



**HAL**  
open science

## Apport de la fabrication additive à l'intensification des procédés

Laurent Falk, Jean-Marc Jean-Marc.Commenge@univ-Lorraine.Fr Commenge,  
Raphael Faure, Matthieu Flin

► **To cite this version:**

Laurent Falk, Jean-Marc Jean-Marc.Commenge@univ-Lorraine.Fr Commenge, Raphael Faure, Matthieu Flin. Apport de la fabrication additive à l'intensification des procédés. Les Techniques de l'Ingenieur, 2021, pp.BM7947. 10.51257/a-v1-bm7947 . hal-03875712

**HAL Id: hal-03875712**

**<https://hal.science/hal-03875712>**

Submitted on 28 Nov 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Apport de la fabrication additive à l'intensification des procédés

*Title : Contribution of Additive Manufacturing to Process Intensification*

par **Jean-Marc COMMENGE**

Fonction: Professeur à l'Université de Lorraine

Affiliation: Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

**Laurent FALK**

Fonction: Directeur de recherche CNRS

Affiliation: Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

**Raphael FAURE**

Fonction : Responsable d'équipe Conception et Fabrication

Affiliation : Campus Innovation Paris, Air Liquide R&D, 1 chemin de la Porte des Loges, 78354 Les Loges en Josas

**Matthieu FLIN**

Fonction: Coordinateur de projet R&D

Affiliation : Campus Innovation Paris, Air Liquide R&D, 1 chemin de la Porte des Loges, 78354 Les Loges en Josas

## **Résumé (~500 - 700 signes) : Résumé du texte - Résumé du texte**

L'intensification des procédés est un concept applicable à de nombreuses industries de transformation de la matière et de l'énergie. De nombreuses opérations unitaires sont toutefois limitées par les caractéristiques géométriques des équipements (réacteurs, échangeurs de chaleurs, mélangeurs, ...) qui leur sont associées. Les procédés de fabrication de ces équipements peuvent être une limite au développement d'appareillages plus complexes, pour atteindre des niveaux de compacité et d'efficacité supérieurs aux solutions existantes. Cet article a pour objectif de présenter et d'exemplifier les nouvelles opportunités offertes par la fabrication additive pour la conception et la réalisation d'équipements permettant l'intensification des procédés.

## **Abstract (~500 – 700 signs) : Text abstract - Text abstract**

*Process intensification is a concept applicable to many industries based on heat and mass transfer operations. Several unit operations are however limited by the geometric characteristics of the equipment (reactors, heat exchangers, mixers, etc.) associated with them. Manufacturing processes of the devices can be a limit to the development of more complex equipment, to achieve levels of compactness and efficiency higher than existing solutions. The objective of this article is to present and exemplify the new opportunities offered by additive manufacturing for the design and production of equipment allowing process intensification.*

## **Mots-clés (~ 3-4) :**

Intensification des procédés, fabrication additive, conception d'équipements

## **Keywords (~ 3-4) :**

*Process intensification, additive manufacturing, equipment design*

## **Table des matières**

<b>1</b>	<b><i>Intensification des procédés par modifications géométriques</i></b>	<b>4</b>
1.1	Impact de la dimension caractéristique	5
1.2	Agencement spatial des volumes et des surfaces	7
1.3	Formes complexes et optimisation topologique	10
<b>2</b>	<b><i>Les apports de la fabrication additive</i></b>	<b>13</b>
2.1	Introduction à la fabrication additive	13
2.2	Avantages et inconvénients des procédés de fabrication additive	14
2.3	L'intérêt de la fabrication additive pour le génie des procédés	16
<b>3</b>	<b><i>Exemples d'applications</i></b>	<b>22</b>
3.1	Echangeurs réacteurs métalliques pour la production d'Hydrogène (FAIR)	22
3.2	Autres exemples de réalisation	27
<b>4</b>	<b><i>Verrous et perspectives de la fabrication additive :</i></b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b><i>Conclusion</i></b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b><i>Glossaire</i></b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b><i>Sigles, Notations et Symboles</i></b>	<b>33</b>

## **Introduction**

L'intensification des procédés de transformation de la matière et de l'énergie est passée en moins de 20 ans de l'état de concept à la réalité industrielle. Telle que définie dans "*European Roadmap for Process Intensification*" l'intensification des procédés représente un ensemble de principes innovants souvent radicalement différents, dans la conception des procédés et des équipements. Les avantages significatifs concernent l'efficacité globale d'un procédé, caractérisée par une diminution des coûts opératoires et des coûts d'investissement, une réduction des rejets, et une amélioration notable de la sécurité des procédés.

Depuis l'émergence du concept dans les années 1980, ces principes ont trouvé plusieurs applications dans les domaines de la pétrochimie où de la chimie fine et en particulier en chimie pharmaceutique. Au-delà des concepts théoriques permettant de mieux appréhender les phénomènes physico-chimiques mis en jeu, il est indispensable de disposer de solutions technologiques innovantes pour fabriquer les équipements intensifiés. Grâce aux nouvelles techniques de fabrication, il est possible de réaliser des équipements aux géométries et dimensions associées qui permettent une augmentation drastique des transferts de matière et de chaleur tout en offrant une compacité importante des équipements tels que réacteurs, échangeurs de chaleur, mélangeurs, séparateurs, ... qui sont les équipements clés des procédés industriels.

Du point de vue conceptuel, on peut imaginer et dimensionner tous types d'équipements performants. Mais la réalisation pratique, notamment l'usinage et l'assemblage des pièces constitutives, selon la nature des matériaux, peut présenter de nombreuses limitations ne permettant pas de réaliser techniquement ou économiquement des géométries complexes. Si ainsi, il n'est pas possible de fabriquer un équipement compact avec une grande surface d'échange pour évacuer la chaleur dégagée par une réaction chimique, il sera nécessaire d'adapter les conditions de réaction, par exemple par dilution, pour réaliser la synthèse dans le réacteur moins performant. On conçoit ainsi que les limitations d'usinage et de fabrication des équipements entraînent de fait une limitation du potentiel d'intensification de ces équipements. C'est notamment le cas de l'intensification par modification géométrique, présentée dans cet article.

Depuis une quinzaine d'années, la fabrication additive offre de nouvelles opportunités pour la conception et la réalisation de ces équipements, en levant certains verrous propres aux méthodes traditionnelles de fabrication. Avec l'émergence de solutions de fabrication additive présentant des capacités et des productivités de fabrication augmentée, il est envisageable aujourd'hui de produire des équipements dont l'utilisation dans les procédés industriels peut être compétitive. La fabrication additive apparaît comme une technologie clé dans de nombreuses feuilles de route.

Cet article a pour objectif de présenter les avantages et les inconvénients de la fabrication additive pour l'intensification des procédés par modifications géométriques, d'expliquer comment la conception de tels équipements doit être revue et de détailler des exemples de réalisation pour la fabrication d'équipements, par fabrication additive, pouvant prétendre à l'intensification du procédé dans lequel ils sont utilisés. L'article aborde également les limitations actuelles à l'utilisation de ces nouveaux procédés de fabrication et les perspectives de développements envisagées pour les prochaines années. L'article fait ainsi le lien entre deux grandes rubriques des éditions Techniques de l'Ingénieur, l'intensification des procédés et méthode d'analyse durable et les procédés de fabrication additive.

# 1 Intensification des procédés par modifications géométriques

**L'intensification des procédés** représente un ensemble de principes innovants pour lever les limitations cinétiques, thermodynamiques et de transferts et les apports d'énergie, dans la conception des procédés et des équipements, visant à améliorer différents aspects comme l'efficacité, la compacité, la compétitivité, l'impact environnemental ou encore la sécurité de fonctionnement d'un procédé.

L'intensification des procédés a fait l'objet de différentes publications ces dernières années. On citera notamment une feuille de route européenne pour l'intensification des procédés [1] et on notera également différentes associations professionnelles animant régulièrement des groupes de travail sur ce sujet, comme la Société Française de Génie des Procédés (SFGP) et différentes associations européennes comme EUROPIC, dédiée à l'intensification des procédés ou encore European Federation of Chemical Engineering (EFCE).

La fabrication additive apparaît comme une technologie clé, dans de nombreuses feuilles de route, pouvant faciliter l'application des concepts d'intensification des procédés en libérant les règles de conception et en permettant de nouvelles géométries jusqu'alors non fabricables. A titre d'exemple, la Société Française de Génie des Procédés (SFGP) consacre une partie spécifique aux apports des procédés d'impression 3D pour le génie des procédés dans son livre blanc consacré à l'usine du futur [2]. L'article fait ainsi le lien entre deux grandes rubriques des éditions Techniques de l'Ingénieur, l'intensification des procédés et méthode d'analyse durable [3] et les procédés de fabrication additive [4].

A l'échelle d'un équipement dans lequel sont mis en œuvre des phénomènes physiques et chimiques de transformation de la matière et de l'énergie, il existe de nombreuses relations qui relient ces phénomènes à la géométrie précise de l'équipement. Par exemple, les volumes accessibles aux fluides impactent directement les temps de passage et donc la conversion chimique par des réactions homogènes, mais également les phénomènes gravitaires qui modifient les écoulements multiphasiques ou les phénomènes de mélange par turbulence. De même, les surfaces disponibles régissent les flux de transfert échangés à travers les parois pour l'apport ou l'évacuation de chaleur, les flux de matière pour les réactions hétérogènes et les forces de cisaillement qui induisent la dissipation d'énergie mécanique. La présence d'obstacles peut favoriser les phénomènes de transfert et stabiliser des écoulements, mais également induire du rétro-mélange néfaste à la sélectivité des réactions chimiques. Les changements de direction permettent de créer localement des écoulements de recirculation très utiles pour l'homogénéisation des conditions de réaction, mais augmentent aussi les pertes de charge et donc le prix des pompes et compresseurs, ainsi que l'énergie consommée.

Ces diverses interactions entre phénomènes et géométries sont complexes : leur

impact, positif ou négatif, dépend fortement du couplage entre phénomènes et de l'objectif visé. S'il n'existe pas de "règle du pouce" pour choisir a priori une géométrie optimale répondant à un objectif donné, il est certain que la réalisation de géométries précises et complexes, comme le permet la fabrication additive, permet très souvent d'augmenter la performance globale d'un système selon des critères variés (économique, énergétique, sécurité, rapidité de développement, etc.).

Les effets de la géométrie sur un système physico-chimique peuvent être classés selon 3 niveaux de complexité :

- L'impact direct de la dimension caractéristique, grandeur proportionnelle au rapport du volume sur la surface de l'équipement, sur la vitesse à laquelle se déroulent ces phénomènes et sur leurs prédominances relatives,
- L'agencement spatial global des volumes et des surfaces pour fournir en tout point de l'équipement les conditions favorables à la transformation,
- Le design local des géométries pour maximiser la performance en optimisant la forme précise des volumes et surfaces qui régissent cette transformation.

Alors que les deux premiers niveaux ont donné lieu à des approches méthodologiques (résumées ci-dessous) efficaces mais contraintes par les techniques de fabrication, la fabrication additive permet aujourd'hui d'unifier ces 3 niveaux et de proposer des géométries optimales et réalisables par fabrication.

## 1.1 Impact de la dimension caractéristique

Le premier niveau de complexité dans l'analyse des relations entre phénomènes et géométries peut être résumé par la dépendance qui existe entre la vitesse intrinsèque d'un phénomène et la dimension du volume (fluide ou solide) dans lequel il se déroule. Qu'il soit physique ou chimique, tout phénomène de transfert ou de transformation peut être associé à un temps caractéristique, défini comme le rapport de la quantité d'extensité (matière, chaleur, quantité de mouvement, etc.) transférée ou transformée sur la vitesse à laquelle cette extensité est transférée/transformée [5]. Ce temps caractéristique est une mesure de la vitesse de ce phénomène : les temps courts correspondent aux phénomènes rapides alors que les phénomènes lents sont représentés par des temps longs. Lorsque plusieurs phénomènes sont couplés, chaque phénomène peut être caractérisé par un temps, et des règles de couplage (série, parallèle, mixte) donnent accès au temps global d'opération.

Type de phénomène	Ordre de dépendance, n, entre temps caractéristique, $t_{op}$ , et dimension caractéristique locale, L : $t_{op} \sim L^n$
Réaction homogène (volumique)	0
Phénomène gravitaire	1/2
Réaction hétérogène de surface	1
Phénomène de tension de surface	3/2
Phénomène de transfert de matière, chaleur ou quantité de mouvement par conduction, diffusion ou convection	2

Tableau 1 - Relations entre temps caractéristiques et dimension de phénomènes physiques et chimiques

Le Tableau 1 liste les principaux phénomènes rencontrés en Génie des Procédés et leurs dépendances à la taille interne du système (canaux d'écoulement, notamment). Alors que les réactions homogènes (volumiques) ne dépendent naturellement pas de cette dimension (leur cinétique intrinsèque dépend essentiellement de la température et des concentrations locales), les phénomènes surfaciques de transfert varient très fortement : les transferts sont beaucoup plus rapides dans un système de petite dimension interne. Cette dépendance d'échelle explique très simplement l'intérêt des réacteurs microstructurés pour l'opération en conditions isothermes ou en régime chimique, puisque leurs faibles dimensions internes accélèrent davantage les transferts de chaleur et de matière que les réactions homogènes ou hétérogènes [6], [7].

L'exemple du réacteur-échangeur développé en section 3.1 illustre une application du choix de la dimension caractéristique en vue de l'accélération d'un phénomène de transfert de chaleur par rapport à une réaction hétérogène. Le temps caractéristique de la réaction hétérogène varie comme le rayon d'un canal, alors que le temps de transfert de chaleur varie comme le carré de ce rayon. Pour que la productivité ne soit pas limitée par l'apport de chaleur vers la réaction endothermique, le temps de transfert doit être inférieur au temps de réaction (donc plus rapide que la réaction): cette condition est satisfaite pour de faibles dimensions caractéristiques. La dimension nécessaire pour respecter cette "hiérarchie" est d'autant plus faible que la cinétique intrinsèque de la réaction est rapide : des dimensions submillimétriques peuvent ainsi devenir indispensables pour l'opération isotherme ou le contrôle de réactions rapides et fortement endo-/exothermiques.

Ces temps caractéristiques expliquent aussi, par exemple, les effets de coincement ("quenching") générés dans des arrête-flammes structurés dont les faibles dimensions internes favorisent les transferts de chaleur pour le refroidissement du mélange et les réactions hétérogènes de terminaison par rapport aux réactions homogènes de propagation radicalaires (Figure 2). Dans un autre domaine, les phénomènes hydrodynamiques en écoulements diphasiques s'interprètent aisément par la compétition entre phénomènes gravitaires et de tension de surface : la tension de surface prédomine dans les écoulements confinés alors que les effets gravitaires s'imposent pour des dimensions supérieures à quelques millimètres. En résumé, la dimension caractéristique permet ainsi de modifier les vitesses relatives des phénomènes couplés, et donc d'en changer la hiérarchie, pour permettre de sélectionner le phénomène qui doit prédominer pour atteindre la performance optimale.

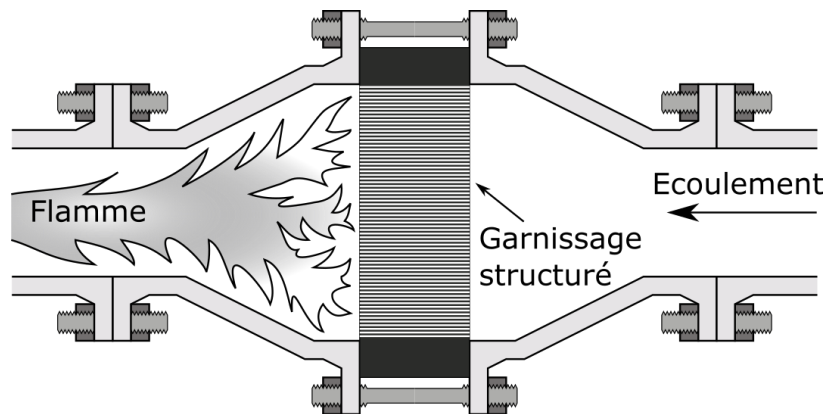


Figure 2 - Schéma de principe d'un arrête-flammes structuré dans une conduite

## 1.2 Agencement spatial des volumes et des surfaces

Parvenir à agencer les surfaces et les volumes (fluide ou solide) au sein de l'équipement, pour fournir, en tout point, des conditions favorables, tel que décrit précédemment, constitue le deuxième niveau de complexité. Les méthodologies mises en œuvre avec cet objectif ont en commun un caractère multi-échelle très prononcé dans le sens où elles visent à concilier a) le besoin d'une structuration locale fine pour la performance optimale des phénomènes avec b) la nécessaire accessibilité de cette micro-échelle depuis la macro-échelle de l'équipement ou du procédé.

Les démarches les plus abouties pour ce problème sont regroupées sous le titre d'approche "constructale", dont le nom couple l'idée de cette démarche de construction avec les propriétés des structures fractales qui émergent très régulièrement de ce problème d'optimisation multi-échelle [8]. Par exemple, l'organisation des éléments "internes" d'un réacteur-échangeur afin de guider le fluide entrant dans le réacteur vers l'intégralité du volume tout en lui fournissant les conditions optimales de compétition entre réaction et transfert, est un problème de distribution entre un point et un volume soumis à des contraintes, liées aux transferts, à la puissance mécanique dissipée par frottement et très souvent à la fabricabilité de la géométrie proposée.

A chaque typologie de problème (transfert de chaleur contre perte de charge ; efficacité maximale contre volume minimal, etc.) correspond une topologie optimale de l'agencement des internes. Toutes les géométries partagent un caractère arborescent, divergent ou convergent, lié à la nécessaire distribution depuis une entrée vers un volume ou une surface et à la recombinaison inverse en sortie d'équipement. Mais ces géométries se distinguent par des facteurs de forme spécifiques, directement dépendants des phénomènes en compétition : le poids relatif accordé aux critères/contraintes de conversion chimique, de transfert de chaleur/matière et/ou de perte de charge favorise tantôt des structures longilignes en faisceaux de tubes fins, tantôt des structures trapues monolithiques, tantôt de fines structures quasi-membranaires développant une large section passante nécessitant son repliement dans un volume donné [5].

Sans entrer dans les détails, l'impact de l'agencement spatial des volumes et des surfaces peut être illustré sur le cas simplifié d'un contacteur à 2 fluides. Que ce soient les échangeurs de matière pour le transfert entre phases (extraction d'un soluté d'une



phase vers l'autre), les échangeurs de chaleur pour le transfert d'énergie entre fluides à températures différentes, ou les mélangeurs dans lesquels on cherche à homogénéiser les fluides, tous ces contacteurs répondent au même principe de base : permettre et faciliter le transfert d'extensité entre fluides. Le flux de transfert initial est proportionnel à un coefficient de diffusion  $\Gamma$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ), à la valeur maximale de la grandeur à échanger  $Y_{\text{max}}$  et inversement proportionnel à la dimension caractéristique,  $L$  (m), du volume contenant le fluide qui échange avec son environnement (Figure 3). Suivant le transfert considéré, la relation du flux de transfert par unité de surface (loi de Fick pour le transfert de matière et le mélange, loi de Fourier pour le transfert de chaleur) s'écrit :

$$(1) \quad \varphi \approx \Gamma \frac{Y_{\text{max},0}}{L}$$

où  $Y$  représente la concentration (quantité d'énergie par unité de volume ( $\text{J}.\text{m}^{-3}$ ) ou quantité de matière par unité de volume ( $\text{mol}.\text{m}^{-3}$ )) de l'extensité à transférer. Le flux de transfert ( $\text{J}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  ou  $\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) est d'autant plus grand, et donc le transfert plus rapide, que la dimension caractéristique  $L$  est faible.

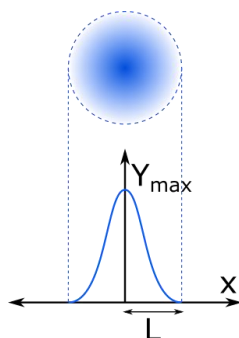


Figure 3 - Diffusion d'extensité dans un milieu et expression du flux en fonction des grandeurs caractéristiques

Le Tableau 2 présente, en coupe transversale à l'écoulement, quatre modes d'agencement de deux fluides (gris/blanc) qui diffèrent par la dimension caractéristique et la position relative des passages fluides. Ces 4 modes peuvent également représenter 4 étapes successives de la distribution des deux fluides dans la section droite de l'écoulement. Cette section est discrétisée en 256 pixels qui peuvent être occupés soit par le fluide gris (concentration  $Y = Y_{\text{max}} = 100$ ) soit par le fluide blanc ( $Y = Y_{\text{min}} = 0$ ). Le fluide gris occupe un quart de la section totale.

Organisation spatiale des deux fluides (coupe transverse à l'écoulement)				
Echelle de ségrégation	8 pixels	4 pixels	2 pixels	1 pixel
Intensité de ségrégation	1.73	1.73	1.73	1.73
Surface totale d'échange	16	32	112	240
Facteur	2	8	64	240

d'intensification géométrique				
-------------------------------	--	--	--	--

Tableau 2 - Comparaison de 4 agencements possibles de deux fluides dans la section orthogonale à l'écoulement moyen dans un contacteur

Ces agencements peuvent être comparés selon des critères quantitatifs :

- L'échelle de ségrégation,  $L$ , est une mesure de la dimension caractéristique des passages fluides, et peut être assimilée à un diamètre hydraulique local.
- L'intensité de ségrégation est une mesure de l'hétérogénéité du champ de concentration et peut être calculée comme un écart-type de la distribution surfacique des concentrations normalisées :

$$(2) \quad I_s = \sqrt{\frac{1}{N_{pixels}} \sum_{i=1}^{N_{pixels}} \left( \frac{Y_i - Y_{moy}}{Y_{moy}} \right)^2}$$

Dans cet exemple, le nombre de pixels gris et blancs étant inchangé d'un agencement à l'autre, la distribution des concentrations et, donc, l'intensité de ségrégation sont indépendantes de l'agencement.

- La surface totale d'échange est la somme des surfaces qui séparent des pixels de concentrations différentes. Cette grandeur est proportionnelle à la valeur initiale, avant échange, du flux par unité de surface et traduit donc l'aptitude de la configuration géométrique du contacteur à échanger facilement. Si on note  $A$  cette surface, le flux total de transfert initial s'écrit :

$$(3) \quad \phi = \Gamma(Y_{max} - Y_{min}) \frac{A}{L}$$

- Enfin, on peut calculer le facteur d'intensification géométrique  $A/L$ , qui représente le facteur d'augmentation du flux de transfert.

On peut noter l'évolution extrêmement rapide de l'effet d'intensification dû à la structuration géométrique de l'écoulement. L'agencement qui fournit le facteur d'intensification maximal est celui où l'échelle de ségrégation est minimisée (1 pixel) et où les fluides sont uniformément distribués sur l'ensemble de la surface. Le flux de transfert est multiplié par 120 par rapport à l'agencement le moins structuré. Mais cette structuration fine augmente également les effets de dissipation par frottement et donc la consommation d'énergie : un compromis entre gain de transfert et pertes par dissipation doit donc être trouvé par des approches multi-critères.

Sous le jeu de contraintes retenues ici (géométrie discrète, forme et nombre de mailles, fraction de surface des fluides), cet agencement très finement structuré et uniformément réparti est optimal pour le critère de transfert dans le contacteur. Mais ces contraintes sont dimensionnantes : d'autres contraintes induiraient d'autres géométries et agencements optimaux. Cet agencement optimal soulève un autre problème pratique : comment alimenter les 64 canaux du fluide gris depuis une entrée unique, avec des débits égaux autant que possible ? Sur un cas aussi simple, des structures multiplaques empilées sont envisageables par des méthodes de fabrication classiques. Néanmoins, l'approche constructale a fait émerger des formes et des

structures arborescentes entrelacée qui ne peuvent pas être fabriquées autrement que par fabrication additive.

### 1.3 Formes complexes et optimisation topologique

Pour illustrer la nécessité des formes complexes, nous pouvons considérer le contacteur à deux fluides, avec l'objectif de diviser et entrelacer les filets fluides pour atteindre la configuration optimale issue de la section précédente. La Figure 4 représente une vue 3D schématique de cet objet ainsi que des plans de coupe à différentes positions. Un design possible consiste à subdiviser progressivement chaque passage fluide en multipliant leur nombre par 4 à chaque itération et en divisant par 2 leur diamètre hydraulique. Chaque transition d'échelle requiert, pour simplifier le design global par autosimilarité, d'échanger les positions de deux filets fluides : cette permutation s'appelle un "chiasme" et sa géométrie fine est présentée sur la Figure 5. L'inversion de position est réalisée en faisant tourner sur elle-même la paroi séparatrice entre les deux fluides : dans l'espace, cette paroi a donc une forme en hélice. Une transition pour passer de 4 à 16 filets contient donc 8 canaux droits et 4 chiasmes entre deux canaux. L'opération peut être répétée d'échelle en échelle sur des groupes de 4 canaux plus petits.

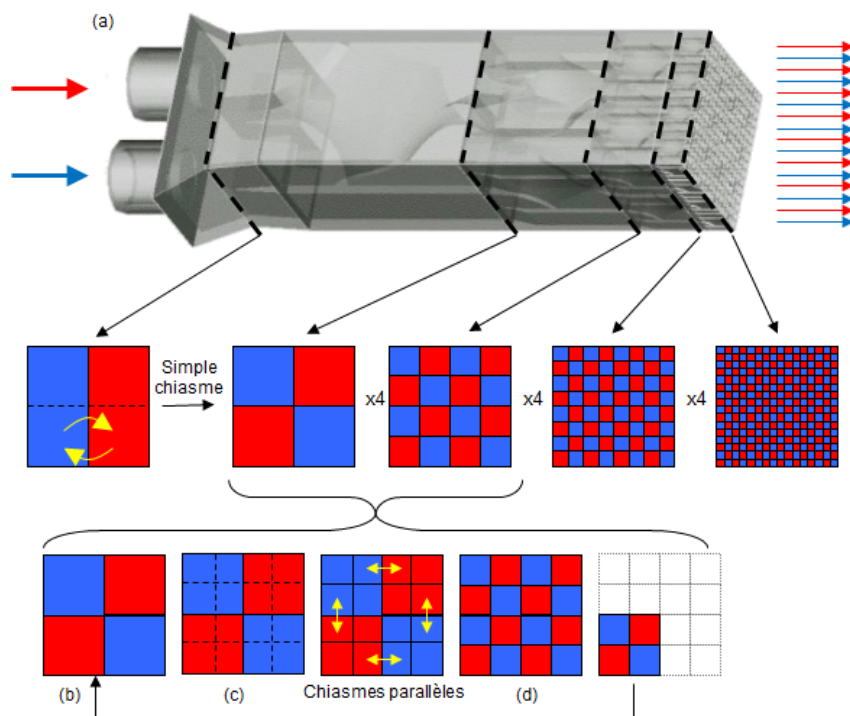


Figure 4 - Représentation d'un contacteur à deux fluides et coupes transversales successives lors de la division et de l'entrelacement des fluides (source LRGP)

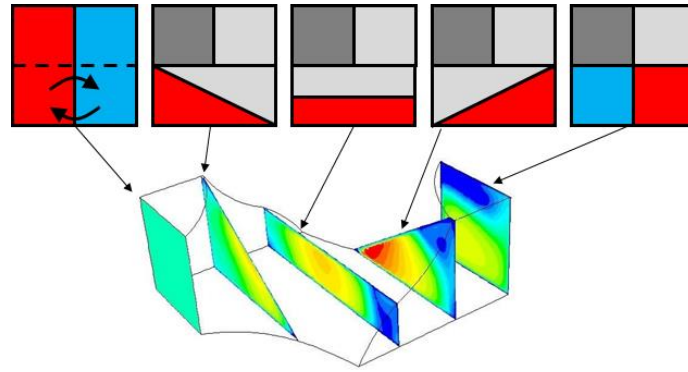


Figure 5 - Plans de coupe lors d'un chiasme pour la permutation de deux courants fluides (source LRGP)

Une telle complexité géométrique, liée à l'entrelacement intime des filets fluides et la diversité des échelles caractéristiques, ne peut pas être réalisée par des méthodes de fabrication soustractive qui procèdent par enlèvement de matière contrôlée (découpe, perçage, rectification). Seule la fabrication additive permet de générer une telle géométrie pour passer de deux filets fluides de grande dimension à  $4^N$  filets de faible dimension et atteindre, dans un volume minimal, une configuration quasi-optimale pour le transfert de chaleur ou le mélange.

Dans cet exemple, la complexité géométrique est une nécessité pour atteindre la configuration optimale, mais les degrés de liberté offerts par la fabrication additive ouvrent de nouvelles perspectives afin de mieux contrôler les couplages entre phénomènes physiques et chimiques. Il est désormais possible d'exploiter ce degré de liberté, soit pour dessiner des formes complexes qui favorisent des synergies entre phénomènes, soit pour optimiser ces synergies sans se contraindre à des formes simples. Cette liberté s'exprime pleinement grâce aux méthodes d'optimisation topologique couplées aux outils de mécanique des fluides numérique [9]. L'optimisation de forme et l'optimisation topologique permettent d'obtenir une géométrie complexe pour intensifier localement certains phénomènes et contrôler en tout point les compétitions qui régissent la performance globale de l'équipement.

Ces méthodes sont déjà appliquées sur des systèmes variés : écoulements dans des plaques de piles à combustibles [10], ailettes pour refroidissement par convection naturelle [11], ailettes pour convection forcée [12], canaux accidentés de micromélangeurs [13], séparateurs cyclones [14], garnissages fonctionnalisés de colonnes d'absorption [15], etc. Au-delà des géométries que ces méthodes optimisent pour des applications spécifiques, de nouvelles formes émergent et pourraient devenir génériques dans les méthodes de design pour les ingénieurs en Génie des Procédés : arborescences convergentes ou divergentes biomimétiques, gyroïdes, hélicoïdes, surfaces minimales périodiques, spirales compactes, etc.

#### À retenir

- L'intensification géométrique consiste à accélérer les phénomènes de transfert de matière et de chaleur en réduisant la dimension spatiale caractéristique.
- L'augmentation des transferts nécessite également un accroissement des interfaces d'échange entre fluides grâce à une réorganisation spatiale des écoulements interne.

- Les équipements intensifiés présentent des géométries internes complexes dont les applications sont nombreuses : échangeurs thermiques, réacteurs catalytiques, mélangeurs, contacteurs diphasiques...

## 2 Les apports de la fabrication additive

**La fabrication additive** désigne l'ensemble des procédés qui peuvent être utilisés pour fabriquer, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique.

### 2.1 Introduction à la fabrication additive

La Fabrication Additive (FA) est définie dans la norme NF EN ISO/ASTM 52900 comme représentant un ensemble de procédés pour la fabrication de pièces par l'assemblage de matériaux, en général couche après couche, à partir de modèles numériques représentant les pièces en 3 dimensions. Ces procédés se définissent donc à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive (comme par exemple l'usinage). Il existe une grande variété de procédés, en fonction de la nature des matériaux mis en œuvre (métaux, thermoplastique, résines photo polymérisables, papier, bois, céramiques, ...) ainsi que de l'énergie utilisée pour la mise en forme de ces matériaux (rayonnement UV, rayonnement laser, faisceau d'électrons...). De nouveaux procédés sont développés chaque année et les classifications sont donc susceptible d'évoluer en permanence. Des dénominations normalisées classent ces procédés (quel que soit le matériau) en sept grandes catégories [norme NF EN ISO 17296-2 : 2016] :

- Photopolymérisation en cuve,
- Projection de matière,
- Projection de liant,
- Fusion sur lit de poudre,
- Extrusion de matière
- Dépôt de matière sous flux d'énergie concentrée,
- Stratification de couches de matières

Ces procédés sont présentés dans [BM7017]. Ils se distinguent des procédés de fabrication traditionnels par une grande agilité dans la fabrication et une plus grande liberté dans la conception, qui n'est plus freinée par les étapes habituelles, comme expliqué ci-dessous Figure 6 :



Figure 6 - comparaison des processus de fabrication : impact sur les temps et les étapes de développement [BM7017]

La chaîne numérique est spécifique aux procédés de FA. Toutes les pièces fabriquées par ces procédés suivent les mêmes étapes de conception [BM7017] :

- Création d'un modèle numérique 3D de la pièce à fabriquer,
- Conversion du fichier, tranchage et vérifications (exemple : recherche d'erreurs lors du maillage surfacique),
- Préparation de la fabrication (orientation de la pièce au plateau, définition du supportage, ...).

Les étapes de fabrication et de parachèvement diffèrent, selon les procédés de FA. Alors que certains procédés permettent d'obtenir des pièces fonctionnelles (procédés de fabrication directe), d'autres procédés nécessitent impérativement l'utilisation d'étapes complémentaires, comme le déliantage et le frittage, avant d'obtenir une pièce fonctionnelle. A noter, dans tous les cas, et selon les spécifications propres à chaque pièce, la nécessité d'utiliser des traitements de parachèvement (usinage, revêtements, remise en solution, ...) afin d'adapter les propriétés métallurgiques et surfaciques, au-delà des capacités du procédé.

## 2.2 Avantages et inconvénients des procédés de fabrication additive

**La FA doit être utilisée avec à-propos**, en connaissance de ses avantages et de ses inconvénients, pour une utilisation pertinente dans l'intensification des procédés.

Face à l'ampleur des développements et aux retombées potentielles de la FA pour tous les secteurs d'activités en France, la DIRECCTE Région Centre a réalisé une étude, toujours d'actualité, qui dresse l'état des lieux et les perspectives de la FA, en prenant l'exemple de différentes applications industrielles.[16]

Il en ressort notamment l'analyse ci-dessous, concernant les avantages et les inconvénients des procédés de FA :

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des délais de fabrication ;</li> <li>• Conception innovante et optimisée, entièrement numérique ;</li> <li>• Intégration possible des données issues de l'optimisation topologique ;</li> <li>• Possibilité de réaliser en monobloc des pièces multi-matières ou des sous-ensembles (diminution des assemblages) ;</li> <li>• Contrôle précis de la matière déposée, pour aboutir à des pièces à géométrie complexe (contre-dépouille, structures lattices) difficilement réalisables par les techniques usuelles.</li> <li>• Production par exemple de pièces complexes creuses (allègement de structures), avec des « canaux » non rectilignes ;</li> <li>• Nouvelles possibilités de personnalisation ;</li> <li>• Production sans développer d'outillages (gain en termes de temps et élimination des coûts liés à l'outillage) ;</li> <li>• Les poudres non fusionnées se recyclent relativement facilement ;</li> <li>• Réduction de l'impact environnemental par la réduction de la quantité de matière (Réduction du « buy to fly » en aéronautique, par exemple) ;</li> <li>• Diminution possible des stocks.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investissement machine élevé ;</li> <li>• Productivité des machines pouvant être assez faible ;</li> <li>• Choix des matériaux relativement limité par rapport aux procédés de mise en forme traditionnels ;</li> <li>• Limite dimensionnelle des pièces fabriquées ;</li> <li>• Nécessité de modifier les méthodes de conception : chaque produit est un cas particulier ;</li> <li>• Maîtrise de nouveaux outils (optimisation topologique, logiciels pour les structures lattices, maîtrise de la chaîne numérique de données qui viennent de scans ...) ;</li> <li>• Nécessité de compétences au-delà de l'utilisation de la machine (granulométrie de la poudre, influence de la vitesse du laser, contraintes liées à certains procédés...) ;</li> <li>• Obtention d'un brut et non d'une pièce finie : nécessité de post-traitements ;</li> <li>• Les contrôles non destructifs coûtent très cher et peuvent ne pas être réalisables sur certaines pièces complexes (problématique d'accès) ;</li> <li>• Exposition à des produits dangereux (poudres métalliques, résines, fumées, ...) et risques machines (Lasers, F.E., lampes UV,...)</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité de fabriquer des pièces à distance, à proximité directe des sites d'utilisation, par utilisation des solutions de fabrication additive disponible sur site.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en place de moyens de prévention coûteux (environnement ATEX : installations de captage pour aspiration, poussières, ...);</li> <li>• Nécessité de porter une attention à l'environnement d'utilisation de la machine (local où la machine est isolée, non soumise à des vibrations et relativement éloignée d'autres équipements qui pourraient être endommagés par les poudres).</li> <li>• Thématique encore peu intégrée au sein de l'enseignement initial ;</li> </ul>
<b>Opportunités</b>	<b>Menaces</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualification et normalisation en cours d'élaboration : demande des donneurs d'ordre en faveur de l'établissement de normes spécifiques à un matériau pour un procédé donné ;</li> <li>• Validation réalisée sur des applications « phares » dans les domaines de l'aéronautique (injection de carburant : composants de moteur d'avion LEAP) et du médical ;</li> <li>• Développement de nouveaux matériaux ;</li> <li>• Émergence de nouveaux fabricants et distributeurs de matières premières ;</li> <li>• Développement de machines hybrides (machines combinant procédés additifs et soustractifs) ;</li> <li>• Démocratisation de la technologie en partie grâce à l'expiration de certains brevets.</li> <li>• Nombreux développements en cours pour fiabiliser les équipements, améliorer les caractéristiques mécaniques de pièces ;</li> <li>• Augmentation des capacités de travail des équipements et de la puissance des sources d'énergie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriété intellectuelle : l'utilisation systématique d'un fichier 3D (peut ensuite être dupliqué) et les banques de données de modèles CAO rendent la notion de droit d'auteur plus délicate à gérer.</li> </ul>

Tableau 3 - Avantages et inconvénients de la FA, selon [16]

Nombres d'inconvénients reportés ci-dessus peuvent être anticipés, lors des phases de conceptions. Les personnels présents au sein des bureaux d'études, en charge de la conception des nouveaux produits, peuvent être formés à l'utilisation de ces nouveaux outils. Des logiciels spécifiques ont été développés, qui facilitent le chaînage des différentes étapes numériques, permettent la conversion des fichiers, optimisent le maillage surfacique et analysent et corrigent les erreurs. Même si les risques associés à l'utilisation de ces nouveaux procédés restent réels, nécessitant des investissements financiers importants, des offres de services dédiés permettent de faciliter l'intégration dans l'environnement de travail existant.

De nombreuses associations professionnelles se sont créées ces dernières années, qui facilitent l'accès aux informations essentielles (écosystèmes existants, sous-traitance de fabrication, formation, ...). A titre d'exemple, France Additive (anciennement Association Française de Prototypage Rapide) tisse un réseau en plein



développement à l'échelle nationale et permet de référencer l'ensemble des acteurs de la filière, et les fédère par l'organisation d'évènements (journées techniques, congrès). Le site France Additive cartographie notamment les plateformes collaboratives, telle Addictive Factory Hub (AFH), sous l'égide de la Région Ile-de-France qui ont pour objectif de mutualiser l'expertise et les moyens nécessaires pour relever les défis de la fabrication additive.

### 2.3 L'intérêt de la fabrication additive pour le génie des procédés

Tous les procédés de FA ne peuvent être utilisés pour le génie des procédés, et quelques-uns seulement de ces procédés de fabrication sont aujourd'hui suffisamment matures pour produire des équipements fonctionnels.

Les procédés industriels de transformation de la matière et de l'énergie utilisés dans le domaine de l'énergie, de la pétrochimie, de la chimie pharmaceutique utilisent en général des appareils, ou équipements, métalliques, notamment lorsque l'application nécessite d'opérer sous une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Plusieurs types d'équipements, associés à des opérations unitaires, peuvent être concernés : réacteurs, échangeurs de chaleur, séparateurs, mélangeurs, ... La modification géométrique de ces équipements, avec pour objectif l'intensification des opérations unitaires et in fine du procédé global dans lesquels ils sont utilisés, induit de nouvelles contraintes de fabrication de ces appareils, notamment concernant les formes et les dimensions recherchées des internes, qui pourront être respectivement plus complexes et plus petites.

La fabrication de ces équipements fait appel à des procédés métallurgiques bien établis, comme la fonderie, le forgeage, le frittage, l'usinage ou encore le soudage. Ces procédés sont matures et leur utilisation pour la fabrication de tels équipements est maîtrisée. Ces procédés apparaissent limités lorsque la complexité géométrique des équipements augmente (Figure 7).

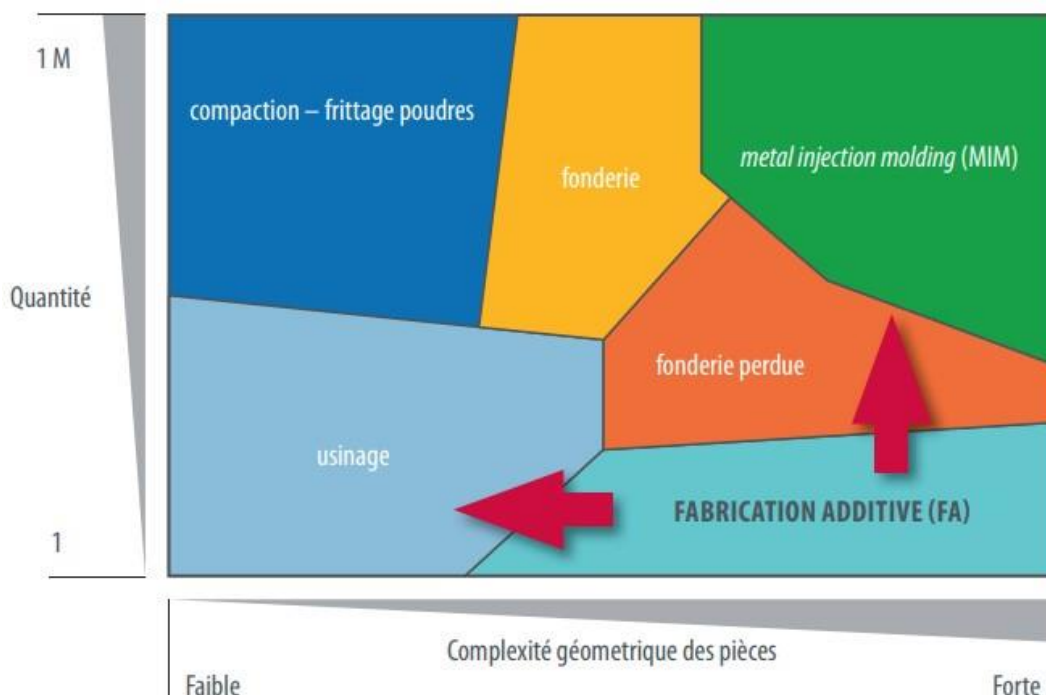
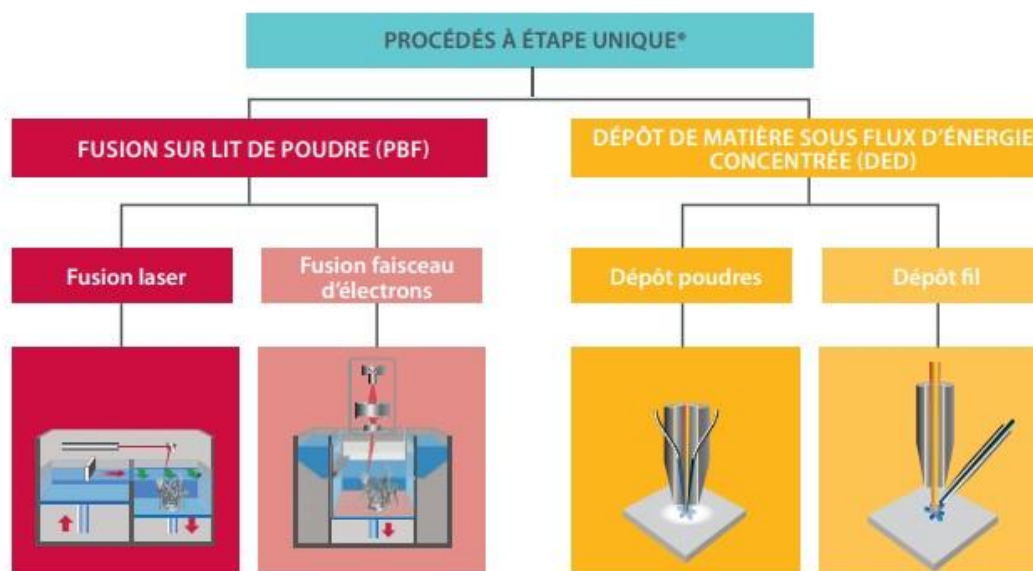


Figure 7 - Place de la FA parmi les autres procédés de fabrication métallique, considérant en abscisse le niveau de complexité géométrique des pièces produites et en ordonnée la quantité de pièces produites par les procédés cités (de 1 à 1 million) [17]

Les connaissances fondamentales sur les procédés de FA métallique ont récemment été répertoriées dans un ouvrage éponyme du CETIM [17]. Plusieurs procédés de FA peuvent être utilisés pour la fabrication d'équipements utiles à l'intensification des procédés de transformation de la matière et de l'énergie. Ces procédés peuvent être scindés en deux groupes :

- i. Les procédés à étape unique (Figure 8), également appelés procédés de fabrication directe,
- ii. Les procédés à étapes multiples (Figure 10), également appelés procédés de fabrication indirecte



\* Ces procédés consolident la matière première en une seule étape mais nécessitent de multiples étapes pour obtenir la pièce finie (traitement thermique, découpe des supports, finition de surface...)

Figure 8 - procédés de FA par fabrication directe de pièces métalliques [17]

Les procédés de fabrication directe (Figure 8) permettent d'obtenir une pièce dès sortie du procédé. Des exemples de pièces produites par ces procédés de fabrication sont donnés Figure 9. Les procédés de fusion sur lit de poudre (PBF, pour Powder Bed Fusion), et notamment le procédé permettant l'obtention de pièces par la fusion sélective d'un lit de poudre métallique à l'aide d'un laser (LB-PBF, pour *Laser Beam Powder Bed Fusion*) est sans doute le plus utilisé aujourd'hui. [18]

Le procédé LB-PBF présente plusieurs avantages :

- Précision : possibilité de réaliser des structures fines d'épaisseurs approchant les 200µm,
- Productivité : possibilité d'utiliser simultanément plusieurs lasers pour augmenter la vitesse de production,
- Capacité : des machines de développement récent possèdent des chambres de fabrication mesurant 600mm x 600mm (x,y) pour des hauteurs de fabrication pouvant atteindre sur certaines machines près de 1m.

Néanmoins, plusieurs limitations sont à souligner :

- Matériaux : peu de matériaux sont disponibles sous forme de poudres métalliques,
- Coût : le coût des machines reste aujourd'hui encore prohibitif (de l'ordre du million d'euros), impactant fortement le cout de production des pièces.
- Taille des pièces : la taille des pièces est limitée à l'enceinte de fabrication, aussi grande soit elle.

Les procédés de dépôt de matière sous flux d'énergie concentrée (DED, pour Direct Energie Deposition), permettent de remédier en partie à ces limitations :

- Possibilité de construire des pièces de grande dimension, possiblement hors enceinte de fabrication (exemple : dans le cas d'un procédé de type DED-W, le WAAM - Wire Arc Additive Manufacturing - est généralement composé d'un robot 6 axes, d'un générateur de soudage avec ses équipements associés (torche, dévidoir de fil, système d'amenée de gaz de protection...) et des accessoires supplémentaires comme des dispositifs d'inertage (chambre, trainard).
- Coût d'investissement moindre (exemple : le cout moyen d'une installation complète WAAM est de l'ordre de 300K€),
- Matériaux utilisables sous forme de poudre ou de fil, selon le procédé (les fils utilisés pouvant être des consommables de soudage, des produits relativement disponibles, pour une grande variété de métaux).

Un récent état de l'art des procédés de FA directe utilisant une matière première sous forme de fil permet de bien comprendre les spécificités de ces procédés. [19] Pour la grande majorité d'entre eux, ces procédés ne permettent pas d'avoir une précision significative, nécessitant alors un usinage lorsque les tolérances de surface spécifiées le demandent. Certains fabricants associent désormais ces procédés avec de l'usinage, ce qui permet de cumuler les avantages de la fabrication additive et soustractive.

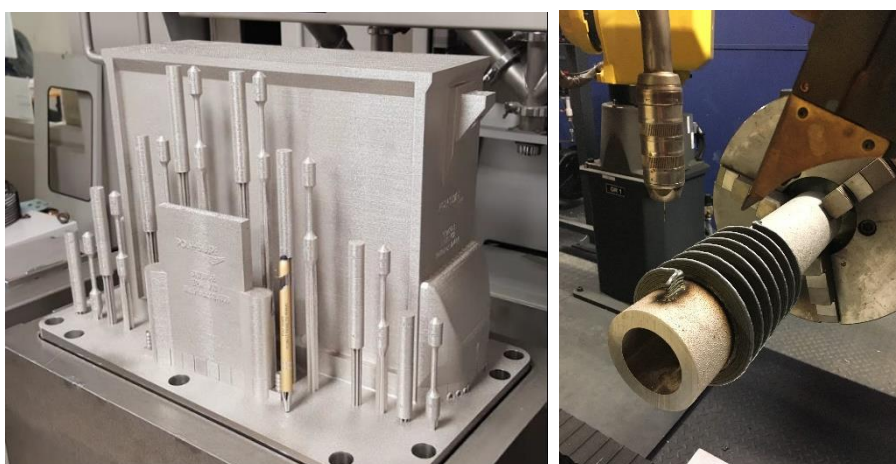


Figure 9 - Pièces obtenues par des procédés de fabrication additive directe : réacteur et pièces témoins produits par LB-PBF (gauche, source Air Liquide/Poly-Shape) et ailettes hélicoïdales sur un réacteur tubulaire produites par WAAM (droite, source Additive Factory Hub/Air Liquide)

Les procédés de fabrication indirecte (Figure 10) nécessitent des étapes complémentaires, après l'acte initial de fabrication (d'une pièce verte ou d'un noyau de fonderie) pour l'obtention d'une pièce métallique finie.

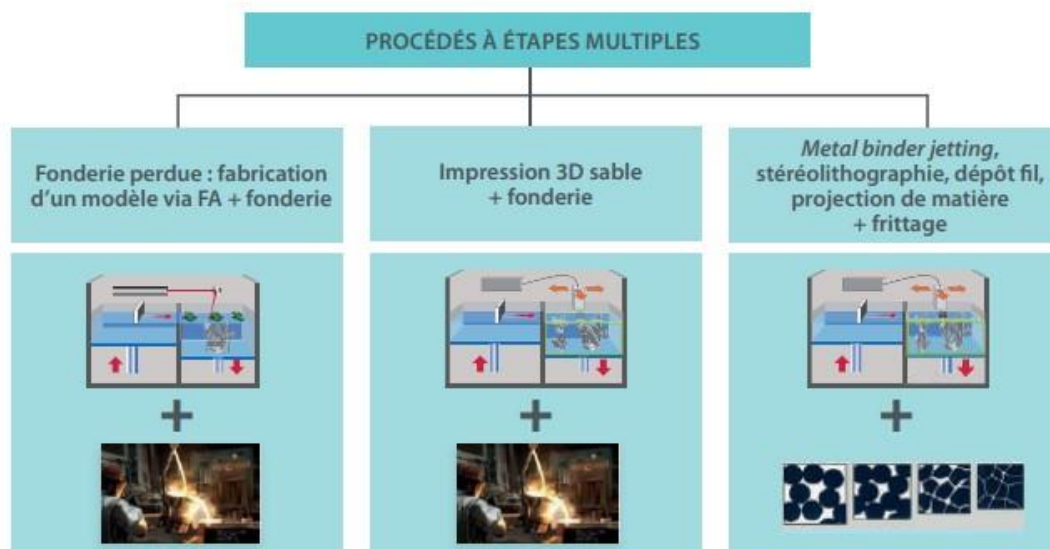


Figure 10 - procédés de FA par fabrication indirecte de pièces métalliques [17]

Il est par exemple possible de coupler avantageusement la fabrication additive de noyau en sable ou de modèles en résine ou en cire (pour l'élaboration d'un noyau), et les procédés de fonderie. Ces procédés permettent d'obtenir des pièces d'une qualité métallurgique éprouvée et maîtrisée, et bénéficient de la maturité des procédés de fonderie. En revanche, les contraintes propres aux procédés de fonderie restent ici valables (anomalies d'engorgement, tourbillons à la coulée, zones à masseloter, défauts, anisotropie thermique et contraintes, ...).

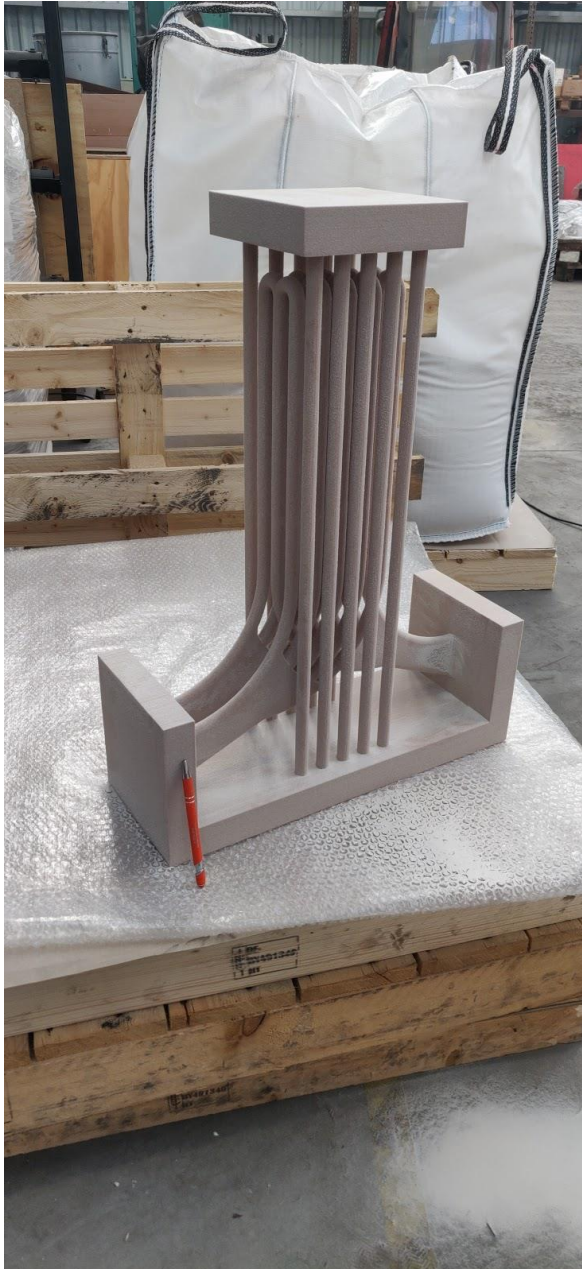


Figure 11 - Illustration de la fabrication additive indirecte : noyau de fonderie pour production d'un réacteur expérimental (source AFHS-3D).

Enfin, nous citerons une dernière catégorie de procédés, qui permettent d'obtenir des pièces métalliques après impression d'une matrice mixte métallique/polymère, déliantage et frittage (Metal Binder Jetting). Ce procédé est très proche du procédé de type MIM (Metal Injection Molding), et nécessite les mêmes précautions pour le dimensionnement des pièces et la prise en compte du retrait au frittage. Ce procédé est aujourd'hui limité à des pièces de petites tailles, mesurant tout au plus une dizaine de centimètre, et présentant de préférence des géométries isotropes (pour la gestion du retrait au frittage).



Figure 12 - Pièces obtenues par projection de liant (binder jetting), comparaison avant / après frittage (source. CETIM) [17]

#### À retenir

- La FA est représentée par un ensemble de procédés de fabrication, capables de construire un objet physique à partir d'un objet numérique
- La FA permet concevoir et de fabriquer des géométries complexes, jusqu'à irréalisables, pour des pièces pouvant être utilisées en production
- Au-delà du prototypage, il est nécessaire de bien prendre en compte les limitations associées à ces nouveaux procédés (maturité technologique, aspects normatifs, compétences spécifiques, ...)

### 3 Exemples d'applications

De nombreux exemples d'application peuvent être listés, qui utilisent la liberté de conception offerte par la FA pour développer des équipements plus performants.

#### 3.1 Echangeurs réacteurs métalliques pour la production d'Hydrogène (FAIR)

Ce premier exemple détaille la mise en application des principes présentés précédemment au travers d'un exemple concret de conception et de fabrication d'un échangeur-réacteur milli-structuré pour la production d'hydrogène. Le choix de la technologie et sa structure interne sont le résultat de l'application d'une démarche d'intensification au procédé de vaporeformage de méthane. Cette démarche s'appuie sur les fondamentaux théoriques décrits dans la partie 1.

Aujourd'hui, comme depuis la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, l'hydrogène nécessaire aux applications industrielles de pétrochimie et de chimie fine est majoritairement produit par la réaction de vaporeformage du méthane contenu dans le gaz naturel [20]. La réaction fait réagir le méthane avec de la vapeur d'eau pour produire un gaz de synthèse (mélange de H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) riche en hydrogène.

La réaction de vaporeformage étant très endothermique, elle nécessite un apport de chaleur externe. Ainsi, la réaction de vaporeformage est mise en œuvre industriellement au contact de catalyseurs dans de longs réacteurs tubulaires, disposés dans des fours chauffés par des brûleurs à gaz, dont les flammes sont positionnées entre les réacteurs tubulaires. La chaleur nécessaire à la réaction est apportée par la combustion d'un mélange de gaz naturel et des rejets issus des étapes de purification du procédé. Une vue de l'intérieur d'un four, en fonctionnement, d'une unité de vaporeformage est donnée Figure 13

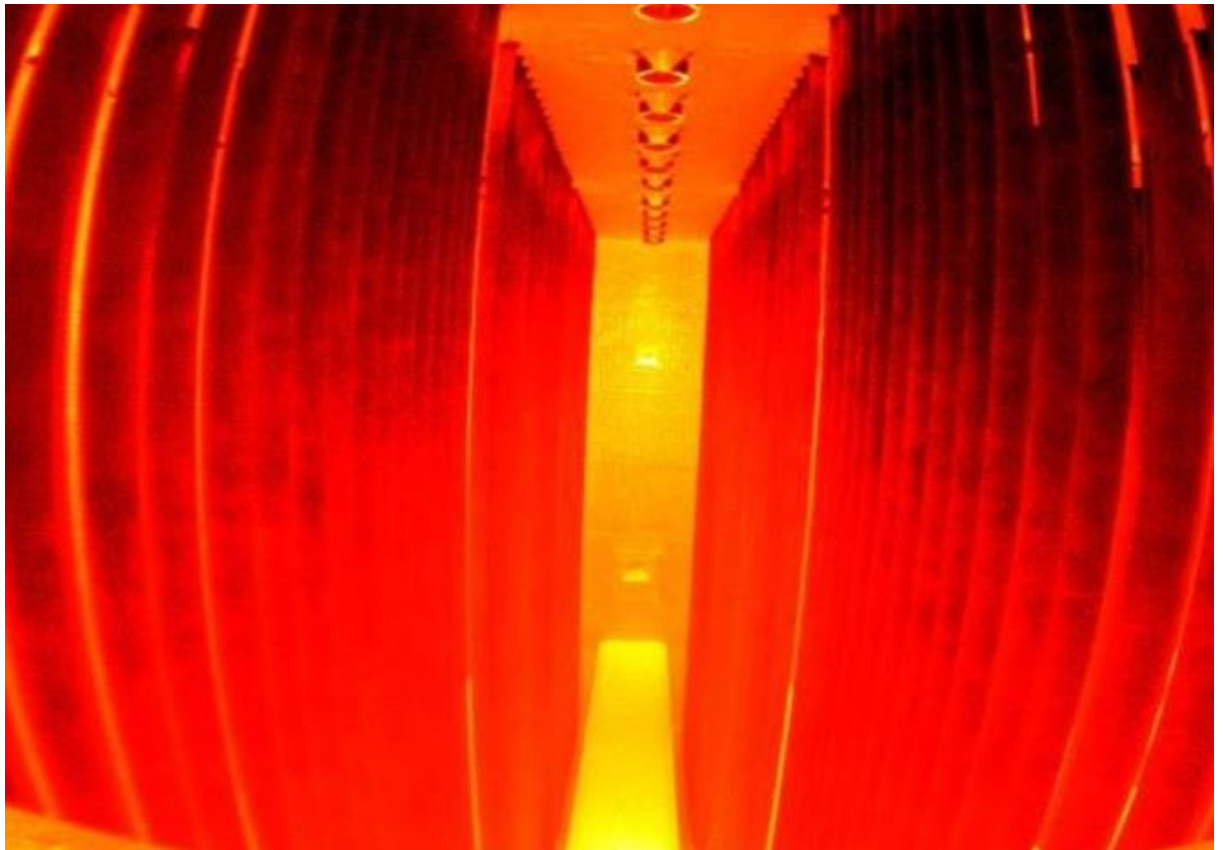


Figure 13 - Vue interne d'un four équipé de brûleurs sur le dessus, unité Air Liquide de production d'hydrogène à Rotterdam, aux Pays Bas (source Air Liquide)

En sortie des tubes le mélange est à l'équilibre aux conditions opératoires données (Température, Pression). Pour atteindre des conversions importantes la température de sortie des tubes est généralement très élevée (supérieure à 850°C) ce qui pose des problèmes métallurgiques importants. En effet, à ces températures des variations de quelques degrés au-dessus de la température opératoire maximale admissible, peuvent impacter considérablement la durée de vie des tubes. Ainsi, lors de la phase de conception c'est le flux de chaleur maximal qui détermine la longueur des tubes de telle sorte que la température de sortie atteinte soit suffisamment élevée pour permettre une conversion théorique maximale du méthane sans toutefois que la température du métal ne dépasse jamais la température opératoire maximale admissible. Le catalyseur qui remplit alors les tubes est introduit en large excès par rapport à la quantité théoriquement nécessaire. Un schéma de principe d'une unité de vaporeformage est donné Figure 14.

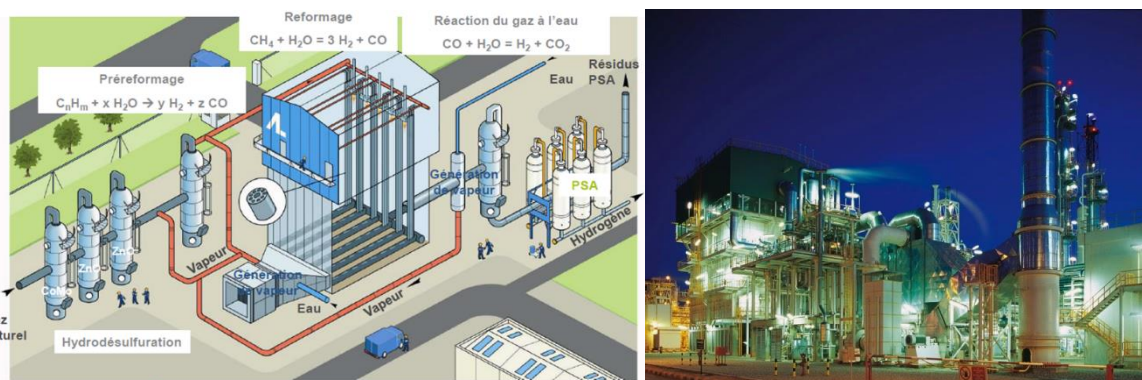


Figure 14 - Schéma de principe d'une unité de production d'hydrogène par vaporeformage (gauche). Photographie d'une unité de vaporeformage (droite),



(source Air Liquide)

L'analyse des phénomènes limitants portée aux bornes du réacteur met en avant plusieurs limitations :

- la diffusion intraparticulaire dans les pores du catalyseur : la réaction de vaporeformage n'est pas uniquement contrôlée par la cinétique de réaction mais également par le transfert de matière des réactifs vers les sites actifs; en conséquence, seulement une faible partie du catalyseur chargé dans un réacteur catalyse en réalité la réaction [21], [22].
- le transfert de chaleur : l'efficacité du four de vaporeformage est contrôlée par le transfert thermique (i) par radiation et convection depuis les flammes et les fumées vers la paroi externe du tube, (ii) par conduction dans la paroi du tube, (iii) par radiation, convection et conduction depuis la paroi interne du tube jusqu'au gaz et catalyseur

Ces deux limitations peuvent être adressées par une démarche d'intensification structurale telle qu'exposée dans la partie 1.1 où les dimensions caractéristiques vont être adaptées aux phénomènes physiques et chimiques que l'on souhaite mettre en œuvre.

Une solution technologique apportée par l'intensification de procédés et permettant de diminuer ces limitations est l'utilisation d'échangeur-réacteurs **micro ou milli-structurés avec un catalyseur déposé sur une faible épaisseur en paroi pour réaliser la réaction de vaporeformage**. En effet, comme le catalyseur est déposé sur une fine épaisseur en paroi (typiquement de quelques microns) la dimension caractéristique liée au transfert de matière interne est fortement réduite par rapport aux technologies traditionnelles et cette limitation peut être levée.

De la même manière, en ayant des passages hydrauliques de l'ordre du millimètre la taille caractéristique liée au transfert de chaleur est également réduite. De plus, la structure de ces équipements offrant des rapports surface sur volume très importants, le transfert de chaleur peut être amélioré. Cette technologie offre une solution intensifiée pertinente pour la réaction de vaporeformage.

Enfin, en étendant cette analyse à l'ensemble de l'unité de vaporeformage, il apparaît que l'intégration thermique de celle-ci est primordiale pour assurer une haute efficacité du procédé. En effet, la réaction endothermique a lieu dans un four et une grande partie de la chaleur produite est contenue dans les fumées de combustion et les produits de la réaction. Cette chaleur est récupérée pour préchauffer les fluides procédés et également produire de la vapeur. Celle-ci est généralement produite en excès et est valorisée en la vendant sur le bassin industriel ou est implanté l'usine. Lorsque ceci n'est pas possible il est alors nécessaire d'adapter l'intégration thermique. Une solution pertinente est alors de récupérer la chaleur des produits de la réaction pour préchauffer directement les réactifs dans un équipement multifonctionnel tel qu'un échangeur-réacteur.

Pour résumer cette approche il apparaît qu'une intensification intéressante du réacteur de vaporeformage basée sur la structuration et la synergie peut être apportée par un échangeur-réacteur milli-structuré.

Dans le cadre du projet LOKI-R (projet français financé entre 2009 et 2013 par le

programme FUI), ces équipements ont dans un premier temps été fabriqués par des méthodes de fabrication “traditionnelle” d'échangeur à plaque. Les plaques étaient usinées chimiquement pour obtenir les passages hydrauliques puis assemblées par brasage ou par soudage diffusion.

La preuve de concept sur ces équipements a été faite en 2013 par des tests sur une unité pilote au Campus Innovation Paris d'Air Liquide. Les deux premiers échangeurs-réacteurs fabriqués respectivement par brasage et par soudage diffusion ont permis une production d'Hydrogène au débit nominal attendu pour l'échelle pilote de 5 Nm<sup>3</sup>/h.

Néanmoins, l'utilisation imposée d'alliages réfractaires à haute teneur en Nickel (pour résister aux conditions de température et de pression du procédé de vaporeformage) rendaient le procédé d'assemblage extrêmement complexe et la tenue mécanique de l'ensemble pouvait restreindre la plage d'opération. D'autre part, la fabrication de la matrice de l'échangeur-réacteur nécessitait plusieurs étapes avec plusieurs sous-traitants :

- Découpe laser des plaques,
- Usinage chimique des plaques,
- Assemblage par brasage ou soudage diffusion.

C'est face à ces limitations que la fabrication additive (LB-PBF) s'est imposée comme une solution pour produire plus rapidement des matrices d'échangeurs-réacteurs avec une tenue mécanique accrue. En effet, la suppression des interfaces d'assemblage (et des possibles défauts en résultant) par une pièce monolithique issue de la fusion laser lit de poudre a permis sur des pièces mécaniques identiques de résister à des pressions jusqu'à 4 fois supérieures lors de tests d'éclatement. De plus, la fabrication additive a permis de libérer d'avantage la conception de l'équipement. Il a notamment été possible de concevoir des zones de distributions complexes conçues en faisant appel aux outils de mécanique des fluides numériques qui couplés avec des restrictions spécifiques de chaque passage hydraulique permet d'équilibrer les pertes de charges et assure une répartition homogène du fluide entre tous les canaux. Cette conception est illustrée Figure 15. L'équilibrage des chemins hydrauliques a été assuré par la conception spécifique des zones de distribution et de collection ainsi que des restrictions locales propre à chaque canal sur un échangeur-réacteur.

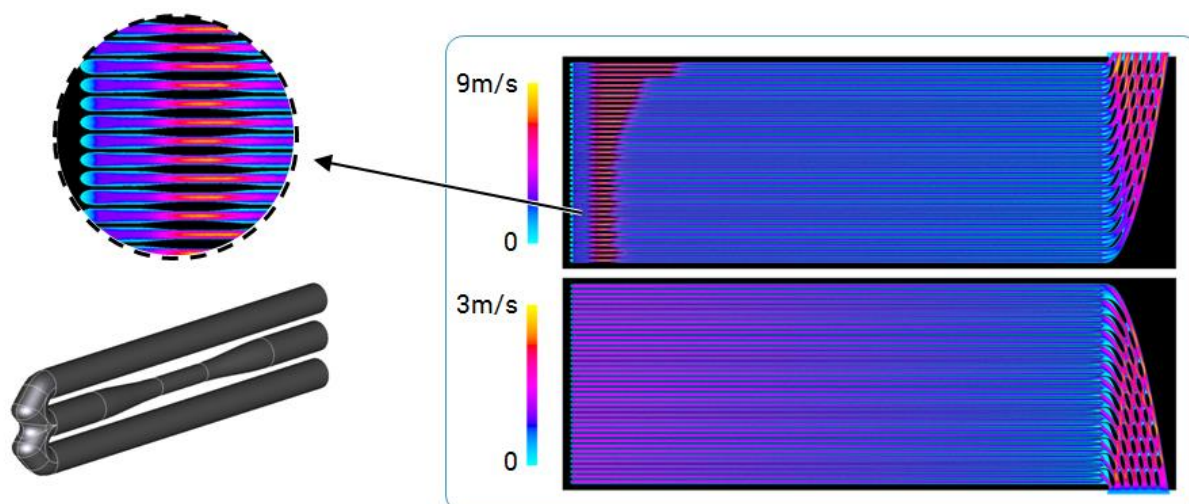


Figure 15 - Zone de distribution et de collection et de singularité conçues pour assurer une distribution homogène du fluide entre tous les passages d'un échangeur-

réacteur (source Air Liquide)

Ainsi, les maldistributions sont réduites tout en conservant un design compact des zones de de distribution/collection de l'équipement. Les formes spécifiques qui constituent ces zones ainsi que les restrictions locales de la section hydraulique des canaux ont pu être réalisés grâce à la fabrication additive.

Dès 2015 Air Liquide a testé sur son unité pilote un échangeur-réacteur réalisé par impression 3D métallique avec une capacité de production d'Hydrogène nominal de 5 Nm<sup>3</sup>/h. Ce premier prototype avait une section de 100 cm<sup>2</sup> et une longueur de 30 cm (cf. Figure 16).

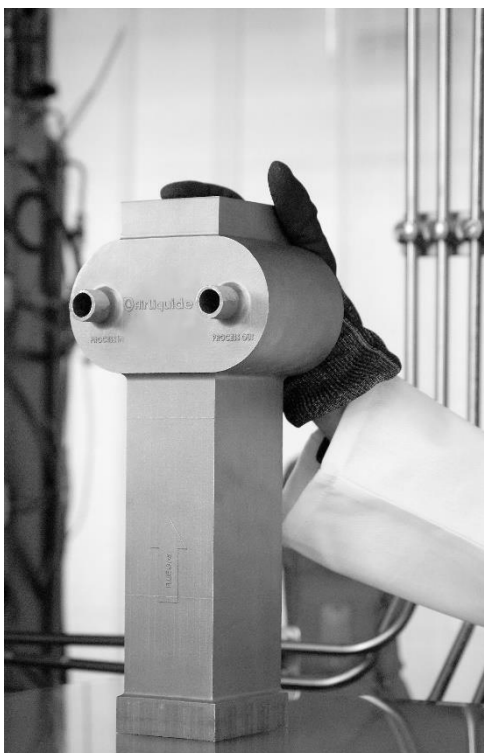


Figure 16 - Echangeur-réacteur milli-structuré pour la production de H<sub>2</sub> par vaporeformage réalisé par fabrication additive (capacité 5 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub>, Air Liquide, 2015) (source Air Liquide)

Suite à ce succès s'est posé la question du changement d'échelle avec un défi de taille : comment proposer des équipements avec une capacité de production 10 fois plus importante tout en restant compétitif avec la fabrication additive ?

Le projet FAIR, pour Fabrication Additive pour l'Intensification de Réacteurs (PSPC financé par Bpifrance entre 2016-2020, dans le cadre du PIA) [23]) a alors été lancé pour répondre à cette problématique ambitieuse. Le projet FAIR a mis en avant que la fabrication fusion laser sur lit de poudre n'est pas simplement un procédé "presse bouton". En effet, les pièces à fabriquer pour cette montée en capacité de production d'hydrogène correspondaient aux limites d'occupation des plateaux de fabrication. La réalisation de telles pièces avec une vitesse de production de l'imprimante accrue se révèle alors être un défi qui nécessite une maîtrise complète de la chaîne de fabrication de la gestion du fichier CAO à la maîtrise parfaite de la machine et de ses paramètres. Le projet FAIR a permis de multiplier par 4 la vitesse d'impression (passage de 15 cc/h de matière fondue à 60 cc/h) pour des pièces dont le volume a été multiplié par 3 et des taux d'occupation du plateau de fabrication supérieur à 80%. L'évolution des tailles

de réacteurs est illustrée sur la Figure 17.

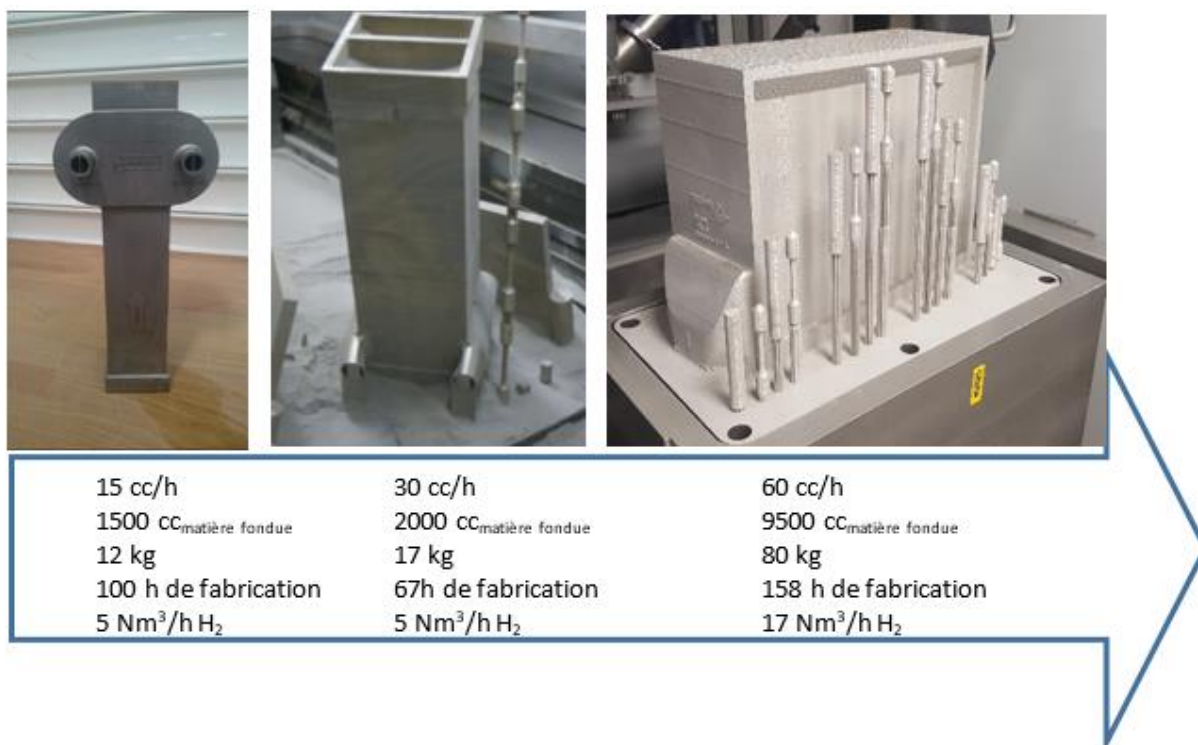


Figure 17 - Evolution de la vitesse de fabrication des réacteurs au cours du projet FAIR (Source Air Liquide - Poly-Shape)

Un tel réacteur peut présenter une solution particulièrement intéressante pour la production sur site d'hydrogène, où son intégration thermique importante lui confère un avantage majeur vis-à-vis de la consommation de gaz naturel et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

### 3.2 Autres exemples de réalisation

De nombreux autres exemples d'applications, dont certains sont encore à un stade de développement, utilisent des procédés de fabrication additive pour atteindre les objectifs de modification géométriques permettant l'intensification escomptée. Sans être exhaustif, certains exemples particulièrement pertinents sont rapportés ci-après (tableau 4).

Equipements	Avantages apportés par l'intensification par modification géométrique	Avantages apportés par la fabrication additive	Références
Catalyseurs structurés	<p>Amélioration des transferts de masse et de chaleur</p> <p>Contrôle des conditions locale (écoulement, mélange etc...)</p> <p>Contrôle de la sélectivité</p> <p>Modularité et passage de réaction batch à continue</p>	<p>Liberté de conception en termes de structure</p> <p>Possibilité de recourir à des méthodologies de conception avancée notamment basées sur la CFD (Computational Fluid Dynamic) -</p> <p>Possibilité d'avoir une fonctionnalisation de l'équipement</p>	[9], [27] [28], [31], [32], [34], [35], [36]

	Amélioration de la sélectivité	lors de sa fabrication (catalyseur imprimé en même temps, fonction d'analyse etc...)	
Réacteurs structurés	<p>Amélioration des transferts de matière et de chaleur</p> <p>Contrôle des conditions locale (écoulement, mélange etc...)</p> <p>Meilleur contrôle de température de l'équipement (réaction exothermique)</p> <p>Sécurité accrue avec la réduction des volumes de réactif en présence</p> <p>Contrôle de la sélectivité</p> <p>Modularité et passage de réaction batch à continue</p> <p>Amélioration de la sélectivité</p> <p>Organisation maîtrisée des courants de réactifs ou de phases, par des distributeurs et collecteurs spécifiques</p>	<p>Liberté de conception en termes de structure</p> <p>Possibilité de recourir à des méthodologies de conception avancée notamment basées sur la CFD (Computational Fluid Dynamic) -</p> <p>Possibilité d'avoir une fonctionnalisation de l'équipement lors de sa fabrication (catalyseur imprimé en même temps, fonction d'analyse etc...)</p> <p>Structure monolithique, sans interfaces d'assemblage, meilleur intégrité mécanique,</p>	[9], [25], [26], [29], [32], [35], [36], [44]
Echangeurs compacts	<p>Equipement compact avec ratio S/V très élevé</p> <p>Structure d'échange avec des coefficients d'échanges améliorés</p> <p>Maximisation des forces motrices d'échange entre sources chaude et froide</p> <p>Structuration/texturation des surfaces pour les échangeurs diphasiques</p> <p>Accélération des régimes transitoires par réduction des masses et des effets inertiels</p>	<p>Liberté de conception en termes de structure</p> <p>Possibilité de recourir à des méthodologies de conception avancée notamment basées sur la CFD (Computational Fluid Dynamic) permettant notamment une parfaite equidistribution des fluides dans les canaux</p> <p>Optimisation de la structure pour minimiser le poids</p> <p>Réduction des risques de fuites entre fluides par fabrication monobloc sans joints</p> <p>Consolidation locale pour la résistance thermomécanique</p> <p>Fabrication directe à partir des fichiers numériques CAO/CFD</p> <p>Réduction du délai entre une proposition de design innovant et la réception de l'objet fabriqué</p>	[9], [11], [12], [24], [29], [30], [33]
Micro mélangeurs	<p>Amélioration de la mise en contact des fluides jusqu'à l'échelle moléculaire (échelle micro).</p> <p>Combinaison d'une série d'opérations géométriques: subdivision des flux, entrelacement des flux pour la création de striation, diminution de l'épaisseur de striation pour accélérer la diffusion moléculaire entre courants</p> <p>Contrôle hydrodynamique par le champ de vitesse et le cisaillement</p>	<p>Liberté de conception en termes de structure</p> <p>Possibilité de recourir à des méthodologies de conception avancée notamment basées sur la CFD (Computational Fluid Dynamic) pour contrôler précisément les vitesses de cisaillement et les temps de séjour</p> <p>Possibilité d'intégrer des canaux de fluides caloporteurs pour contrôler la température du milieu, par dégagement de chaleur s'il y a une</p>	[43], [44]

	<p>Amélioration de la sélectivité et du rendement des réactions complexes (chimie fine et pharmaceutique)</p> <p>Contrôle de la distribution granulométrique des particules dans le cas de précipitation</p> <p>Contrôle de la distribution des masses moléculaires dans le cas des réactions de polymérisation</p>	<p>réaction exothermique notamment (cas des emballements thermiques) ou s'il est nécessaire de contrôler la viscosité du milieu,</p> <p>Détermination précise de la géométrie et notamment du temps de passage pour éviter le bouchage des canaux en cas de réaction de polymérisation ou de précipitation</p> <p>Facilité du contrôle des conditions opératoires par modification du ratio des débits</p>	
Turbomachines (roues, turbines)	<p>Efficacité améliorée grâce de nouvelles formes d'aubes, de volute, densité de puissance augmentée</p> <p>Equilibrage facilité par la réduction de masse des roues</p> <p>Réduction du poids,</p>	<p>Structures complexes, faibles épaisseurs de parois,</p> <p>Gain en masse grâce à des structures optimisées topologiquement,</p> <p>Réparations rapides de pièces complexes,</p> <p>Fourniture rapide de pièces de rechanges aux clients</p> <p>Des turbines plus petites, pour les petites pompes haute pression</p>	[33], [37], [38], [39],
Garnissage	<p>Augmentation de l'aire interfaciale entre les fluides grâce à</p> <p>Augmentation des rapports surface sur volume de fluide</p> <p>Contrôle hydrodynamique des écoulements pour favoriser les transferts de matière locaux</p>	<p><u>Structures complexes</u>, faibles épaisseurs de structures,</p> <p><u>Gain en masse</u> grâce à des structures optimisées topologiquement,</p> <p>Possibilité d'intégrer des échangeurs thermiques pour la maîtrise des températures locales</p> <p>Conception de géométries complexes qui puissent permettre d'offrir une grande surface spécifique effective (mouillage des surfaces par la réorientation des écoulements liquides) par des distributeurs et collecteurs des fluides</p> <p>Fonctionnalisation des surfaces pour améliorer le mouillage.</p>	[40], [41], [42]

Tableau 4 : Exemples d'applications utilisant des procédés de fabrication additive pour atteindre les objectifs de modification géométriques permettant l'intensification.

À retenir
<ul style="list-style-type: none"> <li>- De nombreux exemples où la fabrication additive a permis d'apporter une solution d'intensification de procédés en fabricant des géométries adaptées existent aujourd'hui à différent stade de maturité (de l'objet de recherche jusqu'au produit industriel)</li> <li>- Les développements en ce sens touchent l'ensemble des opérations du génie des procédés des réacteurs aux turbomachines</li> <li>- Ces développements sont portés par une augmentation en capacité et en productivité des moyens de réalisation par fabrication additive</li> </ul>

## 4 Verrous et perspectives de la fabrication additive :

La fabrication additive rassemble différents procédés de fabrication, qui permettent une conception différente des équipements utilisés en génie des procédés, par rapport aux solutions de fabrication traditionnelles. Ces solutions de fabrication avancées autorisent la création de géométries et de topologies complexes, inaccessibles aux technologies de fabrication traditionnelles. Ces avantages ont été démontrés dans la conception et la fabrication de nouveaux échangeurs de chaleur, de réacteurs et d'internes de réacteurs, de distributeurs et de mélangeurs, ...

Néanmoins, de nombreux challenges restent à relever aussi bien sur la méthodologie de conception que sur les moyens de fabrication et l'appropriation de ces solutions à la fois par les organismes notifiés et les sociétés d'ingénierie.

La plupart des méthodologies et des outils disponibles pour le dimensionnement de ces équipements font appel à des règles de conception qui supposent des géométries et des topologies simples, ne prenant pas en compte les avantages offerts par la fabrication additive. De nouveaux outils doivent donc être développées, pour permettre d'utiliser au mieux le potentiel de la fabrication additive. Certaines entreprises ont été créées pour répondre à ces besoins spécifiques, par manque d'outils accessibles, comme la société TEMISTH en France, ou encore la société HiETA, en Grande Bretagne. Ainsi, les travaux sur les méthodologies et sur les outils doivent également se poursuivre les aspects d'intensification en travaillant notamment sur les solutions d'optimisation topologique de systèmes fortement non linéaires tels que rencontrés dans le génie de la réaction chimique. Le recours à des simulations CFD dans un objectif d'optimisation de design présente encore de nombreux défis. On peut notamment citer le couplage entre réaction et transport avec une modélisation multi-échelle suffisamment fiable tout en conservant des ressources de calcul acceptable. Néanmoins, des approches innovantes se mettent en place pour dépasser ces limitations. On peut par exemple mentionner dans le cadre de la conception d'échangeur innovant le recours au Machine Learning sur une banque d'ondes préalablement qualifiée par CFD. [45] Une fois l'entraînement de la machine réalisée la boucle d'optimisation s'appuie sur les résultats du Machine Learning pour aboutir à un design optimal de l'équipement, la CFD n'intervenant plus que pour une validation finale. Avec cette approche les temps et les besoins de calculs pour aboutir à un design optimal sont considérablement réduits.

La maturité technologique est très variable, selon les procédés de fabrication et pour un même procédé de fabrication, peut dépendre de la taille et de la complexité des équipements à fabriquer. Là encore, il est nécessaire de porter tous les cas d'usages d'intérêt à la connaissance des fabricants de machines et des fabricants d'équipements, de faire connaître ces besoins, pour susciter de nouveaux développements. Mais là encore, il convient d'être vigilant, quant au choix du procédés de fabrication, si le développement des nouveaux équipements est contraint par le temps. L'exemple traité en détail dans le cadre de cet article, pour la conception et la fabrication d'un réacteur-échangeur dédié à la production d'hydrogène, en est la parfaite illustration – le projet ayant vu évoluer les machines de fabrication de technologie LB-PBF de façon significative au cours des quatre dernières années - avec des équipements de plus de 80kg, produits en quelques jours en fin de projet, alors que leur fabrication semblait inenvisageable quelques années plus tôt. Le procédé LB-PBF étant très certainement le plus mature de tous à ce jour, il présente néanmoins toujours certaines limitations. Il est par exemple toujours assez difficile de produire,

par ce procédé, des pièces de grande dimension (représentant plus de 10 000 cm<sup>3</sup> de matière fondue par le laser), présentant de surcroît des structures fines, comme des ailettes d'échanges. La production de telles pièces nécessite des progrès sur la capacité (taille des enceintes de production, gestion des flux gazeux pour évacuation des fumées) et la productivité (nombre et puissance des lasers, paramétrie de production, épaisseur des couches de poudres). De telles machines représenteraient néanmoins un investissement financier conséquent, ce qui aurait un impact non négligeable sur le prix des pièces produites, et devront donc avoir l'assurance d'être chargée en production afin d'être rentabilisée.

Ces nouveaux procédés de fabrication n'étant pas encore reconnu dans le cadre des normes existantes, il convient bien souvent de qualifier chaque équipement individuellement, pour garantir la conformité de chacun vis-à-vis des réglementations en vigueur. Bien souvent, aujourd'hui, les équipements produits par ces nouvelles solutions de fabrication doivent être qualifiés de tout point de vue :

- Le processus de fabrication doit démontrer une certaine reproductibilité dans sa capacité à produire des pièces selon les spécifications demandées, en lien avec les processus qualité client,
- Les matériaux produits doivent également être qualifiés, en accord avec les normes en vigueur, pour chaque application.

Ces processus sont longs et coûteux, et la barrière réglementaire peut rebuter les nouveaux utilisateurs potentiels. La participation active des industriels aux Comités Normatifs, comme la commission UNM920, qui assure le suivi des instances ISO et CEN relatives aux procédés de fabrication additive, est essentielle à la prise en compte de la fabrication additive au sein des normes existantes. L'intégration de la fabrication additive dans ces normes est un point essentiel pour permettre aux bureaux d'étude et aux ingénieries d'y recourir plus largement.

Enfin, il convient d'évoquer le nécessaire changement des mentalités, au sein des industries chimiques, qui peuvent être, par nécessité, trop conservatives et peuvent voir d'avantage la fabrication additive comme un risque (inhérent à tout nouveau procédé de fabrication, notamment au regard des incertitudes de qualité matière) que comme une opportunité. Au-delà des développements qui peuvent être portés par les équipes de R&D, le changement doit venir des bureaux d'études, intégrés aux structures d'ingénierie de conception ou d'exploitation, qui portent la responsabilité de la conception et des modifications des produits.

#### **À retenir**

- LA FA apporte des solutions inédites pour la fabrication de géométries complexes, avec une fabrication simplifiée et plus directe
- Les procédés de FA restent néanmoins assez jeunes, et peuvent pâtir d'un manque de maturité
- Les contraintes liées aux aspects réglementaires et à la nécessaire qualification des nouveaux matériaux produits peuvent freiner l'adoption de la FA au sein des entreprises



## 5 Conclusion

L'intensification des procédés est facilitée par les récents progrès de la fabrication additive : de nouvelles géométries sont accessibles, avec un impact direct sur les dimensions caractéristiques, sur l'agencement spatial global des volumes et des surfaces pour fournir en tout point de l'équipement les conditions favorables à la transformation, et sur le design local des géométries pour maximiser la performance en optimisant la forme précise des volumes et surfaces qui régissent cette transformation. La fabrication additive est un outil d'un grand intérêt pour les scientifiques, et pas seulement pour le prototypage - pour la production par lots ou en petites séries, il peut déjà être compétitif.

La variété de nouveaux procédés de fabrication émergents chaque année, et les progrès réalisés pour rendre ces procédés plus matures, capables de produire des équipements toujours plus grands, avec une productivité sans cesse améliorée, nous laissent imaginer une utilisation généralisée dans les années futures, en tenant compte des exigences induites par les applications industrielles, avec la sécurité, la productivité et la capacité pour priorités. De nombreux acteurs industriels commencent à s'approprier les nouvelles règles de conception pour la fabrication additive, malgré les verrous encore existants. Nul doute qu'une fois ces verrous levés, l'impact de ces nouveaux procédés sera majeur pour l'industrie chimique.

## 6 Glossaire

### **CAO** (Conception Assistée par Ordinateur)

La conception assistée par ordinateur comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir des objets à l'aide d'un ordinateur

### **CEN** (Comité Européen de Normalisation)

### **CFD** (*Computational Fluid Dynamics*)

La mécanique des fluides numériques étudie les mouvements d'un fluide, ou leur impact sur le milieu, par la résolution numérique des équations régissant le fluide

### **DED** (*Direct Energy Deposition*)

Procédé de FA permettant de fabriquer des objets par dépôt sous flux d'énergie concentrée - une énergie thermique focalisée est utilisée pour fusionner des matériaux en les fondant au fur et à mesure qu'ils sont déposés - par utilisation de matières premières sous différentes formes (fil, poudre)

### **FA** (Fabrication Additive)

Ensemble de procédés de fabrication capable de produire un objet par ajout de matière à partir d'un fichier numérique

### **ISO** (*International Organisation for Standardization*)

Organisation Internationale de Normalisation

**LB-PBF** (*Laser-Beam Powder-Bed Fusion*)

Procédé de FA permettant de fabriquer des objets par fusion laser d'un lit de poudre métallique.

**UNM** (Union de Normalisation de la Mécanique)**UV** (ultraviolet)**Vaporeformage** (Steam Reforming)

Réaction endothermique entre des hydrocarbures (principalement le méthane) et de la vapeur d'eau pour former un gaz de synthèse (mélange de H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) riche en hydrogène.

**WAAM** (*Wire Arc Additive Manufacturing*)

Procédé de FA de type DED, utilisant un arc électrique pour générer la chaleur nécessaire à la fusion de la matière première sous forme de fil

## 7 Sigles, Notations et Symboles

Symbole	Description	Unité
A	Surface	m <sup>2</sup>
Γ	Coefficient de diffusion	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
I <sub>s</sub>	Intensité de ségrégation	-
L	Dimension caractéristique	m
Y	Quantité par unité de volume d'une grandeur à échanger (énergie ou matière)	J.m <sup>-3</sup> ou mol.m <sup>-3</sup>
φ	Flux de transfert	J.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ou mol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>

# Apport de la fabrication additive à l'intensification des procédés

*Title : Contribution of Additive Manufacturing to Process Intensification*

par **Jean-Marc COMMENGE**

Fonction: Professeur à l'Université de Lorraine

Affiliation: Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

**Laurent FALK**

Fonction: Directeur de recherche CNRS

Affiliation: Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

**Raphael FAURE**

Fonction : Responsable d'équipe Conception et Fabrication

Affiliation : Campus Innovation Paris, Air Liquide R&D, 1 chemin de la Porte des Loges, 78354 Les Loges en Josas

**Matthieu FLIN**

Fonction: Coordinateur de projet R&D

Affiliation : Campus Innovation Paris, Air Liquide R&D, 1 chemin de la Porte des Loges, 78354 Les Loges en Josas

## Sources bibliographiques

- [1] European roadmap for process intensification, [https://efce.info/efce\\_media/p-531.pdf](https://efce.info/efce_media/p-531.pdf),
- [2] Horbez, D. et al. "L'usine du futur pour l'industries de procédés", Livre blanc, SFGP, 2019
- [3] Techniques de L'ingénieur, rubrique Intensification des procédés et méthodes d'analyse durables, [42493210]
- [4] Techniques de L'ingénieur, rubrique Procédés de fabrication additive, [42633210]
- [5] J.M. Commenge, L. Falk, "Reaction and Process System Analysis, Miniaturization and Intensification Strategies", Chap. 2 dans "Micro Process Engineering – A comprehensive Handbook, volume 3: system, process and plant engineering, Ed. V. Hessel, A. Renken, J.C. Schouten et J. Yoshida, Wiley-VCH, Weinheim, Allemagne, 2009]
- [6] C. Gourdon, "Intensification des procédés - Fondamentaux et exemples d'industrialisation", Techniques de l'ingénieur, J7002 v1, 2016
- [7] L. Falk, J.M. Commenge, J.F. Portha, "Principes théoriques de la chimie en flux", Techniques de l'ingénieur, J8025 v1, 2019
- [8] A. Bejan, S. Lorente, "Design with Construtal theory", Wiley, 2008; A. Bejan, "Shape and Structure, from Engineering to Nature", Ed. Cambridge University Press, 2020].
- [9] Stark, A. K., "Manufactured chemistry: rethinking unit operation design in the age of additive manufacturing", AIChE Journal, 64, 4, 1162-1173, 2018.
- [10] Behrou, R., Pizzolato, A., Forner-Cuenca, A., "Topology optimization as a powerful tool to design advanced PEMFCs flow fields", Int. J. Heat Mass Transfer, 135, 72-92, 2019)
- [11] Lazarov, B. S., Sigmund, O., Meyer, K. E., Alexandersen, J., "Experimental validation of additively manufactured optimized shapes for passive cooling", Applied Energy, 226, 330-339, 2018
- [12] Ge, R., Humbert, G., Martinez, R., Attallah, M. M., Sciacovelli, A., "Additive manufacturing of a topology-optimised multi-tube energy storage device: experimental tests and numerical analysis", Applied Thermal Engineering, 180, 115878, 2020
- [13] Dehghani, T., Moghanlou, F. S., Vajdi, M., Asl, M. S., Shokouhimehr, M., Mohammadi, M., "Mixing enhancement through a micromixer using topology optimization", Chem. Eng.

Res. Des., 161, 187-196, 2020

[14] Kumar, V., Jha, K., “Multi-objective shape optimization of vortex finders in cyclone separators using response surface methodology and genetic algorithms”, Separation and Purification Technology, 215, 25-31, 2019

[15] Miramontes, E., Love, L. J., Lai, C., Sun, X., Tsouris, C., “Additively manufactured packed bed device for process intensification of CO<sub>2</sub> absorption and other chemical processes”, Chem. Eng. J., 388, 124092, 2020)

[16] L'impression 3D – Etat des lieux et perspectives, étude du DIRECCTE Centre, en partenariat avec la CCI Centre, <https://centre-val-de-loire.direccte.gouv.fr/L-impression-3-D-etat-des-lieux-et> (2014)

[17] Fabrication additive métallique – Les fondamentaux, publication du CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES MÉCANIQUES (Cetim), 2019, ISBN 978-2-36894-160-7

[18] Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry , John O. MILEWSKI, Springer, 2017

[19] C. BOURLET, F. SCANDELLA, L. JUBIN, Etat de l'art de fabrication additive métallique avec du fil, Soudage et techniques connexes, Institut de Soudure, Novembre-Décembre 2017

[20] J.R. Rostrup-Nielsen, “Catalytic Steam Reforming”, Springer-Verlag, 1983

[21] J. De Deken, E.F. Devos, G.F Froment, “American Chemical Society Steam Reforming of Natural Gas: Intrinsic Kinetics, Diffusional Influence and Reactor Design”, Chemical Reaction Engineering, ACS Symp. Ser. 196, 1982

[22] M.A. Soliman, S.S.E.H. Elnashaie, A.S. Al-Ubaid, A.M. Adris, “Simulation of Steam Reformers for Methane”, Chemical Engineering Science Vol. 43, 1803-1809, 1988

[23] Site internet de Bpifrance, article consacré au projet FAIR, “FAIR un projet collaboratif ambitieux”, 2016 <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Actualites/Fair-un-projet-collaboratif-ambitieux-dans-le-domaine-de-l-impression-3D-26815>

[24] M. Arie, A. Shooshtari, V. V. Rao, S. Dessiatoun, M. Ohadi, “Air-Side Heat Transfer Enhancement Utilizing Design Optimization and an Additive Manufacturing Technique”, Journal of Heat Transfer Vol. 139, 2016

[25] Obinna Okafor, Andreas Weillhard, Jesum A. Fernandes, Erno Karjalainen, Ruth Goodridge, Victor Sans, “Advanced reactor engineering with 3D printing for the continuous-flow synthesis of silver nanoparticles”, Reaction Chemistry and Engineering Vol. 2, 2017

[26] Mark D. Symes, Philip J. Kitson, Jun Yan, Craig J. Richmond, Geoffrey J.T. Cooper, Richard W. Bowman, Turlif Vilbrandt, and Leroy Cronin, “Integrated 3d-printed reactionware for chemical synthesis and analysis”, Nature chemistry Vol. 4, 349–354, 2012.

[27] Y. Elias, Ph. Rudolf von Rohr, W. Bonrath, J. Medlock, A. Buss, “A porous structured reactor for hydrogenation reactions”, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification Vol.95, 175–185, 2015.

[28] John N. Stuecker, James E. Miller, Robert E. Ferrizz, Jason E. Mudd, and Joseph Cesarano, “Advanced support structures for enhanced catalytic activity”, Industrial & engineering chemistry research, Vol. 43, 51–55, 2004.

[29] J.R. McDonough, “A perspective on the current and future roles of additive manufacturing in process engineering, with an emphasis on heat transfer”, Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 19, 2020.

[30] C. Septet, G. El Achkar, , O. Le Metayer, J.M. Hugo, "Experimental investigation of two-phase liquid-vapor flow in additive manufactured heat exchanger", Applied Thermal Engineering Vol. 179, 2020.

[31] X. Nguyen, A. Carafa, C.H. Hormung , “Hydrogenation of vinyl acetate using a continuous flow tubular reactor with catalytic static mixers”, Chemical Engineering & Processing : Process Intensification Vol.124, 215-221, 2018

[32] Printcredit, site internet du projet <https://www.sintef.no/projectweb/printr3dit/>

- [33] Site internet de la société HIETA <https://www.hieta.biz/>
- [34] Sonia García, Stephen Poulston, Deena Modeshia, Petr Stavarek, Massimo Ujcic, Lali, Manuel A. Alves, José D. Araújo, Michael Krusche, Frank Ullrich, Diana Maier, “Continuous production of squalane using 3D printed catalytic supports”, Johnson Matthey Technology Review, 2019
- [35] A. Avril, C. H. Hornung, A. Urban, D. Fraser, M. Horne, J-P. Veder, J. Tsanaktsidis, T. Rodopoulos, C. Henry, DR Gunasegaram, “Continuous flow hydrogenations using novel catalytic static mixers inside a tubular reactor” Reaction Chemistry & Engineering, Vol. 2, 180–188, 2017
- [36] Sergio Rossi, Alessandra Puglisi, Maurizio Benaglia. “Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis”. ChemCatChem Vol.10, 2017
- [37] N. Qaud, “Additive manufacturing technologies at Sulzer”, Sulzer Technical Review, Vol. 2, 2018
- [38] T. Kranzler, “Process method for manufacturing implellers by Selective Laser Melting, Sulzer White Paper in Sulzer Technical Review, Vol. 2, 2018
- [39] R. Smith, “Sierra Turbines drives innovation for microturbines”, 2020
- [40] Konrad Gładyszewskiab, Mirko Skiborowska, “Additive manufacturing of packings for rotating packed beds”, Chemical Engineering and Processing : Process Intensification, Vol. 127, 1-9, 2018
- [41] Johannes Neukäuffer, Florian Hanusch, Martin Kutscherauer, Sebastian Rehfeldt, Harald Klein, Thomas Grützner, “Methodology for the Development of Additively Manufactured Packings in Thermal Separation Technology”, Chemical Engineering Technology Vol. 42, 1970 – 1977, 2019
- [42] He Gongqiang, Kochergin Vadim, Li Yuehao, Nandakumar Krishnaswamy, “Investigations about the effect of fractal distributors on the hydrodynamics of fractal packs of novel plate and frame designs”, Chemical Engineering Science, Volume 177, 195-209, 2018
- [43] L.S. Ojala, P. Uusi-Kyyny, V. Alopaeus, “Prototyping a calorimeter mixing cell with direct metal laser sintering”, Chemical Engineering Research and Design Vol. 108,146-151, 2016
- [44] T. Femmer, I. Flack, M. Wessling, , “Additive manufacturing in fluid process engineering”, Chemie Ingenieur Technik Vol. 88, 535-552, 2016
- [45] S. Cadalen, Black Box optimization for additive manufactured heat exchangers, Presentation at EURO 2018 (29th European Conference on Operational Research), Conference Handbook p.352

#### À lire également dans nos bases

- Floriane LAVERNE, Frédéric SEGONDS, Patrice DUBOIS - *Fabrication additive – Principes généraux*. [BM7017]
- Marc THOMAS, Cécile DAVOINE, Stefan DRAWIN , *Fabrication additive en aeronautique et en spatial*. [BM7940]
- Frédéric SEGONDS, *Créativité et fabrication additive - Infographie*. [IBM7017]
- Sébastien PILLOT, *Fusion laser selective de lit de poudres métalliques*. [BM7900]
- Christophe GOURDON, *Intensification des procédés - Fondamentaux et exemples d'utilisation*. [J7002]
- Jean-Claude CHARPENTIER, *Intensification des procédés - Introduction*. [J7000]
- Clarisse MARIET, Christine DALMAZZONE, Marie MARSIGLIA, Emmanuel MIGNARD, Axel VANSTEENE, Laurent VIO, *Microréacteurs : outils d'intensification de la chimie*. [CHV2227]

Jean-Claude ANDRÉ, *Stéréolithographie par photopolymérisation* [BM7910]  
Jean-Claude ANDRÉ, *Impression 3D : niches applicatives porteuses* [BM7970]  
Jean-Claude ANDRÉ, *Fabrication additive : révolution ou simple évolution sociétale ?* [AG115]  
Jean-Claude ANDRÉ, *Recyclage des déchets d'impression 3D* [BM7975]

## Normes et standards

ISO, *Fabrication additive — Principes généraux — Partie 2: Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières*, ISO 17296-2:2015  
ISO, *Fabrication additive — Principes généraux — Partie 3: Principales caractéristiques et méthodes d'essai correspondantes*, ISO 17296-3:2014  
ISO, *Préparation des éprouvettes de matériaux thermoplastiques par des techniques sans moule — Partie 1: Principes généraux, et frittage laser des éprouvettes*, ISO 27547-1:2010  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Principes généraux — Terminologie*, ISO/ASTM 52900:2015  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Principes généraux — Principes essentiels et vocabulaire*, ISO/ASTM DIS 52900  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Principes généraux — Exigences pour l'achat de pièces*, ISO/ASTM 52901:2017  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Pièces types d'essai — Évaluation de la capacité géométrique des systèmes de fabrication additive*, ISO/ASTM 52902:2019  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Fabrication additive de matériaux plastiques à base d'extrusion de matière*, ISO/ASTM 52903:2020  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Caractéristiques et performances du procédé — Pratique du procédé de fusion sur lit de poudre métallique en vue de répondre aux applications critiques*, ISO/ASTM 52904:2019  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Matières premières — Méthodes pour caractériser les poudres métalliques*, ISO/ASTM 52907:2019  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Conception — Exigences, lignes directrices et recommandations*, ISO/ASTM 52910:2018  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Conception — Partie 1: Fusion laser sur lit de poudre métallique* ISO/ASTM 52911-1:2019  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Conception — Partie 2: Fusion laser sur lit de poudre polymère*, ISO/ASTM 52911-2:2019  
ISO/ASTM, *Fabrication additive — Principes de qualification — Installation, fonctionnement et performances (IQ/OQ/PQ) de l'équipement de PBF-LB*, ISO/ASTM PRF TS 52930

## Réglementation

Rien n'a été ajouté ici

## Brevets

Rien n'a été ajouté ici

## Annuaire

### Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

Add-Up, fabricant et distributeur de machines LB-PBF et DED-P, services de productions de pièces, services de formation, <https://addupsolutions.com/fr/>

AFHS 3D (ancienne fonderie BOUTTE), production de moules sable par fabrication additive, pour procédés fonderie, <https://www.afhs3d.fr/accueil>

EOS, fabricant et distributeur de machines pour production de pièces en fabrication additive par fusion laser (métal, polymères), <https://www.eos.info/en>

HIETA (UK), conception et fabrication d'équipements pour la fabrication additive (échangeurs de chaleur, turbomachines, brûleurs), <https://www.hieta.biz/>

Poly-Shape (Groupe Add-Up), production de pièces par LB-PBF et DED, <https://www.poly-shape.com/contact/>

SLM Solutions GmbH, fabrication de machines LB-PBF, <https://www.slm-solutions.com/>

TEMISTH, conception d'échangeurs de chaleur innovants pour la fabrication additive, <http://temisth.com/temisth/>

VOLUM-E, production de pièces par fabrication additive (métal, polymère), <https://www.volum-e.com/>

### Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

Additive Factory Hub, plateforme collaborative pour le développement de la fabrication additive, <https://www.additivefactoryhub.com/>

European Process Intensification Community (EUROPIC), <https://europic-centre.eu/>

European Federation of Chemical Engineering (EFCE), <https://efce.info/>

France Additive, association professionnelle des acteurs de la fabrication additive en France, <https://franceadditive.tech/>

La Fabrication Additive, portail de l'offre fabrication additive en France, <https://www.la-fabrication-additive.com/>

Société Française de Génie des Procédés (SFGP), <https://www.sfgp.asso.fr/>

The Welding Institute (TWI), <https://theweldinginstitute.com/>

### Documentation - Formation – Séminaires (liste non exhaustive)

Sites d'information spécialisés en fabrication additive :

3D Natives, <https://www.3dnatives.com/impression-3d-metal/>

A3DM Magazine, <https://www.a3dm-magazine.fr/>

Metal AM, <https://www.metal-am.com>

Sites d'information spécialisés en génie des procédés :

Chemical Engineering on-line, <https://www.chemengonline.com/site/latest-news/>

Chemical and Engineering news, <https://cen.acs.org/index.html>

The Chemical Engineer, <https://www.thechemicalengineer.com/>

### Laboratoires – Bureaux d'études – Écoles – Centres de recherche (liste non exhaustive)

CEA-LITEN, Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux, <https://liten.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/Axes-de-recherche/Economie-circulaire/Fabrication-additive.aspx>

CETIM, Centre Technique Industriel des Industries Mécaniques, notamment impliqué sur l'essor des solutions de fabrication additive en France, <https://www.cetim.fr>

Centre des Matériaux - Mines ParisTech, <http://www.mat.mines-paristech.fr/Accueil/>

CIRTES, <https://cirtes.com/>

CTIF, Centre Technique Industriel des industries de Fonderie, <https://www.ctif.com/>

Ecole Centrale de Nantes, <https://www.ec-nantes.fr/recherche/themes-de-recherche/manufacturing-et-fabrication-additive>

ENSAM-PIMM (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, laboratoire des Procédés et de l'Ingénierie Mécanique des Matériaux, CNRS UMR 8006), <https://pimm.artsetmetiers.fr/fabrication-additive-par-laser>,

GEPEA, Laboratoire de Génie des Procédés – Environnement – Agro-alimentaire, <https://www.gepea.fr>

IFPEN, Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles, <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr>

IJL, Institut Jean Lamour, <https://tto.ijl.univ-lorraine.fr>

LAAS, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, <https://www.laas.fr/projects/MultiFAB>

LAGEPP, Laboratoire d'Automatique, de Génie des Procédés et de Génie Pharmaceutique, <https://lagepp.univ-lyon1.fr/>

LGC, Laboratoire de Génie Chimique, <https://lgc.cnrs.fr/>

LGPC, Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques, <https://www.lgpc.fr>

LORIA, Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications, <https://www.loria.fr>

LRGP, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés, <https://lrgp-nancy.cnrs.fr>

RAPSODEE, Centre de recherche d'Albi en génie des procédés des solides divisés, de l'énergie et de l'environnement, <https://www.imt-mines-albi.fr/fr/rapsodee>