



Pr Claude BARRIERE  
Président du Directoire de  
CIRTES, Président d'Inori



Dr Cyril PELAINGRE  
Responsable R & D procédé au Cirtes



Guillaume EZO'O  
Chargé de projets CM2T



Jean-Paul CHOBOUT  
Directeur CM2T, Président de  
l'ATF

### Le concept de fabrication additive

Issue d'activités de recherche menées depuis le début des années quatre-vingt, une nouvelle génération de technologies de fabrication dites « de fabrication additive » (FA ou *Additive*

# La Fabrication Additive par Stratoconception® pour les outillages de fonderie - applications industrielles et R&D

*Manufacturing* (AM)) est en passe de révolutionner non seulement le monde industriel mais également les rapports et les attentes des consommateurs. En effet, les nouvelles perspectives offertes par ces technologies augmentent la sensibilité de ces derniers envers les produits fabriqués, notamment en ce qui concerne leur adéquation avec leurs exigences en termes de diversité de design, de personnalisation ou bien encore de fonctionnalités. Dans l'industrie, les nouvelles perspectives sont directement liées à des gains de performances industrielles, à des gains de compétitivité. L'ingénieur et le concepteur d'aujourd'hui disposent de solutions lui permettant non seulement de réduire le temps de mise sur le marché de nouveaux produits mais également d'optimiser leur coût de fabrication ainsi que le fonctionnement en service de ces nouvelles pièces et outillages.

La fabrication additive englobe trois concepts fondamentaux. Le Prototypage Rapide (*Rapid Prototyping* ou RP) qui fut le premier concept à apparaître dès la fin des années quatre-vingt. Il permet principalement la fabrication, dans des temps très court, de pièces prototypes très complexes. Le deuxième concept a été le concept d'Outillage Rapide (*Rapid Tooling* ou RT) apparu naturellement dès 1996. Il s'agit d'utiliser les procédés de

fabrication additive pour réaliser directement des outillages, pour fabriquer des pièces bonne matière et bon procédé à l'aide des grands procédés industriels de la plasturgie, de la fonderie, de la mise en forme par emboutissage... Une troisième voie est apparue début des années deux mille, celle de la Fabrication Directe (*Direct Manufacturing*). Il s'agit maintenant de réaliser directement (sans aucun moule ou modèle intermédiaire) de petites séries de pièces grâce au procédé de FA. Le présent article s'attachera aux apports de ce deuxième concept d'Outillage Rapide en fonderie.

### Présentation du procédé de Stratoconception

#### Positionnement du procédé dans le domaine de la FA

Dès le milieu des années quatre-vingt-dix, les sept brevets de base explicitant sept principes physiques d'addition de matière étaient déjà déposés. Ainsi, ce sont ces sept principes qui permettent de classer, aujourd'hui, les nombreux procédés de Fabrication Additive suivant sept grandes familles (suivant la norme ISO 17296-2) :

1. polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser,
2. projection de gouttes de matériau,

3. projection d'un liant sur un substrat de type poudre,
4. solidification de poudre sous l'action d'une source d'énergie de moyenne à forte puissance (laser ou faisceau d'électrons),
5. projection de poudres (ou fusion de fil) dans un flux d'énergie (laser, plasma, Cold Spray),
6. fusion de fil au travers d'une buse chauffante,
7. assemblage de couches à partir de feuilles ou de plaques découpées.

La famille procédant par assemblage de couches réalise les objets à partir de matériaux solides qui peuvent prendre la forme de feuilles fines ou de plaques épaisses. Ces techniques additives procèdent par découpage et assemblage ou bien assemblage puis découpage de ces feuilles. Le procédé de Stratoconception appartient à cette famille et met en œuvre des matériaux de différentes natures disponibles en plaques épaisses.

Les différents principes physiques se différencient suivant la nature de leur matériau de base, suivant leur méthode de solidification mais également suivant leurs principales performances qui en découlent. Ainsi, le tableau, ci-dessous, résume les principales caractéristiques présentées par chacune des sept grandes familles de procédés et permet de déduire les principales applications et domaine d'application de chacune d'elle.

### Le procédé de Stratoconception

#### Les origines des travaux - le procédé breveté

À la fin des années quatre-vingt, ce sont les travaux de recherche du Professeur Claude Barlier qui sont à l'origine du procédé additif breveté de Stratoconception®. Pour développer ses travaux, en 1991,

il crée CIRTES à Saint-Dié-des-Vosges. Depuis cette date, l'équipe de recherche de CIRTES travaille à la mise au point du procédé original et au développement des logiciels. Dix-neuf brevets de base et huit marques ont été déposés à l'international (France, Europe, Etats-Unis, Canada, Chine et Japon).

#### Le principe de base du Procédé breveté

Le procédé de Stratoconception® est le procédé de fabrication additive (initialement appelé prototypage rapide) qui permet la fabrication d'une pièce 3D, par addition de couches solides, directement à partir du tranchage d'un fichier numérique.

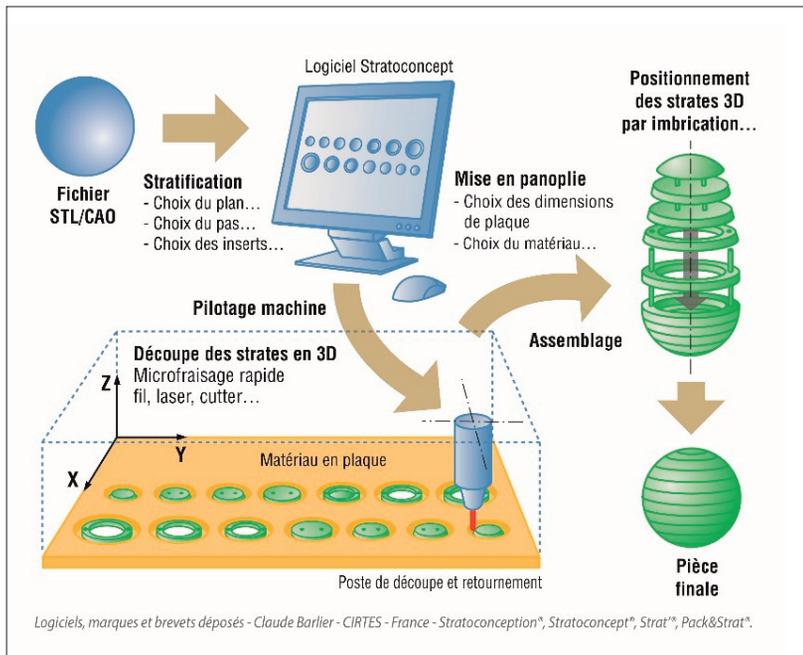
Il consiste à décomposer automatiquement la pièce en une série de couches élémentaires complémentaires 3D appelées strates, dans lesquelles sont placés des éléments de positionnement.



### Tableau comparatif des différentes familles de procédés

	Petites pièces	Moyennes pièces	Grandes pièces	Outillages	Nombre de matériaux	Qualité de finition	Originalité / point fort
Polymérisation d'une résine Stéréolithographie	++	+		-	-	++	Précision des détails, transparences
Projection de goutte de matériau	++	+		-	-	+	Précision des détails
Projection d'un liant sur poudre	++	+		-	-	-	Rapidité, couleurs directes
Solidification de poudre	++	+		+	+		Matières proches plastiques, matières métalliques denses
Projection de poudre	-	++	+	++		-	Santé matière, possibilité de grandes pièces et de rajout sur pièces existantes
Fusion de fil FDM	+	++	-	-	-	-	Prix de revient très bas. Applications grand public
Assemblage de couches solides Stratoconception	-	+	++	++	++	++	Nombreux matériaux non propriétaires. Possibilité de très grandes pièces et outillages.

Tableau comparatif des différentes familles de procédés (Fabrication Additive, du Prototypage Rapide à l'impression 3D ; Dunod ; septembre 2015)



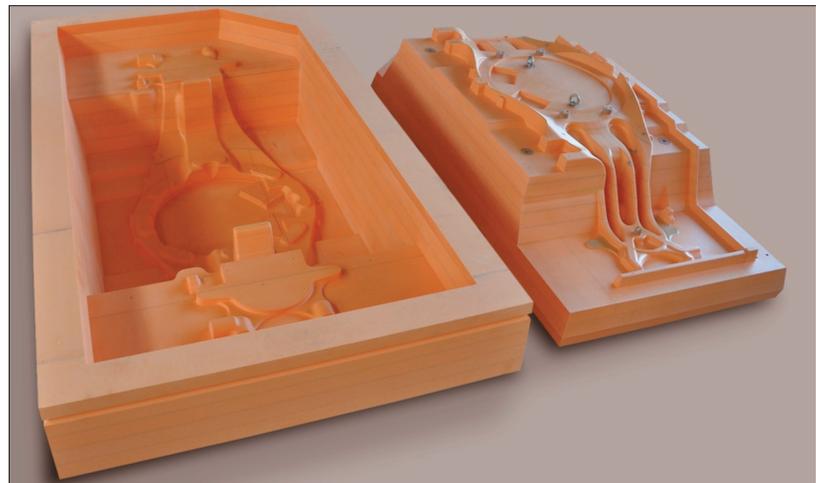
Chacune de ces strates est directement mise en panoplie, puis fabriquée par micro-fraisage rapide, par découpe laser, par découpe au fil, ou par tout autre moyen de découpe à partir de tous matériaux en plaques. Toutes ces strates sont ensuite positionnées par des inserts, des pontets sécables ou par des éléments d'imbrication, dans le cas de pièces à parois minces, puis assemblées afin de reconstituer la pièce finale. L'assemblage des strates est pris en compte dès la conception afin d'assurer la tenue aux contraintes mécaniques pendant l'utilisation.

Dans certains cas, il est également possible d'incorporer dans les strates des canaux de régulations, des cellules thermiques, des busages, voire d'intégrer des capteurs.

Le procédé est rapide et sans limitation de forme, de matériau ou de taille, il est particulièrement adapté aux pièces de moyennes et grandes dimensions. Il peut être utilisé aussi bien pour la fabrication de pièces mécaniques, de maquettes, de modèles et aussi d'outillages. Il trouve donc des applications en prototypage, en outillage et en fabrication directe pour tous les secteurs d'activité :

automobile, aéronautique, énergie, électroménager, flaconnage, verrerie, cristallerie, médical, sanitaire, architecture, mobilier, sculpture, design... Il permet également de réaliser des œuvres d'art, de moyennes et grandes dimensions et plus récemment des emballages 3D.

L'un des concepts le plus porteur pour le procédé de Stratoconcept est celui de l'outillage rapide notamment pour les domaines de la forge, la plasturgie, la verrerie, et plus particulièrement pour le domaine d'application industriel privilégié de la fonderie.



Plaque modèle en Strato Résine PU 2000 x 1000 x 400mm (Fonderie de BROUSSEVAL et MONTREUIL)

## Applications actuelles en fonderie

### Domaine d'application

En fonction du type d'outillage et de l'application visée, les matériaux constituant les outillages réalisés par Stratoconcept® diffèrent, ainsi pour :

#### 1. la fonderie sable

- a. réalisation de modèles permanents
  - l'outillage sera en PSE (Polystyrène exposé) pour la réalisation de pièce unitaire ou de très petite série,
  - en bois (bouleau de Finlande) ou en planche usinable moyenne densité (LAB650) pour la moyenne série,
  - en planche usinable haute densité (LAB950) pour les outillages dédiés à la grande série.

- b. réalisation de modèles perdus

- réalisation de modèle direct en PSE pour la réalisation de pièce unitaire ou de très petite série,
- réalisation d'outillage d'injection en aluminium ou en acier pour la fabrication en série de modèle perdu en PSE.

#### 2. la fonderie en moule métallique

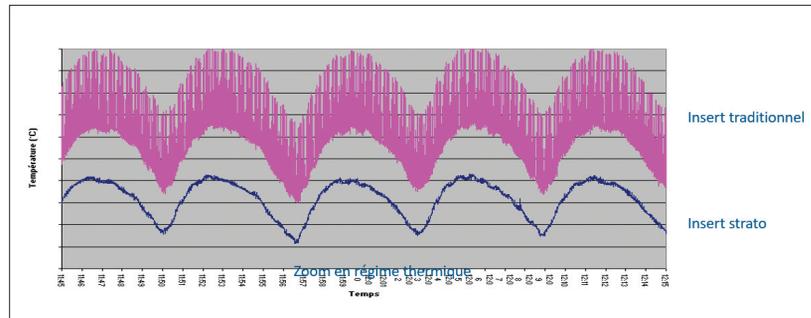
- a. l'outillage est réalisé en acier à outils dans les nuances conventionnelles de travail à chaud (H11, H13...).

Il s'agit donc ici de mettre en œuvre des matériaux déjà couramment utilisés par les modeleurs et moulistes traditionnels et, donc, dont le comportement est bien maîtrisé.

### Innovations au service de la fonderie

L'équipe de recherche de Cirtes travaille depuis de nombreuses années sur le développement de l'outillage rapide par Stratoconception® métal. Ces travaux ont abouti à des innovations majeures brevetées présentées ci-dessous et particulièrement bien adaptées aux outillages de fonderie.

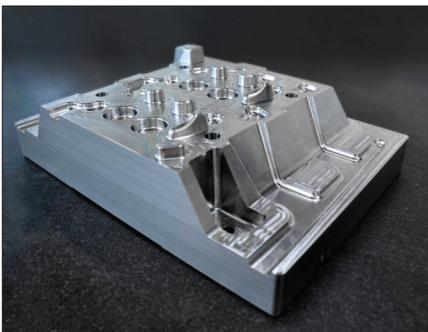
La première innovation concerne la réalisation de cellule thermique conformable. L'intérêt majeur pour l'outillage rapide réside dans la possibilité d'intégration au cœur même de l'outillage de fonctionnalités avancées telles que la chauffe ou le refroidisse-



Températures des inserts mesurées en production (résultats projet FUI PROMAPAL)

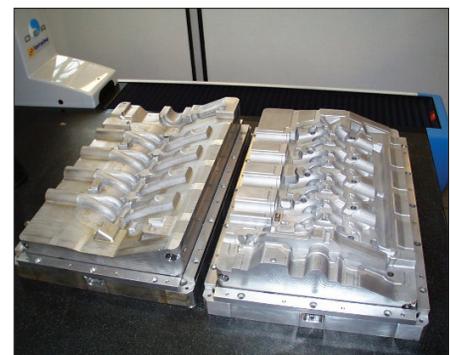
ment des empreintes permettant une réelle maîtrise du comportement thermique de ces dernières. Les études menées ont permis de mettre au point de véritables nappes de régulation conformable autorisant la gestion fine des différents échanges thermiques pendant les cycles de fabrications, ce qui apporte des gains de productivité et de qualité importants.

mentaire. Ils se retrouvent également sur les temps de fabrication des noyaux avec également de meilleurs taux de polymérisation des sables. Enfin, la gestion et la récupération des gaz de polymérisation sont facilitées, améliorant ainsi la protection des opérateurs et un moindre impact environnemental.

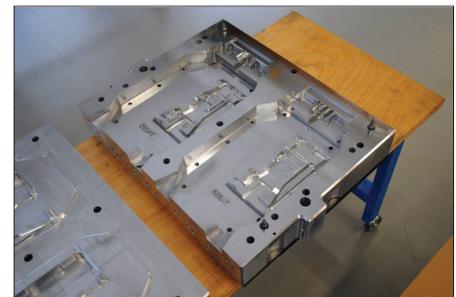


L'insert strato-conçu fini, image thermique des température mesurées (Sp2 : insert Strato) (images projet FUI PROMAPAL)

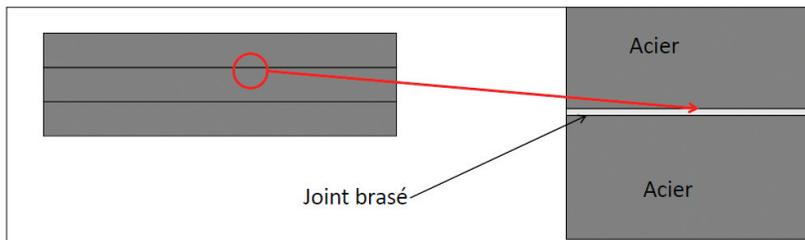
La deuxième innovation intéressant la fonderie en premier lieu a été initialement conçue par l'équipe R & D de Cirtes pour le passage de la vapeur de cuisson dans l'obtention de modèles en polystyrène expansé. Les busages ainsi aménagés aux inter strates peuvent être transposés à tous les procédés nécessitant des échanges de fluide entre la partie moulante et l'extérieur du moule (comme par exemple l'aspiration dans le cas du thermoformage...). Le placement et la fabrication de ces événements sont directement intégrés au procédé et, ainsi, ils sont réalisés en même temps que l'ensemble de l'outil. Ce type de busage conformable trouve des applications importantes en fonderie comme par exemple dans la fabrication des boîtes à noyaux. Les gains obtenus se retrouvent sur la fabrication des outillages qui ne doivent subir qu'une étape de perçage supplé-



Outillage d'injection strato PS pour PMP culasse moteur (PSA)



Boîte à noyau strato avec événements conformables (projet Eco Industrie ORIBAN)



## Strato métal

Les outillages métalliques strato-brasés résultent notamment d'une collaboration CIRTES / CM2T avec l'étude et la mise au point du concept d'assemblages de strates métalliques par brasage (programme R & D Promapal). Les outillages sont constitués, d'une part, de strates d'acier d'outillage d'épaisseurs variables ou constantes et, d'autre part, de joints brasés assurant la liaison des plaques entre elles.

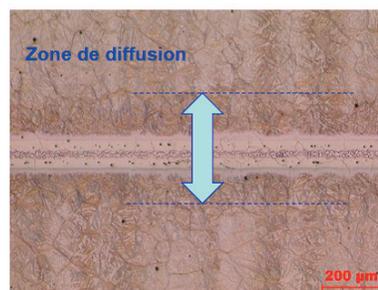
Le choix de la nuance d'acier se fait en prenant en compte les sollicitations en service (corrosion, fatigue thermomécanique, étamage, érosion...), les contraintes d'approvisionnement, les propriétés des brasures associées (température de fusion, caractéristiques mécaniques des joints brasés...) et leurs techniques de mise en œuvre. On utilise des nuances d'acier semblables à celles retenues pour les outillages de fonderie conventionnels :

1. nuances faiblement alliées de type 40CrMoV6, 55 NiCrMo7 pour les faibles niveaux de sollicitations thermomécaniques,
2. nuances fortement alliées de type X38CrMoV5-1, X38CrMoV5-3, X32 CrCo MoV3-3-3 à bas résiduels résistant à la thermomécanique et à l'adoucissement cyclique en fonderie par gravité ou fonderie sous pression,
3. nuances de type X20CoCrWMo 10-10-6-2 pour les fonctionnements à très haute température où les risques d'adoucissement sont importants.

Les tôles utilisées doivent impérativement présenter certaines caractéristiques :

1. grande planéité afin d'éviter les « manques » (zones non brasées) ; les joints brasés pouvant avoir des épaisseurs comprises entre 40 et 150 microns,
2. disponibilité (nuances, formats, quantité),
3. homogénéité microstructurale (absence de décarburation et/ou d'oxydation en surface, carbures massifs...).

Le choix de la nuance de brasure se fait en fonction des propriétés mécaniques finales des joints brasés ainsi que des températures de mise en œuvre qui doivent être compatibles avec les températures de traitement thermique de l'acier. On choisira une température de brasage proche de la température de trempe ou de celle du revenu de l'acier afin d'éviter les risques de grossissement des grains et d'obtenir des propriétés optimales côté acier d'outillage.

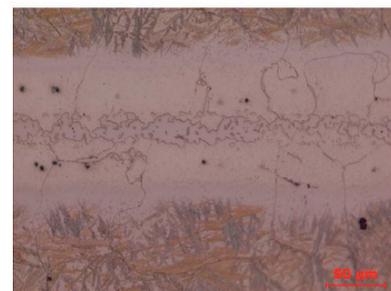


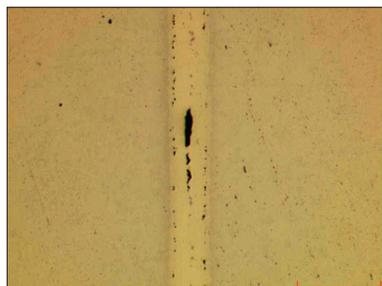
Réseau continu de précipités fragilisant

Les brasures peuvent être mises en œuvre sous forme de feuillets, de pâtes ou de poudres. Les feuillets disponibles jusqu'à des largeurs de 250 mm présentent l'avantage d'offrir des épaisseurs de joint constantes et des taux de porosité plus faibles. Cependant, seules certaines brasures sont disponibles sous cette forme et la pose peut être complexe pour des pièces de grandes dimensions avec des chevauchements ou des manques possibles après brasage. A l'inverse, les brasures sous formes de poudre avec liant ou de pâtes sont faciles à mettre en œuvre. Cependant, elles tendent à dégazer plus fortement lors de l'opération de brasage en four sous atmosphère contrôlée et conduisent à des taux de porosités plus importants pouvant jouer le rôle d'initiateurs de fissuration. Par ailleurs, elles ne permettent pas d'obtenir des épaisseurs de joint très homogènes ni faibles.

Les qualités attendues suivantes doivent être obtenues au niveau de chaque liaison :

1. absence de manques (figure ci-dessous),
2. épaisseur de joint maîtrisée et constante,
3. pas de défauts internes (fissure, porosité, inclusion),
4. pas de phases fragilisantes à l'interface dans le joint ou dans la zone de diffusion (composés inter métalliques),
5. pas de précipités ou maîtrise de la morphologie des précipités dans le joint brasé.





Manques et porosité Kirkendall

La stratégie de tranchage prend en compte la réparabilité des strates, notamment si l'on envisage de recourir au rechargement par soudage au niveau de la maintenance des outillages.

L'application de Stratoconception® au concept de l'outillage rapide pour la fonderie apporte bien sûr des gains de temps et des gains économiques sur l'outillage. Mais, au travers des innovations présentées ci-dessus, elle apporte également des gains en termes de performances industrielles au niveau qualité aussi bien qu'au niveau productivité. Il est également important de préciser que le concept « Strat brasé » s'applique également à des parties d'outillages (zones fonctionnelles par exemple) et pas forcément à la totalité de l'outillage. Dans ce cas, nous retrouvons la notion d'insert. Ces nouveaux outillages nécessitent un surcroît de conception qu'il faut savoir prendre en compte dès le lancement des études d'outillage. Afin d'innover également sur ces aspects conception, CIRTES s'est associé à Missler Software dans le cadre du projet C-FAST.

### Le Projet PIAVE C-FAST

Le projet labellisé PIAVE (Industrie du Futur) C-FAST (Conception pour la Fabrication Additive par Stratoconception® sous Top-solid) porte sur la création, pour le procédé de

Stratoconception®, d'une chaîne numérique unifiée continue et réversible de la conception en fabrication additive jusqu'au contrôle final. En effet, les procédés de FA demandent le transfert des fichiers issus des différents logiciels de conception assistée par ordinateur du marché, sous format de fichiers STL afin de communiquer avec les différentes machines de FA présentes en usine. Or, cette étape est réductrice car elle n'autorise plus les remontées d'informations issues de la fabrication pour modifier les modèles sources, et également la variabilité du modèle initial devant être reproduit suivant différentes dimensions, sans avoir à refaire tout le travail. L'objectif de C-FAST, qui permet de travailler en natif, est donc de supprimer cette étape de transfert par le format STL afin de fluidifier les échanges montants et descendants : piste d'économies, de gain de productivité et de qualité.

### Conclusion

La fabrication d'outillage par Stratoconception®, avec ou sans l'assemblage des strates par brasage, constitue une réelle alternative aux techniques de fabrication conventionnelles. Le procédé offre des avantages majeurs pour la réalisation de moules et d'outillages dans des secteurs très divers tels que la fonderie, mais aussi la forge, la plasturgie et le secteur verrier. Il permet notamment :

- l'amélioration de la thermique du moule (refroidissement, thermo (régulation) réduction des cycles de production et amélioration de la qualité des pièces produites),
- l'amélioration de la durée de vie des outillages,
- la modification des outillages facilitée grâce à la chaîne numérique,
- l'amélioration de l'efficacité des outillages (gazage des boîtes à noyaux, diffusion homogène de la vapeur de

cuisson des outillages polystyrène...),

- l'intégration de fonctions avancées lors de la réalisation du moule (capteurs),
- la possibilité d'adapter la durée de vie des outillages aux séries par une large gamme de matériaux compatibles avec cette méthode de fabrication,
- la possibilité d'adapter des nuances d'aciers selon les sollicitations du moule ou partie de moule (insert),
- le concept d'outillages éphémères permettant le stockage numérique des modèles, donc la sécurité des données et de ce fait réduisant l'emprise au sol dans le magasin outillages.

Le procédé est d'ores et déjà utilisé en fonderie à l'échelle industrielle pour la réalisation de boîtes à noyaux, de modèles perdus (polystyrène) et de moules permanents (bois, résine...). Les derniers développements portent sur la réalisation d'outillages métalliques destinés à être utilisés en fonderie par gravité et en fonderie sous pression. Ces procédés qui sollicitent fortement les outillages nécessitent la mise en œuvre de procédés d'assemblage très performants (par brasage notamment), permettant d'obtenir des inter strates de haute qualité, aptes à résister à des sollicitations thermomécaniques extrêmes.

### Présentation de CIRTES

CIRTES, société labellisée Structure de Recherche Contractuelle (SRC), est située depuis 1991 en Lorraine, au cœur du bassin industriel de Saint-Dié-des-Vosges. Elle possède également un établissement à Carmaux (S-O). CIRTES a pour objet de mener des contrats de R & D industriels autour de deux axes : la Fabrication Additive à partir de son procédé breveté de Stratoconception et la Fabrication Soustractive®, c'est-à-dire l'étude expérimentale de la coupe, à partir de son système breveté ACTARUS®.

Elle conduit également des missions d'innovation et de transfert de technologie pour l'intégration de la chaîne numérique de la Fabrication Additive et du DRP dans les entreprises PMI, ETI ainsi que des prestations de fabrication (faisabilité et qualification) à partir de ses propres procédés. Elle prend en charge la valorisation et la diffusion des PRODUITS issus de ses travaux de R & D, par la commercialisation d'une gamme de produits (logiciels, stations de travail, outils instrumentés, de contrats licences, de brevets, formation et *hotline*...). CIRTES propose également son expertise au travers de formations en Fabrication Additive et usinage avancé ou bien encore de missions de centre expert.

### Présentation CM2T

Le Critt METALL 2T (CM2T) est un Centre de Ressources Technologiques, labellisé CRT, membre de l'institut Carnot ICEEL. Né en 1988, CM2T réalisait historiquement des analyses déféctologiques, des études métallurgiques notamment pour les métiers de la forge et de la fonderie. Il accompagne des industriels des secteurs de la transformation des métaux dans le développement de leurs nouveaux produits. CM2T réalise également des caractérisations thermo-physiques pour alimenter des codes de calcul (Conductivité, Diffusivité, courbes TRC et TTT). A partir de 2002, CM2T s'est spécialisé dans la recherche de solutions anti-usure (alliages moulés, traitements thermiques, rechargements) et anti-corrosion notamment autour de la technologie de projection Cold Spray. Il travaille actuellement en partenariat avec le Critt TJFU sur des solutions innovantes en termes de préparation et nettoyage de surface par jets fluides hyperbares, de réparations performantes (pièces aéronautiques), fonctionnalisation des surfaces. CM2T a également collaboré

avec CIRTES pour l'étude et la mise au point métallurgique de l'assemblage brasé des outillages en Stratoconception® Métal.

Les travaux du CIRTES et de CM2T ont été, en partie, réalisés dans le cadre de plusieurs programmes R & D, notamment au cours du programme FUI Promapal associant également le laboratoire Ermep, le CTIF et trois industriels partenaires. Nous tenons à remercier les co-financeurs publics de l'Europe (fond Feder), de l'Etat (DGE, Direccte) et de la Région Grand-Est.



Tooling manufacturing by Stratoconception® process is a real alternative to conventional manufacturing technics. This Additive manufacturing process offers major advantages to the manufacture of molds and tools for a lot of sectors (plastics, glass, foundry), as it allows to:

- Improve the tooling efficiency (thermoregulation, core boxes gassing, homogeneous steam curing diffusion) in order to reduce the production cycles and increase the parts quality,
- Optimize tooling lifetime
- Simplify tools modifications through the digital chain integration,
- Integrate advanced functions during the mold manufacturing (sensors)
- Adapt tooling lifetime
- Digital store models, enabling a reduction on the physical space required for storing ephemeral tools

The process already has industrial applications in foundry for the production of core boxes, lost models (Polystyrene) and permanent master patterns (wood, resin ...). The latest developments concern the production of metal tools for gravity and die casting applications.