAAM robotisés avec différents types de source d'énergie

Des moyens uniques pour développer les procédés de la fabrication de pièces de grandes dimensions et leur mise sous contrôle

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) / CETIM Bourges – PRINTING BOURGES Expertises à l'échelle des établissements



Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Outil expert aide à la décision / choix procédé ; règles de conception en lien avec les procédés FA ; optimisation topologique statique ; simulation multi-physique
Matériaux	Expert national	Caractérisation des poudres ; nouvelles nuances de poudres ; matériaux développés : alliages Al, aciers outils, aciers maraging, base Ni, alliages Ti, inox ; optimisation par RNA
Fab. 3D	Expert international	R&D relative à l'étude des stratégies de fabrication en lien avec les spécificités fonctionnelles des composants, à la maîtrise et répétabilité des procédés haute énergie et MELD
Post-traitement	Expert national	Traitements thermiques aluminium
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle et qualification des poudres ; contrôles en cours de production ; contrôle de pièce
HSE	Maîtrise	Recyclage des poudres ; connaissance de la réglementation
Chaîne numérique	Maîtrise	Exploitation des données ; simulation procédé
Normalisation	Expert national	Qualification matériau/procédé
Impact env.		
Acc. À l'intégration	Expert national	Conduite du changement ; diagnostic ; business model

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	PBF-LB	Très large panel de matériaux métalliques
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.	WAAM / DED-P	316L / alliages Al
Stratification de couches	MELD	Matériaux métalliques
Combinaison de technologies		

Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	☒
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+	Priorité	+++
---	----------	-----

Pièces réalisées : Taille min. : 10 mm x 1 mm x 10mm Taille max. : 8m x 1,5m x 1,5m		
---	--	--

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) / CETIM Cluses

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Outil expert aide à la décision / choix procédé ; règles de conception en lien avec les procédés FA ; optimisation topologique statique, fluide & thermique
Matériaux	Expert national	Nouvelles nuances de poudres ; matériaux développés : aciers inoxydables, matériaux pour le secteur du luxe
Fab. 3D	Expert international	R&D relative à l'étude des stratégies de fabrication en lien avec les spécificités fonctionnelles des composants, à la maîtrise et répétabilité des procédés sinter based
Post-traitement	Expert national	Usinage ; traitements thermiques (industrialisation)
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle de pièce ; contrôle en ligne
HSE	Maîtrise	Recyclage des poudres ; connaissance de la réglementation
Chaîne numérique	Maîtrise	Exploitation des données ; jumeau numérique
Normalisation		
Impact env.	Connaissance	ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration	Expert national	Conduite du changement ; diagnostic ; business model

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant	MBJ	Aciers inox
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière	M-FDM	Métaux
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	☒
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+ Priorité +++

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm x 5mm x 1mm // Taille max. : 250x200x100mm

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) / CETIM IdF - AFH Expertises à l'échelle des établissements



Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Outil expert aide à la décision / choix procédé ; règles de conception en lien avec les procédés FA
Matériaux	Expert national	Nouvelles nuances de poudres ; matériaux développés : bases Ni, aciers inoxydables et aciers faiblement alliés
Fab. 3D	Expert international	R&D relative à l'étude des stratégies de fabrication en lien avec les spécificités fonctionnelles des composants, à la maîtrise et répétabilité des procédés FAM PBF-LB et WAAM
Post-traitement		
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôles en cours de production
HSE	Maîtrise	Recyclage des poudres ; connaissance de la réglementation
Chaine numérique	Maîtrise	Exploitation des données / simulation – génération trajectoires WAAM
Normalisation	Expert national	Contribution rédaction de normes ISO pour ACV
Impact env.	Expert national	ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration	Expert national	Conduite du changement ; diagnostic ; business model

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	PBF-LB	Inconels / 316L
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.	WAAM	Aciers / 316L / Alliage aluminium
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	☒
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+ Priorité +++

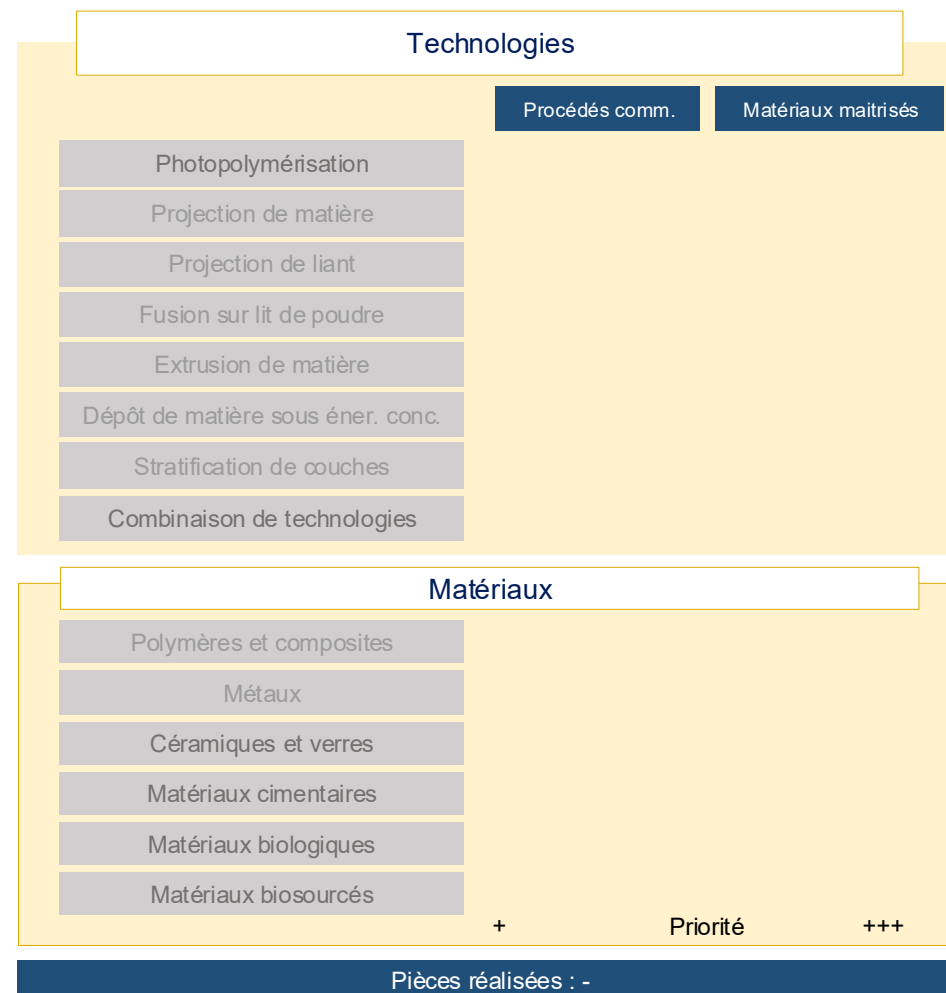
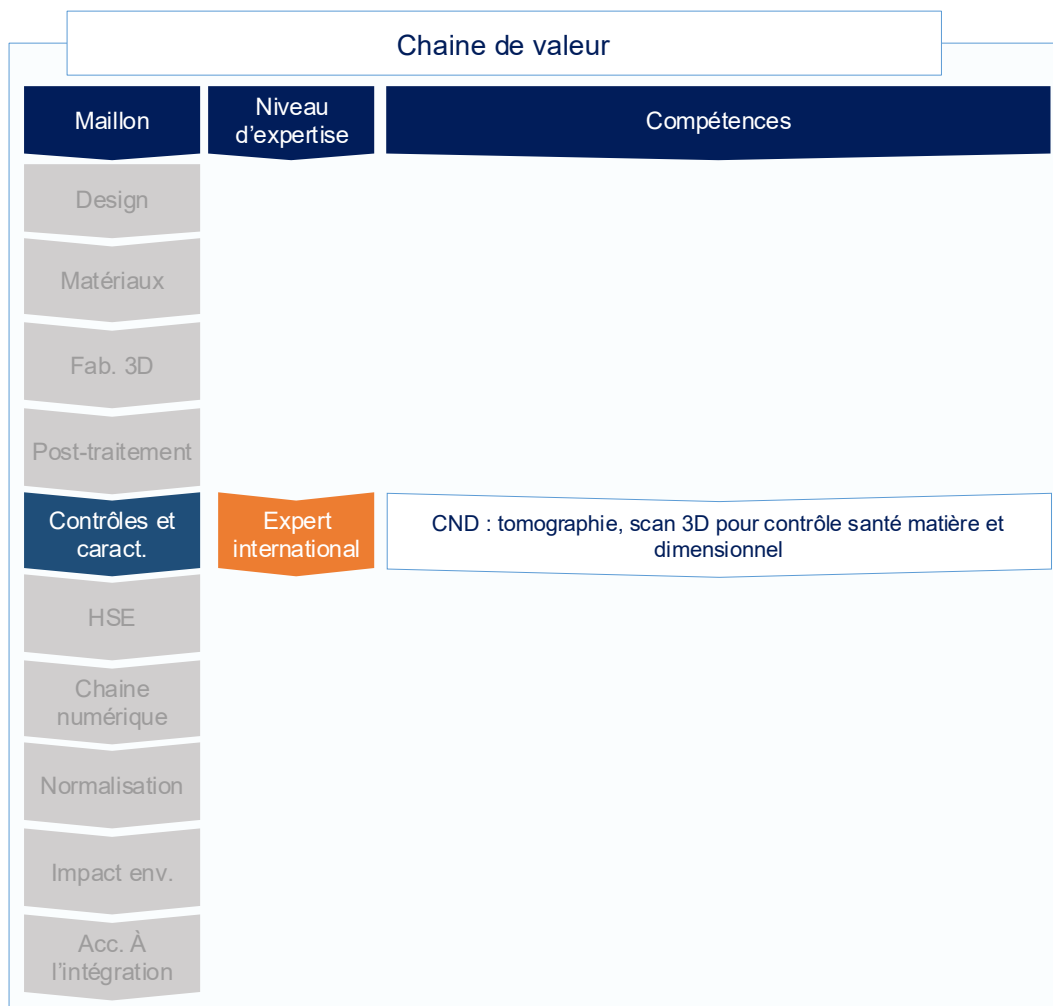
Pièces réalisées : Taille min. : 10 mm x 1 mm x 10mm // Taille max. : 2m x 1m x 1m

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) / CETIM Nantes Expertises à l'échelle des établissements

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design		
Matériaux	Expert national	Soudage, composites
Fab. 3D		
Post-traitement		
Contrôles et caract.	Expert national	Durabilité des matériaux : corrosion, fragilisation par l'hydrogène ; banc d'essai pour applications hydrauliques et environnement hydrogène
HSE		
Chaine numérique	Expert national	soudage & WAAM
Normalisation		
Impact env.	Expert national	ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration	Expert national	Conduite du changement ; diagnostic ; business model

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		
Matériaux		
Polymères et composites		
Métaux		
Céramiques et verres		
Matériaux cimentaires		
Matériaux biologiques		
Matériaux biosourcés		
	+	Priorité +++
Pièces réalisées : -		

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) / CETIM Pau Expertises à l'échelle des établissements



Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) / CETIM Saint Etienne

Expertises à l'échelle des établissements

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Outil expert aide à la décision / choix procédé ; règles de conception en lien avec les procédés FA ; optimisation topologique statique, fluide & thermique
Matériaux	Expert international	Caractérisation des poudres ; nouvelles nuances de poudres ; matériaux développés : BMG, alliages Al, métaux réfractaires, ferromagnétiques, multi matériaux, aciers inoxydables
Fab. 3D	Expert international	R&D relative à l'étude des stratégies de fabrication en lien avec les spécificités fonctionnelles des composants, à la maîtrise et répétabilité des procédés MBJ et PBF-LB
Post-traitement	Expert national	Usinage ; finition / texturation des surfaces ; traitements thermiques ; Nettoyage des pièces
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle et qualification des poudres ; contrôles en cours de production ; contrôle dimensionnel de pièce ; développement de méthodes de caractérisation avancée ; contrôle propreté particulière
HSE	Maîtrise	Recyclage des poudres ; connaissance de la réglementation
Chaine numérique	Connaissance	Exploitation des données ; jumeau numérique
Normalisation	Expert international	Membre UNM 920 & animation ISO TC 261 - WG3 ; méthodes de test : méthodes de spécification & qualification
Impact env.	Connaissance	ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration	Expert national	Conduite du changement ; diagnostic ; business model

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant	MBJ	Aciers / BMG
Fusion sur lit de poudre	PBF-LB	Alliages Al / Ti / métaux réfractaires
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	☒
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+ Priorité +++

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm x 5mm x 1mm // Taille max. : Ø250mm x 250mm

Carnot Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM) / CETIM Senlis Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Simulation multi-physique, mécanique statique/dynamique
Matériaux		
Fab. 3D		
Post-traitement	Expert national	Usinage ; traitements thermiques & revêtements
Contrôles et caract.	Expert international	Carac. comportement en fatigue(nocivité des défauts), contraintes résiduelles et comportement tribologique ; CND : applications contrôle process + contrôle in process et final des composants ; bancs essai spécifiques sur composant
HSE	Expert national	Sécurité Machine - Normalisation
Chaîne numérique	Maîtrise	Exploitation des données ; jumeau numérique
Normalisation	Expert national	Membre UNM 920 & ISO TC 261 Normes terminologie imperfections en FAM / normes CND appliquées à la FA
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Technologies	
	Procédés comm. Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	
Projection de matière	
Projection de liant	
Fusion sur lit de poudre	
Extrusion de matière	
Dépôt de matière sous éner. conc.	
Stratification de couches	
Combinaison de technologies	
Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	
	+ Priorité +++
Pièces réalisées : -	

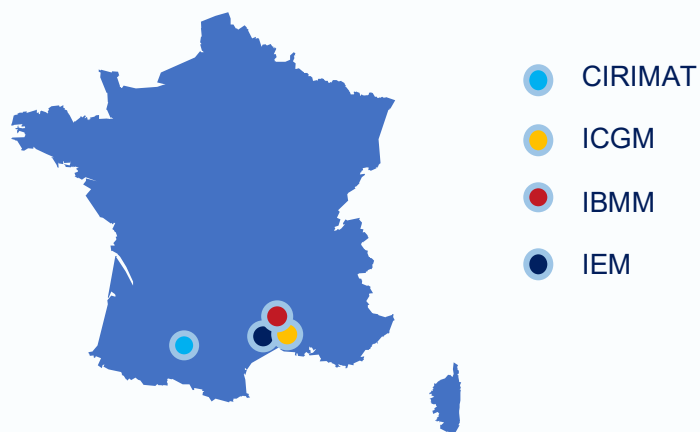
4

Fiche Portrait du Carnot Chimie Balard Cirimat

Carnot Chimie Balard Cirimat Éléments clefs à l'échelle du Carnot

Référence à destination des secteurs de l'aéro-spatial et du médical, l'institut Carnot Chimie Balard Cirimat étudie la FA pour la réalisation de pièces en métal, céramique, polymères et composites céramique-métal, avec un positionnement étendu en amont de la chaîne de valeur.

Localisation des établissements

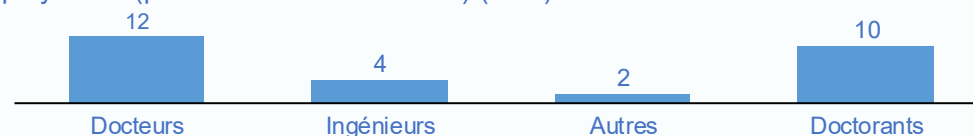


Contacts de l'équipe

- Philippe Tailhades – Directeur de Recherche CNRS – philippe.tailhades@univ-tlse3.fr – (33) 5-61-55-61-74
- Sébastien Blanquer – Chargé de Recherche CNRS – sebastien.blanquer@umontpellier.fr – (33) 4-48-79-21-18

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



9 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

109 ans d'ancienneté cumulée des équipes

1,5 M€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 1 à 4

9 M€ d'équipements dédiés à la FA

12 machines de production

Procédé L-PBF: 1 ProX200 300 W (3D System), 1 Orlas Creator (Coherent),

Procédé Binder Jetting: 1 ExOne

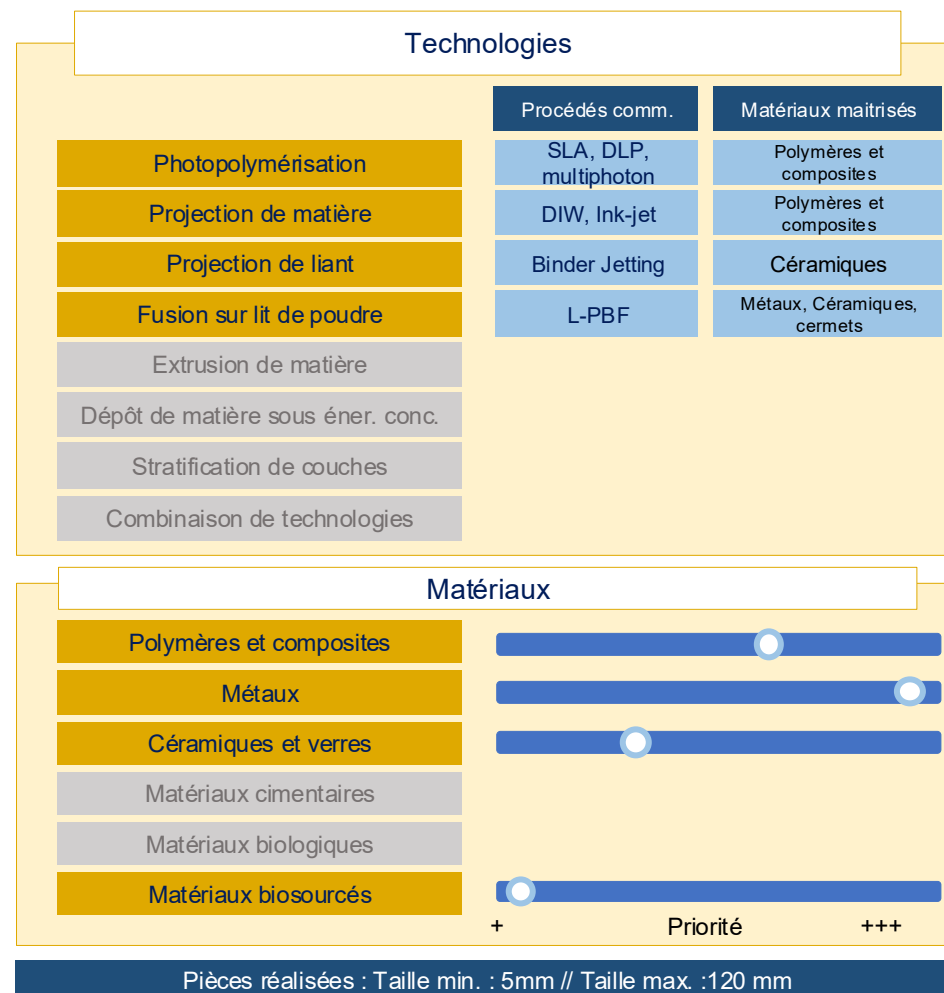
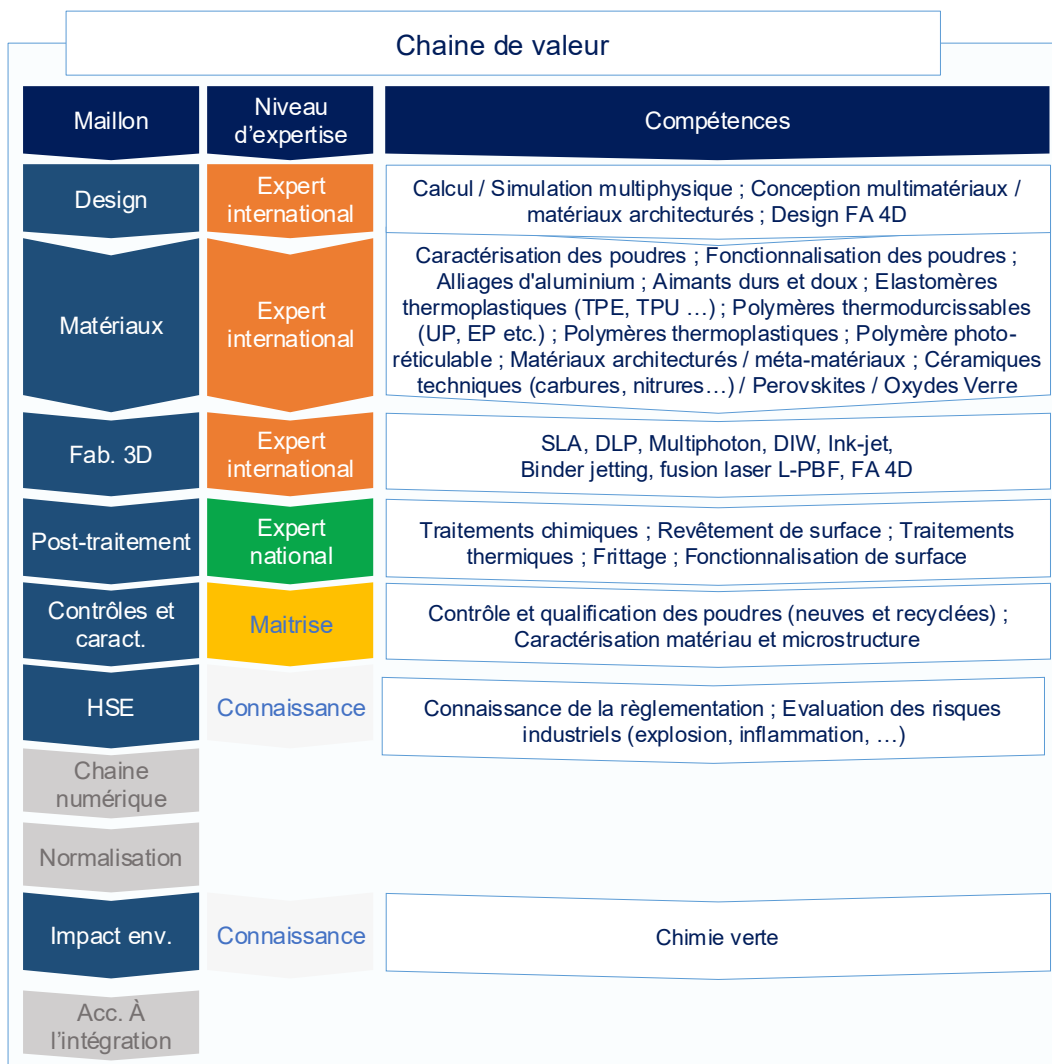
(Asiga (Kreos), Bionova X et Lumen X (CellInk), Micro et Titan3 (microSLA), Ender3 (Neo), Raise Pro3 (Raise), S600D (Lynxter), Biobots (Allevi))

100 publications scientifiques en matière de FA

11 brevets possédés sur la FA

Carnot Chimie Balard Cirimat

Expertises à l'échelle de l'institut Carnot



Carnot Chimie Balard Cirimat

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Secteurs adressés



Réalisations industrielles et participations à de grands projets

- **Projet Doc 3D Printing** : Doc 3D Printing, un projet d'impression 3D en céramique : ce projet ambitionne de couvrir le spectre de la fabrication additive de céramique depuis l'élaboration de la matière première jusqu'aux tests de produits commercialisables, pour les industries de la santé et de l'aérospatial.
- **Projet bio-impression** : Sur le projet bio-impression, la FA joue un rôle clé dans l'ingénierie tissulaire. Une des applications prometteuses concerne l'utilisation des organoïdes, qui remplacent les modèles animaux. En fabriquant directement le tissu nécessaire, il est possible de réduire significativement le recours aux modèles in vitro.
- Prototypes de pièces céramique-métal sur machines industrielles en vue d'application aux télécommunications spatiales
- Eléments magnétiques structurés pour machines électriques

Réalisations scientifiques et techniques

- Recherche des conditions de fabrication de matériaux "exotiques" pour la fusion laser sur lit de poudre (céramiques diélectriques, supra-conductrices, ferrimagnétiques, bio-céramiques) et de multi-matériaux céramique-métal. Recherches de polymères originaux pour la fabrication 4D. Acquisition d'une machine de Binder Jetting pour l'impression des matériaux céramiques.
- Obtention de pièces originales en céramique ou multi-matériaux céramique-métal par L-PBF ou de pièces polymère "4D". Impression d'AIN par binder jetting, rarement synthétisé par cette voie.
- Bioimpression.

Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Etude et réalisation d'éléments magnétiques à structuration complexe pour machines électriques (procédés L-PBF, binder jetting et frittage flash)
- Développement de multi-matériaux par L-PBF
- Mise en œuvre de matériaux recyclables
- Matériaux stimulables
- Assemblage de multimatériaux
- Développement de simulations thermiques et utilisation de l'IA
- Cultures multicellulaires

Carnot Chimie Balard Cirimat Equipements & Moyens emblématiques



Machines L-PBF permettant notamment de mener des recherches sur la fabrication additive multi-matériaux céramique-métal et sur composants thermoélectriques

3D Systems – ProX Direct Metal Printer 200
Near-Infrared laser source (1,07µm)
Maximal laser power : 300W
Tuneable power : 30W – 300W
Focalized laser spot size : 70µm



Machine L-PBF (ORLASER)



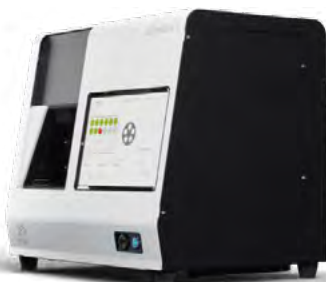
Machine de binder jetting dédiée notamment à l'impression de matériaux en céramique (AlN notamment ou oxydes)

Machine de binder jetting (ExOne)



Impression 3D à grade pharmaceutique, permettant la validation des dispositifs imprimés pour la pharmacie

S600D (Lynxter)



Machine Bioprinting sur le principe DLP, avec impression directe dans les puits de culture cellulaire (première machine vendue en France par Cellink, 2024)

BioNovaX (Cellink)



Asiga MAX X43 (Kreos)

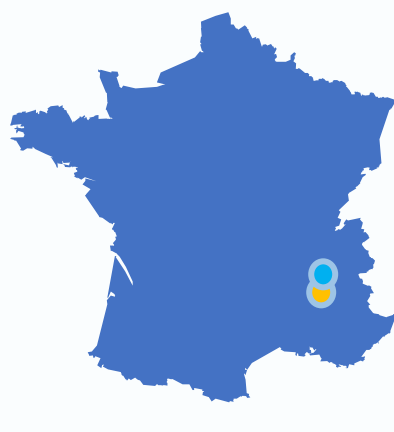
5 Fiche Portrait du Carnot Énergies du futur

Carnot Énergies du futur

Éléments clefs de l'institut Carnot

Le Carnot Énergies du futur est positionné sur la compréhension et la maîtrise du lien entre la poudre/le fil, le procédé et les propriétés d'usage des matériaux et composants fabriqués par une approche couplant les essais expérimentaux, la simulation, l'instrumentation, la caractérisation et le contrôle non destructif.

Localisation des établissements



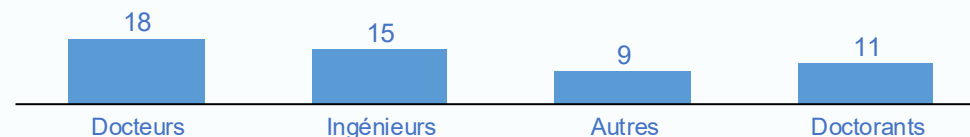
- CEA / Liten
- UGA-CNRS / G-SCOP

Contacts de l'équipe

- Stéphanie Riché – Chef du programme Economie Circulaire des Matériaux, stephanie.riche@cea.fr, 04 38 78 18 91
- Christophe Branly – Chef du service Procédés Poudres et Caractérisations Avancées, christophe.branly@cea.fr, 04 38 78 92 50

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



+10 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

234 ans d'ancienneté cumulée des équipes

+3,14 M€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 3 à 7 (*moyenne de tous les établissements*)

+75 projets scientifiques financés depuis 2017

Des équipements de synthèse de matériaux (mélangeur fonctionnalisateur de poudres...), **12 machines de fabrication** (DLP, MBJ, MJF, LPBF, ...) et d'assemblage (CIC et brasage) en polymères, métal et céramiques, **des bancs de tests spécifiques, des moyens de caractérisations microstructurale** (MO, MEB, EBSD, EDS, WDS, EPMA, MET, MET-HR, DRX, SAT, synchrotron...) et **mécanique** (traction, ténacité, résilience...)

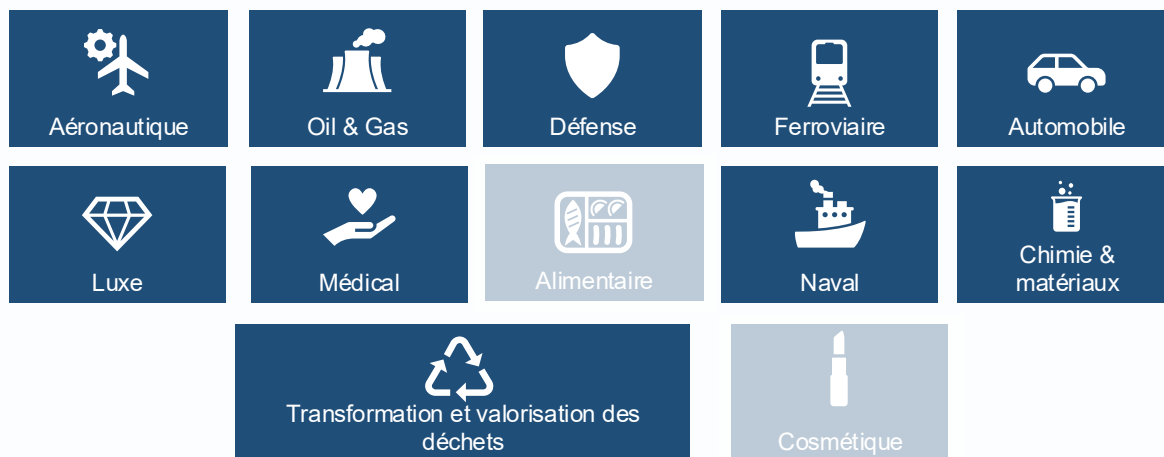
+100 publications scientifiques en matière de FA

95 brevets possédés sur la FA

Carnot Énergies du futur

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot (1/2)

Secteurs adressés



Réalisations industrielles

- Qualification des pièces pour le nucléaire réalisés par différents procédés de fabrication additive (projet ARQANE, NUCOBAM)
- Projet d'accompagnement du déploiement de la FA dans l'aéronautique : qualification des poudres, analyses HSE... (projet AeroPrint)
- Production de pièces complexes, légères et personnalisées, comme en aéronautique (réduction de poids d'aubes de turbine) et en médical (prothèses sur mesure).
- Autres projets industriels sur de la personnalisation de pièces, réassort/réparation de pièces

Réalisations scientifiques et techniques

- Développement de structures lattice (impression 4D) : en particulier développement d'outils de conception paramétriques
- Elaboration d'alliages pour la fabrication d'aimants à teneur en terres rares réduites,
- Développement de céramiques SiC résistantes à la corrosion et élaboration d'alliages à haute entropie pour la tenue à la corrosion
- Développement de (nano)composites conducteurs thermiques et isolants électriques,
- Développement de composites ferromagnétiques à faibles pertes pour moteur électrique,
- Conception d'échangeurs de chaleur métalliques haute performance
- Elaboration d'un banc instrumenté d'étalement de lit de poudre
- Elaboration de composites polymères biosourcés
- développement de la plateforme PRISMA (WAAM et autres procédés à venir)
- développements en CND et caractérisation, instrumentation et monitoring multi-techniques (ultrasons, courants de Foucault, fluorescence X, fibres optiques...). Développements en simulation (couplage modèles procédés et contrôle), structuration base de données et corrélations données machines/monitoring avec CND post-fabrication
- Développement de connaissance autour des procédés de FA, recherche sur la maîtrise géométrique des pièces produites, optimisation des conditions opératoire (contrôles procédés en continu).

Carnot Énergies du futur

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot (2/2)

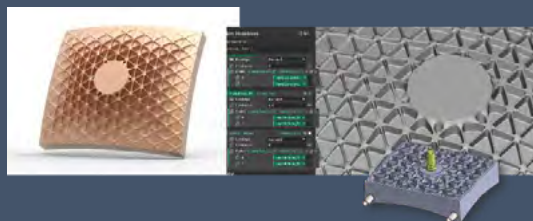
Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Maîtrise du lien microstructure/propriété des matériaux, maîtrise dimensionnelle de la fabrication et réduction des défauts (maîtrise du procédé) et enfin conception générative et exploitation de l'IA
- Mise sous contrôle des procédés de FA pour les filières industrielles à haut niveau d'exigence (énergie dont nucléaire, aérospatial, défense)
- Développement des matériaux polymères à impact environnemental réduit (biosourcés)
- Montée en maturité des développements de matériaux pour le packaging de l'électronique (conducteur thermique/isolant électrique)
- Instrumentation de la fabrication additive pour la collecte de base de données matériaux & procédés dans une perspective de mise en place de jumeaux numériques : rétroaction conception / réalisation optimisée pour des gains en fiabilité et délai de réalisation

Carnot Énergies du futur Équipements & Moyens emblématiques

Outils et
équipements
spécifiques



Outils de conception paramétrique
appliqués à la conception d'une
paroi de réacteur



Banc d'étalement
de poudres



Mélangeur/granulateur 5 Litres à
pâles à fort cisaillement



Plateforme
Poudrinov

Machines de
fabrication



MJF



MBJ



3D Systems ProX200
(300W)



SLM 125
(400W)



Farsoon FS271M
(400W)



ADDUP FormUp350
(2x500W)

LPBF

Carnot Énergies du futur / CEA / LITEN

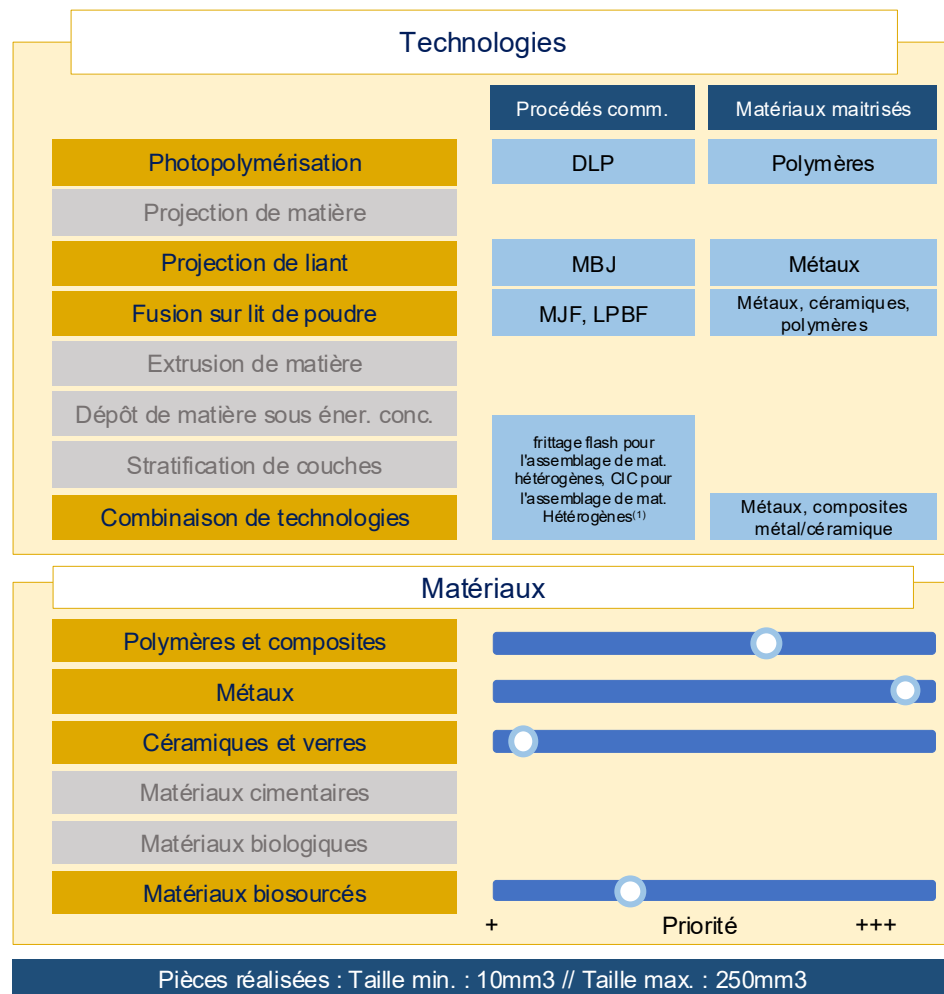
Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Conception Fiabiliste ; Optimisation topologique / multiphysique ; Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle; Règles de conception en lien avec les procédés FA ; Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS) ; Hybridation technologique ; Eco conception et cycle de vie ; Design FA 4D ; Conception multimatériaux / matériaux architecturés
Matériaux	Expert international	Gradients de propriété ; Matériaux architecturés / méta-matériaux ; Production pellet ; Alliages ; Obtention / production de poudres ; Nouvelles nuances de poudres ; Caractérisation des poudres ; Fonctionnalisation des poudres ; Tamisage ; Aimants durs et doux ; Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes Verre ; Polymères thermoplastiques ; Composés avec nanocharges, nanocomposites ; Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes Verre
Fab. 3D	Expert national	DLP ; MBJ ; MJF, LPBF ; frittage flash (SPS: Spark Plasma Sintering) pour l'assemblage de matériaux hétérogènes ; CIC (Compression Isostatique à Chaud) pour l'assemblage de matériaux hétérogènes
Post-traitement	Maîtrise	Déliantage ; Frittage ; Traitements thermiques ; Revêtement de surface ; Traitements mécaniques ; Usinage
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface
HSE	Expert international	Connaissance de la réglementation ; Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité) ; Mesures de l'exposition
Chaîne numérique	Expert national	Intégration numérique produit - procédé & Simulation ; Simulation des procédés ; Jumeau numérique
Normalisation		
Impact env.	Maîtrise	Formulation de matériaux recyclés / recyclables ; ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Conduite du changement ; Diagnostic ; Business model ; Benchmark

(1) Frittage flash (SPS: Spark Plasma Sintering) et CIC (Compression Isostatique à Chaud) pour l'assemblage de matériaux hétérogènes

Carnot Énergies du futur / CEA / LITEN

Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux



(1) Frittage flash (SPS: Spark Plasma Sintering) et CIC (Compression Isostatique à Chaud) pour l'assemblage de matériaux hétérogènes

Carnot Énergies du futur / UGA-CNRS / G-SCOP

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Maitrise	Outil expert aide à la décision / choix procédé ; Calcul / Simulation multiphysique
Matériaux		
Fab. 3D	Expert national	-
Post-traitement	Maitrise	Traitements mécaniques ; Maitrise du dimensionnel
Contrôles et caract.		
HSE		
Chaîne numérique	Expert national	Intégration numérique produit - procédé & Simulation ; Simulation globale du processus ; Jumeau numérique
Normalisation		
Impact env.	Maitrise	ACV process
Acc. À l'intégration	Expert national	Benchmark

Technologies	
	Procédés comm. Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	
Projection de matière	
Projection de liant	
Fusion sur lit de poudre	
Extrusion de matière	
Dépôt de matière sous éner. conc.	
Stratification de couches	
Combinaison de technologies	
Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	☒
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	
	+ Priorité +++
Pièces réalisées : Taille min. : quelques mm // Taille max. : 800x800 mm	

6

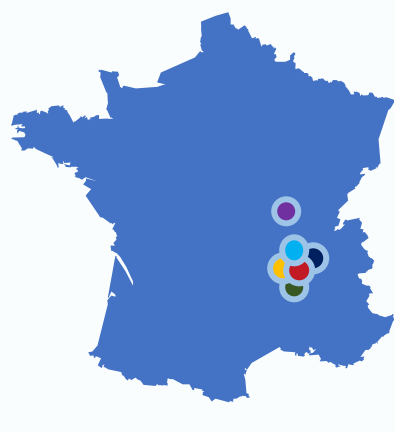
Fiche Portrait du Carnot Ingénierie @Lyon

Carnot Ingénierie @Lyon

Éléments clefs de l'institut Carnot

Ingénierie @Lyon a fait de la caractérisation des pièces sa marque de fabrique, allant du traitement thermique/mécanique au monitoring des interactions laser-matière afin de comprendre les phénomènes subis par les matériaux et améliorer les pièces critiques.

Localisation des établissements



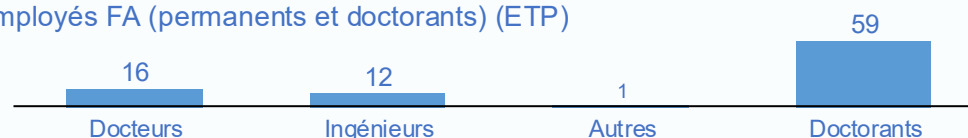
- INSA CNRS / LaMCoS
- ECAM Lasalle / LABECAM
- INSA CNRS / MatéIS
- INSA-UCBL-UJM-CNRS / IMP
- CTIPC
- ECL, CNRS, ENTPE/ LTDS

Contacts de l'équipe

- Nicolas Tardif – Maître de Conférences HDR – nicolas.tardif@insa-lyon.fr – 04 72 43 82 72

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



24 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

238 ans d'ancienneté cumulée des équipes

350 k€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 1 à 5 (*moyenne de tous les établissements*)

33 projets scientifiques financés depuis 2017

+7,1 m€ d'équipements dédiés à la FA

19 machines : 2 LASCOL (DED-LB poudre, Coldspray), Markforged METAL X, 9 FDM, 1 SLS, 1 SLA, 1 machine laser cladding, 1 machine de sphéroïdisation plasma, Machines de post-traitement (tribofinition, abrasive flow machining, ...), 1 machine matériaux cimentaires, 1 banc de fusion laser sur lit de poudre expérimental, Plateforme de caractérisation mécanique, Double tomographe RX haute énergie, production et caractérisation de poudres, Caractérisation microstructure MEB et tomographie aux rayons X

3 Fours (de frittage, de déliantage, de traitement thermo-chimiques), 3 Imprimantes (Fused Pellet Fabrication, Fused Filament Fabrication, Imprimantes 3D polymères), Ligne d'extrusion filament

180 publications scientifiques en matière de FA

10 brevets possédés sur la FA

Carnot Ingénierie @Lyon

Expertises de l'institut Carnot

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Optimisation topologique / multiphysique ; Calcul / Simulation multiphysique ; Eco conception et cycle de vie
Matériaux	Expert international	Gradients de propriété ; Matériaux architecturés / méta-matériaux ; Caractérisation des poudres ; Production pellet
Fab. 3D	Expert national	-
Post-traitement	Maîtrise	Délicatage ; Frittage ; Traitements thermiques ; Revêtement de surface ; Traitements mécaniques ; Usinage
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation mécanique ; Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie)
HSE	Connaissance	Connaissance de la réglementation ; Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité) ; Mesures de l'exposition
Chaîne numérique	Maîtrise	Intégration numérique produit - procédé & Simulation ; Exploitation des données ; Jumeau numérique
Normalisation		Méthodes de test
Impact env.	Expert national	Formulation de matériaux recyclés / recyclables ; ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration		Conduite du changement ; Diagnostic ; Business model ; Benchmark

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA – DLP	Polymères
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	SLS, L-PBF	Polymères, Composites, Métaux
Extrusion de matière	FDM, FFF, LDM	Métaux, céramiques, polymères
Dépôt de matière sous éner. conc.	DED-LB poudre	Métaux
Stratification de couches		
Combinaison de technologies	Coldspray	Métaux, composites métal/céramique

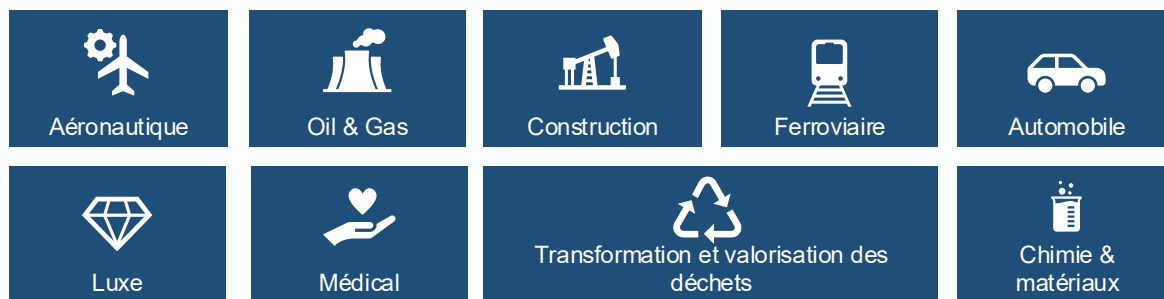
Matériaux	
Polymères et composites	
Métaux	
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	
	+ Priorité +++

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm // Taille max. : 20000mm	
---	--

Carnot Ingénierie @Lyon

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Secteurs adressés



Réalisations industrielles

- Développement de matériaux mous pour applications médicales (hydrogels, silicones) pour différentes techniques (LDM, DLP).
- Contribution par partenariat industriel au développement de pièces en aciers produites par FA:
 - validation du couple poudre/paramétrie de fusion laser sur lit de poudre pour un acier martensitique et traitement thermique associé (statut: pièces industrialisées)
 - validation d'un couple fil/flux en fusion arc-fil pour des pièces de grandes dimensions (statut: brevet déposé).
- Développement d'aciers pour l'outillage d'injection (AISI420, X15TN, CX, TS700)
- Impression d'outillage polymère en SLA
- Impression de pièces techniques en FA (PEEK, PEI, PPS)

Réalisations scientifiques et techniques

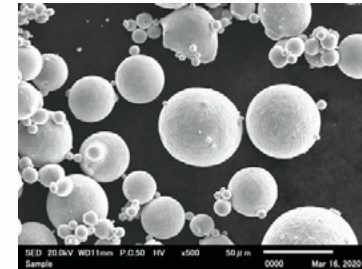
- Maîtrise de la fabrication avec thermoplastiques recyclés, incluant mélanges
- Dépôts de brevets développement de nouveaux matériaux pour différentes techno (silicones, TPU chargés nanoparticules magnétiques, hydrogels)
- Machine ouverte DED-LB poudre, mesure de champ de température à partir d'une caméra RGB, SCAN RX in operando
- Matériaux innovants, diagnostic des procédés, hybridation des procédés
- Atomisation de poudres métalliques innovantes (poudres métalliques amorphes, alliages d'aluminium, alliages haute entropie)
- Instrumentation In-operando
- Parachèvement de surface

Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Développer les thématiques/ compétences suivantes : Nouveaux procédés assistés frittage ; Recyclage/réutilisation des matières premières FA ; Amélioration du bilan matériaux (matière et taux de recyclage, impacts) ; Simulation thermo-mécanique des procédés ; Instrumentation in situ des procédés
- Les moyens nécessaires à ce développement : Techniciens/ingénieurs de recherche, Plateforme FA avec nouveaux équipements ; 1 HIP CIP, dilatomètre de trempe ; WLAM Laser Bleu et financement de projets

Carnot Ingénierie @Lyon Equipements & Moyens emblématiques



Outil de test de fabricabilité de poudres métalliques – Tour d'atomisation pour production de poudres d'alliages de composition maîtrisée



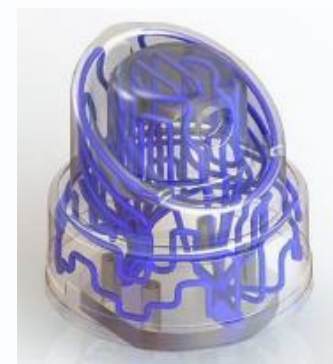
Dispositif ouvert LASCOL DED-LB Poudre + Coldspray



Double tomographe à haute énergie

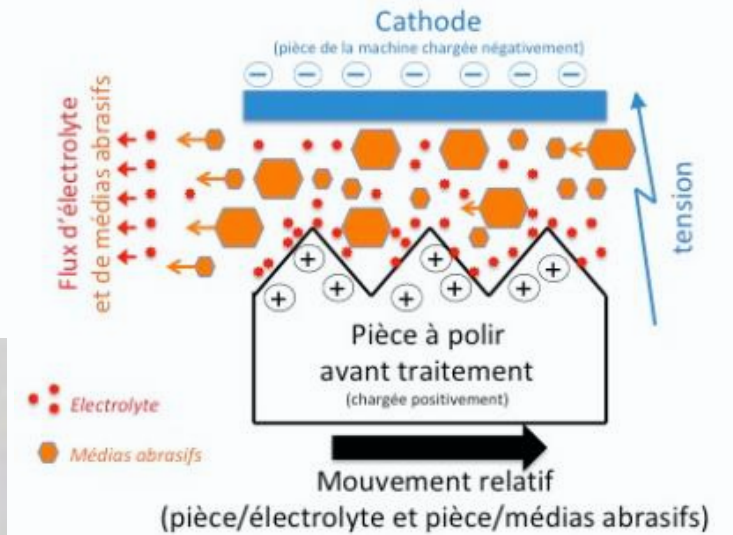
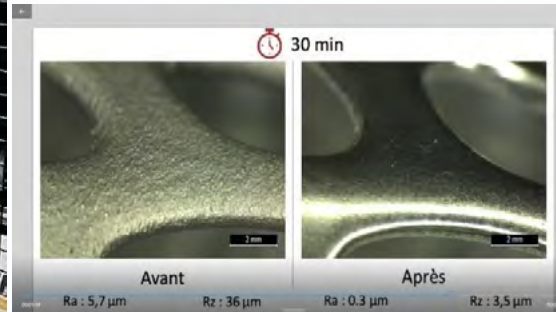
Carnot Ingénierie @Lyon

Equipements & Moyens emblématiques



Imprimante 3D industrielle EOS M290 2 lasers

Carnot Ingénierie @Lyon Equipements & Moyens emblématiques



POLISSAGE ROBOTISÉ PEMEC (ÉLECTRO-MÉCANO CHIMIQUE)

Carnot Ingénierie @Lyon / Institut National des sciences Appliquées de Lyon (INSA) / Matériaux Ingénierie et Science (MatéIS) – UMR 5510

Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design		
Matériaux	Expert international	Développement / production de (nouvelles) poudres ; Analyse des transformations de phase et microstructure durant les procédés FA par calculs et essais ; Nouvelles nuances de poudre
Fab. 3D	Maîtrise	Optimisation des stratégies d'impression en DIW et SLA (lien formulation, rhéologie d'impression et qualité des pièces imprimées)
Post-traitement	Expert national	Optimisation des traitements thermiques sous atmosphère contrôlée après fabrication sur alliages de titane et aciers: détensionnement, déliantage/frittage, etc
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation matériau et microstructure ; Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface ; Caractérisation des pièces (surfacique, volumique) ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...) ; Contrôles Non-Destructifs volumiques ; Biocompatibilité ; Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...) ; Essais de fatigue
HSE	Connaissance	
Chaine numérique	Connaissance	Acquisition de données expérimentales critiques pour la simulation numérique du frittage (respect du dimensionnel des pièces)
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Carnot Ingénierie @Lyon / Institut National des sciences Appliquées de Lyon (INSA) / Matériaux Ingénierie et Science (MatéIS) – UMR 5510

Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux

Technologies

	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA (3D Ceram) LMM (Incus)	Céramiques, Métaux
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière	Direct-Ink Writing FFF (fil fondu)	Polymères, céramiques, Métaux
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux

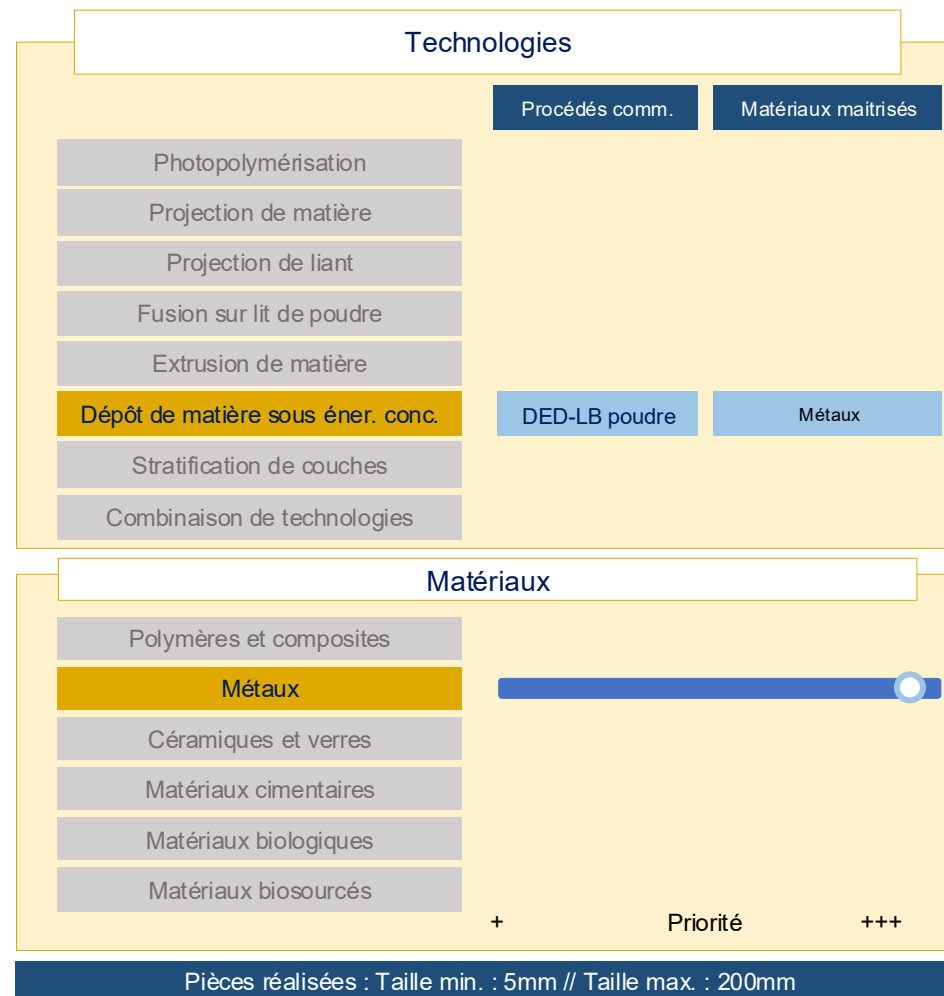
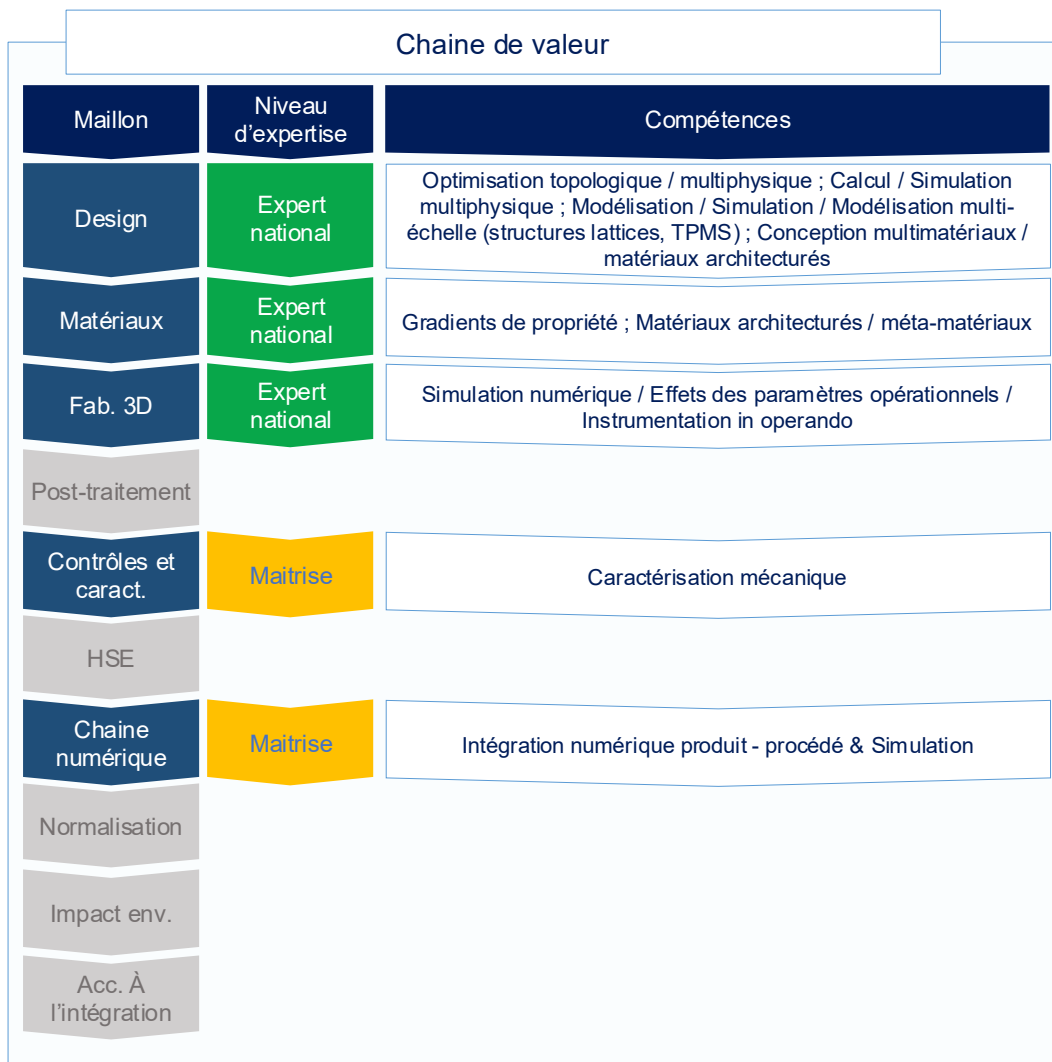
Polymères et composites	
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	<input type="range"/>
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	<input type="range"/>
Matériaux biosourcés	

+
Priorité
+++

Pièces réalisées : Taille min. : 10mm // Taille max. : 100mm

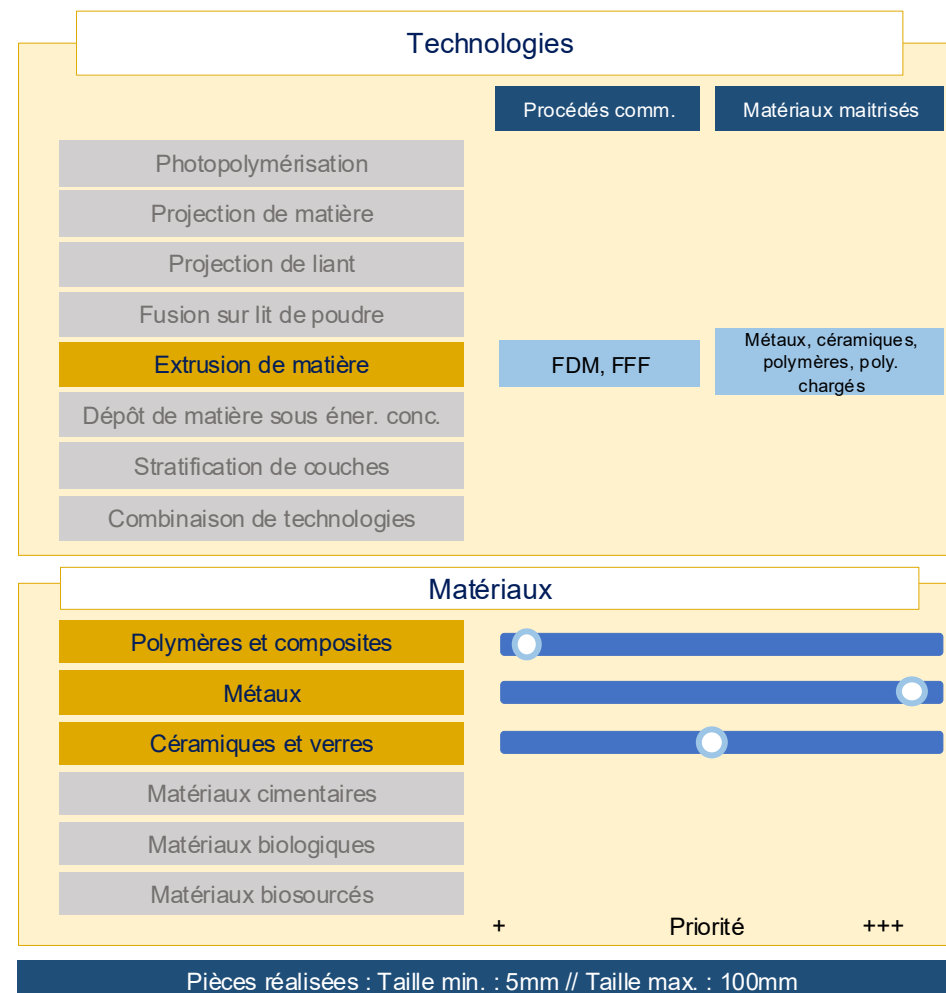
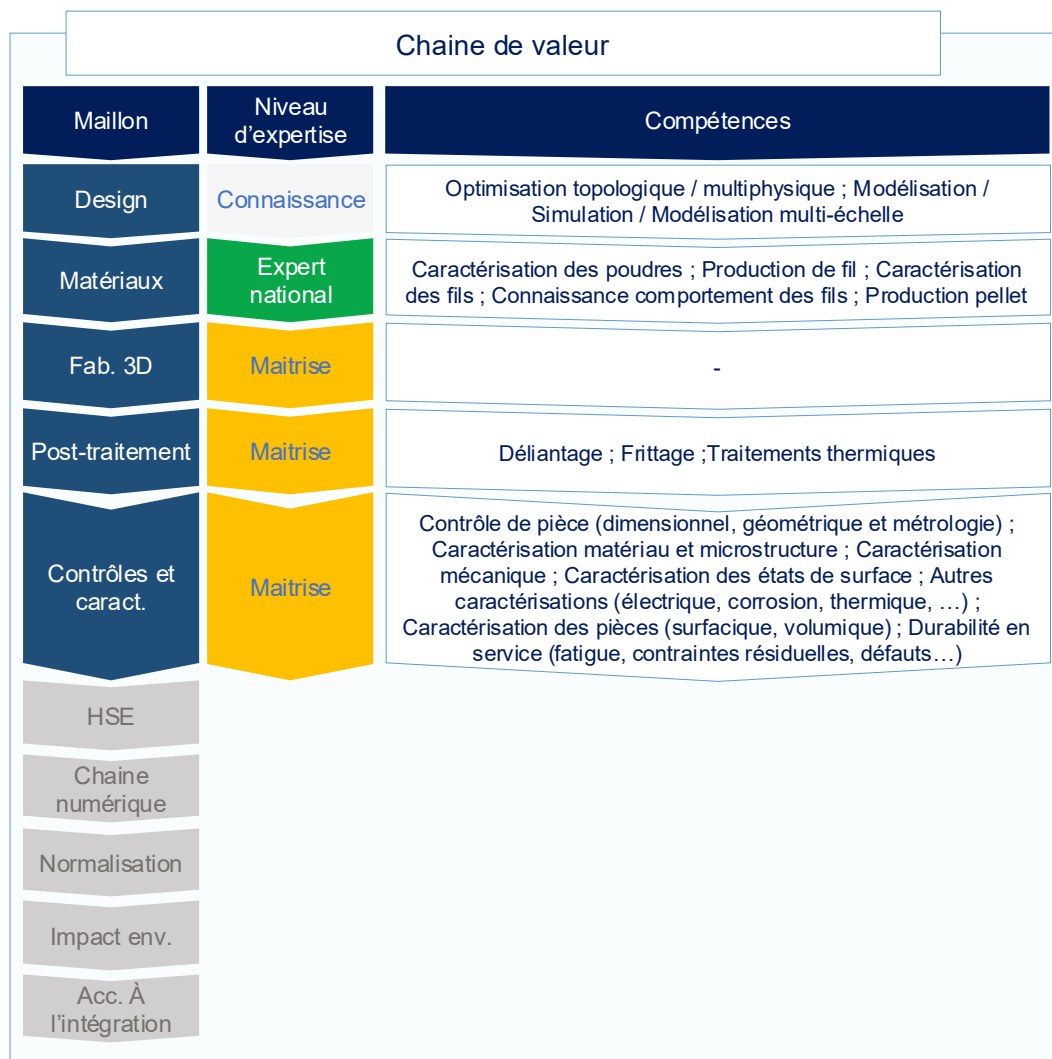
Carnot Ingénierie @Lyon / Institut National des sciences Appliquées de Lyon (INSA) / Laboratoire Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS) – UMR CNRS 5259

Expertises à l'échelle des établissements



Carnot Ingénierie @Lyon / ECAM Lasalle / Centre de recherche ECAM LaSalle (LabECAM)

Expertises à l'échelle des établissements



Carnot Ingénierie @Lyon / Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites (CTIPC) Expertises

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design		Outil expert aide à la décision / choix procédé ; Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS) ; Calcul / Simulation multiphysique ; Eco conception et cycle de vie
Matériaux		Nouvelles nuances de poudres ; Caractérisation des fils ; Production de fil ; Tamisage
Fab. 3D		-
Post-traitement		Traitements mécaniques ; Usinage ; Maîtrise du dimensionnel
Contrôles et caract.		Caractérisation matériau et microstructure ; Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Caractérisation mécanique
HSE		Connaissance de la réglementation
Chaîne numérique		Exploitation des données ; Jumeau numérique ; Intégration numérique produit - procédé & Simulation
Normalisation		Méthodes de test
Impact env.		Formulation de matériaux recyclés / recyclables ; ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration		Conduite du changement ; Diagnostic ; Business model ; Benchmark

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA – DLP	Polymères et poly. Chargés en céramique
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	SLS, LPBF	Polymères, Métaux
Extrusion de matière	FGF, FDM	Polymères
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux	
Polymères et composites	<input type="range"/>
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	<input type="range"/>
+ Priorité +++	

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm // Taille max. : 20000mm

Carnot Ingénierie @Lyon / Ecole Centrale de Lyon, CNRS et ENTPE / Laboratoire Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS) – UMR 5513

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Optimisation topologique / multiphysique
Matériaux	Expert national	Obtention / production de poudres ; Caractérisation des poudres ; Nouvelles nuances de poudres ; Fonctionnalisation des poudres ; Alliages d'aluminium ; Alliages base Titane ; Aciers inoxydables
Fab. 3D	Expert national	-
Post-traitement	Expert national	Traitements thermiques ; Traitements chimiques ; Traitements mécaniques
Contrôles et caract.	Expert national	Caractérisation matériau et microstructure ; Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Caractérisation des états de surface ; Caractérisation des pièces (surfactive, volumique)
HSE	Expert national	Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité) ; Mesures de l'exposition ; Sécurité des opérateurs
Chaîne numérique	Expert national	jumeau numérique ; Simulation globale du processus ; Intégration numérique produit - procédé & Simulation
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

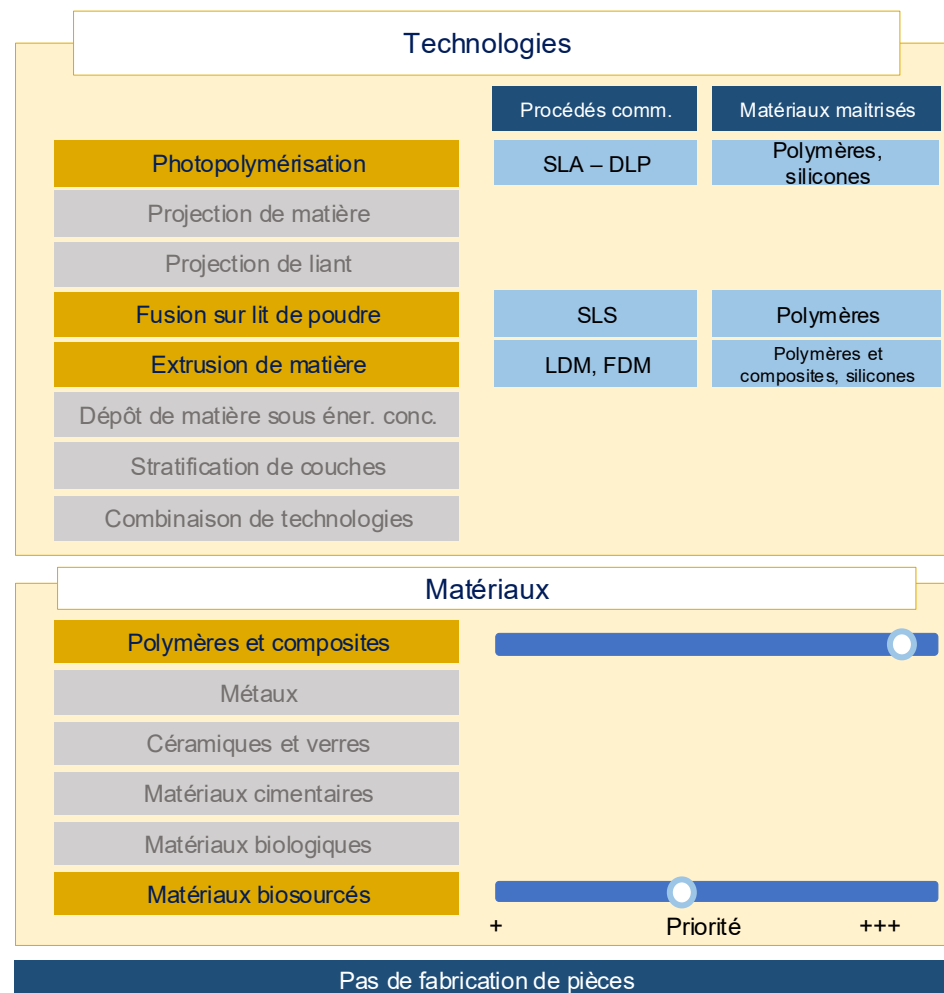
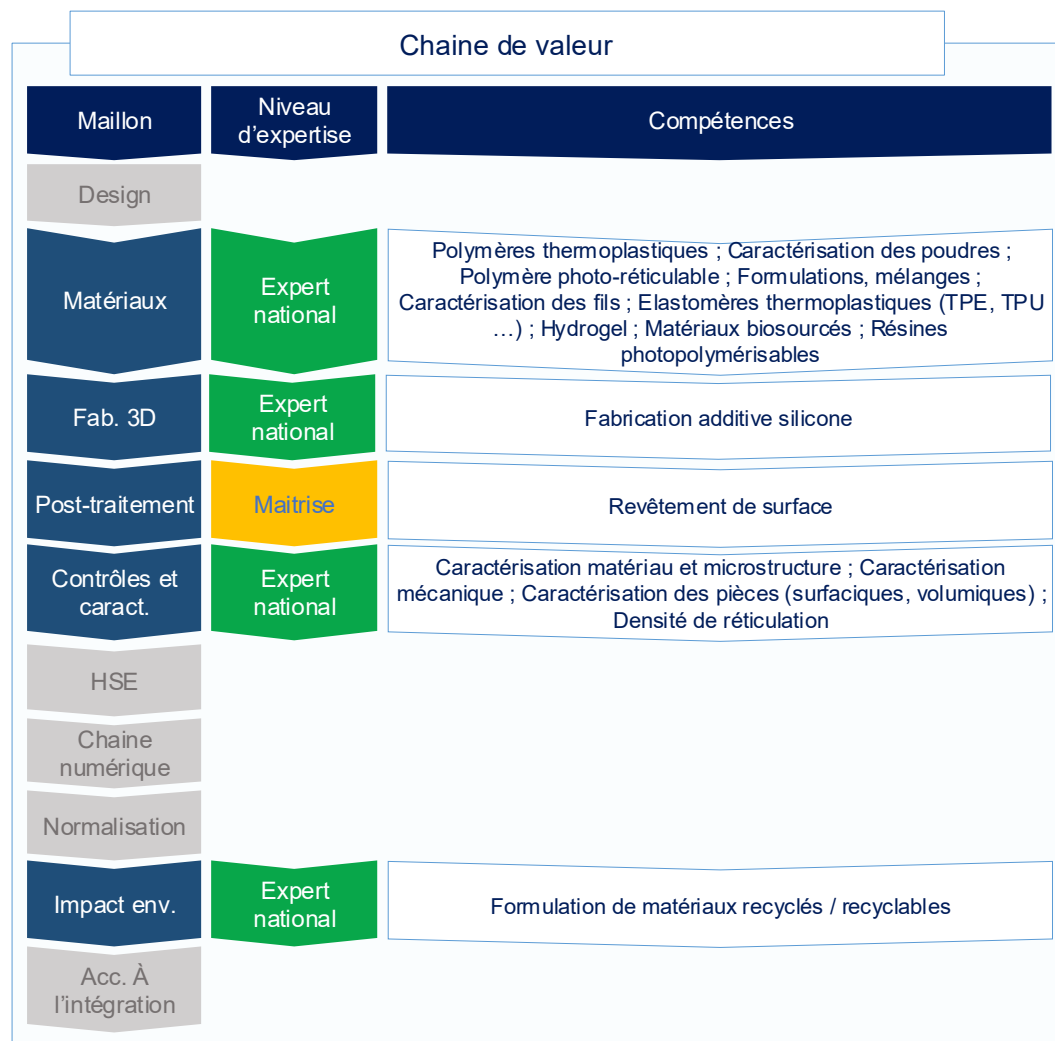
Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		Métaux, composites métal/ céramique
Extrusion de matière		Polymères et matériaux cimentaires
Dépôt de matière sous éner. conc.		Métaux
Stratification de couches		
Combinaison de technologies	Cold spray	Métaux, composites métal/céramique

Matériaux	
Polymères et composites	<input type="range"/>
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	<input type="range"/>
Matériaux cimentaires	<input type="range"/>
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	
+ Priorité +++	

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm // Taille max. : 600mm	
---	--

Carnot Ingénierie @Lyon / INSA-UCBL-UJM-CNRS / Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP) – UMR 5223

Expertises à l'échelle des établissements



7 Fiche Portrait du Carnot ICÉEL

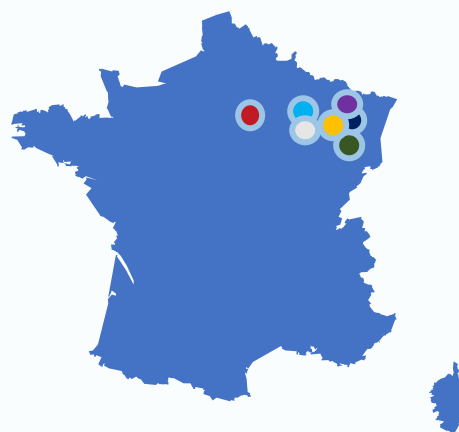
Carnot ICÉEL

Éléments clefs de l'institut Carnot



La force d'ICÉEL réside dans la diversité des matériaux, le développement de nouveaux matériaux, l'ancrage territorial et une dynamique intergénérationnelle qui prolonge l'œuvre des pionniers tout en ouvrant la voie à de nouvelles avancées.

Localisation des établissements



- TJFU
- CERFAV
- Institut de Soudure
- LRGP
- Institut Jean Lamour
- CIRTES
- LCPME

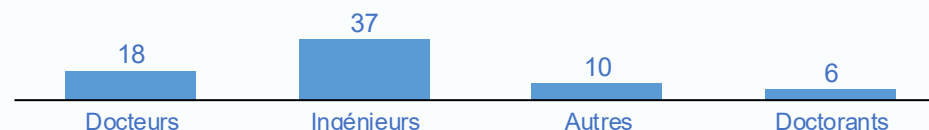
Contacts de l'équipe

- S. Kenzari, samuel.kenzari@univ-lorraine.fr, J. Zollinger, julien.zollinger@univ-lorraine.fr, H. Alem-Marchand, halima.alem@univ-lorraine.fr (1)
- P. Hee, patricia.hee@cerfav.fr
- M. Etienne, mathieu.etienne@univ-lorraine.fr, M. Brites-Helu, marie-la.brites-helu@univ-lorraine.fr (2)
- A. Tazibt, a.tazibt@critt-tifu.com, M. Yahiaoui, m.yahiaoui@critt-tifu.com, Y. Khalsi, y.khalsi@critt-tifu.com
- Alexandre Hautcoeur, a.hautcoeur@isgroupe.com, Antoine Bastien, a.bastien@isgroupe.com
- Cyril Pelaingre, cyril.pelaingre@cirtes.fr
- Cécile Nouvel, cecile.nouvel@univ-lorraine.fr, Quentin Arthur Poutrel, quentin-arthur.poutrel@univ-lorraine.fr, Véronique Falk, veronique.falk@univ-lorraine.fr (3)
- M. Elie, coordinateur, marcel.elie@univ-lorraine.fr (4)

(1) IJL, (2) LCPME, (3) LRGP, (4) Carnot Icél

Chiffres clefs

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



35 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

637 ans d'ancienneté cumulée des équipes

570 k€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 2 à 6 (*moyenne de tous les établissements*)

46 projets scientifiques financés depuis 2017

5,73 M€ d'équipements dédiés à la FA

+25 machines : Stratoconception (bois, polymère, métal), Stéréolithographie (SLA) Fused Deposition Modeling (FDM), Jet de matériaux, Pack & Strat, LOM, Frittage Sélectif Laser (SLS) Polymère, SLS Sable, SLS Métal, DMLS Métal, Profilomètre interférométrique NP FLEX (caractérisation des pièces de grandes dimensions) - Microscopes numériques à fort grossissement - Microscope électronique à balayage MEB (JSM 6010LA : Grossissement de x5 à x 300 000) », Imprimantes, équipement de préparation des encres, Un prototype d'impression 3D verre (sls/slm), 2 robots KUKA robot, 2 générateurs Fronius TPS CMT générateur, UV MAX 385, Creality, raise pro3D, et autre système filaments, tumaker dual (material extrusion), machine de dépôt de liant alimentaire adhoc + Une plateforme dédiée, inaugurée en 2022

+269 publications scientifiques en matière de FA

+86 brevets possédés sur la FA



Carnot ICÉEL

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Secteurs adressés



Réalisations industrielles

- Mise en phase d'une technologie de FA pour le matériau verre, réalisation de démonstrateurs pour l'industrie.
- Appareil de mesure de sulfites en vin avec filtre de O2 intégrée (Savens - Dropsens)
- Conception de produits avec procédé 3D associé/démonstrateur industriel (naval, nucléaire, chimie)
- Démarche de certification de produits en vue de l'industrialisation de produits issus de la FA (nucléaire)
- Filiale IS3D (Institut de Soudure) dédiée à la fabrication de petites et moyennes séries
- Réalisation en FA bois par Stratoconception des nœuds de structure du pavillon "les Ram'eaux" exposé au parc de La Villette lors des JO de Paris 2024.
- Formulation et impression 3D par photopolymérisation de résines dentaires composite à haut taux de charge.
- En collaboration avec le LERMAB, formulation de composites polymères imprimables à base de déchets/extraits bois.

Réalisations scientifiques et techniques

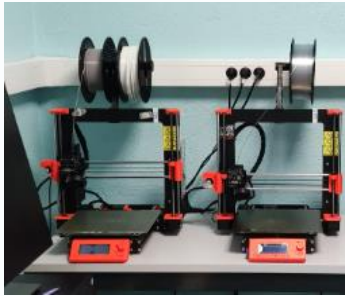
- Reconnaissance d'innovations technologiques en impression 3D et 4D
- Développement du monitoring process, automatisation FA, hybridation procédée de FA, intégration de l'IA dans le monitoring
- Développements des matériaux et de nouveaux procédés
- Photolymérisation, impression poudre alimentaires et impression réactive, utilisation matériaux recyclables et recyclés
- Multiprocédés, jumeau numérique, contrôle des pièces obtenues.
- Augmentation de la durabilité et maintien des performances des pièces, allègement des structures.

Perspectives pour l'avenir

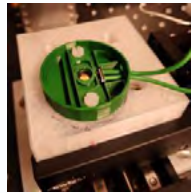
Champs de recherche, investissement et équipements

- Utilisation de la FA pour le développement des électrodes et dispositifs électrochimiques (capteurs, cellules)
- Développement du monitoring process, automatisation FA, hybridation procédée de FA, intégration de l'IA dans le monitoring
- R&D de solutions technologiques (Matériaux & Procédés), protection PI et transfert vers les secteurs applicatifs
- Développement des matériaux polymères avec des fonctionnalités ajoutées et dans le domaine du 4D Printing / difficultés : Fiabilité et optimisation des procédés d'impression, Réduction de l'empreinte environnementale, accessibilités des imprimantes multi têtes, objets multi-matériaux ...
- Développement de compétences en génération de trajectoires robots.
- Maîtrise de l'ajout de matière par projection à froid par FA Cold Spray sur des supports à gradient de propriétés (Problème d'adhérence mécanique...)
- Réalisation d'un prototype de fabrication additive verre pour l'industrie

Carnot ICÉEL Equipements & Moyens emblématiques



FDM - Prusa i3 MK3S



Cellule pour couplage
SGECM et QCM



DLP - Asiga PICO2 HD (27 µm)



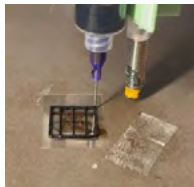
Puce avec électrodes
intégrées.



WAAM – jusqu'à 2X2X2 m



DIW – Prusa Mini modifiée



Électrode 3D



Carnot ICÉEL Equipements & Moyens emblématiques



FA Strat'Auto MECANUMERIC : machine automatique pour la FA de grandes dimensions par Stratoconception



SPINNER MVC 1600 : Centres d'usinage 3 axes Intégrés FA Stratoconception
- capacité : X1600 mm x Y800 x Z Illimité

Carnot ICÉEL

Equipements & Moyens emblématiques:
Formulation de matériaux plastiques



Extrudeur depuis qqg jusqu'à 20kg/h (microcompounder DSM Explore, PS 11, PTW24)



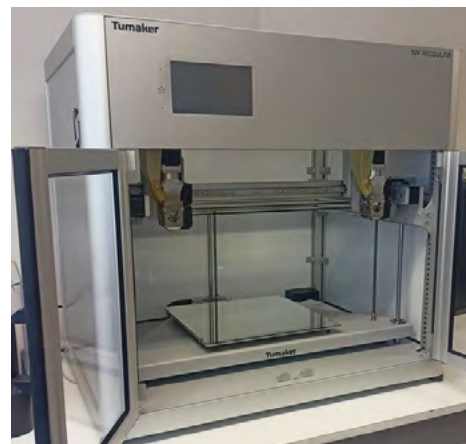
Dispositif d'enrobage de fil Thermo Electron



Extrudeuse de filament 3devo

Carnot ICÉEL

Equipements & Moyens emblématiques:
Principales Imprimantes



Tumaker NX Modular: dual Direct Printing (FGF) ou FFF/FGF

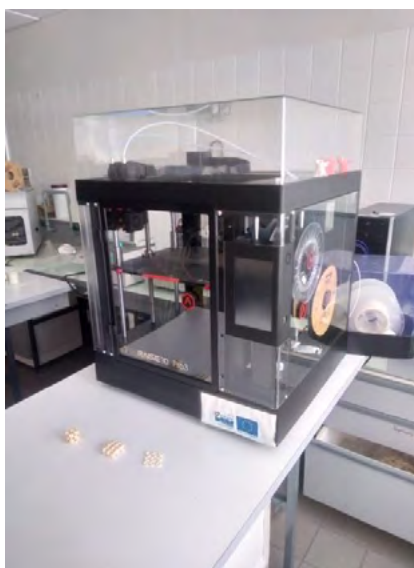


Fig 1 : Imprimante double tête Raise3D-Pro permettant l'impression Multi-Filaments



Imprimante DLP : UV MAX Pro

Carnot ICÉEL / Techniques Jet Fluide et Usinage (TJFU) Expertises à l'échelle des établissements

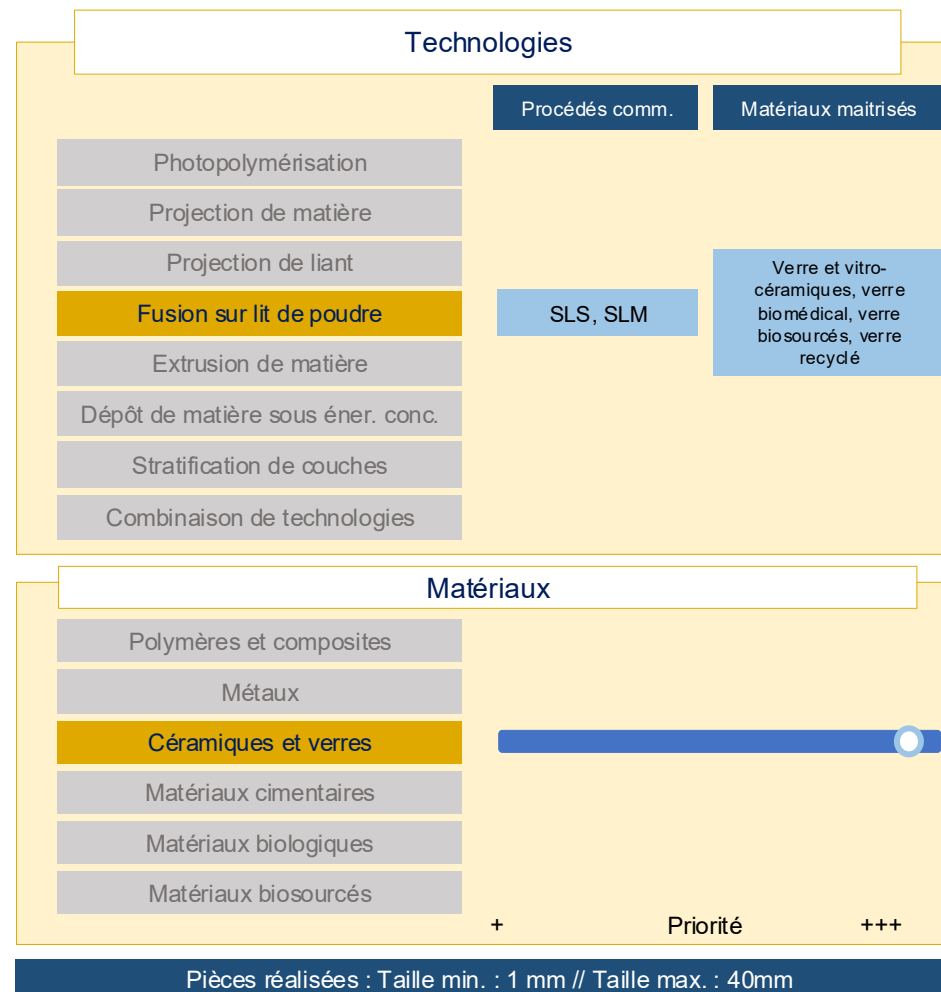
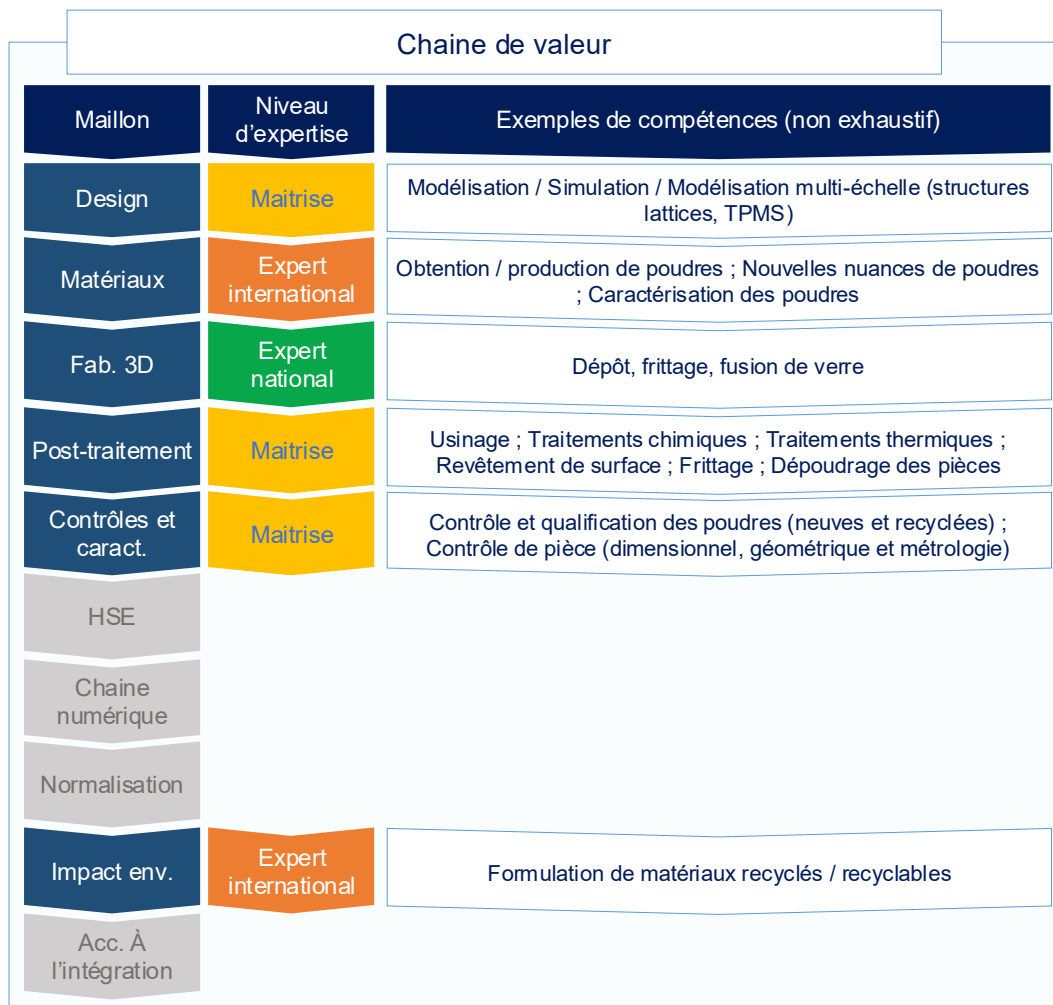
Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design		
Matériaux	Expert international	Revêtements composites à gradient thermique CTE, Nouvelles nuances de poudres, chimie cold spray compatible; Caractérisation des poudres
Fab. 3D	Expert national	Stratégies et démonstrateurs FA Cold Spray de pièces 3D de grandes dimensions, et ajouts de fonctions
Post-traitement	Maitrise	Traitement de surface, Aplatissement par Jet fluide de la rugosité de surface FA, Densification par Jet fluide du top surface FA
Post-traitement	Maitrise	métallurgie cold spray, dureté, résistance mécanique adhérence, norme ASTM C633, MEB, EDS, topologie surfaces Keyence
HSE		
Chaine numérique	Maitrise	Modules IA appliqués à la maintenance prédictive de la FA Cold Spray
Normalisation		
Impact env.	Maitrise	Recyclage, séparation sélective en voie sèche des matières, Réparation, remise à neuf des structures, réduction des émissions de CO2, économie d'énergie fossile
Acc. À l'intégration	Maitrise	Faisabilité et qualification technique et économique, Rédaction du cahier des charges techniques de l'installation FA Cold Spray, Formation du personnel au procédé FA Cold Spray

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière à froid (sans fusion)	Cold Spray	Métaux, alliages, céramiques, composites, polymères, biosourcés
Projection de liant		
Projection de jet fluide supersonique	Azote supercritique Jet d'eau THP,	Métaux, alliages, céramiques, composites, polymères, biosourcés
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies	Cold Spray - Jet fluide supersonique	Métaux, alliages, céramiques, composites, polymères, biosourcés

Matériaux	
Polymères et composites	<input type="range"/>
Métaux et alliages	<input type="range"/>
Céramiques et verres	<input type="range"/>
Matériaux cimentaires	<input type="range"/>
Matériaux biologiques	<input type="range"/>
Matériaux biosourcés	<input type="range"/>
+ Priorité +++	

Pièces réalisées : Taille min. 10 microns : // Taille max. : 1 m	
--	--

Carnot ICÉEL / Centre de Formation aux Arts et techniques du verre (CERFAV) Expertises à l'échelle des établissements



Carnot ICÉEL / Institut de Soudure (IS)

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Maitrise	Règles de conception en lien avec les procédés FA ; Calcul / Simulation multiphysique ; Reverse engineering
Matériaux	Maitrise	Connaissance comportement des fils ; Aciers pour traitement thermique / Aciers à outils ; Aciers inoxydables
Fab. 3D	Maitrise	-Stratégie de dépôt optimisé, maitrise de structure issues de solidification. Capacité de production et de contrôle
Post-traitement	Maitrise	Traitements thermiques
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle de pièce (dimensionnel, interne, géométrique et métrologie) ; Caractérisation matériau et microstructure
HSE		
Chaîne numérique	Maitrise	Jumeau numérique – Monitoring de process-Programmation des trajectoires
Normalisation	Expert international	Préconisation des référentiels prénormatifs auprès de l'IIW (Contrôle non-destructif)
Impact env.		
Acc. À l'intégration	Expert national	Grand Groupe et PME accompagnés pour le déploiement de la technologie WAAM. Intégrer dans les filières métiers (nucléaire, ferroviaire...)

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.	WAAM	Tous alliages métalliques excepté Titane
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		
Matériaux		
Polymères et composites		
Métaux		
Céramiques et verres		
Matériaux cimentaires		
Matériaux biologiques		
Matériaux biosourcés		
	+	Priorité +++
Pièces réalisées : Taille min. : 10X10X10 mm // Taille max. : 2X2X2 m		

Carnot ICÉEL / Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP)

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Maitrise	Reverse engineering ; Eco conception et cycle de vie
Matériaux	Expert international	Production pellet ; Production de fil ; Polymères thermoplastiques ; résine/composite photopolymérisable, formulations, mélanges
Fab. 3D	Expert international	FFF, FGF, Photopolymérisation (principalement DLP), Projection de Liant
Post-traitement	Maitrise	Post Cuisson UV
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface
HSE		
Chaîne numérique		
Normalisation		
Impact env.	Expert national	Formulation de matériaux recyclés / recyclables et plus durable
Acc. À l'intégration		

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	DLP	Polymères/composite
Projection de matière		
Projection de liant	Dépôt de liant sur lit de poudre	Alimentaires
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière	FFF, FGF	Polymères et composites, matériaux biosourcés
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies	FFF et FGF et réactivité, FFF et dépôt liquide ou poudre	Polymères et composites, matériaux biosourcés

Matériaux	
Polymères et composites	☒
Métaux	☐
Céramiques et verres	☐
Matériaux cimentaires	☐
Matériaux biologiques	☐
Matériaux biosourcés	☒

☐ + Priorité ☒ +++

Pièces réalisées : Taille min. : quelques mm // Taille max. : ~500mm

Carnot ICÉEL / Institut Jean Lamour (IJL) Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Expert international	Modélisation / Simulation, structures lattices, multi-gradients, Règles de conception FA
Matériaux	Expert international	Elaboration des matériaux ; Formulations, mélanges ; poudres, alliages métalliques et composites
Fab. 3D	Expert international	Dépôt, Frittage, Fusion, Elaboration additive, 4D Printing
Post-traitement	Expert international	Traitements thermiques, mécaniques, chimiques ; dépôts et revêtements de surface (PVD, CVD, ALD), Usinage
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation des matériaux et microstructures ; Caractérisations mécaniques, tribologiques, état de surface, propriétés physiques et chimiques
HSE	Maîtrise	Sensibilisation, formation et sécurité des opérateurs
Chaîne numérique	Connaissance	
Normalisation	Connaissance	
Impact env.	Connaissance	
Acc. À l'intégration	Connaissance	

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	DLP	Polymères & composites
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	SLS, SLM	Polymères & composites, Aluminium, Acier, Titane
Extrusion de matière	FFF, FGF, PEM	Polymères & composites, silicone, résine, gel, pâte
Dépôt de matière sous éner. conc.	DED	Alliages métalliques
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux	
Polymères et composites	<input type="range" value="80"/>
Alliages métalliques et composites	<input type="range" value="90"/>
Céramiques et verres	<input type="range" value="10"/>
Matériaux cimentaires	<input type="range" value="20"/>
Matériaux biologiques	<input type="range" value="50"/>
Matériaux biosourcés	<input type="range" value="60"/>
	+ Priorité +++

Pièces réalisées : Taille min. : 10x10x10 // Taille max. : 200x200x200
--

Carnot ICÉEL / CIRTES

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Expert international	Optimisation topologique / multiphysique ; Règles de conception en lien avec les procédés FA
Matériaux	Maîtrise	Alliages d'aluminium; Matériaux biosourcés ; Polymères thermoplastiques ; Polymères thermodurcissables (UP, EP etc.)
Fab. 3D	Expert national	-
Post-traitement	Maîtrise	Usinage ; Traitements mécaniques ; Traitements chimiques ; Revêtement de surface ; Maîtrise du dimensionnel
Contrôles et caract.	Maîtrise	Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie) ; Contrôle en cours de production
HSE	Connaissance	Sécurité des opérateurs ; Formation aux problématiques HSE
Chaîne numérique	Expert international	Intégration numérique produit - procédé & Simulation ; Exploitation des données ; Format des données
Normalisation	Maîtrise	Méthodes de spécification
Impact env.	Maîtrise	ACV process ; ACV produits
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Diagnostic ; Business model ; Benchmark

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA	Réine photopolymère, Cire
Projection de matière	Polyjet (3D Systems, Stratasys)	Cire, résines
Projection de liant	Z-Corps (3D systems) Voxeljet	plâtre, élastomères, sable
Fusion sur lit de poudre	SLS, DMLS, SLM, EBM	polymères, sables, métaux (aciers, titanes)
Extrusion de matière	FDM	ABS, PLA
Dépôt de matière sous éner. conc.	DED, LENS, CLAD	Aciers, Titanes
Stratification de couches	Stratoconception	Polymères, aciers, aluminium, bois, carton
Combinaison de technologies	Strato+Clad/ Strato + Waam - Starto + Cold Spray	Aciers, inconel, cuivre, alu

Matériaux	
Polymères et composites	<input type="range"/>
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	<input type="range"/>
Matériaux cimentaires	<input type="range"/>
Matériaux biologiques	<input type="range"/>
Matériaux biosourcés	<input type="range"/>
+ Priorité +++	

Pièces réalisées : Taille min. : 50mm // Taille max. : 6000mm	
---	--

Carnot ICÉEL / Laboratoire de Chimie Physique et Microbiologie pour les Matériaux et l'Environnement (LCPME) Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Exemples de compétences (non exhaustif)
Design	Maitrise	Règles de conception en lien avec les procédés FA ; Reverse engineering ; Hybridation technologique
Matériaux	Maitrise	Polymères thermoplastiques ; Résines photopolymérisables ; Hydrogel ; Autres ; Matériaux biologiques
Fab. 3D	Maitrise	FDM, DLP, SLA, DIW
Post-traitement	Connaissance	Traitements thermiques, Revêtement de surface
Contrôles et caract.	Connaissance	Caractérisation matériau et microstructure
HSE	Connaissance	Sécurité des opérateurs
Chaîne numérique		
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Technologies

Photopolymérisation

Projection de matière

Projection de liant

Fusion sur lit de poudre

Extrusion de matière

Dépôt de matière sous éner. conc.

Stratification de couches

Combinaison de technologies

Procédés comm.

SLA, DLP

Matériaux maîtrisés

Polymères

DIW, FDM

Polymères, Hydrogels, encres de carbone

Matériaux

Polymères et composites

Métaux

Céramiques et verres

Matériaux cimentaires

Matériaux biologiques

Matériaux biosourcés

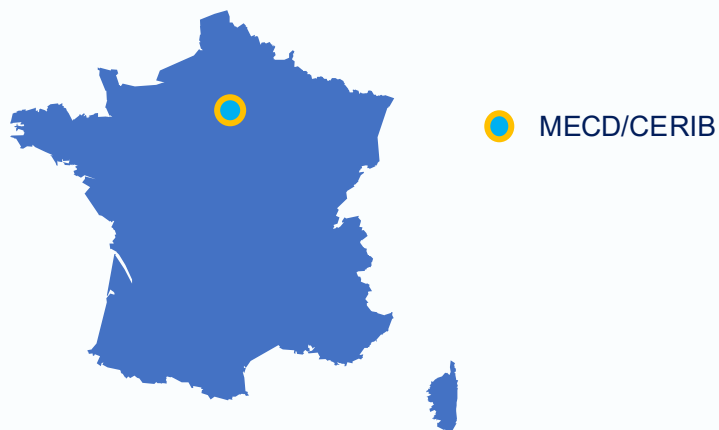
8 Fiche Portrait du Carnot MECD

Carnot MECD / Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton

Éléments clefs de l'institut Carnot

Référence dans le secteur de la construction, le Carnot MECD se voit comme organisme de contrôle ayant la légitimité pour caractériser la performance des matériaux d'impression béton et garantir leur adéquation aux standards de qualité et de sécurité requis par le marché.

Localisation des établissements

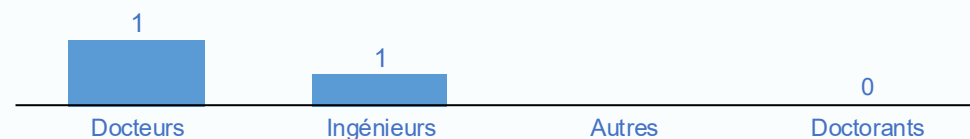


Contacts de l'équipe

- Sylvain DEHAUDT – Responsable Innovation - s.dehautd@meed.fr – 02.37.18.48.00

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



Entre 5 à 10 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

4 ans d'ancienneté cumulée des équipes

0,1 M€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 3 à 7

1 projet scientifique financé depuis 2017

0,15 M€ d'équipements dédiés à la FA

1 imprimante cartésienne développée sur mesure, et commercialisée par la société Construction 3D

Carnot MECD / Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton

Expertises à l'échelle de l'institut Carnot – Compétences

Chaine de valeur

Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design		
Matériaux	Connaissance	Mortier et béton à base de liant hydraulique (ciment, additions minérales)
Fab. 3D	Connaissance	-
Post-traitement	Connaissance	Traitements mécaniques ; Traitements physiques ; Revêtement de surface ; Maîtrise du dimensionnel ; Post-curing
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle en cours de production ; Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie) ; Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...) ; Contrôles Non-Destructifs volumiques ; Tenue au feu ; Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...)
HSE	Maîtrise	Connaissance de la réglementation ; Sécurité des opérateurs ; Formation aux problématiques HSE
Chaine numérique		
Normalisation	Expert national	Méthodes de spécification ; Méthodes de test
Impact env.	Expert national	ACV produits ; Formulation de matériaux recyclés / recyclables
Acc. À l'intégration		

Carnot MECD / Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton

Expertises à l'échelle de l'institut Carnot – Technologies et matériaux

Technologies

Procédés comm.

Matériaux maîtrisés

Photopolymérisation

Projection de matière

Projection de liant

Fusion sur lit de poudre

Extrusion de matière

Dépôt de matière sous éner. conc.

Stratification de couches

Combinaison de technologies

FDM

Matériaux cimentaires

Matériaux

Polymères et composites

Métaux

Céramiques et verres

Matériaux cimentaires

Matériaux biologiques

Matériaux biosourcés

+

Priorité

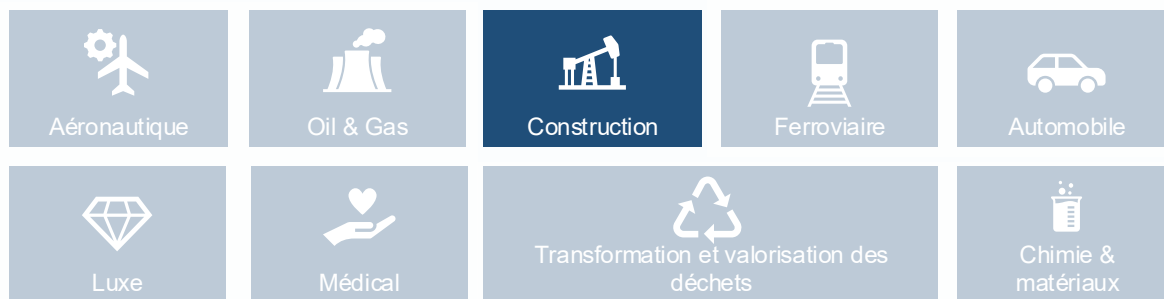
+++

Pièces réalisées : Taille min. : 150mm // Taille max. : 1000mm

Carnot MECD / Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Secteurs adressés



Réalisations scientifiques et techniques

- Des travaux de veille technologique ont débuté en 2017. En 2019-2020, acquisition d'une imprimante cartésienne. De 2021 à 2024, développement des processus de qualification pour les produits et matériau, mis en œuvre par impression 3D.

Réalisations industrielles

le projet [Canopee Diamanti](#)

Projet d'impression d'une passerelle pour piéton :

Un projet novateur est en cours pour développer une passerelle pour piéton imprimée en béton, explorant une géométrie optimisée permettant de solliciter le matériau uniquement en compression. Ce type de conception est clé pour contourner les limitations actuelles de l'impression de béton dans des applications structurales.



Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Acquisition d'une imprimante 3D à bras robotisé (LMDC)
- Développement de compétences sur l'impression additive de matériaux biosourcés et géosources

Carnot MECD / Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton Equipements & Moyens emblématiques



Microstructure



Imprimante cartésienne 3D pour béton



Portique d'essai dalle mécanique

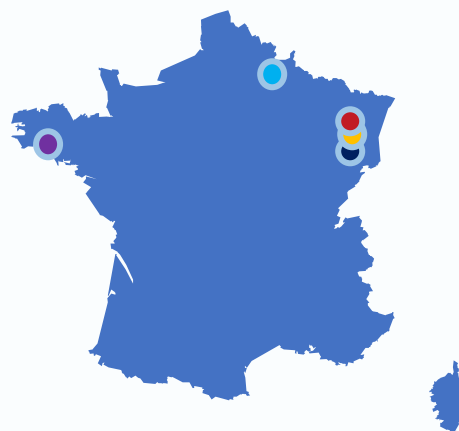
9 Fiche Portrait du Carnot MICA

Carnot MICA

Éléments clefs de l'institut Carnot

Le Carnot MICA est reconnu pour son travail sur les grandes pièces, la lumière, les matériaux et surfaces. Il s'engage activement dans l'acculturation et l'acceptabilité sociale de cette technologie, avec des projets sur les multi-structures et des démonstrateurs.

Localisation des établissements



- CRITT MI
- CNRS – US⁽¹⁾ / ICPEES
- IREPA Laser
- IRMA
- CNRS – UHA⁽²⁾ / IS2M

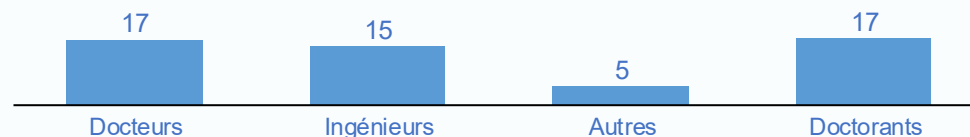
Contacts de l'équipe

- Nicolas Minard – Directeur adjoint Carnot MICA – nicolas.minard@uha.fr – 03 89 60 87 04

(1) US : Université de Strasbourg
(2) UHA : Université de Haute Alsace

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



35 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

464 ans d'ancienneté cumulée des équipes

+4,06 M€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 3 à 6 (*moyenne de tous les établissements*)

+52 projets scientifiques financés depuis 2017

5,3 M€ d'équipements dédiés à la FA

+20 imprimantes & 3 robots AFP (non exhaustif) :

FDM/FFF (Fused Filament Fabrication), CFR (Continuous Fibre Reinforcement), Grand format industriel, Extrusion 6 axes, µ-extrusion 3 axes, Gel mono et bi-composant, AFP (Automated Fiber Placement), imprimantes DLP (ASIGA, ...), 2 SLA (DWS, Formlabs), 1 Volumetrique (Readily 3D), 2 LCD (Photocentric...), 2 bancs de photolithographie deux photons (Microlight 3D à 532 nm, 1 customisé - multi-longueur d'onde)

Formulation à façon : Techniques hautes-performances, Biosourcés / biodégradables, Hybrides métal / Céramique, Moussés, ESD... Mise en œuvre semi-produits

Caractérisation : Essais mécaniques, Analyses morphologiques, Analyses fibres, Analyses rhéologiques, Analyses Thermiques

+1045 publications scientifiques en matière de FA

24 brevets possédés sur la FA

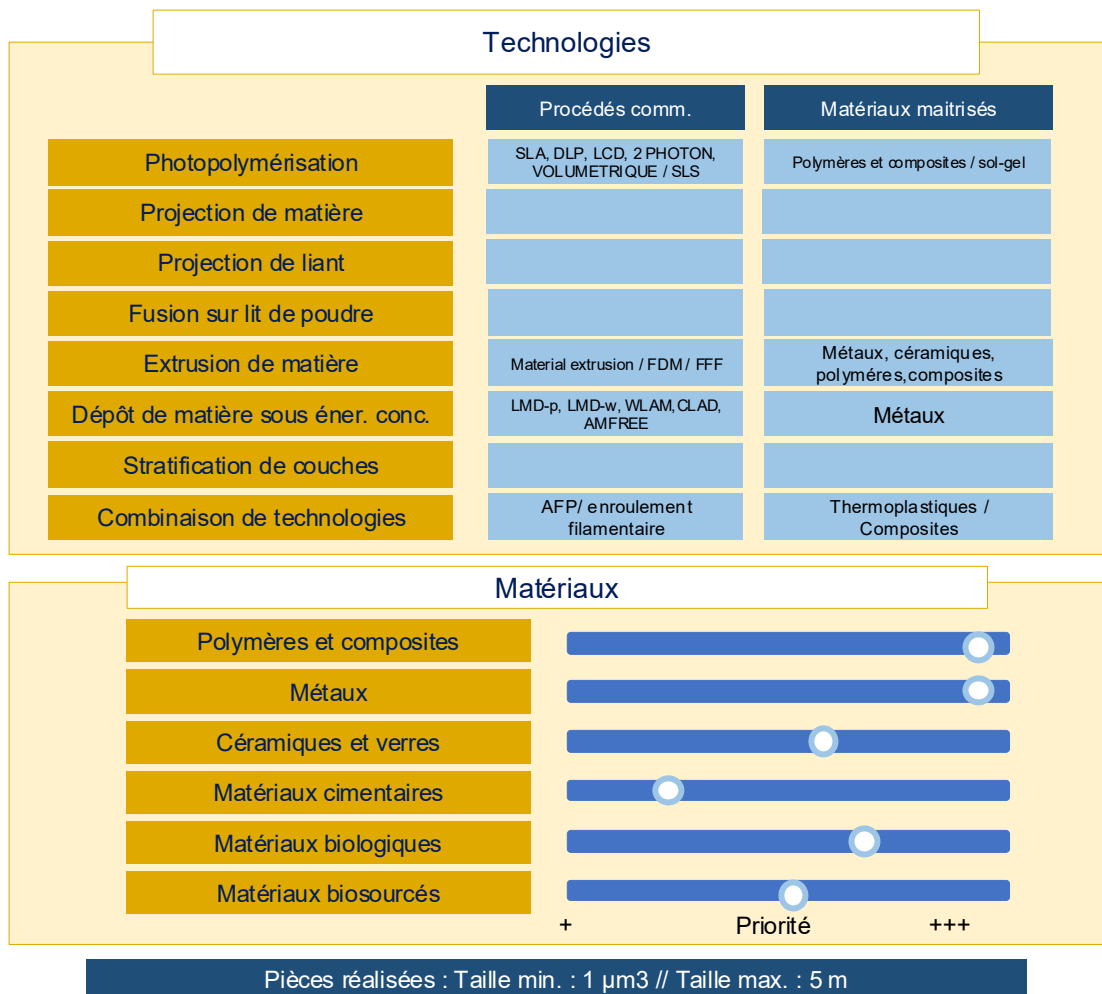
Carnot MICA

Expertises de l'institut Carnot - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Règles de conception en lien avec les procédés FA; Calcul / Simulation multiphysique ; Hybridation technologique
Matériaux	Expert international	Caractérisation & Fonctionnalisation de poudres ; Caractérisation & Fonctionnalisation de fils ; Polymères thermoplastiques ; Matériaux biosourcés
Fab. 3D	Expert international	Extrusion de matière / métaux & céramiques / SLS / FDM Dépôt de matière (fil ou poudre) sous énergie concentrée : FDM / FFF / AFP / enroulement filamentaire / SLA, DLP, LCD, 2 PHOTON, VOLUMÉTRIQUE
Post-traitement	Expert international	Déliantage ; Frittage; Traitements thermiques ; Maîtrise du dimensionnel ; Usinage ; Traitements physiques / Fonctionnalisation de surface / Fonctionnalisation de surface ;; Post-curing ; Traitements chimiques
Contrôles et caract.	Expert international	Contrôle et qualification des poudres ; Caractérisation matériau et microstructure / Caractérisation mécanique / Etats de surfaces / réticulation / biocompatibilité
HSE	Connaissance	Connaissance de la réglementation / ACV / sécurité
Chaine numérique	Maîtrise	Exploitation des données ; Format des données ; IA dédiée à la FA ; Intégration numérique produit - procédé & Simulation / Jumeau numérique
Normalisation	Expert national	Méthodes de spécification ; Méthodes de test
Impact env.	Expert international	ACV process ; ACV produits ; Chimie verte ; Formulation de matériaux recyclés / recyclables
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Diagnostic ; Benchmark ; Conduite du changement

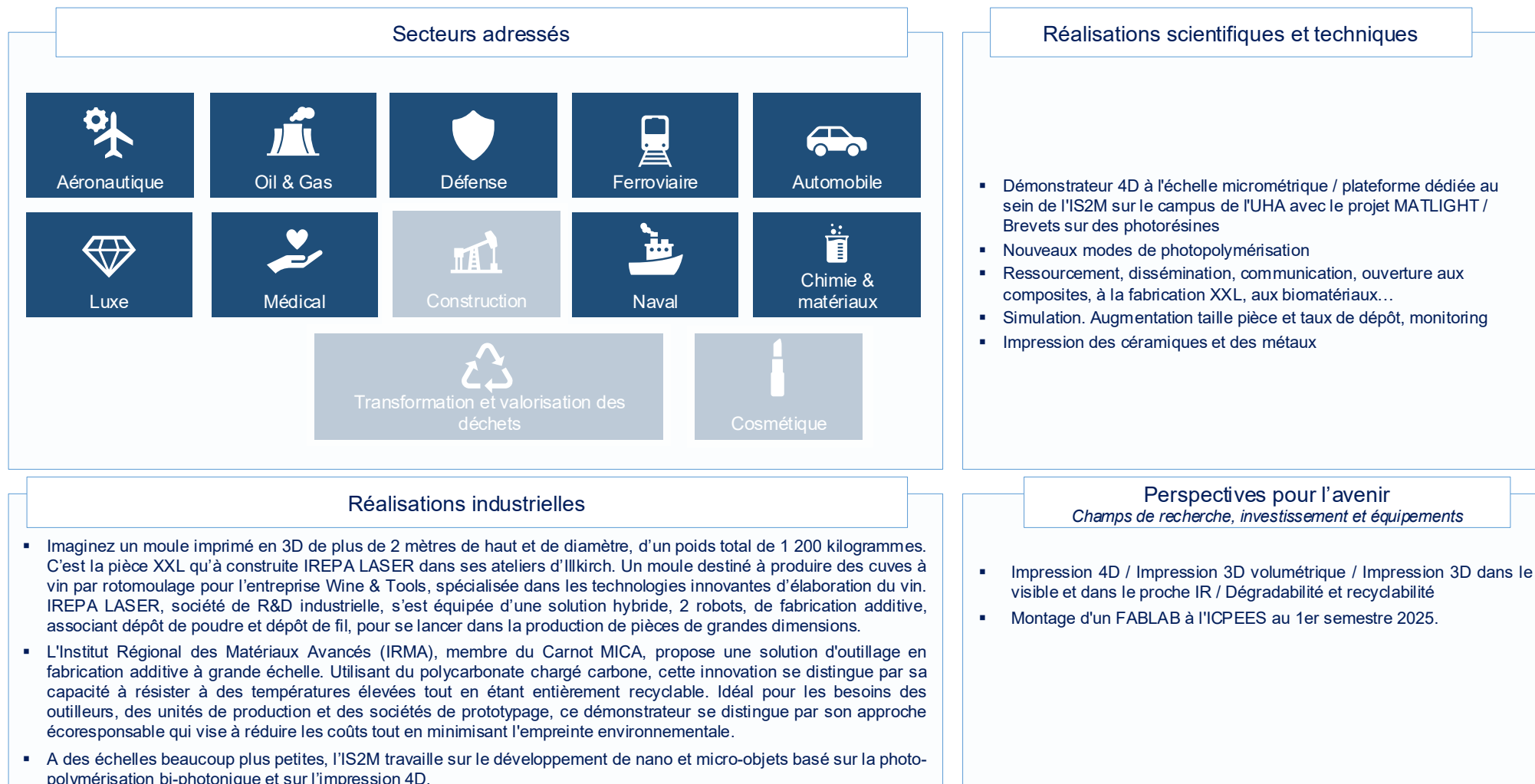
Carnot MICA

Expertises de l'institut Carnot

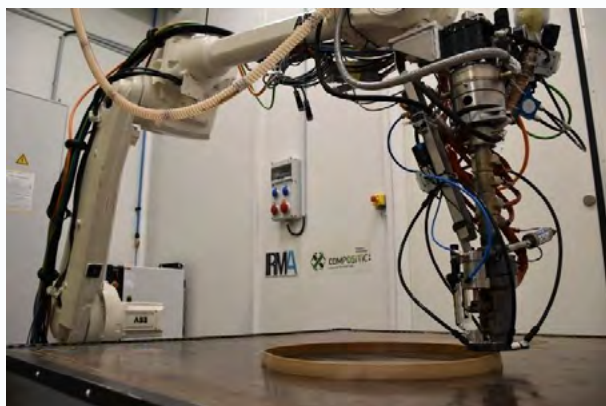


Carnot MICA

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot



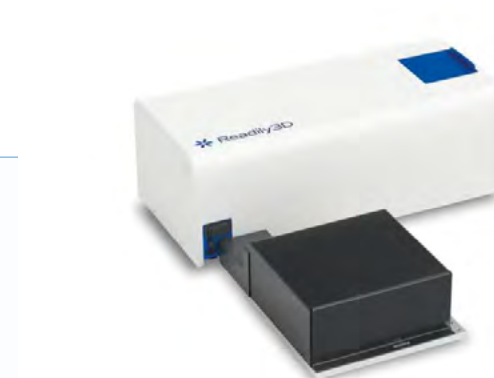
Carnot MICA Equipements & Moyens emblématiques



Cellule surmould 3D (IRMA)



Machine « Freeformer »
(CRITT MI)



Readily3D Tomolite with Multi-wavelength add-on
for advanced volumetric 3D printing applications
(IS2M)



Procédé DED CLAD-pw (IREPA LASER)

Carnot MICA / CRITT Matériaux Innovation (CRITT MI)

Expertises à l'échelle des établissements – Compétences

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Connaissance	-
Matériaux	Expert national	Caractérisation des poudres ; Fonctionnalisation des poudres ; Production de fil ; Caractérisation des fils ; Connaissance comportement des fils ; Production pellet ; Maîtrise de l'agrégation ; Mise en solution
Fab. 3D	Expert national	Extrusion de matière / métaux & céramiques
Post-traitement	Expert national	Déliantage ; Frittage ; Traitements thermiques ; Maîtrise du dimensionnel ; Usinage ; Traitements physiques ; Revêtement de surface ; Fonctionnalisation de surface
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie) ; Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface, de la propreté (risque de relargage de poudres) et des pièces (surfactive, volumique) ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...) ; Contrôles Non-Destructifs volumiques et surfaciques
HSE	Connaissance	Connaissance de la réglementation
Chaîne numérique	Connaissance	-
Normalisation	Maîtrise	Méthodes de spécification ; Méthodes de test
Impact env.	Connaissance	Formulation de matériaux recyclés / recyclables
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Diagnostic ; Benchmark ; Conduite du changement

Carnot MICA / CRITT Matériaux Innovation (CRITT MI) Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux

Technologies

Procédés comm.

Matériaux maîtrisés

Photopolymérisation

Projection de matière

Projection de liant

Fusion sur lit de poudre

Extrusion de matière

Dépôt de matière sous éner. conc.

Stratification de couches

Combinaison de technologies

Material extrusion

Métaux, céramiques

Matériaux

Polymères et composites

Métaux

Céramiques et verres

Matériaux cimentaires

Matériaux biologiques

Matériaux biosourcés

+

Priorité

+++

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm // Taille max. : 100mm

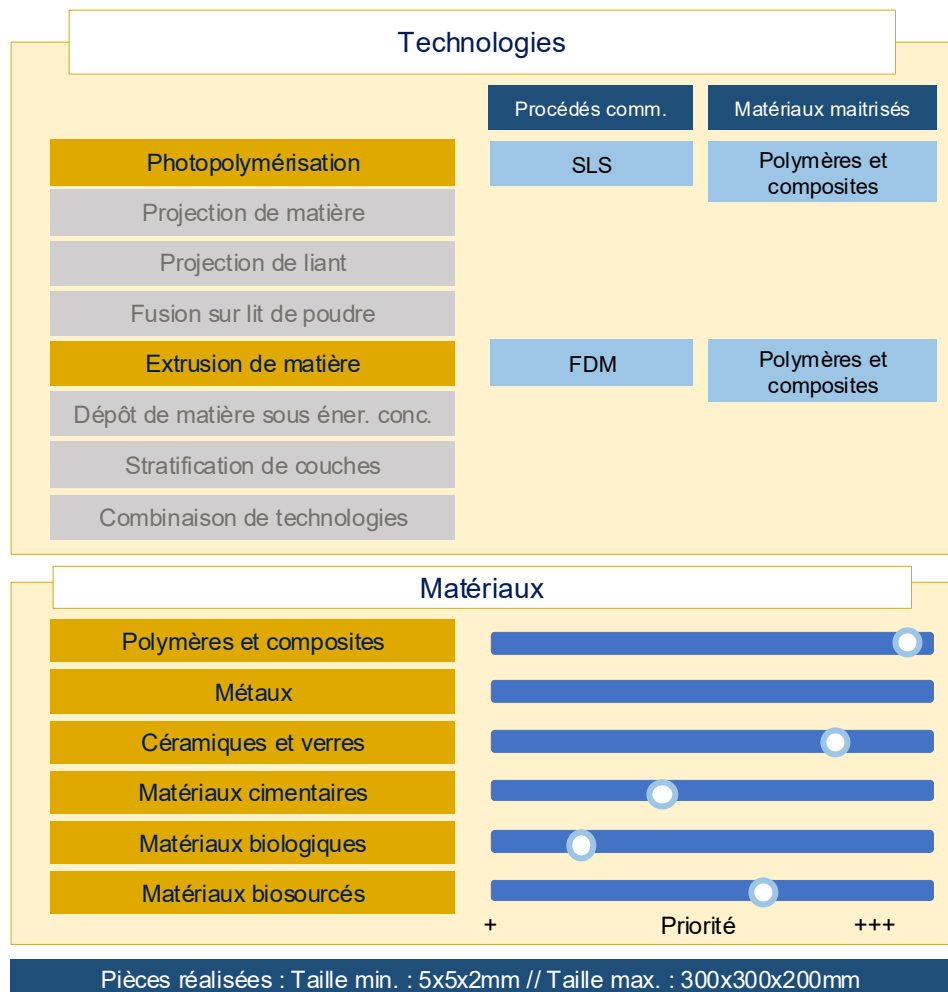
Carnot MICA / CNRS – Université de Strasbourg / Institut de Chimie et Procédés pour l'Énergie, l'Environnement et la Santé (ICPEES)

Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Maitrise	Conception Fiabiliste ; Règles de conception en lien avec les procédés FA ; Hybridation technologique ; Conceptionmultimatériaux / matériaux architecturés
Matériaux	Connaissance	Fonctionnalisation des poudres ; Obtention / production de poudres ; Caractérisation des poudres ; Production de fil ; Caractérisation des fils ; Connaissance comportement des fils ; Mise en solution ; Maîtrise de l'agrégation ; Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes Verre ; Béton
Fab. 3D	Maitrise	SLS / FDM
Post-traitement	Connaissance	Traitements thermiques ; Post-imprégnation ; Fonctionnalisation de surface ; Traitements chimiques ; Traitements mécaniques ; Revêtement de surface
Contrôles et caract.	Maitrise	Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface
HSE		
Chaine numérique		
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Carnot MICA / CNRS – Université de Strasbourg / Institut de Chimie et Procédés pour l'Énergie, l'Environnement et la Santé (ICPEES)

Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux



Carnot MICA / IREPA LASER

Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Maitrise	Règles de conception en lien avec les procédés FA ; Calcul / Simulation multiphysique ; Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS) ; Conception multimatériaux / matériaux architecturés
Matériaux		
Fab. 3D	Expert international	Dépôt de matière (fil ou poudre) sous énergie concentrée
Post-traitement	Maitrise	Fonctionnalisation de surface
Contrôles et caract.	Maitrise	Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Contrôle en cours de production ; Caractérisation matériau et microstructure ; Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie)
HSE		
Chaîne numérique	Maitrise	Exploitation des données ; Format des données ; IA dédiée à la FA ; Intégration numérique produit - procédé & Simulation
Normalisation	Expert national	Méthodes de spécification
Impact env.		
Acc. À l'intégration	Maitrise	Diagnostic

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.	LMD-p, LMD-w, WLAM, CLAD, AMFREE	Métaux
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		
Matériaux		
Polymères et composites		
Métaux		
Céramiques et verres		
Matériaux cimentaires		
Matériaux biologiques		
Matériaux biosourcés		
	+	Priorité +++
Pièces réalisées : Taille min. : 50mm // Taille max. : 5000mm		

Carnot MICA / Institut Régional en Matériaux Avancés (IRMA)

Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Règles de conception en lien avec les procédés FA; Calcul / Simulation multiphysique ; Hybridation technologique
Matériaux	Expert national	Production de fil ; Caractérisation des fils ; Production pellet ; Polymères thermoplastiques ; Polymères thermodurcissables ; Matériaux biosourcés ; Composites à renforts fibreux continus ; Composites à renforts fibreux discontinus ; Polymères thermoplastiques semi-cristallins - de commodité/standards - techniques ; Polymères thermoplastiques amorphes ; Elastomères thermoplastiques
Fab. 3D	Expert national	FDM / FFF / AFP / enroulement filamentaire
Post-traitement		
Contrôles et caract.	Expert national	Caractérisation mécanique ; Caractérisation matériau et microstructure ; Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...)
HSE		
Chaîne numérique	Maîtrise	Jumeau numérique ; Intégration numérique produit - procédé & Simulation ; Continuité numérique / Traçabilité numérique ; IA dédiée à la FA ; Simulation globale du processus
Normalisation		
Impact env.	Maîtrise	ACV process ; ACV produits ; Chimie verte ; Formulation de matériaux recyclés / recyclables
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Benchmark

Carnot MICA / Institut Régional en Matériaux Avancés (IRMA) Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux

Technologies

Procédés comm.

Matériaux maîtrisés

Photopolymérisation

Projection de matière

Projection de liant

Fusion sur lit de poudre

Extrusion de matière

Dépôt de matière sous éner. conc.

Stratification de couches

Combinaison de technologies

FDM / FFF

Thermoplastiques / Composites

AFP/ enroulement filamentaire

Thermoplastiques / Composites

Matériaux

Polymères et composites

Métaux

Céramiques et verres

Matériaux cimentaires

Matériaux biologiques

Matériaux biosourcés

+

Priorité

+++

Pièces réalisées : Taille min. : 5mm // Taille max. : 4000mm

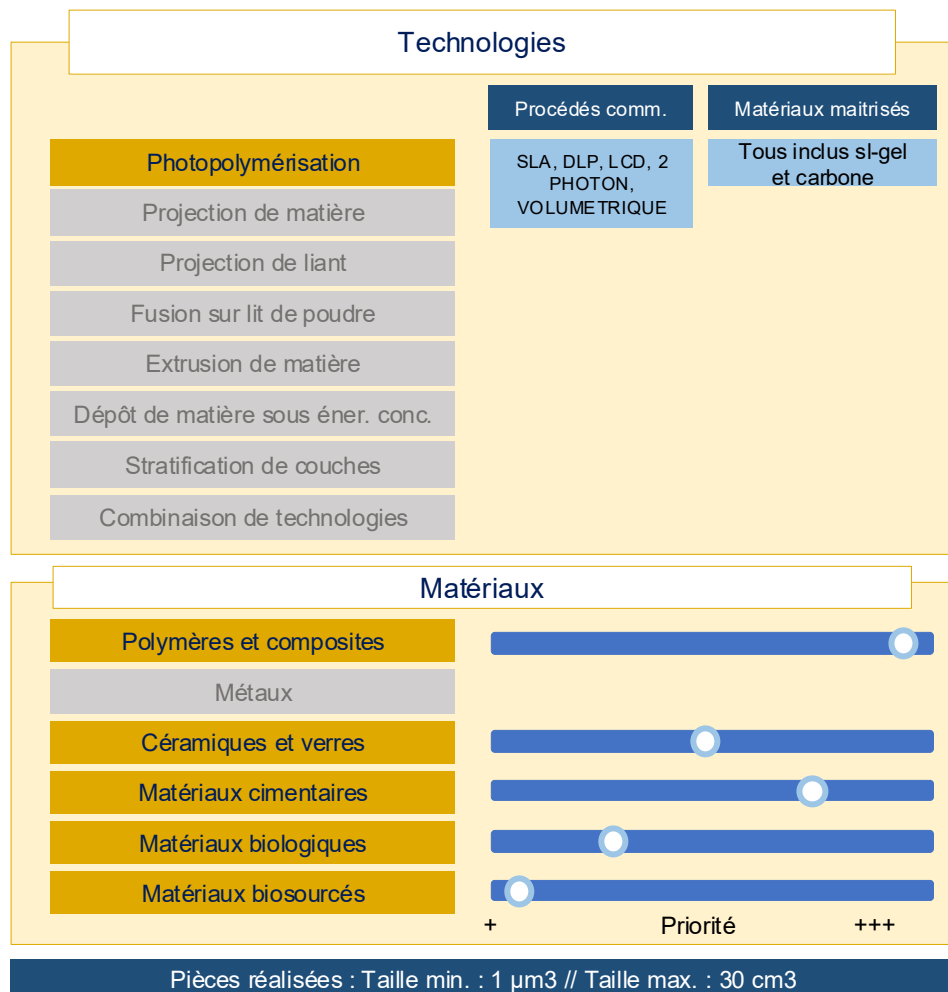
Carnot MICA / CNRS - Université de Haute Alsace / Institut de Science des Matériaux de Mulhouse (IS2M)

Expertises à l'échelle des établissements – Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Maitrise	Design FA 4D ; Conception multimatériaux / matériaux architecturés
Matériaux	Expert international	Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes Verre ; Formulation des encres cimentaires ; Polymère photo-réticulable ; Biopolymère ; Hydrogel ; Emulsion / latex ; Résines photopolymérisables ; Matériaux stimulables (température, pH, environnement, électromagnétique...) ; Précurseurs, Oxydes mixtes, matériaux réfractaires, photoamorceurs ; Matériaux hybrides (ex : sol-gel)
Fab. 3D	Expert international	SLA, DLP, LCD, 2 PHOTON, VOLUMETRIQUE
Post-traitement	Expert International	Fonctionnalisation de surface ; Traitements thermiques ; Frittage ; Post-curing ; Traitements chimiques ; Revêtement de surface
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation des états de surface ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation matériau et microstructure ; Densité de réticulation ; Biocompatibilité ; Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...)
HSE		
Chaine numérique		
Normalisation		
Impact env.	Expert national	Chimie verte ; Formulation de matériaux recyclés / recyclables
Acc. À l'intégration		

Carnot MICA / CNRS - Université de Haute Alsace / Institut de Science des Matériaux de Mulhouse (IS2M)

Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux



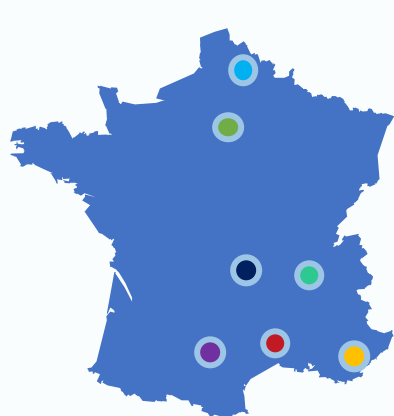
10 Fiche Portrait du Carnot M.I.N.E.S

Carnot M.I.N.E.S

Éléments clefs de l'institut Carnot

Carnot MINES se distingue par sa capacité à repousser les limites en s'attaquant à des matériaux réputés non travaillables et en concevant des machines adaptées. En s'affranchissant des standards, l'institut explore des solutions uniques, avec un fort investissement pour garantir la fonctionnalité des pièces produites.

Localisation des établissements



- IMT Nord Europe / CERI MP
- Mines Paris - PSL, CNRS / CMAT
- Mines Paris – PSL, CNRS / CEMEF
- INP Clermont Auvergne, CNRS / Institut Pascal
- Mines Saint-Etienne, CNRS, INSERM / LGF, LIMOS et SAINBIOSE
- IMT Mines Alès / C2MA
- IMT Mines Albi, CNRS/ plateforme MIMAUSA de ICA-A

Contacts de l'équipe

- Delphine Gilges-Crampon – Chargée Soutien Innovation du Carnot M.I.N.E.S, delphine.gilges-crampon@minesparis.psl.eu, 07 86 03 90 57
- Elisa borges-mendoza - responsable plateforme EPROM, elisa.borges_mendonca@minesparis.psl.eu
- Aurélien Mazzoni, Responsable-adjoint de la plateforme MIMAUSA, aurelien.mazzoni@mines-albi.fr
- Marie-France Lacrampe – Professeur, marie-france.lacrampe@imt-nord-europe.fr

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



20 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

538 ans d'ancienneté cumulée des équipes

1 M€ de recettes de recherche partenariale en 2023

390 k€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 2 à 5 (*moyenne de tous les établissements*)

79 projets scientifiques financés depuis 2017

11,7 M€ d'équipements dédiés à la FA

+ 40 machines : Large parc de machines de fabrication additive : FDM/FFF/MEX, SLA, SLS, DLP, jet d'encre ... pour polymères et composites (fibres continues ou fibres coupées); déliantage/frittage métaux et céramiques; impression cimentaire / Plateforme de plasturgie avec machines d'extrusion et de granulation (compoundage, fabrication de fils et de pellets) / Equipements de formulation d'encres cimentaires / Bancs de caractérisation thermomécanique (dont pièces de grandes tailles) avec contrôle CND / Plateforme POPCOM d'Optimisation de nouveaux Procédés COMposites (pour hybridation avec les technologies de fabrication additive) / 3 machines SLS / 2 machines FDM / Machine de fusion laser lit de poudre SLM 125HL / 3D CERAM C1100, Admatceh Admaflex + 4 machines L-PBF, machine MBJ, machine Cold Spray haute et basse pression, WLAM, métrologie des poudres, fours de traitements thermiques, For d'élaboration d'alliage, machines d'essais mécaniques, analyses microstructurales ...

196 publications scientifiques en matière de FA

8 brevets possédés sur la FA

(1) ICA : Institut Clément ADER

Carnot M.I.N.E.S

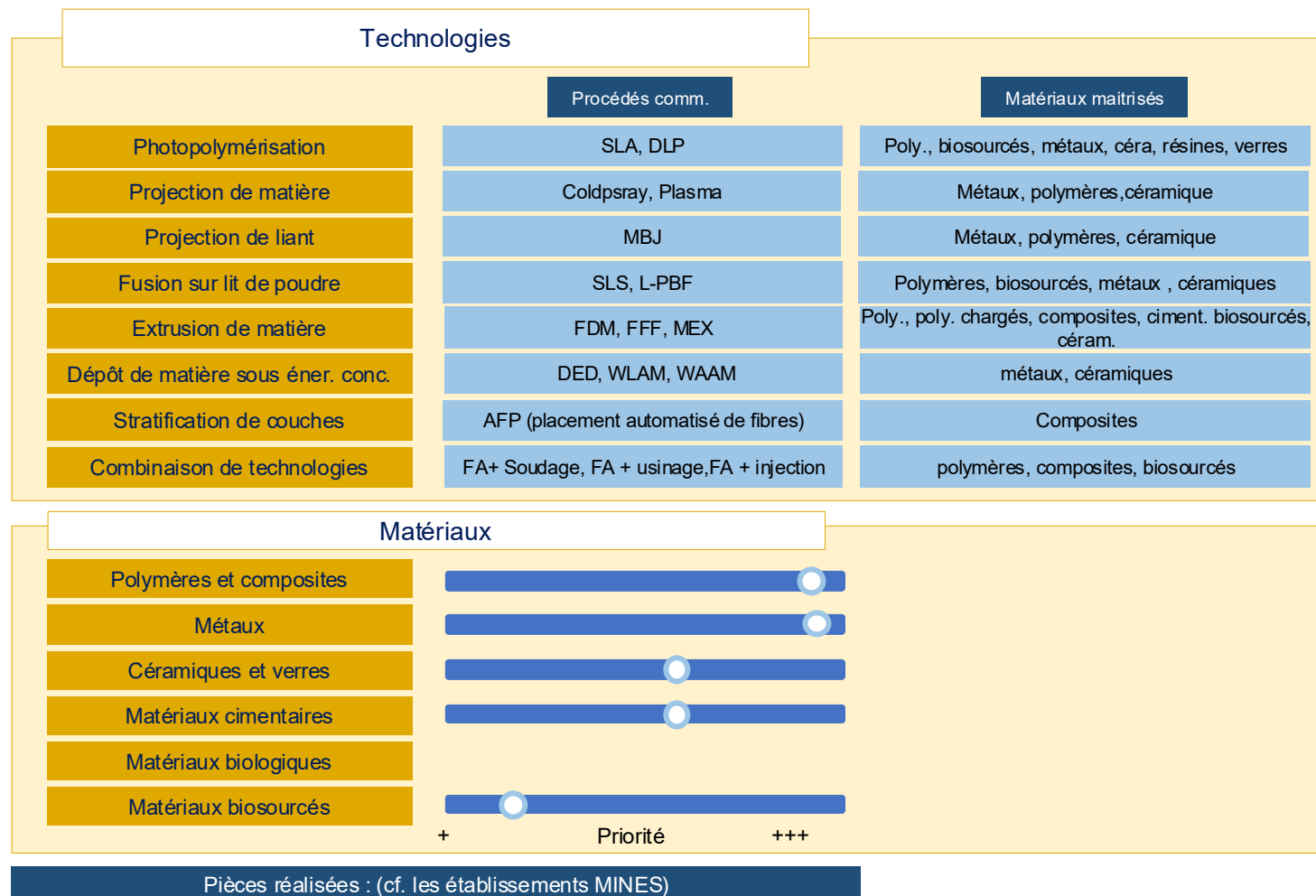
Expertises de l'institut Carnot - Compétences

Chaine de valeur

Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Règles de conception en lien avec les procédés FA / Optimisation topologique / multiphysique / Calcul / Simulation multiphysique / Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS) / Eco conception et cycle de vie / "Reverse engineering" / Hybridation technologique / Conception multi-matériaux et matériaux architecturés / Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle / Design FA 4D /
Matériaux	Expert international	Production de fil / Production pellet / Ciment, mortier, béton / Formulation des encres cimentaires / Polymères thermoplastiques / Elastomères thermoplastiques (TPE, TPU ...) / Matériaux biosourcés / Composites et Composites à renforts fibreux continus (fibres continues, rovings, rubans) ou à renforts fibreux discontinus (fibres coupées courtes ou longues) / Formulations, mélanges / Matériaux architecturés / méta-matériaux / Alliages base Nickel / Alliages base Aluminium / Alliages inoxydables / Alliages ChromeCobalt / Métaux réfractaires (Mo, W, ...) / Composés avec nanocharges, nanocomposites / Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / OxydesVerre / Fonctionnalisation des poudres / Nouvelles nuances de poudres et leur caractérisation et leur production / Tamassage
Fab. 3D	Expert international	Interaction énergie / matière (procédés haute énergie, base frittage, base déformation plastique, ...) / Simulation et modélisation des procédés / Simulation métallurgie du composant / Echelle micro-meso-macro - développement / Effet des paramètres opérationnels / Règles de conception des pièces finies / Instrumentation pour mesures et contrôles en cours de production / Monitoring du procédé & traitement de données associée / Capacité, répétabilité, reproductibilité / Adaptation du process pour multimatériaux
Post-traitement	Expert national	Déliantage / Frittage / Fonctionnalisation de surface / Maîtrise du dimensionnel / Traitements thermiques / Post-curing
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle machine et maintenabilité / Contrôle en cours de production / Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie) / Caractérisation matériau et microstructure / Caractérisation mécanique / Caractérisation des états de surface / Caractérisation des pièces (surfaique, volumique) / Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...) / Contrôles Non-Destructifs volumiques / Contrôles Non-Destructifs surfaiques / Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) / Tenue au feu
HSE	Expert national	Evaluation des risques industriels (explosion, inflammation, ...) / Sécurité des opérateurs / Formation aux problématiques HSE / Mesures de l'exposition / Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité) / Toxicologie des poudres
Chaine numérique	Expert international	Exploitation des données / jumeau numérique / Simulation globale du processus / Intégration numérique produit - procédé & Simulation / Continuité numérique/Traçabilité numérique / Protection des données / Format des données / IA dédiée à la FA
Normalisation		
Impact env.	Expert national	Formulation de matériaux recyclés / recyclables / ACV produits / ACV Process
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Conduite du changement / Diagnostic / Benchmark / Business model

Carnot M.I.N.E.S

Expertises de l'institut Carnot – Technologies et matériaux



Carnot M.I.N.E.S

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot (1/2)

Secteurs adressés



Réalisations industrielles

- IMT Mines Albi collabore avec des sous-traitants de pièces aéronautiques comme Fusia et Prismadd pour développer de nouveaux alliages et optimiser les procédés de fabrication additive.
- Mines Paris – PSL collabore avec :
 - ✓ JPB Système pour la fabrication de pièces par Metal BinderJetting,
 - ✓ EDF R&D sur la projection "Cold Spray acier 316L",
 - ✓ Sirius Space Service pour le développement du domaine du New Space grâce à la fabrication additive
 - ✓ Safran Tech pour la caractérisation de microstructure de l'inconel 178
- Le LGF de l'école des Mines de Saint Etienne a travaillé sur l'élaboration et la caractérisation fines de nouveaux alliages d'aluminium (avec les sociétés THALES et SAFRAN) et d'aciers (avec la société MICHELIN) pour les procédés de fusion sur lit de poudres (SLM) et ont conduit à plusieurs dépôts de brevets

Réalisations scientifiques et techniques

- Développement de nouveaux procédés de fabrication additive (Wire Laser Additive Manufacturing, Metal Blinder jetting)
 - ✓ Lancement du projet LASCALA en 2017 visant à développer une machine de FA capable de produire des pièces de grande taille en plastiques et composites, y compris des composites structuraux à fibres continues.
 - ✓ Investissement dans la technologie WLAM pour accroître ses possibilités
- Développement des nouveaux matériaux (bétons, biopolymères, multi-matériaux)
 - ✓ La FA pour applications médicales, le développement de polymères recyclés adaptés à la FA, le développement de formulations biosourcées pour la FA céramiques, la FA pour la fabrication rapide d'outillages et la maintenance
 - ✓ L'impression 3D est utilisée pour fabriquer des gels biosourcés aux formes complexes en employant des aérogels à base de cellulose
- Développement d'une approche « Santé Matière » spécifique au procédé de fabrication additive
- Utilisation de la simulation, de la modélisation et de l'intelligence artificielle pour les procédés de fabrication additive
- Réalisation de projets européens : Interreg ELASTO-PLAST (élastomères thermoplastiques pour FA), 3DMed & 3D4Med (FA pour applications médicales), DOUDOU (polymères recyclés adaptés à la FA), CIRMAP (encres cimentaires éco-responsables pour la FA), PEPS (formulations biosourcées pour la FA céramique), AGILITY (FA pour fabrication rapide d'outillages et maintenance), et Horizon Europe SUINK (polymères piézoélectriques biosourcés imprimables).
- Organisation des journées technologiques, comme celle dédiée à la FA pour le textile, afin de présenter les avancées dans le secteur des composites et de favoriser les échanges entre chercheurs et industriels.
- Réseau de plateformes accessibles aux entreprises (EPROM, Mimausa, etc.)

Carnot M.I.N.E.S

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot (2/2)

Réalisations industrielles (suite)

- Impression 3D de terres excavées du projet Grand Paris Express (Chaire industrielle Ecosed de l'IMT Nord Europe).
- Développement d'une nouvelle encre cimentaire bas carbone pour impression 3D béton à échelle industrielle sur « maxi printer » de la société Constructions-3D et création d'une nouvelle entreprise Termix-3D pour la confection d'encres cimentaires et la réalisation de construction par impression 3D béton (IMT Nord Europe)
- En collaboration avec INITIATIVE 3D, Mines Saint-Étienne participe à un plan d'investissement sur la technologie de fabrication générative à partir d'un fil métallique, WAAM et amènera ses compétences d'élaboration de matériaux et de transformations (laminage des fils notamment) et d'analyse au service de projets communs à l'échelle régionale, Nationale et Européenne.
- Projet avec Atelier LUMA : l'IMT Mines Alès a intégré des micro et macroalgues locales dans des matrices thermoplastiques. Ces biomatériaux ont ensuite été transformés en objets de design à l'aide de l'impression 3D et du moulage par injection.
- Plusieurs collaborations avec des start-ups, telles que Wallace Technologies, spécialisée dans la production d'énergie, en les accompagnant dans le développement de solutions basées sur la fabrication additive.

Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Développement de nouveaux procédés (WLAM, LASCALA, etc.)
- Renforcement des plateformes accessibles aux entreprises : EPROM (1,7 M€ d'investissement), Mimausa (recrutement de moyens humains), LASCALA
- Développement des connaissances des matériaux métalliques (santé) et de leur comportement lors de la mise en forme sous ce procédé de fabrication additive, les modélisations et simulations associés pour pallier les problématiques de résistances (microfissure) pour l'aéronautique et le spatial mais aussi en santé etc
- Polymères biosourcés : Mise au point de polymères dérivés de ressources renouvelables pour des applications en FA, en particulier pour des produits à courte durée de vie ou biodégradables.
- Polymères hautes performances : Développement de polymères thermoplastiques et thermodurcissables avancés pour des applications dans l'automobile, l'aéronautique et le biomédical.
- Composites renforcés par fibres continues : Perfectionnement des techniques de dépôt et de renforcement pour améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des pièces.
- Fabrication additive hybride : Intégration de la FA dans des procédés de fabrication composite traditionnels pour des pièces fonctionnelles plus complexes.
- Encres et matériaux composites biosourcés : Développement de composites biosourcés (à base de fibres végétales ou de déchets agricoles) adaptés à des applications diverses, comme l'emballage, la construction ou les biens de consommation.
- Matériaux circulaires : Recherche sur la conception de matériaux recyclables ou facilement
- Développement de nouveaux feedstocks pour répondre à des exigences spécifiques en termes de résistance, de légèreté et de durabilité.
- Fabrication additive multi-matériaux : Exploration de procédés permettant la combinaison de différents métaux dans une seule pièce, ce qui peut être particulièrement pertinent pour des applications structurales et thermiques.
- Fabrication additive de céramiques techniques : Développement de procédés pour des céramiques techniques (alumine, zirconium) aux propriétés de résistance thermique et chimique améliorées, adaptées pour des secteurs comme l'aérospatial et la médecine.
- Bio-céramiques : Exploration de la céramique pour des applications biomédicales (implants, prothèses) avec une biocompatibilité et une durabilité améliorée.
- Céramiques fonctionnelles : Intégration de céramiques conductrices ou piézoélectriques pour des applications électroniques ou énergétiques.
- Encres cimentaires pour la construction : Développement d'encres à base de ciment adaptées à la fabrication additive pour la construction de bâtiments et d'infrastructures.
- Formulations innovantes de bétons : Étude des formulations de bétons auto-cicatrisants ou légers, et exploration des possibilités de structures à géométrie complexe pour réduire l'empreinte carbone dans la construction.

Carnot M.I.N.E.S Equipements & Moyens emblématiques



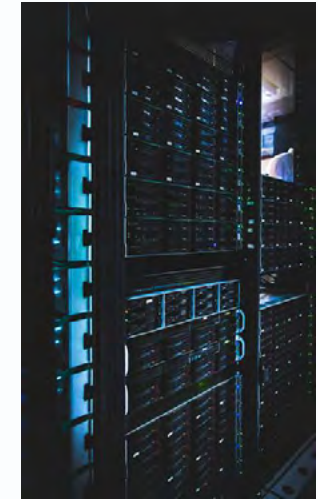
Metal Binder Jetting (modification laboratoire pour étude de la santé matière) @Mines Paris-PSL



Fabrication additive robotisée LASCALA de pièces de grandes tailles (jusqu'à 6mx2mx1m) en thermoplastiques et composites (extrusion de matériaux, alimentation avec granulés de polymères, renforcement avec fibres coupées ou continues) © IMT Nord Europe (développement en propre)



Impression 3D béton : Formulation d'encres cimentaires bas carbone © IMT Nord Europe (développement en propre)



Pour des calculs parallèles intensifs de modélisation et simulation de mise en forme des matériaux, un Cluster de Calcul, High Performance Computing
1120 cœurs répartis sur 40 nœuds de calculs interconnectés par un réseau très rapide à faible latence (performances théoriques = 43 TFlops),
576 cœurs de calcul constituant un 2ème pool de calcul (performances théoriques = 12 TFlops),
28 To de stockage de données centralisé et accessibles par tous les serveurs et postes de travail.

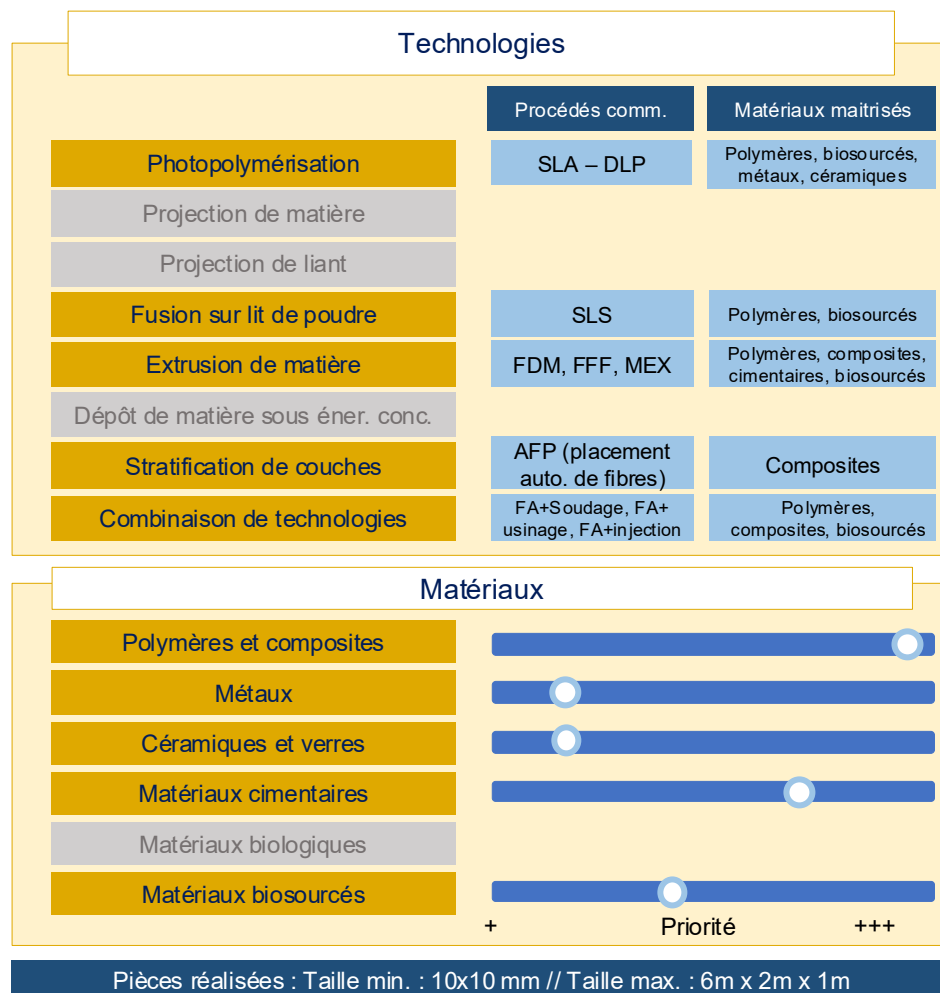
@Mines Paris – PSL

Carnot M.I.N.E.S / IMT Nord Europe / Centre Matériaux & Procédés (CERI MP)

Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Maîtrise	Règles de conception en lien avec les procédés FA ; Optimisation topologique / multiphysique; Calcul /simulation multiphysique; Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS); Eco conception et cycle de vie ; Reverse engineering; Hybridation technologique; Conception multimatériaux / matériaux architecturés; Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle; Design FA 4D
Matériaux	Expert International	Polymères et élastomères thermoplastiques; Matériaux biosourcés; Composites; Matériaux architecturés / méta-matériaux; Formulation, mélanges; Production de fil ; Production pellet ; Formulation des encres cimentaires; Ciment, mortier, béton
Fab. 3D	Expert International	Interaction énergie / matière; Simulation et modélisation des procédés / chelle micro-meso-macro; Développement / Effet des paramètres opérationnels; Règles de conception des pièces finies; Instrumentation pour mesures et contrôles en cours de production; Monitoring du procédé & traitement de données associées; Capabilité, répétabilité, reproductibilité; Adaptation du process pour multimatériaux
Post-traitement	Maîtrise	Déliantage ; Frittage ; Fonctionnalisation de surface ; Maîtrise du dimensionnel ;Traitements thermiques
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle machine et maintenabilité; Contrôle en cours de production ; Caractérisation matériau et microstructure; Caractérisation mécanique; Caractérisation des états de surface; Caractérisation des pièces; Durabilité en service (fatigue, défauts); Contrôles Non-Destructifs (volumiques et surfaciques)
HSE	Expert national	Evaluation des risques industriels (explosion, inflammation, ...) ; Sécurité des opérateurs ; Formation aux problématiques HSE; Mesures de l'exposition
Chaine numérique	Expert national	Exploitation des données ; jumeau numérique ; Simulation globale du processus ; Protection des données; Format des données; IA dédiée à la FA
Normalisation		
Impact env.	Expert national	Formulation de matériaux recyclés / recyclables
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Conduite du changement ; Diagnostic ; Business model ; Benchmark

Carnot M.I.N.E.S / IMT Nord Europe / Centre Matériaux & Procédés (CERI MP) Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux



Carnot M.I.N.E.S / Mines Paris - PSL, CNRS / Centre des Matériaux de Mines Paris (CMAT)

Expertises à l'échelle des établissements – Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Connaissance	Règles de conception élémentaire en lien avec les procédés FA
Matériaux	Expert international	Nouvelles nuances de poudres ; Caractérisation des poudres ; Fonctionnalisation des poudres ; Alliages base Nickel ; Aciers inoxydables ; Métaux réfractaires (Mo, W, ...); Céramiques techniques (carbures, nitrures...)/ Perovskites / Oxydes Verre ; Gradients de propriété ; Matériaux architecturés / méta-matériaux
Fab. 3D	Expert international	Interaction énergie / matière/Simulation et modélisation des procédés / Simulation métallurgie du composant / echelle micro-meso-macro/Développement / Effet des paramètres opérationnels/Règles de conception des pièces finies/Instrumentation pour mesures et contrôles en cours de production/Monitoring du procédé & traitement de données associées /Adaptation du process pour multimatériaux
Post-traitement	Maîtrise	Maîtrise du dimensionnel ; Délantage ; Frittage ; Traitements thermiques ; Post-curing
Contrôles et caract.	Maîtrise	Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Contrôle machine et maintenabilité ; Contrôle en cours de production ; Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...); Contrôle de pièce (dimensionnel, géométrique et métrologie)
HSE	Connaissance	Connaissance de la réglementation
Chaine numérique	Expert national	Exploitation des données ; IA dédiée à la FA ; Intégration numérique produit - procédé & Simulation
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration	Maîtrise	Business model ; Conduite du changement

Brevets :

<https://data.inpi.fr/brevets/WO2014083291?q=colin%20christophe#WO2014083291> ;
 <https://data.inpi.fr/brevets/WO2014083292?q=colin%20christophe#WO2014083292> ;
 <https://data.inpi.fr/brevets/EP2784045?q=colin%20christophe#EP2784045>

Carnot M.I.N.E.S / Mines Paris - PSL, CNRS / Centre des Matériaux de Mines Paris (CMAT)

Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux

Technologies

	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière	Cold spray, plasma	Métaux, Polymères, Céramiques
Projection de liant	MBJ	Métaux
Fusion sur lit de poudre	L-PBF	Métaux, Céramiques
Extrusion de matière	FDM	Polymères
Dépôt de matière sous éner. conc.	DED	Métaux, Céramiques
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux

Polymères et composites	<input type="range"/>
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	<input type="range"/>
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+
Priorité
+++

Pièces réalisées : Taille min. : 2 mm // Taille max. : 250 mm

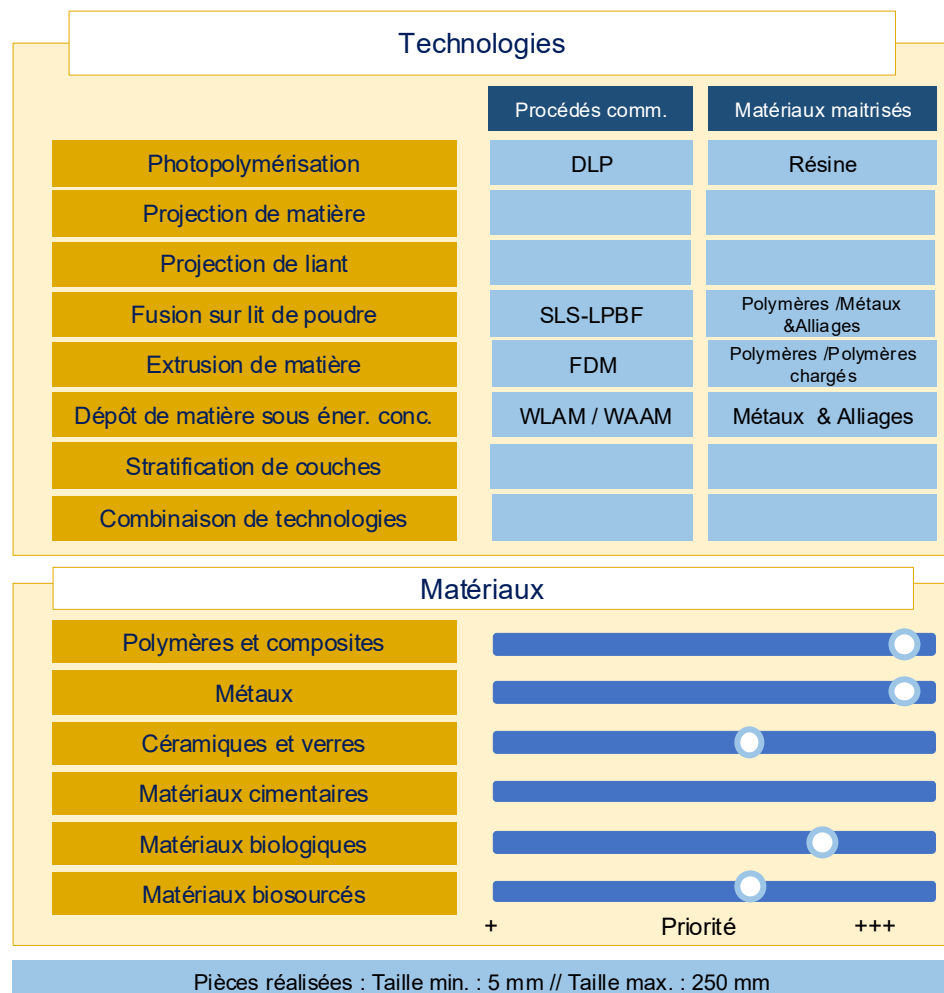
Carnot M.I.N.E.S / Mines Paris – PSL, CNRS / Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF)

Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design		
Matériaux	Expert national	Résine, polymères, polymères chargés, métaux, alliages et céramiques
Fab. 3D	Expert national	Interaction énergie / matière (procédés haute énergie, base frittage, base déformation plastique,...) / Simulation et modélisation des procédés / Simulation métallurgie du composant / échelle micro-meso-macro / Développement, Effet des paramètres opérationnels / Instrumentation pour mesures et contrôles en cours de production / Monitoring du procédé & traitement des données associées / Capabilité, répétabilité, reproductibilité / Adaptation du process pour multimatériaux / Effet des paramètres opérationnels
Post-traitement	Expert national	Relation procédé – microstructure ; Transformations de phases
Contrôles et caract.	Expert national	Caractérisation mécanique ; Microstructures et propriétés ; Rôle de la composition chimique
HSE		
Chaine numérique	Expert international	Simulation numérique des procédés ; Modélisation ; Exploitation des données ; Jumeau numérique ; Etat microstructural
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Carnot M.I.N.E.S / Mines Paris – PSL, CNRS / Centre de mise en forme des matériaux (CEMEF)

Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux



Carnot M.I.N.E.S / Mines Saint- Etienne, CNRS, INSERM / Laboratoire Georges Friedel (LGF)¹,
Laboratoire informatique, modélisation et optimisation des systèmes (LIMOS)² et SAINBIOSE ³
Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Calcul / Simulation multiphysique /Modélisation / Simulation / Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS) ; Eco conception et cycle de vie
Matériaux	Expert national	Obtention / production de poudres ; Nouvelles nuances de poudres ; Caractérisation des poudres ; Fonctionnalisation des poudres ; Alliages d'aluminium ; Alliages base Titane ; Aciers pour traitement thermique / Aciers à outils ; Autres matériaux métalliques (Au, etc.)
Fab. 3D	Expert national	Interaction énergie / matière(procédés haute énergie, base frittage, base déformation plastique,...) /Simulation et modélisation des procédés / Simulation métallurgie du composant / echelle micro-meso-macro/ Développement / Effet des paramètres opérationnels/Règles de conception des pièces finies/Instrumentation pour mesures et contrôles en cours de production /Monitoring du procédé & traitement de données associées/Capabilité, répétabilité, reproductibilité / Adaptation d u process pour multimatériaux
Post-traitement	Expert national	Traitements mécaniques ; Traitements physiques ; Fonctionnalisation de surface ; Traitements thermiques
Contrôles et caract.	Expert national	Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Caractérisation matériau et microstructure ; Caractérisation mécanique ; Caractérisation des états de surface
HSE	Expert national	Connaissance de la réglementation / Toxicologie des poudres / Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité) / Sécurité des opérateurs
Chaine numérique	Expert national	Exploitation des données / Jumeau Numérique / Simulation globale du processus
Normalisation		
Impact env.	Expert national	ACV produits
Acc. À l'intégration		

¹ LGF : CNRS + les centres SMS et SPIN de l'école des Mines de Saint Etienne

² LIMOS : UCA + CNRS + les centres CMP, CIS et l'institut Fayol de l'école des Mines de Saint Etienne

³ SAINBIOSE : INSERM + le centre CIS de l'école des Mines de Saint Etienne

Carnot M.I.N.E.S / Mines Saint- Etienne, CNRS, INSERM / Laboratoire Georges Friedel (LGF)¹,
Laboratoire informatique, modélisation et optimisation des systèmes (LIMOS)² et SAINBIOSE³
Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux

Technologies

	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation		
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	SLM	Métaux
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.	WAAM	Métaux
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		

Matériaux

Polymères et composites	
Métaux	
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+
Priorité
+++

Pièces réalisées : Taille min. : 5 mm // Taille max. : 500 mm

¹ LGF : CNRS + les centres SMS et SPIN de l'école des Mines de Saint Etienne
² LIMOS : UCA + CNRS + les centres CMP, CIS et l'institut Fayol de l'école des Mines de Saint Etienne
³ SAINBIOSE : INSERM + le centre CIS de l'école des Mines de Saint Etienne

Carnot M.I.N.E.S / INP Clermont Auvergne, CNRS / Institut Pascal

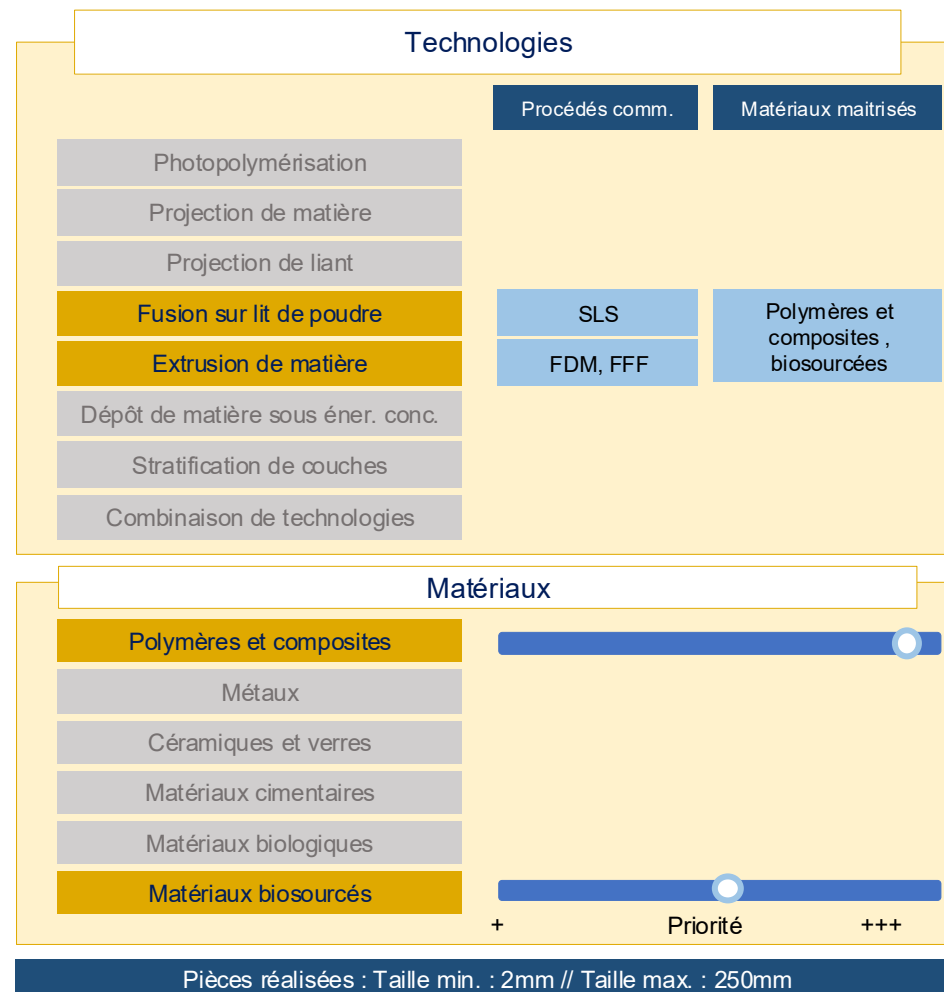
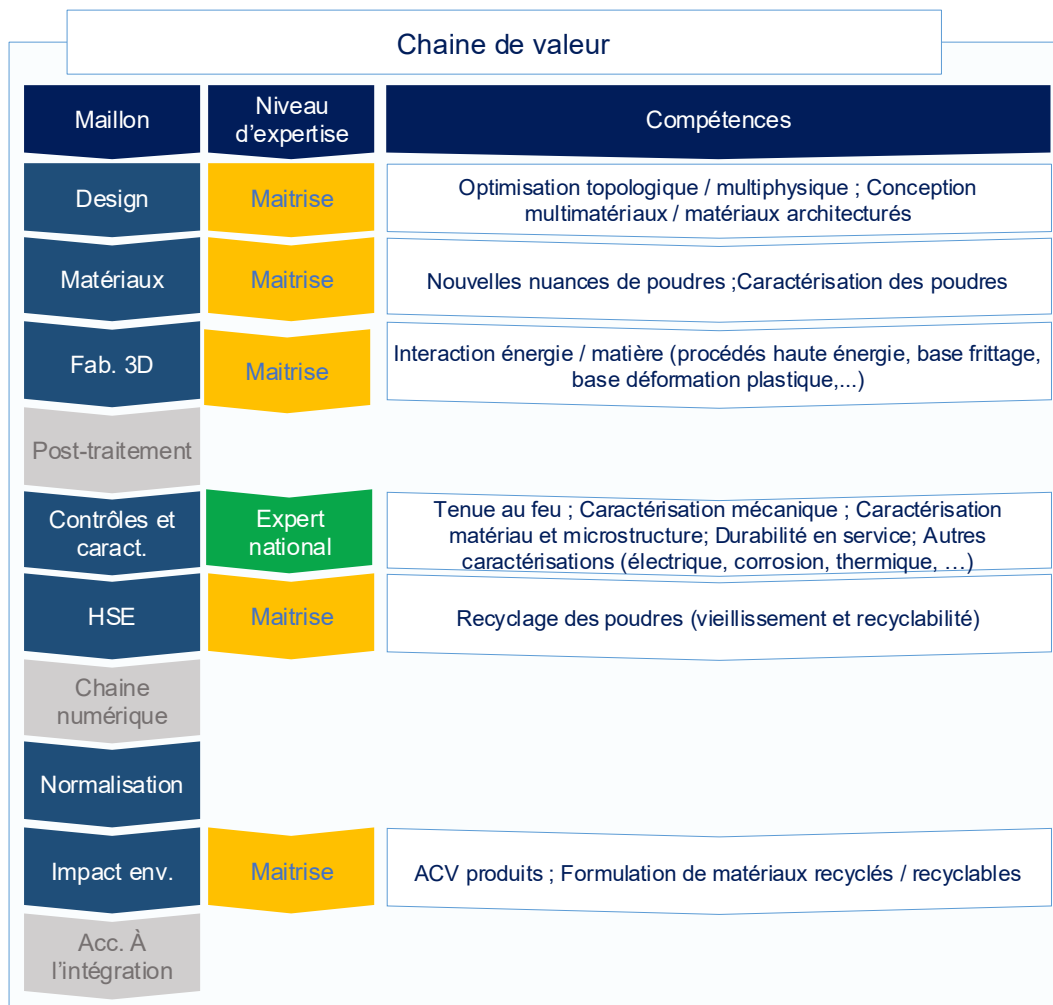
Expertises à l'échelle des établissements

Chaîne de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Maitrise	Règles de conception en lien avec les procédés FA ; Eco conception et cycle de vie
Matériaux	Maitrise	Obtention / production de poudres ; Caractérisation des poudres ; Composés avec nanocharges, nanocomposites ; Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / Oxydes Verre
Fab. 3D	Maitrise	Développement / Effet des paramètres opérationnels ; Capabilité, répétabilité, reproductibilité
Post-traitement	Maitrise	Traitements thermiques ; Dépoudrage des pièces ; Déliantage
Contrôles et caract.	Maitrise	Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées) ; Caractérisation matériau et microstructure ; Biocompatibilité
HSE		
Chaîne numérique	Maitrise	Intégration numérique produit - procédé & Simulation
Normalisation		
Impact env.	Maitrise	ACV process
Acc. À l'intégration	Maitrise	Conduite du changement ; Business model ; Diagnostic

Technologies		
	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA/ DLP	Polymères, verres, céramiques
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies		
Matériaux		
Polymères et composites	<input type="range"/>	
Métaux	<input type="range"/>	
Céramiques et verres	<input type="range"/>	
Matériaux cimentaires		
Matériaux biologiques		
Matériaux biosourcés		
	+	Priorité +++
Pièces réalisées : Taille min. : 2mm // Taille max. : 150mm		

Carnot M.I.N.E.S / IMT Mines Alès / Centre des matériaux des mines d'Alès (C2MA)

Expertises à l'échelle des établissements



Carnot M.I.N.E.S / Mines Albi, CNRS / Institut Clément ADER / Plateforme MIMAUSA

Expertises à l'échelle des établissements

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design		
Matériaux	Maitrise	Caractérisation des poudres, Tamisage, Alliages d'aluminium, Alliages base Titane, Alliages base Nickel, Alliages Chrome-Cobalt, Aciers inoxydables, Céramiques techniques (carbures, nitrures...) / Perovskites / OxydesVerre....
Fab. 3D	Maitrise	Interaction énergie / matière; Développement / Effet des paramètres opérationnels; Règles de conception des pièces finies; Instrumentation pour mesures et contrôles en cours de production; Capabilité, répétabilité, reproductibilité
Post-traitement	Connaissance	Déliantage ; Frittage ; Traitements thermiques ; Revêtement de surface ; Traitements mécaniques ; Usinage
Contrôles et caract.	Maitrise	Contrôle et qualification des poudres (neuves et recyclées), Contrôle machine et maintenabilité, Caractérisation matériau et microstructure, Caractérisation mécanique, Caractérisation des états de surface, Caractérisation des pièces (surfactive, volumique), Durabilité en service (fatigue, contraintes résiduelles, défauts...)
HSE	Maitrise	Toxicologie des poudres; Recyclage des poudres (vieillessement et recyclabilité); Mesures de l'exposition
Chaine numérique		
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration		

Carnot M.I.N.E.S / Mines Albi, CNRS / Institut Clément ADER / Plateforme MIMAUSA

Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux

Technologies

Procédés comm.

Matériaux maîtrisés

Photopolymérisation

Projection de matière

Projection de liant

Fusion sur lit de poudre

Extrusion de matière

Dépôt de matière sous éner. conc.

Stratification de couches

Combinaison de technologies

SLM 125 HL de Nikon

Dépôt de fil : MAT de 3D CERAM

Métaux

Polymères/ Céramiques

Matériaux

Polymères et composites

Métaux

Céramiques et verres

Matériaux cimentaires

Matériaux biologiques

Matériaux biosourcés

+

Priorité

+++

Pièces réalisées : Taille min. : 125mm // Taille max. : 125mm

11 Fiche Portrait du Carnot TSN

Carnot TSN

Éléments clefs de l'institut Carnot

TSN se distingue en se positionnant comme un acteur clé sur des sujets innovants de la chaîne numérique, tels que la data, l'IA, la blockchain, la cybersécurité, l'électronique embarquée, et les applications télécom et optiques

Localisation des établissements



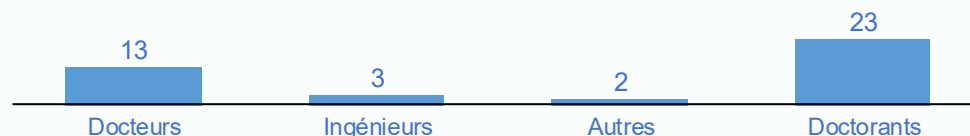
- CNRS – IMT Atlantique – ENSTA Bretagne – UBO – UBS – ENIB (1) / Lab-STICC
- CNRS - US – INSA S - ENGESS(2) / ICube
- IMT Atlantique – OPT - Arago
- IMT BS – UE – UPS(3) / LITEM

Contacts de l'équipe

- François Pineau – Directeur Carnot TSN – francois.pineau@imt.fr - 01 75 31 41 62
- Pierre Renaud – Professeur – pierre.renaud@insa-strasbourg.fr – 03 88 14 47 00
- Christian Person – Professeur – christian.person@imt-atlantique.fr – 02 29 00 13 19
- Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye – Professeur – jl.debougrenet@imt-atlantique.fr - 02 29 00 13 82
- Grazia Cecere - Professeur – grazia.cecere@imt-bs.eu - 01 60 76 47 84

Chiffres clés

Employés FA (permanents et doctorants) (ETP)



15 ans d'antériorité des activités de recherche du Carnot dans la FA

92 ans d'ancienneté cumulée des équipes

300 k€/an alloués à la FA hors investissement

Echelle de TRL : 1 à 4 (*moyenne de tous les établissements*)

25 projets scientifiques financés depuis 2017

1,25 M€ d'équipements dédiés à la FA

+25 machines (SLA, SLS, SLM, FDM, Polyjet, LDM silicone ...)

Chaîne de production LTCC complète (broyeur planétaire à billes, banc de coulage, laser de découpe, sérigraphieuse, presse, four statique + microcableuse + machine flip chip+bancs de mesures RF 0-170 GHz); banc de métallisation

Phototraceurs, machine de réplcation par imprint, impression laser femto, lasers femto de puissance avec platines mécaniques de précision, impression 2PP & MPP (polymérisation à 2 photons, polymérisation multi-photons parallélisée)

139 publications scientifiques en matière de FA

6 brevets possédés sur la FA

(1) Lab-STICC est sous la tutelle de CNRS, IMT Atlantique, ENSTA Bretagne, Université de Bretagne Occidentale, Université de Bretagne Sud, ENIB

(2) ICube est sous la tutelle de CNRS, Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, ENGESS

(3) LITEM est sous la tutelle de IMT BS : Institut Mines-Télécom Business School, Université d'Evry, Université Paris Saclay

Carnot TSN

Expertises de l'institut Carnot

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert international	Calcul/simulation multiphysique; Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle; Conception multimatériaux / matériaux architecturés; Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS); Règles de conception en lien avec les procédés FA; Optimisation topologique / multiphysique; Design FA 4D; Hybridation technologique; Outil expert aide à la décision / choix procédé; Reverse engineering
Matériaux	Expert international	Polymères photo-réliculables (résines, mélanges); Matériaux architecturés / méta-matériaux; Maitrise des concentrations; Obtention / production de poudres
Fab. 3D	Expert international	Interaction énergie / matière; Simulation et modélisation des procédés / Simulation métallurgie du composant / Echelle micromeso-macro; Développement / Effet des paramètres opérationnels; Règles de conception des pièces finies; Monitoring du procédé & traitement de données associées; Capacité, répétabilité, reproductibilité; Automatisation; Adaptation du process pour multimatériaux
Post-traitement	Maitrise	Déliantage ; Frittage
Contrôles et caract.	Expert international	Caractérisation matériau et microstructure; Caractérisation des états de surface; Autres caractérisations (électrique, thermique ...)
HSE	-	-
Chaine numérique	Expert international	Exploitation des données; Continuité numérique / Traçabilité numérique ; Protection des données; Format des données; Jumeau numérique
Normalisation	-	-
Impact env.	Expert national	Formulation de matériaux recyclés / recyclables
Acc. À l'intégration	Expert national	Conduite du changement ; Diagnostic ; Business model ; Benchmark

Carnot TSN

Expertises de l'institut Carnot

Technologies

	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA, 2PP, MPP	Polymères, Céramiques, Verre
Projection de matière	Polyjet	Polymères
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre	SLM	Métaux
Extrusion de matière	FDM	Polymères (dont silicone)
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies	LTCC	Céramiques, Métaux

Matériaux

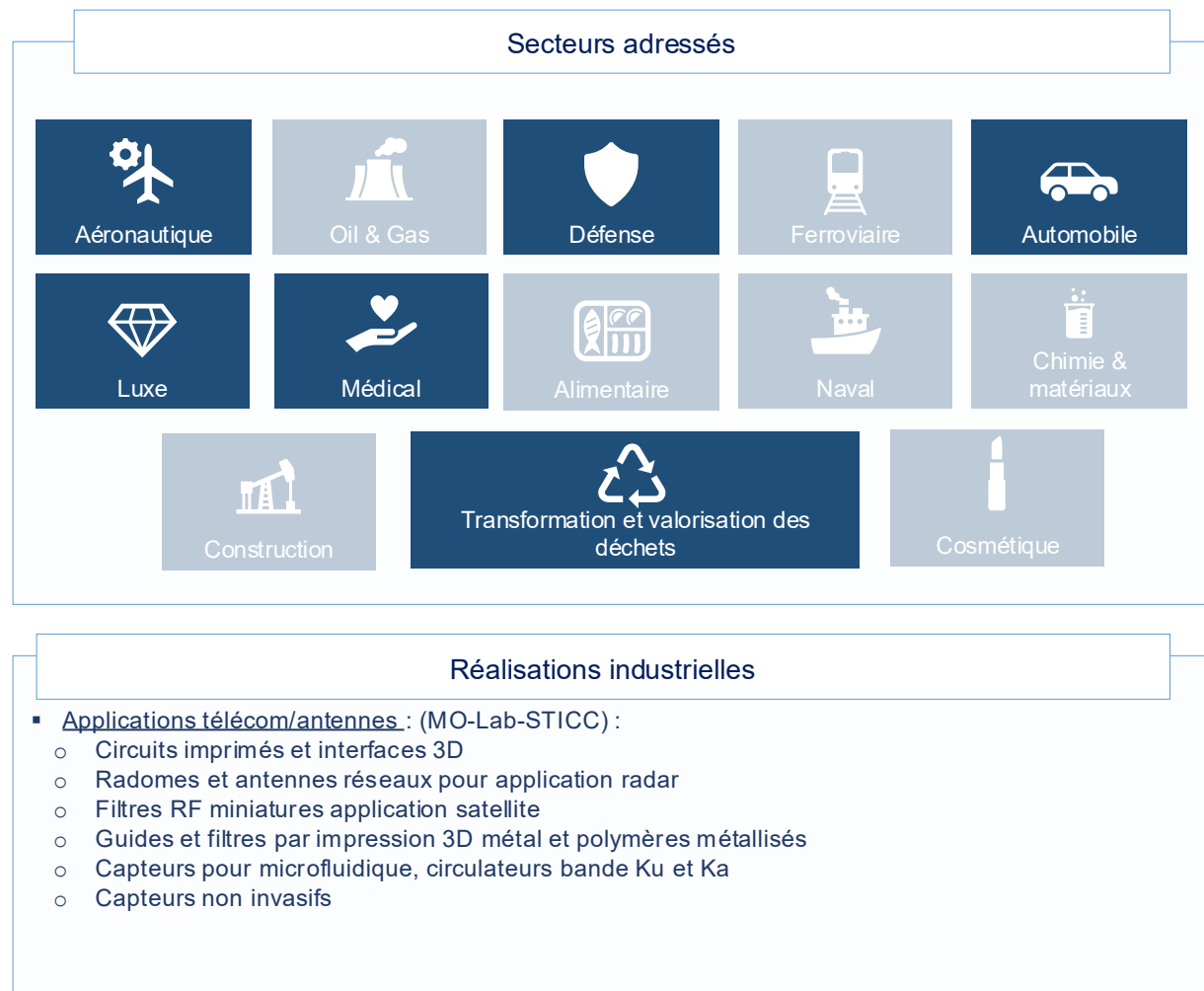
Polymères et composites	
Métaux	
Céramiques et verres	
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+
Priorité
+++

Pièces réalisées : Taille min. : 100 nm // Taille max. : 65 cm

Carnot TSN

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot



Réalisations scientifiques et techniques

- Développement de céramiques co-cuites à basse température LTCC sur plusieurs axes : très haute fréquence, miniaturisation, spatiale, collaboration avec TU Ilmenau
- Développement de chaînes de métallisation pour polymères imprimés en 3D
- Solutions d'interfaces entre circuits imprimés et structures 3D basées sur procédés de FA
- Composants de micro-optique réfractive ou diffractive, procédé de réplication, passage naturel à la méta-structuration de surface
- Emploi de matériaux biocompatibles photosensibles
- Robotisation de procédés: dépose par bras anthropomorphe, FA silicone supervisée
- Conception pour la FA polymère multi-matériaux pour la robotique, conception pour la FA silicone
- Innovation par la FA : interconnexions, conductivité

Perspectives pour l'avenir

Champs de recherche, investissement et équipements

- Domaine Télécom/Antennes/Capteurs
 - Développement de compétences sur coulage de bandes, création des encres, matériaux biosourcés pour la technologie LTCC
 - Montée en expertise sur la conception/analyse des dispositifs combinant FA et optimisation du design par IA
 - Interfaces entre composants mis en oeuvre par FA & circuits actifs/passifs flex ou multimatériaux (LTCC, céramique/métal épais ...)
 - Hybridation de la FA avec des solutions technologiques conventionnelles, intégration de matériaux fonctionnalisés, impression 4D, fiabilisation

Carnot TSN

Réalisations et perspectives d'avenir du Carnot

Réalisations industrielles (suite)

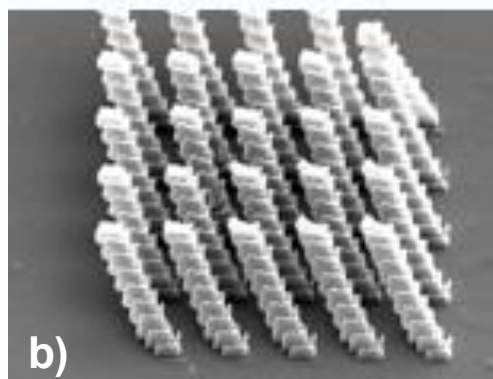
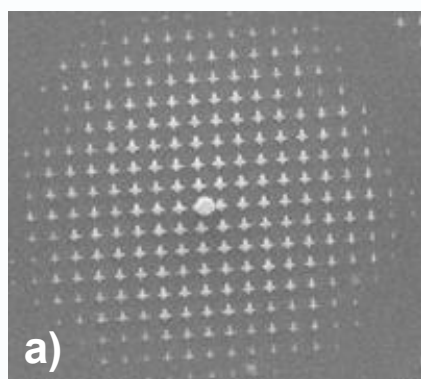
- Applications optiques (OPT – Arago) :
 - Méta-surfçage de composants optiques (guides, lentilles etc.)
 - Hologrammes de sécurité (passeport, devises)
 - Illumination structurée (lecteur code-barre, usinage laser, vision 3D)
 - Affichage tête haute + holographique (application automobile et défense)
 - Réalisation d'implants méta-structurés (cornée et cristallin)
- Applications packaging et santé (Icube);
 - Conception de packagings innovants pour l'industrie du luxe et de la parfumerie
 - Prototypage de lentilles pour industriel de l'optique
 - Réalisation de maquettes et outillages de production pour des solutions de monitoring en e-santé
 - Etudes de faisabilité pour dispositifs d'assistance à la chirurgie

Perspectives pour l'avenir (suite)

Champs de recherche, investissement et équipements

- Domaine optique appliquée (OPT – Arago);
 - Modélisation conception de méta-optiques et de méta-formes
 - Holographie vectorielle, manipulation du moment angulaire orbitale de la lumière, pour l'imagerie haute résolution, la projection holographique et les communications optiques.
 - Intégration (compatibilité) de méta-surfaces avec des dispositifs semi-conducteurs
 - Mise en place d'une filière de fabrication industrielle
- Design et Fab.3D/Procédés (iCube):
 - Supervision
 - Impression 3D silicone : génération de trajectoires pour dépose non-planaire
 - Conception pour la FA en contexte médical
 - Méthodologie d'innovation par la FA
 - Modélisation et réalisation de mousses produites par FA

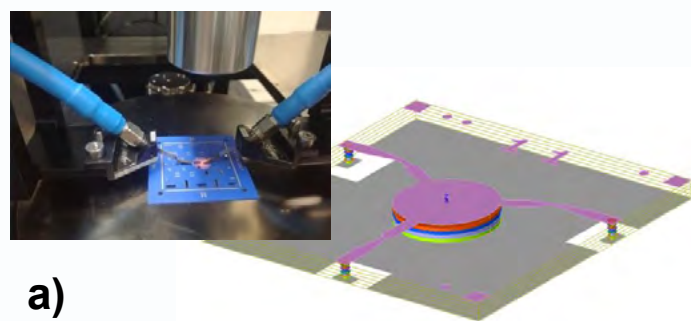
Carnot TSN Equipements & Moyens emblématiques



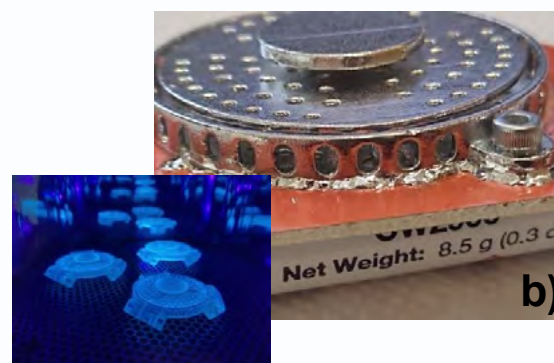
- a. Méta-lentille de Berry-Pancharatnam,
- b. Réseau de méta-atomes dans le visible (rouge)
- c. Face avant de la machine multi-photon parallèle de fabrication de méta-surfaces



Applications optiques : Filière de méta-structuration de surface NANOSHAPE développée par IMT Atlantique – OPT – Arago . Exemple de réalisation

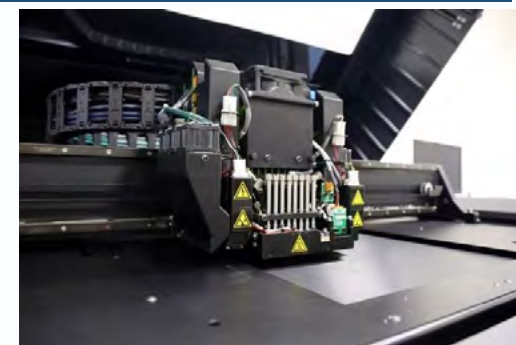


a)



b)

Applications télécom : (a) Micro-circulateur bande Ku en LTCC ; (b) Antenne multi-mode par FA polymère métallisé – Développements Lab-STICC



FA multi-matériaux par photopolymérisation (système J826) exploité par Icube pour développer des technologies pour la robotique (robot imprimé; structure ou actionnement) – Application à l'assistance à la médecine et la chirurgie

Carnot TSN / CNRS – IMT Atlantique – ENSTA Bretagne – Université de Bretagne Occidentale – Université Bretagne Sud – ENIB / Lab-STICC (UMR 6285) Expertises à l'échelle des établissements - Compétences

Chaine de valeur		
Maillon	Niveau d'expertise	Compétences
Design	Expert national	Combinaison de fonctions / Optimisation multifonctionnelle; Calcul / Simulation multiphysique; Hybridation technologique; Outil expert aide à la décision / choix procédé; Règles de conception en lien avec les procédés FA; Optimisation topologique / multiphysique ; Modélisation multi-échelle (structures lattices, TPMS); Reverse engineering
Matériaux	Connaissance	Matériaux architecturés / méta-matériaux; Obtention / production de poudres
Fab. 3D	Expert national	Interaction énergie / matière; Simulation et modélisation des procédés / Simulation métallurgie du composant / Echelle micro-meso-macro; Développement / Effet des paramètres opérationnels; Règles de conception des pièces finies; Monitoring du procédé & traitement de données associées; Capacité, répétabilité, reproductibilité; Automatisation; Adaptation du process pour multimatériaux
Post-traitement	Maîtrise	Déliantage ; Frittage
Contrôles et caract.	Connaissance	Autres caractérisations (électrique, corrosion, thermique, ...)
HSE		
Chaine numérique	Connaissance	Jumeau numérique
Normalisation		
Impact env.		
Acc. À l'intégration	Connaissance	Benchmark

Carnot TSN / CNRS – IMT Atlantique – ENSTA Bretagne – Université de Bretagne Occidentale –
Université Bretagne Sud – ENIB / Lab-STICC (UMR 6285)
Expertises à l'échelle des établissements – Technologies et matériaux

Technologies

	Procédés comm.	Matériaux maîtrisés
Photopolymérisation	SLA	Polymères, Polymères chargés céramique ou verre
Projection de matière		
Projection de liant		
Fusion sur lit de poudre		
Extrusion de matière		
Dépôt de matière sous éner. conc.		
Stratification de couches		
Combinaison de technologies	LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics)	Céramiques et métaux

Matériaux

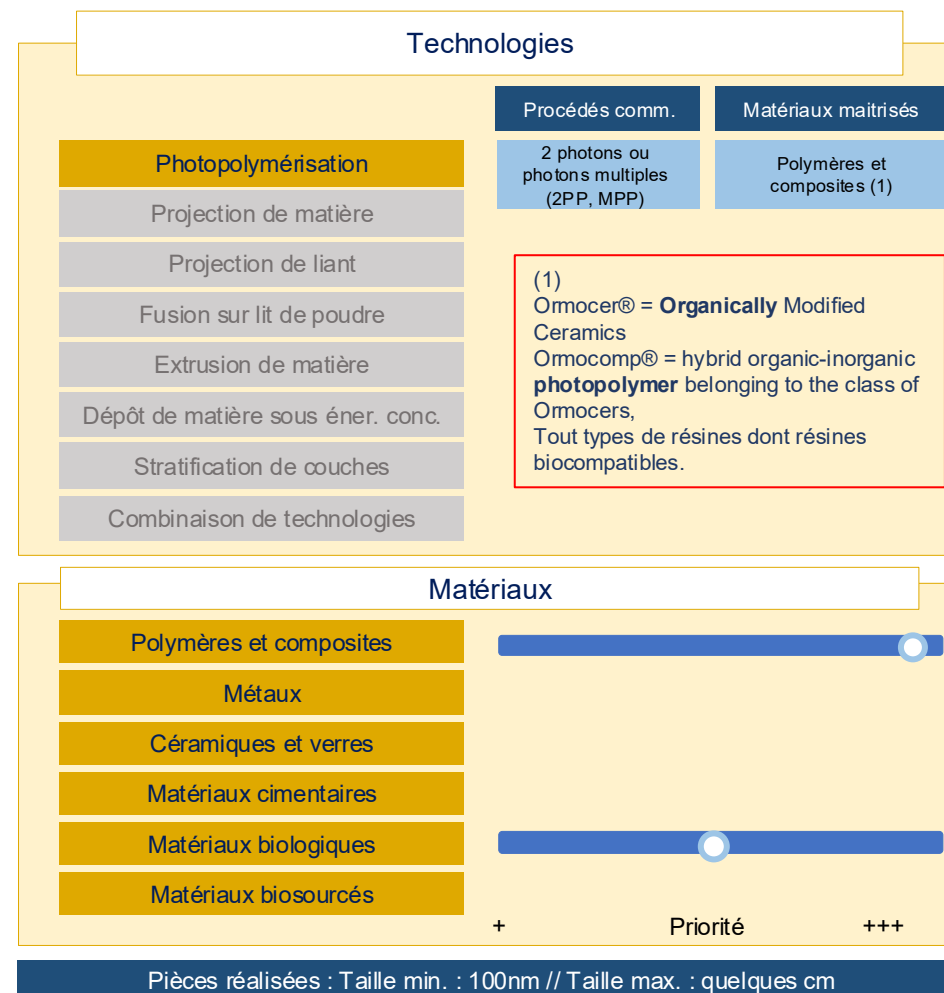
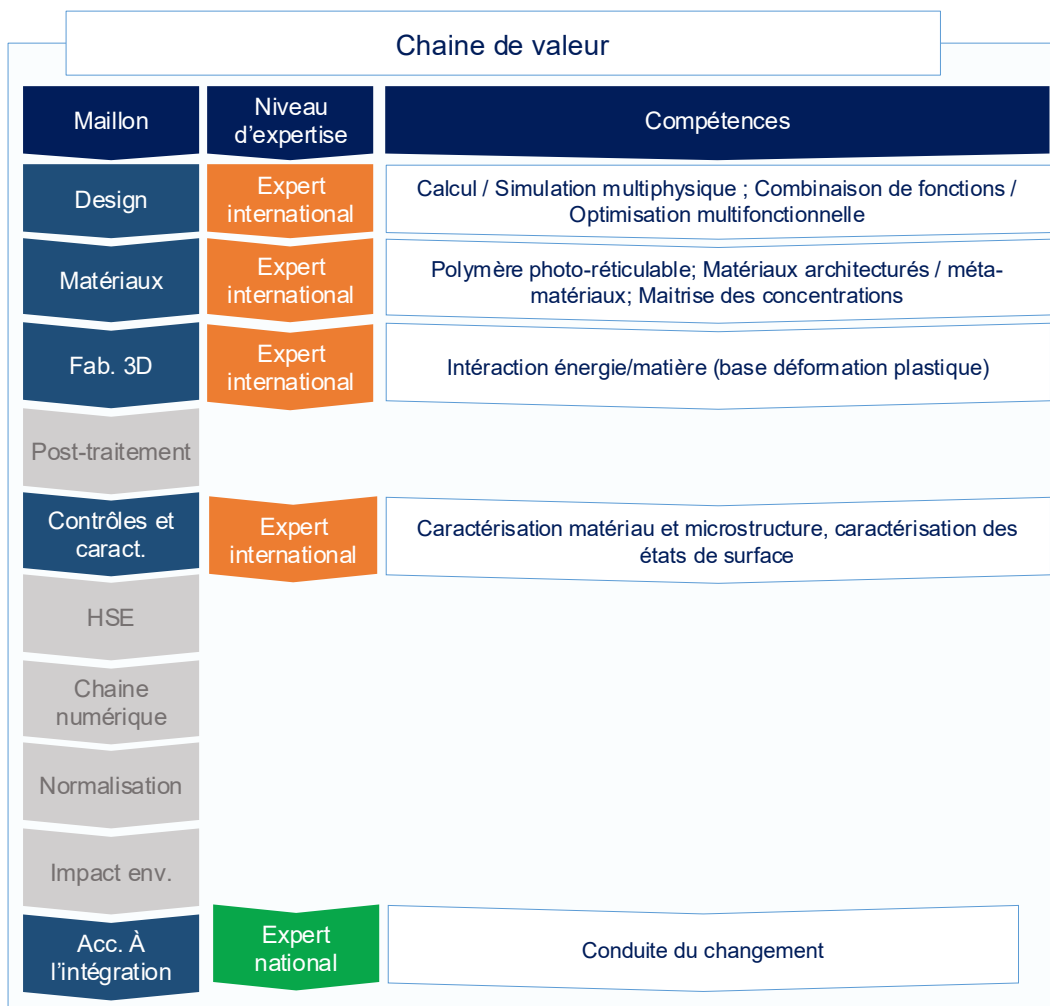
Polymères et composites	<input type="range"/>
Métaux	<input type="range"/>
Céramiques et verres	<input type="range"/>
Matériaux cimentaires	
Matériaux biologiques	
Matériaux biosourcés	

+
Priorité
+++

Pièces réalisées : Taille min. : quelques centaines de μm // Taille max. : quelques cm

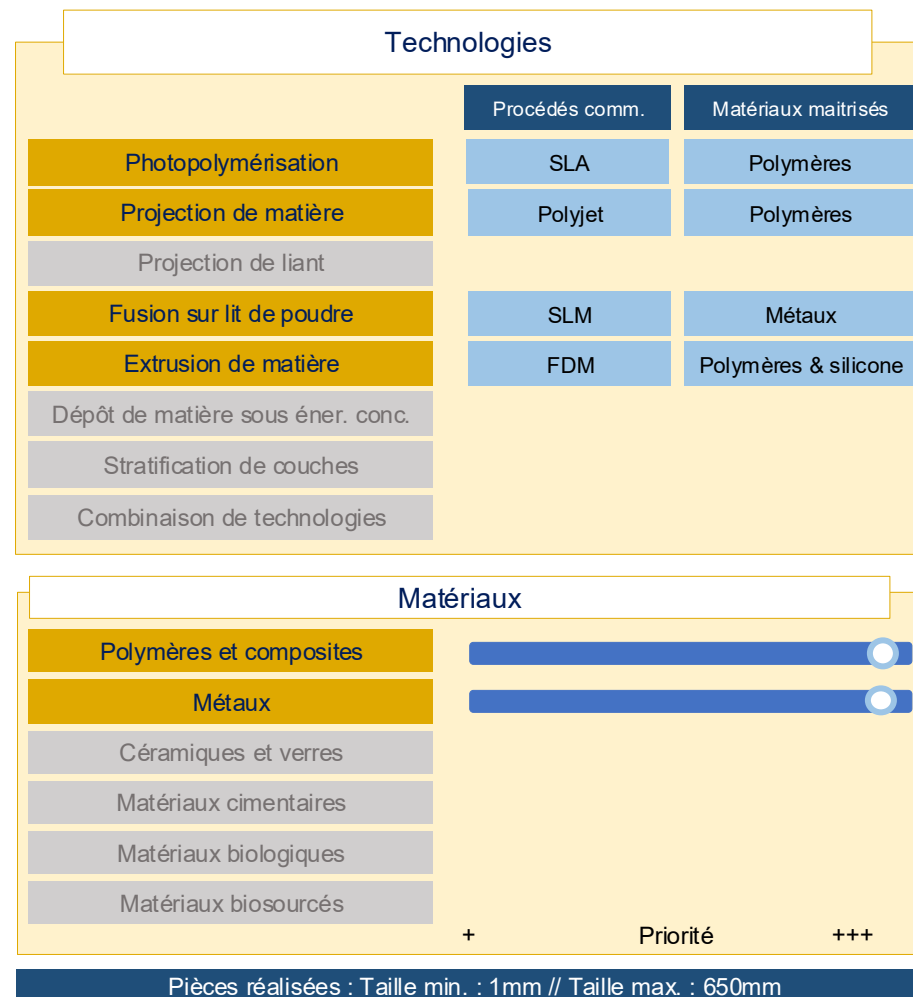
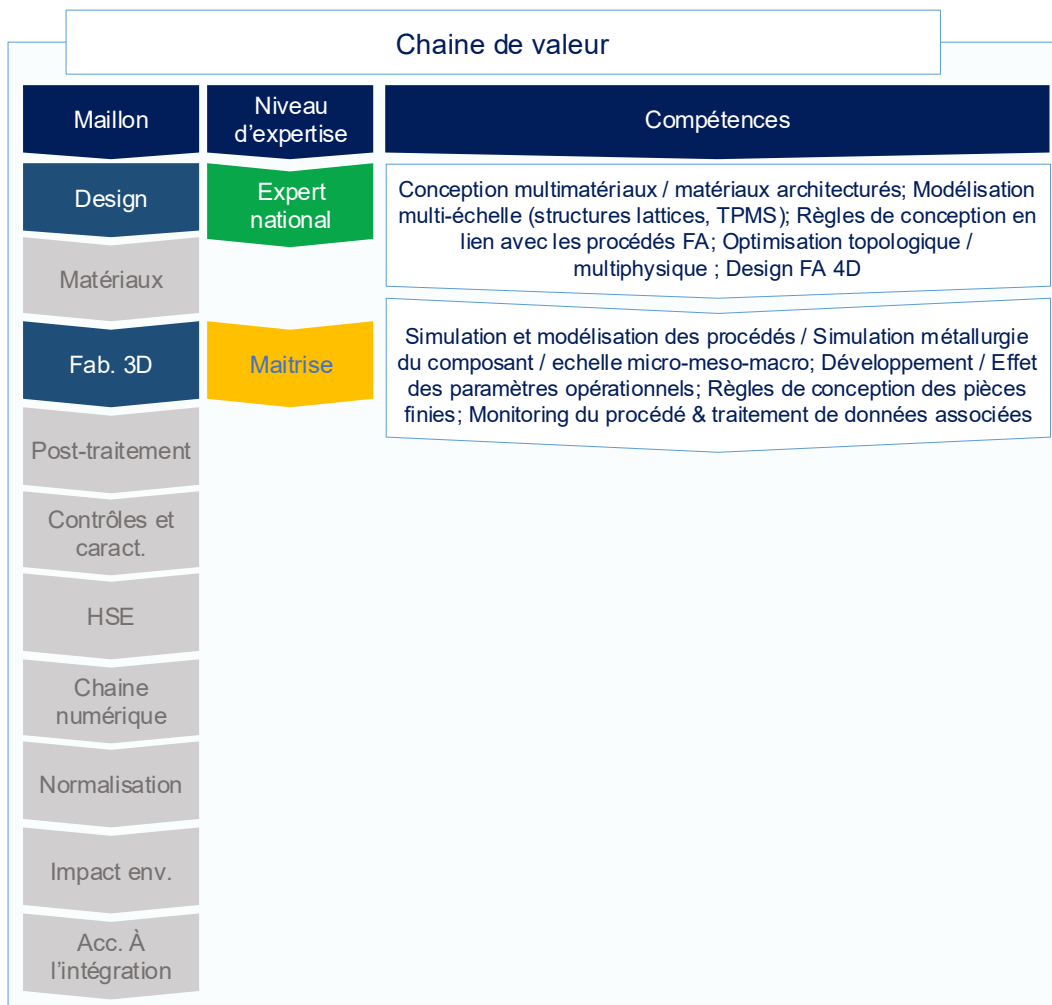
Carnot TSN / IMT Atlantique / Département d'Optique (OPT) / Plateforme Arago

Expertises à l'échelle des établissements



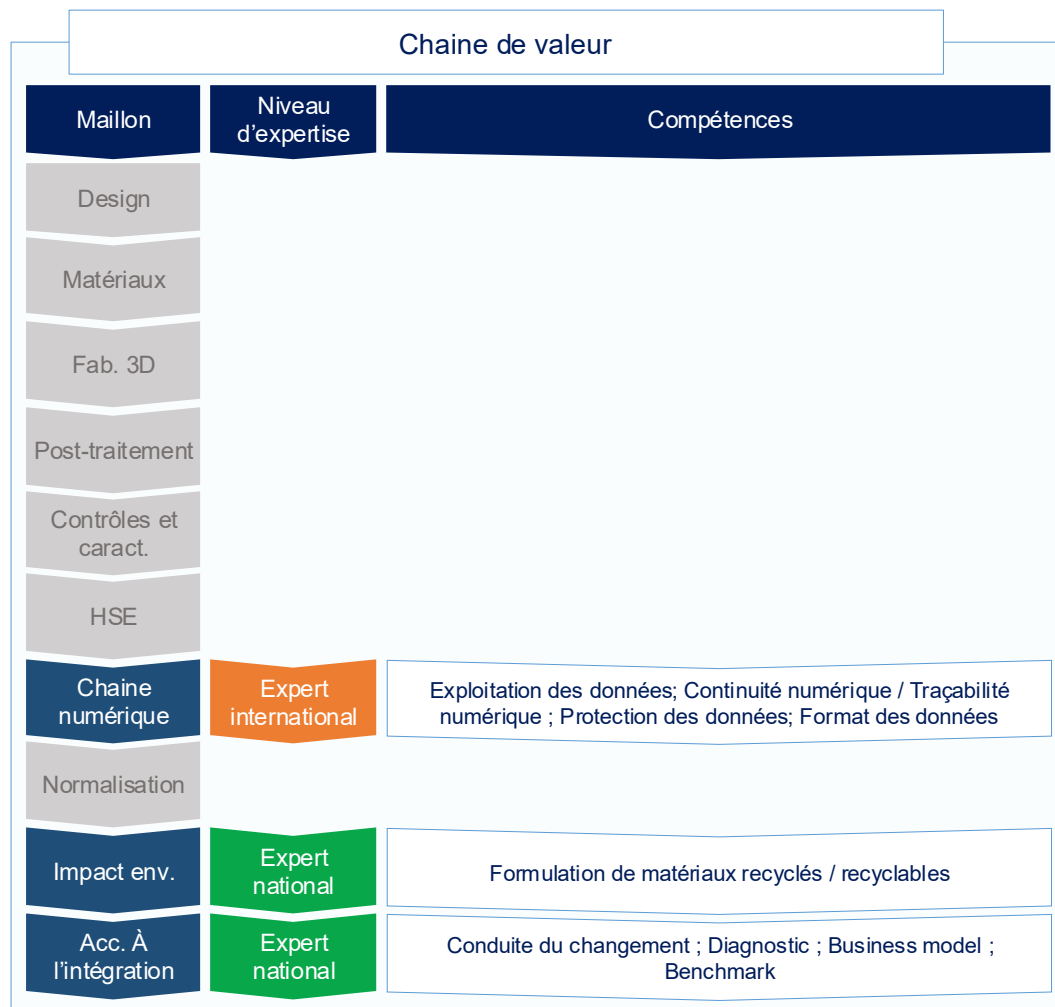
Carnot TSN / Université de Strasbourg – CNRS – INSA Strasbourg – ENGEEES / ICube – UMR 7357

Expertises à l'échelle des établissements



Carnot TSN / IMT Business School – Université d'Evry – Université Paris Saclay / LITEM - EA 7363

Expertises à l'échelle des établissements





2505-19 - © P-H Claudel/Treizeheuresing/Cetm - © Pixel_B - © AdobeStock DigitalSpace - © AdobeStock MjAku - © Cetim

