



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **BM7975 V1**

Recyclage des déchets d'impression 3D

Date de publication :
10 juin 2020

Cet article est issu de : **Mécanique | Fabrication additive – Impression 3D**

par **Jean-Claude ANDRÉ**

Mots-clés

développement durable |
matériaux | fabrication additive
| recyclage | matière

Résumé L'impression 3D offre un avantage de principe relativement aux technologies de fabrication soustractives conventionnelles, celui de n'utiliser que la seule quantité de matière nécessaire à la réalisation d'un objet avec des gains en termes de consommation de matière. Plusieurs types de déchets peuvent être toutefois pris en considération selon les procédés d'addition de matière, les pièces ratées ou plus généralement les matières qui leur ont donné naissance durant le processus de fabrication.

L'article présente les intérêts et problèmes associés à leur recyclage, les modes principaux de recyclage actuels. Il ne fait pas mention du recyclage des pièces ratées, sauf dans le cas des polymères fusibles, ni d'autres conceptions d'objets utilisant des supports, ou de composites, ou de systèmes multi-matériaux.

Keywords

sustainable development |
materials | additive
manufacturing | recycling |
matter

Abstract 3D printing offers a principle advantage over conventional subtractive manufacturing technologies that of using only the matter quantity needed to produce an object with gains in terms of material consumption. But several types of waste can be taken into consideration depending on the additive process, failed parts or more generally the materials that gave rise to them during the manufacturing process.

The article presents the interests and problems associated with their recycling, the main modes of current recycling. It does not mention the recycling of failed parts, except in the case of fusible polymers, or other designs of objects using supports, or composites, or multi-material systems.

Pour toute question :

Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :

infos.clients@teching.com

Par téléphone :

00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **03/11/2024**

Pour le compte : **7200023220 - universite de lorraine // 193.50.135.4**

© Techniques de l'Ingénieur | Tous droits réservés

Recyclage des déchets d'impression 3D

par **Jean-Claude ANDRÉ**
Directeur de recherche au CNRS

1. Des procédés et des matériaux	BM 7 975 – 2
1.1 Procédés	— 3
1.2 Matières et matériaux	— 3
1.3 Mise en forme des matériaux	— 4
1.3.1 Poudres	— 4
1.3.2 Filaments	— 4
1.3.3 Résines	— 5
1.4 Effet de la fabrication sur la transformation des matériaux	— 5
1.4.1 Poudres	— 5
1.4.2 Filaments	— 6
1.4.3 Résines	— 6
2. Entre technologie « verte » et simple recyclage des matériaux	— 6
2.1 Développement durable et fabrication additive	— 6
2.2 Analyse du cycle de vie	— 7
2.3 Recyclages	— 7
2.3.1 Poudres	— 7
2.3.2 Filaments	— 8
2.3.3 Résines	— 8
2.3.4 Autres considérations	— 8
2.4 Hygiène, Sécurité et Environnement	— 8
3. Conclusion : vers un mode d'emploi du recyclage ?	— 8
Pour en savoir plus	Doc. BM 7 975

La fabrication additive est fortement associée à l'existence d'un marché économique mondial de quelques dizaines de milliards €/an avec une progression de l'ordre de 20 % par an. Le succès de cette technologie tient à plusieurs raisons qui vont de la réalisation de pièces complexes de type high-tech à des applications domestiques ou ludiques à très bas coûts. L'ensemble des procédés est considéré favorablement, car il semble participer à une économie durable : on utilise en principe juste la bonne quantité de matière pour réaliser un objet. Cette image très positive d'une part, et la jeunesse de la technologie d'autre part, font que les préoccupations essentielles des chercheurs et des industriels ont été focalisées sur les performances des machines, toujours en progrès. Ce n'est que récemment que les utilisateurs de machines à très bas coût se sont préoccupés de la fabrication de filaments fusibles à partir de déchets souvent ménagers de type polymères thermoplastiques. Il n'y avait qu'un petit pas à franchir pour utiliser une autre source de déchets, celle issue des pièces considérées comme défectueuses. Les pièces réalisées sont généralement produites à titre personnel et ne correspondent pratiquement pas à un marché économique. Les préparations des matériaux ainsi que la qualité des pièces réalisées ne répondent pas à un cahier des charges très précis. En revanche, en prenant l'exemple de pièces mécaniques 3D pour l'espace, il n'est pas possible de prendre le risque d'utiliser des matières et/ou des matériaux non

certifiés pour des raisons évidentes de sécurité. La notion de recyclage ne prend donc pas le même sens, ni la même urgence selon la performance recherchée (et le coût de l'objet par rapport à celui de la matière qui lui a donné naissance) de la pièce à réaliser par fabrication additive. Il s'agit bien de se positionner précisément relativement à un seuil de rentabilité vis-à-vis d'un risque (de quelque nature qu'il soit).

Cet article concernant le recyclage de matières et matériaux traite d'un domaine émergent avec des axes plus développés que d'autres pour les raisons évoquées rapidement ci-dessus. Dans ces conditions particulières, l'auteur a fait appel non seulement aux publications scientifiques, mais également à la littérature grise non évaluée par les pairs (sites internet par exemple). Des analyses présentées dans ce document l'ont amené à :

- faire un rappel concernant les différents types de matières et matériaux utilisés en fabrication additive ;
- rappeler quels sont les effets sur la qualité des pièces 3D d'un éventuel recyclage ;
- présenter les technologies actuelles de recyclage. Rappelons que pour le moment, les grands industriels du domaine n'ont pas investi ce marché et que les travaux universitaires sur le sujet sont modestes en nombre.

Par ailleurs, Google Scholar sur le thème « materials for additive manufacturing » fait état de plus de deux millions de publications ; le présent document se veut plus synthétique en ne considérant que les principaux matériaux utilisés.

1. Des procédés et des matériaux

Les techniques de fabrication additive sont maintenant bien connues avec de nombreux avantages. Le lecteur intéressé pourra utilement se reporter aux publications de Techniques de l'Ingénieur sur le sujet [À lire également dans nos bases] ainsi que Mizeret [1], Dodziuk [2], Conner [3], André [4], etc.

GAO [5] place la fabrication additive comme une technologie pouvant s'inscrire dans les fondements du développement durable parce qu'il est possible d'éviter des pertes de matière. Pour Sauerwein *et al.* [6], l'offre actuelle de matériaux imprimables en 3D devrait continuer de s'élargir avec de nouveaux matériaux issus de la recherche. Indépendamment des aspects financiers ou de développement durable, Hunt *et al.* [7] posent la question : « Cette croissance de l'impression 3D risque de créer encore plus de plastique non recyclé et gaspillé que ne le fait actuellement l'industrie plastique conventionnelle ». Le recyclage devient alors une nécessité pour la survie de la planète... Il faut cependant temporiser cet avis en comparant l'ensemble des quantités de matériaux utilisés en fabrication additive par rapport à d'autres usages.

Cette petite révolution, initiée en 1984 (André, Le Méhauté et de Witte [8] en France, Hull [9] aux USA), laisse penser que les procédés de fabrication additive, parce qu'ils occupent de manière incrémentale des niches applicatives toujours nouvelles et porteuses, vont continuer encore longtemps à se développer pour devenir une technologie diffusante, étouffant les autres méthodes de fabrication qui ont constitué l'ossature de la production industrielle du xx^e siècle. Mais que représentent quelques dizaines de milliards

€/an relativement à l'économie mondiale qui est de l'ordre de 100 000 milliards € ? (NAP [10] ; UN [11]). Le début du xxi^e siècle est marqué par la présence hégémonique de la transition numérique avec, en complément technologique et pratique, les procédés de fabrication additive susceptibles d'affecter en profondeur et rapidement la société occidentale. Cette situation où c'est le bénéfice associé qui l'emporte sur les autres considérations permet, pour certains, de faire fi des aspects environnementaux. Pour d'autres, l'appréciation de technologie « verte » peut intervenir en complément comme un atout pour la promotion d'une technologie plus frugale en termes de consommation de matière (Niaki, Torabi et Nonino [12]). Dans cet esprit, comme il s'agit au départ de matériaux spécifiquement préparés pour la fabrication additive, certains considèrent à juste titre qu'il peut être avantageux d'être capable de recycler les matières non utilisées lors du processus de fabrication, voire les pièces elles-mêmes.

Cet article se focalise sur cette volonté d'examen des possibles recyclages et de leurs performances. Toutefois, les présentations qui vont suivre ne démontrent pas que la fabrication additive est effectivement un processus de fabrication beaucoup plus vertueux que les processus de fabrication plus traditionnels en termes environnementaux. En effet, d'autres considérations devraient être prises en compte comme la consommation d'énergie sur l'ensemble des processus (même si la fabrication peut être réalisée à proximité de l'utilisateur). À cette fin, des articles récents font état d'études (analyses de cycle de vie en particulier) qui ne permettent pas de conclure, de manière complète, et ce, quelle que soit la technologie retenue, que la fabrication additive constitue LE procédé optimal.

Si, en 1984, le premier procédé breveté et industrialisé a consisté en une polymérisation résolue dans l'espace induite par de la lumière (stéréo-lithographie), d'autres procédés se sont développés depuis. Rappelons que l'impression 3D recouvre en réalité toute

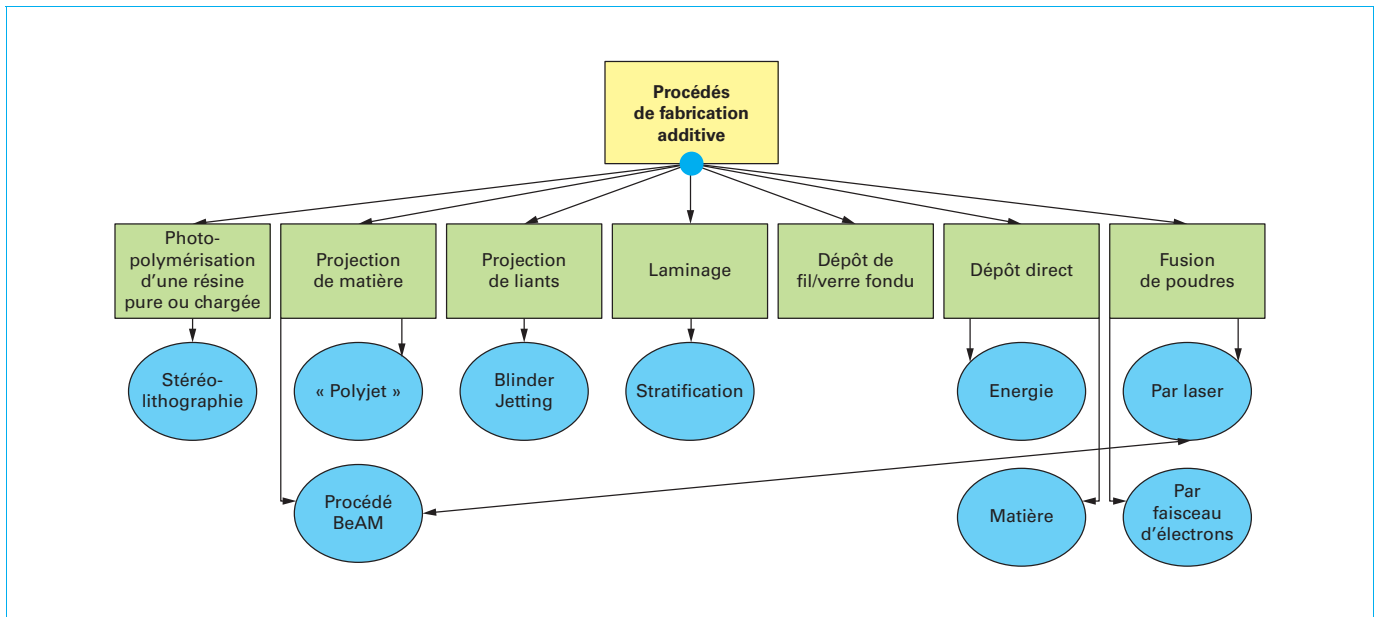


Figure 1 – Les différents procédés de fabrication additive

une série de procédés qui ont en commun de fabriquer des objets par dépôt de couches successives de matière (ou plus simplement d'ajouts comme des fils fondus), lesquelles sont solidifiées au fur et à mesure de la fabrication. Elle est définie par l'AFNOR (2011) [13] comme « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique ».

1.1 Procédés

Les principes de fabrication reposent sur la même base d'additivité. Mais, comme le montrent la figure 1 et le tableau 1, les procédés diffèrent essentiellement par la nature et les modes d'adhésion de la matière à l'objet en construction (André [4]). La règle du jeu est bien de disposer soit d'une énergie localisée, soit d'un positionnement du matériau localisé, soit des deux.

1.2 Matières et matériaux

Différents types de matériaux (avec des mises en forme adaptées à chaque méthode d'impression 3D) sont, en dehors des « grands classiques » (monomères multifonctionnels, polymères fusibles, métaux et alliages, céramiques), associés à ces différents procédés (Cabanis [14] ; Low *et al.* [15] ; Guimon [16] ; Bourell *et al.* [17]). La liste non exhaustive présentée ci-après indique les principales caractéristiques des matériaux utilisés en fabrication additive.

- Métaux (Orcutt [18] ; Blanc [19] ; Hegab [20]) : aluminium, acier, laiton, cuivre, bronze, argent sterling (alliage d'argent à 92,5 %), or, platine, titane, inconnu et autres alliages (Notteau [21] ; Barclift *et al.* [22]) ; l'évolution sur-exponentielle d'utilisation de matériaux métalliques sous formes de poudres a atteint environ 800 tonnes en 2015 (Pécoul [23]) ; matériaux mixtes polymère/métal (Notteau [21] ; Victor [24] ; Lee, Chou et Huang [25] ; Markforged [26]) ; alliages (Wei *et al.* [27] ; Aubert et Duval [28]).

- Matériaux contenant du graphène, 10 fois plus résistant que l'acier (Chandler [29]).

- Polymères : Thermoplastic Polyurethane (TPU) et Poly-(Lactic Acid) (PLA), ABS, etc. chargés ou non en oxyde de graphène (issu

de l'oxyde de graphite lui-même provenant du graphite exfolié (El Achaby [30]) disposant de bonnes qualités mécaniques (Chen *et al.* [31] ; Scaffaro *et al.* [32]).

- Polymères « actifs » sensibles à une stimulation extérieure comme la température, des solvants, des ondes électromagnétiques, etc. (Chen *et al.* [33]).

- Céramiques (Compton et Lewis [34] ; Chartier et Chaput [35] ; Gonzalez *et al.* [36]). Pour les céramiques traditionnelles, il s'agit de matières premières naturelles (terre glaise, argile, kaolin). Pour les céramiques techniques, ce sont des poudres micrométriques obtenues par synthèse chimique ; on parle souvent de « céramiques fines » (Déjou [37]).

- Ciment : murs extérieurs de maisons 3D (Bensoussan [38]).

- Argile : cloisons intérieures de maisons 3D.

- Bois : en fait une pâte composée à 50 % environ de poussières de bois et de résine polymère pour réaliser des objets de taille décimétrique (Pringle, Rudnicki et Pearce [39]).

- Pierre et marbre : idem ; assemblage de poudres de poussière de pierre et de résine.

- Cires et sables : utilisation en fonderie (cire perdue et moulage artistique).

- Papier : procédé spécifique de lamination.

- Verre : stade encore très expérimental (Moore *et al.* [40]).

- Encre pour tatouage.

- Chocolat, chewing-gum et nourritures diverses (dont cellulose selon Bozec [41]).

On se trouve donc dans une situation où un large éventail de procédés 3D est associé à un très grand nombre de matières et/ou de matériaux utilisables. Dans ce qui suit, l'auteur s'est limité à trois grands procédés (stéréolithographie, fusion de fil, fusion de poudres) avec trois grands types de matériaux/matériaux : résines, polymères et métaux/alliages. Les imprimantes multi-matériaux et leurs matériaux ont volontairement été éliminées de ce choix réduit

Tableau 1 – Les différentes méthodes de fabrication additive : quelques éléments de différenciation

Thème évoqué	Appellation du procédé	Nom anglais	Commentaires
Stéréo-lithographie	SLA	Stereo-Lithography	Polymérisation d'une résine chargée ou non induite par de la lumière Différents systèmes d'irradiation
Fusion de fil	FDM	Fused Deposition Modeling	Fusion de fil : dépôt strate par strate d'une fine couche de fil fondu. La matière se refroidit au contact de l'air et se solidifie Du polymère fondu aux métaux en passant par le verre
	FFF	Fused Filament Fabrication	Idem
Collage de feuilles ou de poudres	SDL	Selective Deposition Lamination	Feuilles associées à une colle activable ; utilise le système de jet d'encre (matière photosensible ou réagissant aux UV)
	SC	Strato-Conception	Découpe de feuilles – assemblage « mécanique » ; à chaque couche, un laser ou un outil tranchant enlève les contours de l'objet désiré
	3DP	Three Dimensional Printing	Poudres associées à une colle ; utilise le système de jet d'encre (matière photosensible ou réagissant aux UV) ou un collage thermique
	BJ	Binder Jetting	Idem ; Des particules sont déposées sur le plateau d'impression et liées par l'ajout d'un liquide aggrégateur, éventuellement coloré
	SUR	Soluble/Unsoluble Reaction	Changement de solubilité d'un matériau organique
Fusion / Frittage de poudres	SLS	Selective Laser Sintering	Frittage induit par laser en surface plane
	SLM	Selective Laser Melting	Fusion induite par laser en surface plane
	EBM	Electron Beam Melting	Fusion induite par un faisceau d'électrons
	LMD	Laser Metal Deposition	Dépôt de métal simultané avec sa fusion
	CLAD	Construction Laser Additive Directe	Apport simultané de matière et d'énergie lumineuse : matière fondue lors de son dépôt par une source thermique très dirigée
	MPA	Metal Powder Application	Idem, énergie cinétique des particules

en ce qu'elles concernent des niches applicatives modestes pour une complexité élevée (et un recyclage difficile).

1.3 Mise en forme des matériaux

1.3.1 Poudres

Pour ce qui concerne les poudres métalliques, les céramiques et les polymères, la figure 2, issue de Singh, Ramakrishna et Singh [42], Oros Daraban *et al.* [43], Encyclopædia Universalis [44] et de Renishaw [45] présente les différentes méthodes de production de ces matériaux (ce qui illustre une certaine difficulté dans leur fabrication).

Ces procédés visent la fabrication de structures connues qui doivent disposer de performances techniques adaptées au procédé de fabrication. Ce sont, pour l'essentiel, les suivantes (Dumoulin [46]) :

- taille des grains inférieure à la résolution spatiale liée à la fabrication ; mono-dispersité ou poly-dispersité ; morphologie ;

- forme des grains et aptitude à l'écoulement et à la compression lors de la mise en forme horizontale dans une couche, car il est nécessaire que les particules s'écoulent de manière continue afin de former des couches les plus uniformes possible et ainsi pouvoir obtenir un matériau fondu/fritté lui aussi homogène ;

- présence d'un enrobage (pour des non-métaux) ;
- homogénéité interne des matériaux ;
- évolution la plus faible possible sous l'effet du stockage et du vieillissement (oxydation des poudres métalliques, effets de l'humidité, par exemple).

1.3.2 Filaments

Les filaments de polymères fusibles, chargés ou non, sont pour l'essentiel extrudés et vendus sous forme de bobines de fil. Le marché principal de ces matières est largement domestique ainsi que celui des makers, constituant une branche de la culture *Do It*

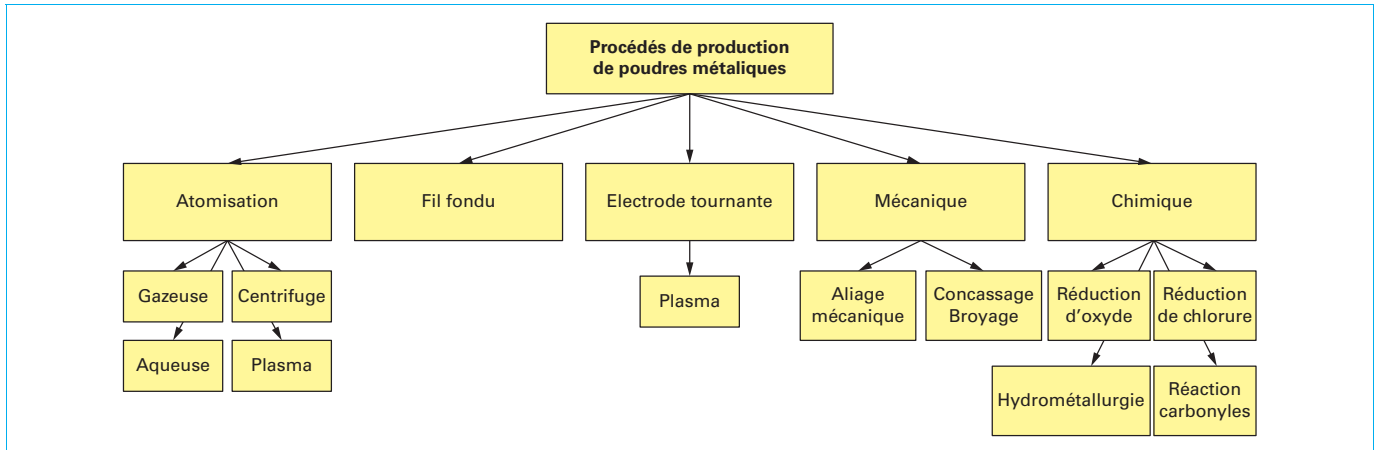


Figure 2 – Procédés de fabrication de matériaux pulvérulents à bases métalliques

Yourself, avec de nombreux travaux sur la réalisation personnelle de filaments à partir de matériaux comme les bouteilles en plastique. Cette tendance indique qu'un plus grand nombre de personnes fabriqueront leur propre filament en polymère (Hunt *et al.* [7] ; Cruz Sanchez [47] [48]). Certaines publications font état de filaments métalliques (par exemple, André [4]).

1.3.3 Résines

Les résines, généralement de type acrylique ou des epoxy (André [4]), contiennent pour leur stockage des inhibiteurs de polymérisation (de la famille de l'hydroquinone) et de l'oxygène en solution (inhibiteur classique des polymérisations radicalaires) en même temps qu'un amorceur photochimique. Elles peuvent être mélangées avec différentes charges organiques ou minérales (pour la réalisation de pièces en céramique).

1.4 Effet de la fabrication sur la transformation des matériaux

En dehors du processus principal recherché qui correspond à la fabrication additive, les interactions énergie-matière peuvent avoir des effets sur les produits et, par suite, sur leur recyclage. Pour les trois matériaux/matières considérés, les effets principaux sont présentés ci-après.

1.4.1 Poudres

Comme l'indiquent Lin *et al.* [49]), la fusion de surface peut, en dehors de phénomènes de retrait liés à la porosité de la poudre, entraîner différents défauts : oxydation, porosité résiduelle non souhaitée, hétérogénéités internes, etc. (figure 3). Des gaz inertes peuvent avantageusement être utilisés pour éviter une partie de ces effets non recherchés (ou travailler sous vide quand la source d'énergie localisée est un faisceau d'électrons).

Par ailleurs, à l'interface entre pièce en construction et matériau pulvérulent, les poudres peuvent subir en partie l'effet de l'énergie incidente. C'est par exemple ce qu'observent Yu *et al.* [50] avec l'agglomération de particules, non éléments de la pièce en construction et diffusion de matière à l'intérieur des grains (voir également Barclift *et al.* [22] ; Slotwinski, Garboczi et Hebenstreit [51] ; Luhrs [52] ; Günther *et al.* [53]) (figure 4).

Pour des poudres de polymères, Dumoulin [46] observe plusieurs effets comme une évolution de la couleur de la poudre qui peut être due à une baisse de sa cristallinité et/ou à une dégradation de la matière induite thermiquement. Il signale une augmentation de 16 % de l'enthalpie de fusion entre la poudre neuve et la

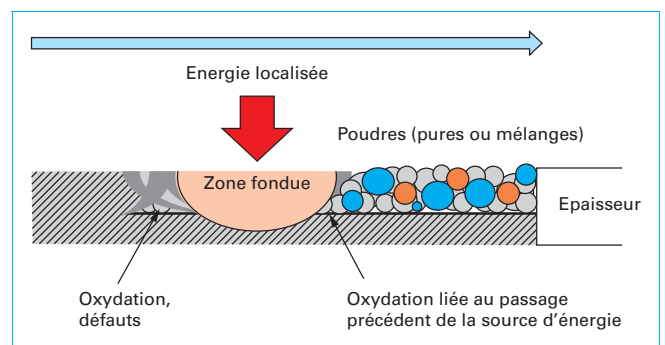


Figure 3 – Défauts de structure induits par le procédé

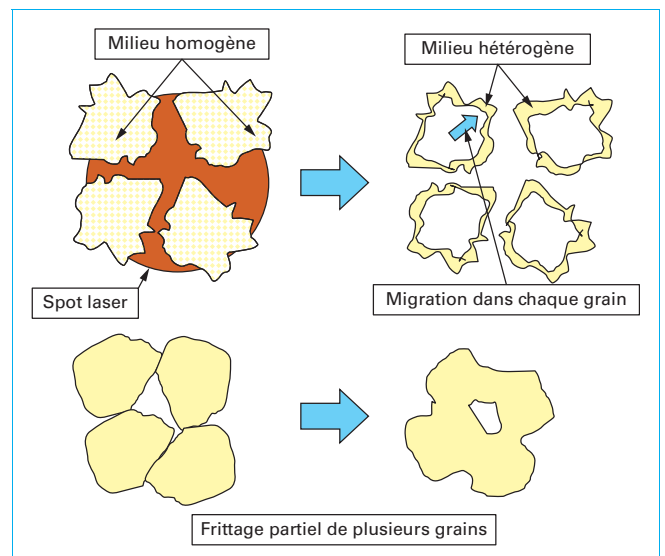


Figure 4 – Diffusion et agglomération de poudres sous l'effet de l'énergie laser

poudre utilisée une fois en machine. Cette analyse est liée à des modifications que subit le milieu pulvérulent lors de son passage en machine, comme signalé au paragraphe précédent.

La morphologie du polymère à partir de l'état fondu est le sphérolite à condition que l'on se rapproche des conditions de cristallisation statique et isotherme, c'est-à-dire lorsque les sollicitations mécaniques (écoulement de matière) ou thermiques (vitesses de refroidissement, gradients thermiques) sont faibles. Dans les procédés 3D, en revanche, les morphologies cristallines peuvent être profondément modifiées lorsqu'existent des gradients thermiques importants avant ou pendant la cristallisation. Selon Haudin [54], les macromolécules flexibles constituant les polymères thermoplastiques tendent à se déformer et à s'orienter dans un écoulement. Après refroidissement, cette déformation et cette orientation vont être en partie figées dans la phase amorphe, modifiant la nature et les propriétés des poudres.

Mais cette situation assez classique peut subir quelques exceptions. Ainsi, si la plupart des filaments polymères ont tendance à se dégrader par scission en chaîne ou par réticulation, les filaments à base de polypropylène (PP) semblent être particulièrement stables thermiquement et donc adaptés à de multiples séquences de fabrication (Gutierrez-Orsorio *et al.* [55]).

1.4.2 Filaments

Dans des conditions normales d'utilisation, le passage du fil fusible dans la machine 3D entraîne la fusion locale du filament qui se pose sur l'objet en construction. Le refroidissement rapide permet un dépôt sur un support solide. On perd un peu de matière au démarrage de l'opération. Par ailleurs, des surchauffes dans la buse d'injection et des modifications dans l'orientation de charges présentes dans le filament peuvent en modifier les propriétés. Ces surchauffes locales peuvent entraîner une dégradation thermique des matériaux (Boparai *et al.* [56]). Des supports provisoires peuvent permettre la réalisation de pièces complexes en termes de forme. Ils utilisent généralement le PLA (acide polylactique) dissous dans l'eau et généralement non recyclé. Rappelons que des systèmes multi-buses permettent la réalisation d'objets « multi-matériaux » (André [4] ; Cruz Sanchez [47] ; Cruz *et al.* [57]) ; en dehors de séparations par solubilisation spécifique des différents matériaux polymères utilisés, le recyclage est pratiquement impossible.

1.4.3 Résines

La lumière (généralement dans le proche UV) permet la polymérisation résolue dans l'espace par réticulation de monomères, au moins en partie multi-fonctionnels, chargés ou non. Pour que la réaction s'engage, le flux lumineux doit être suffisant pour consommer l'inhibiteur de protection de la résine et, dans le cas des résines acryliques, un inhibiteur classique des réactions radicalaires en chaînes, l'oxygène présent dans le liquide réactif. Les résines thermodurcissables forment un réseau tridimensionnel de monomères liés par liaisons covalentes (constitution d'un réseau réticulé). La transformation est unique et donne lieu à une pièce définitive, non recyclable.

D'un point de vue cinétique, la transformation suit une loi d'allure sigmoïde avec une cinétique initiale lente liée à la présence des inhibiteurs qui sont consommés (André [4]), suivie de la réaction « libre » de polymérisation, mais de plus en plus gênée par le polymère tridimensionnel qui se forme qui limite l'espace accessible à la réaction de macro-radicaux avec des monomères restants. Ce que montrent les modélisations et les expériences, c'est que les radicaux libres ne migrent pratiquement pas dans la résine non polymérisée, qui peut être réutilisée telle quelle (qu'elle contienne une charge ou pas). Il convient toutefois de vérifier périodiquement si son comportement reste compatible avec la bonne marche du procédé et, si nécessaire, d'envisager un remplacement par des résines neuves. Dans le cas où celle-ci est considérée comme satisfaisante, il convient de rajouter de la résine neuve pour retrouver le niveau de résine initial.

L'objet 3D réalisé, après sortie du bac de résine, est lavé avec un solvant approprié et séché ; le solvant peut être redistillé et réutilisé.

2. Entre technologie « verte » et simple recyclage des matériaux

Les technologies de fabrication additive permettant une moindre consommation de matières sont vite apparues comme des méthodes de fabrication « durables ». Mais on vient de voir que le recyclage de la matière non utilisée peut se faire à partir de produits au moins partiellement dégradés ou jetés et qu'il faudrait peut-être envisager des méthodes de purification des matériaux pour une réutilisation optimale (ou un réemploi dans d'autres domaines).

2.1 Développement durable et fabrication additive

Comme le rappellent Singh, Ramakrishna et Gupta [42], une bonne méthode consiste déjà à limiter la production de déchets (figure 5) (voir également Morrow *et al.* [58]).

Reeves [59] a montré tout l'intérêt en termes de poids et de consommation d'équivalent carbone des technologies 3D. Cependant, dans un article plus récent de Kellens *et al.* [60], des résultats moins optimistes entrent en contradiction avec cet avis. À partir des données quantitatives disponibles sur les méthodes de fabrication des matières et des matériaux, les procédés de fabrication additive, ces auteurs les ont comparés aux résultats correspondant à des objets identiques fabriqués de manière conventionnelle à l'aide de technologies soustractives en termes de consommation d'énergie et de matériaux, de coûts de transport, de pollution et de déchets, de questions de santé et de sécurité, ainsi que d'autres impacts environnementaux sur toute leur durée de vie. Ils indiquent que l'énergie spécifique des procédés 3D actuels est de 1 à 2 ordres de grandeur supérieurs à celle des procédés de fabrication conventionnels. D'un point de vue environnemental, les pièces 3D ne seraient intéressantes que pour les très petits lots ou dans des re-conceptions qui offrent des avantages fonctionnels substantiels pendant la phase d'utilisation du produit (par exemple, conception de pièces légères et re-fabrication de pièces).

La figure 6 représente les différents flux de matière et d'énergie impliqués en fabrication additive (selon Huang *et al.* [61]) avec différents effets sur l'environnement et sur l'Homme. Cette figure illustre une nature non totalement écologique de l'impression 3D (qui, rappelons-le, est associée à l'informatique qui induit ses propres nuisances). Le recyclage est un des moyens de lutter contre ces nuisances (Industrie et Technologie [62]).

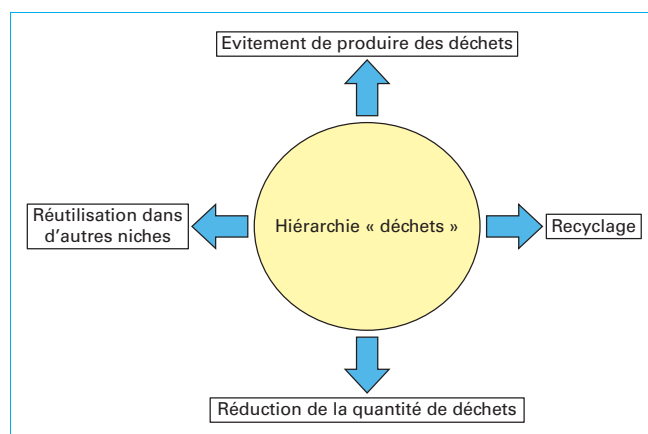


Figure 5 – Recyclage et économies de matière

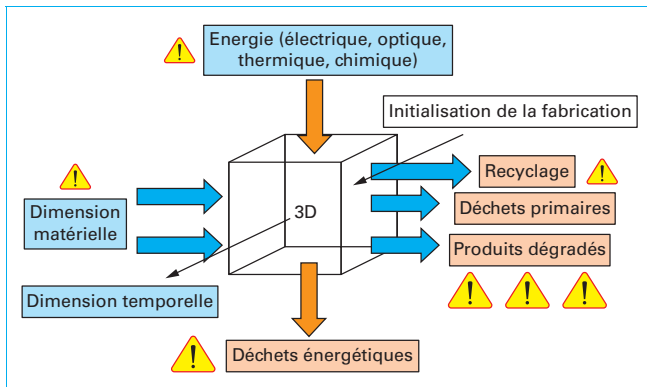


Figure 6 – Flux d'énergie et de matière en fabrication additive (composantes risques représentées par des triangles)

Cependant certains procédés 3D produisent des déchets non recyclables. L'impression par jet d'encre photosensible crée ainsi plus de déchets que la fabrication soustractive traditionnelle par usinage selon Polytechnique Montréal [63].

2.2 Analyse du cycle de vie

Il peut être avantageux d'intégrer le recyclage de matières et de matériaux dans des principes d'économie circulaire dans une approche globale impliquant des connaissances du cycle de vie des objets associés à leur mode de fabrication. Le but de l'analyse du cycle de vie (ACV ou *Life Cycle Assessment* – LCA) est de pouvoir comparer les impacts environnementaux d'un système (de quelque nature qu'il soit) tout au long de sa vie, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...), en passant par ses phases d'usage, d'entretien et de transport (ADEME [64] ; CDD [65] ; Stewart *et al.* [66] ; Belboom et Leonard [67] ; D'Onofrio *et al.* [68] ; Wikipedia [69] ; cf. également le § 2.1). La norme ISO 14044 (Le Bourhis [70] ; Le Bourhis *et al.* [71] [72] ; Kerbrat *et al.* [73]) la définit ainsi : « L'objectif d'une analyse du cycle de vie doit indiquer sans ambiguïté l'application envisagée, les raisons conduisant à réaliser l'étude et le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude ». L'ACV est traitée de manière extensive dans les Techniques de l'Ingénieur (Rousseaux [74] ; Benetto [75] ; Schneider, Chevalier et Navarro [76] ; Querini et Rousseaux [77]). Son approche globale permet d'éviter les transferts de pollution d'une phase de conception à une autre (Becaert [78] [79]) et de disposer de règles de conception environnementale.

Par exemple, pour les poudres métalliques, l'ACV prend en compte tous les aspects, de l'extraction du minerai à la réalisation des matériaux pulvérulents, ainsi que la réalisation de l'objet et son recyclage (Oros Daraban *et al.* [43] ; Gebler *et al.* [80] ; Tang, Mak et Zhao [81]). Mais, ne serait-ce qu'à cause de la mise en forme de certains matériaux, Rossi *et al.* [82] et Watson et Tamingier [83] montrent que les avantages de l'impression 3D du point de vue de l'environnement et de l'énergie consommée restent encore à démontrer. Leur publication présente un examen critique de l'impact environnemental qualitatif et quantitatif de la fabrication additive pour mieux orienter des recherches futures (voir également Fredriksson [84] ; Adargoma Suárez García et Domínguez [85] ; Miola [86] ; Gutierrez-Osorio *et al.* [55] ; Böckin et Tillman [87] ; Ford et Despeisse [88]). L'innovation dans la fabrication de pointe peut être appelée à redéfinir le paysage manufacturier en ce qui concerne les flux de matières (Giurco *et al.* [89]). De surcroît, les résultats d'ACV sont d'autant plus négatifs que le taux d'utilisation des machines est faible (Faludi *et al.* [90])... Il n'est donc pas (encore) possible de parler d'économie verte rentable économiquement...

En effet, pour permettre une analyse globale de chaque procédé, il est nécessaire de connaître nombre d'éléments :

- la conception de la pièce par des méthodes informatiques et sa préparation numérique (couches, supports, etc.) (Flipo *et al.*, [91]) ;
- les matières et les matériaux (dont leur mise en forme) qui entrent dans la fabrication d'un objet ;
- la production de gaz inerte (argon) nécessaire dans certains procédés, les ventilations et les autres éléments de sécurité ;
- les éléments de nettoyage d'une pièce et leur élimination ;
- l'entretien des machines et des ateliers ;
- l'énergie nécessaire pour la réalisation de la machine 3D ;
- le recyclage des matières non utilisées (poudre perdue, résines, etc.) ;
- le recyclage des pièces ;
- le recyclage de la machine en fin de vie ;
- etc.

Toutefois, quelques études méritent d'être mentionnées :

- Kohtala [92] : étude importante et synthétique des activités dans le domaine de la production distribuée ou décentralisée, illustrant le besoin d'un approfondissement ;
- Kreiger *et al.* [93] : recyclage local des matériaux plastiques utilisés dans les procédés 3D de type FDM (celui-ci ne gagnerait pas à être centralisé) ;
- Wittbrodt *et al.* [94] : approche technico-économique des systèmes open-source de type « RepRap » de fabrication additive (Jones *et al.* [95]) avec des possibilités de libre redistribution de programmes et/ou de données numériques (voir également Baechler, DeVuono et Pearce [96]) ;
- Huang *et al.* [61] : analyse de l'impact sociétal des procédés 3D avec une orientation favorable vers les aspects santé, durabilité et réduction des étapes de fabrication ;
- Gebler *et al.* [80] : en lien avec les travaux de Reeves [56], ces auteurs montrent l'intérêt potentiel des technologies 3D en termes de réduction des productions de CO₂ ;
- Peng *et al.* [97] illustrent par ACV l'intérêt du recyclage de poudres métalliques et polymères ;
- Tovar [98], dans le cadre d'une économie circulaire bien gérée, cite le rapport « Imagine 2050 » (Veolia [99]) : les entreprises de trois secteurs clés auraient des mésusages de matériaux et d'énergie correspondant à un gaspillage d'une valeur de 5 milliards de dollars, et ce uniquement pour le Royaume-Uni...

2.3 Recyclages

Depuis la pièce unique, la fabrication additive s'oriente vers la production et la personnalisation de masse ; les procédés doivent alors être respectueux de l'environnement et économes en énergie et en matière afin d'être autosuffisants (Kumar et Czekanski [100] ; Despeisse et Ford [101] ; Ford et Despeisse [88]). Dans une approche non centrée sur le coût, mais sur la prise en compte de l'épuisement des réserves naturelles, il est de prime importance d'examiner comment utiliser au mieux matières et matériaux (qui ne constituent qu'une variable du problème général) en envisageant le recyclage des matières et matériaux d'une part, des objets créés en 3D d'autre part.

2.3.1 Poudres

Le développement de l'utilisation de poudre recyclée au cours des procédés de fabrication additive fait l'objet de débats au sein des milieux de la recherche et de l'industrie dans le monde entier. Comme cela a été présenté au § 1 précédent, les matériaux pulvérulents subissent une dégradation induite par les processus de fabrication, quels qu'ils soient. La très récente publication de Ghods *et al.* (2020) [102] a concerné le recyclage de poudres

métalliques utilisées en fabrication additive par fusion par faisceau d'électrons (EBM). L'alliage de titane (Ti6Al4V) a subi 30 cycles de fabrication (soit environ 480 h de temps machine). L'un des changements les plus marqués de la poudre réutilisée est l'augmentation de la déformation de la surface des particules et des dommages physiques. Les particules ont changé de forme avec les cycles de réutilisation, passant d'une géométrie sphérique à une déformation croissante avec des fossettes de surface et une forme de plus en plus irrégulière. L'origine de la dégradation de la poudre pourrait provenir des aspects mécaniques du processus de recyclage lui-même et d'extraction des pièces. En outre, ces auteurs ont constaté une augmentation du nombre des particules fracturées, des particules partiellement fusionnées et des particules refondues avec réutilisation de la poudre.

Plusieurs voies peuvent être utilisées pour le recyclage des matériaux pulvérulents :

- pour des pièces de haute valeur ajoutée : utilisation préférentielle de poudre neuve ;
- réutilisation sans traitement (mais en évitant les transformations chimiques et physiques durant le stockage : oxydation, effets de l'humidité, etc.), soit pour l'application, soit pour des travaux ne nécessitant pas la même performance (Gorji *et al.* [103] ; Le *et al.* [104] ; Terrassa *et al.* [105]) ;
- séparation des agrégats de poudres des matériaux natifs par exemple par tamisage (Le Bourhis [70] ; Primante 3D [106] ; Multistation [107]) ;
- ajout optimisé de matière vierge pour compenser les effets de dégradation (Dotchev et Yusoff [108] ; Scaffaro *et al.* [32] ; Zhao *et al.* [109] ; Kerbrat *et al.* [110]) ;
- recyclage classique (en particulier pour les pièces 3D massives) où l'on récupère les matières pour différentes utilisations.

Une méthode récente utiliserait un procédé d'atomisation par ultrasons qui permettrait de transformer n'importe quelle pièce métallique en poudre d'impression de haute qualité (Usine Nouvelle [111]).

2.3.2 Filaments

Ce domaine lié en particulier aux utilisations domestiques des procédés à fusion de fil fait l'objet de l'intérêt des scientifiques, des utilisateurs et du secteur économique. Avec des matières fusibles (polymères thermoplastiques), il est possible de récupérer la matière pour la recycler via des extrudeuses de faible coût (Henry [112]) ; il est également envisageable de la dégrader biologiquement (Pakkanen *et al.* [113]). Celles-ci d'ailleurs peuvent servir pour préparer des filaments à partir de matériaux thermosensibles considérés aujourd'hui comme des déchets (Arrighi [114]). Les déchets plastiques (bouteilles, emballages, objets 3D en polymères thermoplastiques, déchets de filaments, etc.) sont sélectionnés, broyés et transformés en granulés qui, chauffés et extrudés sous forme de filament, forment un filament bobiné pour être utilisé en fabrication additive (FEDEREC [115] ; Cruz *et al.* [57] [116]). Dans ce contexte, une des stratégies est le recyclage qui n'induit pas de destruction significative de la structure chimique du polymère, tout au plus quelques modifications de ses propriétés physiques.

Pour nombre d'applications personnelles, selon Mohammed *et al.* [117], la performance de la fabrication peut souvent être considérée comme satisfaisante sans avoir besoin d'un examen de la qualité du matériau qui peut être légèrement dégradé (voire biologiquement insatisfaisant selon Cruz Sanchez [47]). C'est quand les buses servant au procédé se bouchent trop souvent que des alertes peuvent être faites concernant le filament utilisé (mais selon IST [118], ce n'est pas toujours la seule raison de mauvais fonctionnement de la machine).

Christensen *et al.* [119] ont développé une technologie de recyclage chimique du poly-di-ketoenamine (PDK) avec une polymérisation réversible par immersion du PDK dans une solution

acide. Assemblages et désassemblages moléculaires pourraient ainsi être opérés sans perte de performance ni de qualité, en éliminant de possibles charges incluses dans le PDK. Des solutions par simple dissolution ont été proposées par Shi *et al.* [120].

McKeown *et al.* [121] ont utilisé plusieurs complexes de zinc pour dissoudre des échantillons de PLA. L'équipe a pu dériver différents matériaux constitutifs en fonction de la nature exacte du complexe de zinc. Combiné à l'éthanol comme solvant, par exemple, le complexe de zinc a pu former des lactates d'alkyle, qui sont considérés comme des solvants « verts » et, par conséquent, un résultat utile et potentiellement durable du recyclage du PLA. En plus du PLA, il semble possible d'envisager le recyclage du PET, le plastique utilisé pour fabriquer les bouteilles d'eau, en utilisant le même procédé.

2.3.3 Résines

En général, les résines sont peu dégradées par le processus de polymérisation induite par la lumière et l'on compense la consommation liée à la production par de la résine neuve (avec ou sans charges). Toutefois, les pièces ainsi réalisées ne sont pas directement recyclables, les polymères se trouvant sous forme réticulée.

2.3.4 Autres considérations

Une fois ce processus réalisé, des opérations de post-production peuvent être nécessaires en fonction des matériaux utilisés et de la qualité finale désirée (Cotteleer, Holdowsky et Mahto [122]). Ces différentes étapes sont représentées sur la figure 7 sur laquelle différentes opérations font intervenir des matières et des matériaux : opérations de nettoyage de la pièce et/ou de la machine, élimination des supports de construction de l'objet (André [4]). Le chiffage en termes de quantité de matière n'a, à la connaissance de l'auteur, pas été effectuée.

Il peut s'agir de solvants (recyclage possible) ou d'éléments particuliers également récupérables.

2.4 Hygiène, Sécurité et Environnement

La figure 6 met en évidence de possibles effets néfastes liés aux procédés de fabrication additive et aux matériaux utilisés ou transformés. Il s'agit tout d'abord de respecter les règles classiques d'hygiène industrielle (Short *et al.* [123] ; Guimon [16] ; Väisänen *et al.* [124]). Roth *et al.* [125] s'inquiètent cependant du manque de travaux sur ce thème, même si quelques études spécifiques ont été publiées sur les aspects HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement), rappelées dans le tableau 2.

Potter [142] le rappelle, dans des secteurs d'activité industriels, les nuisances liées à la production de pièces 3D utilisant des matériaux composites dans des filaments peuvent poser certaines questions en termes de sécurité, de systèmes de filtration et d'aération. Il est donc important de travailler dans un environnement ouvert et/ou bien ventilé et de ne pas rester exposé trop longtemps à une machine en fonctionnement. Les protections collectives doivent être favorisées.

3. Conclusion : vers un mode d'emploi du recyclage ?

La figure 8 tente de synthétiser les différents éléments présentés dans ce document. Ils mettent en regard la performance de la pièce réalisée par fabrication additive et la qualité des matières et matériaux relativement à cet objectif.

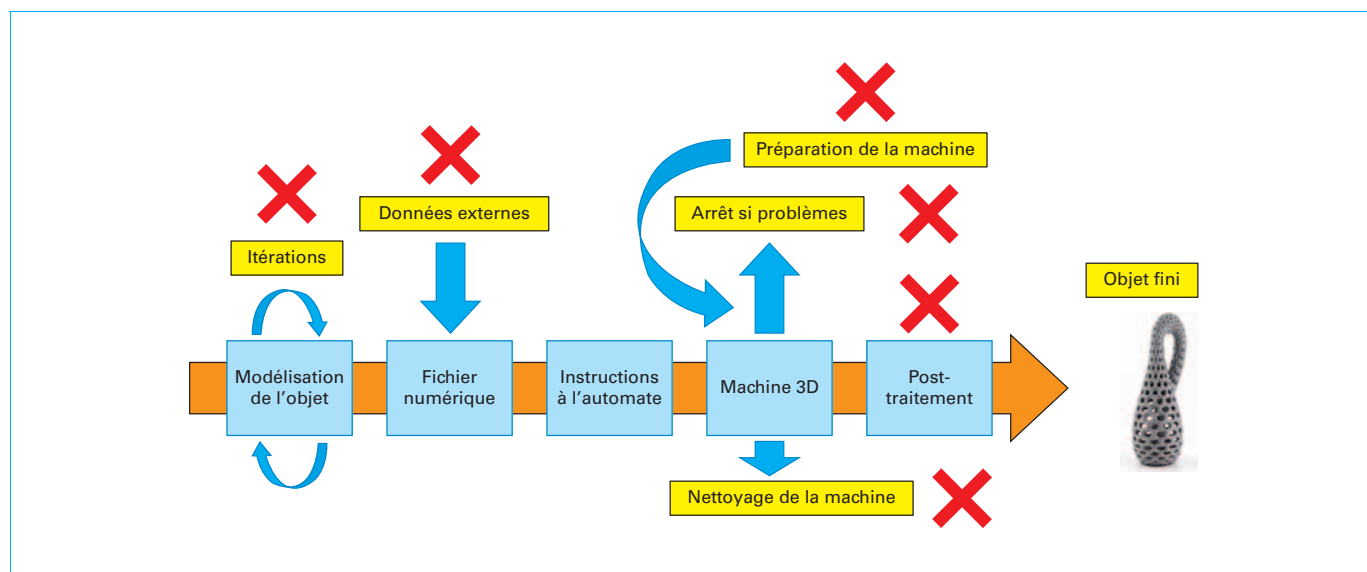


Figure 7 – Les étapes de fabrication d'un objet par fabrication additive (croix rouge : intervention humaine dans le processus)

Tableau 2 – Éléments spécifiques liés à des aspects hygiène et sécurité

Thème	Commentaires	Références
Poussières et particules fines	Poudres métalliques avec des propositions de prévention. Il existerait des poussières autres que les poudres elles-mêmes.	Mellin <i>et al.</i> [126] ; Moylan <i>et al.</i> [127] ; Patrascu [128] ; INRS [129] ; 3D Natives [130] ; Gu <i>et al.</i> [131] ; Bau <i>et al.</i> [132] ; Väisänen <i>et al.</i> [124] ; Folk [133]
Nanoparticules et microparticules	Émission de particules dans le procédé de type « binder jetting printer ». L'essentiel des émissions en nombre de particules se situe dans les PM 2.5 (les particules sont classées en fonction de leur « diamètre aérodynamique », qui correspond au diamètre moyen d'une sphère qui posséderait des propriétés aérodynamiques équivalentes ; l'appellation PM _{2.5} désigne les particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres) avec des risques non maîtrisés tant qu'une ventilation adéquate n'est pas mise en œuvre (10 fois plus environ que dans une atmosphère normale, mais beaucoup moins qu'avec une fusion de filaments polymères).	Afshar-Mohajer <i>et al.</i> [134]
Risque chimique	Procédés de fusion de polymères sous forme de fils qui sont susceptibles d'exposer les utilisateurs à des gaz toxiques et à certaines nanoparticules surtout s'ils sont chauffés au-delà de 240 °C.	Merlo et Mazzoni [135] ; Mélanie [136] ; 3D Natives [137] ; Gu <i>et al.</i> [131] ; Wojtyła, Klama et Baran [138] ; Väisänen <i>et al.</i> [124] ; Folk [133]
Risque biologique	Bio-printing	O'Neal [139]
Stéréo-lithographie	Guimon recommande aux utilisateurs d'utiliser les FDS (fiches de données de sécurité) qui sont des éléments nécessaires à une bonne connaissance des dangers auxquels les opérateurs peuvent être exposés. Ce conseil est valable pour les autres technologies 3D.	Guimon [16] ; Väisänen <i>et al.</i> [124]
Matériaux non conformes	De sérieux risques peuvent subvenir concernant la résistance aux chocs, l'inflammabilité, l'usure ou encore le contact de la peau. La fabrication d'objets non certifiés pour les enfants pourrait, de plus, leur faire courir de graves dangers.	Berdah [140]

Tableau 2 – Éléments spécifiques liés à des aspects hygiène et sécurité (suite)

Thème	Commentaires	Références
Risque lié au nettoyage	Des substances dangereuses peuvent être émises sous forme de gaz comme des aldéhydes dont le formaldéhyde, qui est une substance reconnue comme CMR (Cancérogène, Mutagène, Repro-toxique). Ces substances devraient être captées au sein des machines. Cependant, des émanations résiduelles peuvent être relâchées dans les espaces de travail, notamment au niveau des buses d'injection ou des têtes d'extrusion. Par ailleurs, lors de travaux de purge ou de nettoyage des outils (buses, fourreaux, etc.), l'opérateur peut être exposé à ces substances gazeuses dangereuses.	Travail et Sécurité [141] ; Guimon [16]

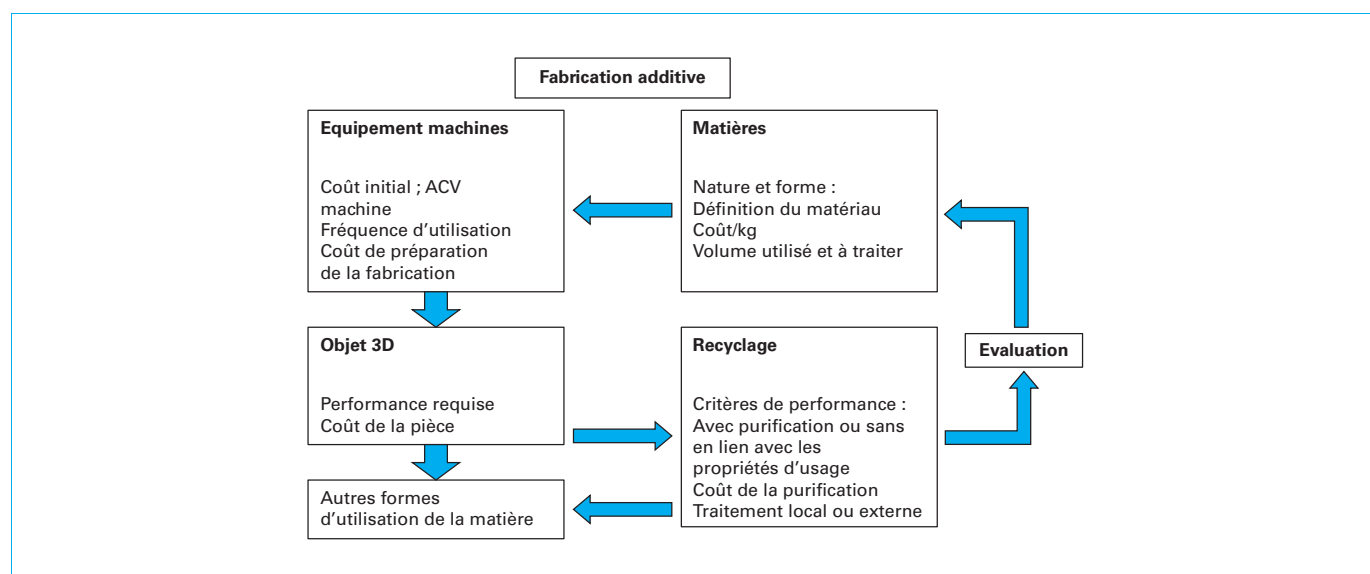


Figure 8 – Entre performance requise et qualité des matériaux utilisés

Dans un système libéral où c'est la concurrence économique qui impose de chercher un coût minimal pour une performance donnée, en dehors des machines à filaments fusibles de faible coût, l'impression 3D concerne des projets spécialisés ou nécessitant un haut niveau de personnalisation et de fonctionnalité (spatial, aéronautique, médical, automobile, etc.). Dans ces conditions, la composante « recyclage » n'a d'intérêt que si on est sûr du maintien des critères qualitatifs des matériaux utilisés pour des objets qui doivent être qualifiés. D'ailleurs Niaki, Torabi et Nonino [12] rappellent que l'adoption d'une technologie 3D ne prend pratiquement pas aujourd'hui en considération la durabilité environnementale. Leur enquête prouve le rôle central des motifs économiques et de sécurité (au sens large) dans les choix, ne serait-ce que par la possibilité de réalisation de pièces complexes infaisables par d'autres procédés.

En revanche, dans une société plus centrée sur les économies de matières premières, le présent article montre des possibilités (certes encore émergentes) d'une utilisation plus optimale de la matière et/ou des matériaux. Cependant avec un marché en termes de coût de matière et de matériaux de quelques milliards €/an (Hoguin [143]), l'effet restera encore pendant longtemps modeste, ne serait-ce qu'en comparaison avec la seule production de l'acier qui est de l'ordre de 1,8 milliard de tonnes par an, à 700 € la tonne (Conso-globe [144]). Pour autant que cette cible de réutilisation soit prise en considération, l'offre actuelle de matériaux imprimables en

3D devrait être encore élargie à d'autres produits développés pour une utilisation durable, mais sans doute de plus en plus spécifiques, ainsi que pour une réutilisation optimisée et spécifique (nécessitant un travail de recherche adapté à chaque procédé/matériau).

Dans les faits, la fabrication additive devrait être capable de supporter plusieurs cycles d'utilisation des produits et matériaux. Elle pourrait s'engager mieux qu'actuellement dans des contributions précieuses à une économie circulaire (cf. série d'articles d'Osa-ghae [145]). Mais, on l'aura compris, l'attractivité d'une telle démarche est encore à stabiliser. L'Europe étant un pionnier mondial en matière de réglementation de la technologie (50 % des propositions contre 28 % pour les USA selon VEI [146]), peut-être faudrait-il que l'Union Européenne impose des règles de réutilisation des matériaux 3D adaptées au recyclage ?

Mais, compte tenu de la jeunesse et de la richesse toujours en croissance rapide des technologies et des matériaux de fabrication additive, un contrôle du marché économique par la norme restera probablement modeste relativement à la compétition industrielle. D'autres priorités devraient émerger avant qu'on se préoccupe sérieusement (et industriellement) de cette question du recyclage considérée comme ayant un impact faible sur les nuisances environnementales issues d'autres technologies. Tout va dépendre du coût de l'objet (financier, image, risques, etc.) relativement au coût matière...

Recyclage des déchets d'impression 3D

par **Jean-Claude ANDRÉ**
Directeur de recherche au CNRS

Sources bibliographiques

- [1] MIZERET (J.). – *Les technologies de fabrication additive pour la créativité, le prototype, la fabrication*. <http://www.swissmem.ch/fr/presentations-fabrication-additive.html> (2015).
- [2] DODZIUK (H.). – *The Added Value : 3D Printing Brings Much More Than Cheaper Manufacturing*. <https://3dprintingindustry.com/news/the-added-value-3d-printing-carries-much-more-than-cheaper-manufacturing-66843/> (2016).
- [3] CONNER (B.P.), MANOGHARAN (G.P.), MARTOF (A.N.), RODOMSKY (L.M.), RODOMSKY (C.M.), JORDAN (D.C.) et LIMPEROS (J.W.). – *Making sense of 3-D printing : creating a map of additive manufacturing products and services*. Additive Manufacturing, 1-4, 64-76 (2014).
- [4] ANDRÉ (J.C.). – *From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing – Volume 1 : From the first concept to the present applications – Volume 2 : Improvement of the present technologies and constraints – Volume 3 : Break-down innovations : Programmable matter ; 4D Printing and Bio-Printing*. ISTE/Wiley Ed., Londres (2017).
- [5] GAO. – *3D Printing : opportunities, challenges and policy ; implications of additive manufacturing*. <http://www.gao.gov/assets/680/670960.pdf> (2015).
- [6] SAUERWEIN (M.), DOUBROVSKI (E.), BALKENENDE (R.) et BAKKER (C.). – *Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy*. Journal of Cleaner Production, 226, 1138-1149 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.108> (2019).
- [7] HUNT (E.J.), ZHANG (C.), ANZALONE (N.) et PEARCE (J.M.). – *Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers*. Resources, Conservation and Recycling, 97, 24-30 (2015).
- [8] ANDRÉ (J.C.), LE MÉHAUTÉ (A.) et DE WITTE (O.). – *Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle*. Brevet français, vol. 84, n° 11, p. 241 (1984).
- [9] HULL (C.). – *Method for Production of Three-Dimensional Objects by Stereo-lithography*. US Patent 5, 762, 856 (1984).
- [10] NAP. – *Frontiers of Materials Research : A Decadal Survey*. <https://www.nap.edu/catalog/25244/frontiers-of-materials-research-a-decadal-survey> (2019).
- [11] UN. – *Situation et perspectives de l'économie mondiale 2019 : Résumé*. <https://www.un.org/development/desa/dpad/publication/situation-et-perspectives-de-leconomie-mondiale-2019-resume/> (2019).
- [12] NIAKI (M.K.), TORABI (S.A.) et NONINO (F.). – *Why Manufacturers Adopt Additive Manufacturing Technologies : The Role of Sustainability*. J. Cleaner Production, 222, 381-392 (2019).
- [13] AFNOR. – *NFE 67-001 : Fabrication additive – Vocabulaire* (2011).
- [14] CABANIS (R.). – *Guide to unusual 3D printing materials*. <http://www.sculpteo.com/blog/2015/04/15/unusual-3d-printing-materials/> (2015).
- [15] LOW (Z.X.), CHUA (Y.T.), RAY (B.M.), MATTIA (D.), METCALFE (I.S.) et PATTERSON (D.A.). – *Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques*. Journal of Membrane Science, 523, 596-613 (2017).
- [16] GUIMON (M.). – *La fabrication additive, un empiement de risques ? Hygiène et sécurité du travail*, 233, 88-92 (2013).
- [17] BOURELL (D.), KRUTH (J.P.), LEU (M.), LEVY (G.), ROSEN (D.), BEESE (A.M.) et CLARE (A.). – *Materials for additive manufacturing*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 66, 659-681 <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009> (2017).
- [18] ORCUTT (M.). – *One 3-D Printer for 21 Metals*. MIT Tech. Rev. <https://www.technologyreview.com/s/600876/one-3-d-printer-for-21-metals/> (2016).
- [19] BLANC (T.). – *Fabrication additive par dépôt laser direct de TA6V : étude expérimentale dans des régimes de forte productivité, modèles de comportement et recyclage de la poudre*. Thèse de l'École des Mines de Paris (2017).
- [20] HEGAB (H.A.). – *Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys : a review*. Manufacturing Review, 3, 11 (2016).
- [21] NOTTEAU (Y.). – *Tout ce qu'il faut savoir sur les imprimantes 3D métal !* <http://www.additive.com/tout-ce-qu'il-faut-savoir-sur-les-imprimantes-3d-metal/> (2016).
- [22] BARCLIFT (M.), JOSHI (S.), SIMPSON (T.) et DICKMAN (C.). – *Cost Modeling and Depreciation for Reused Powder Feedstocks in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing*. Solid Freeform Fabrication 2016 : Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2016/162-Barclift.pdf> (2016).
- [23] PECOUL (N.). – *Communication privée* (2017).
- [24] *Un procédé de jet d'encre métallique dévoilé lors du salon Formnext*. <http://www.3dnatives.com/xjet-impression-3d-07112016/> (2016).
- [25] LEE (H.H.), CHOU (K.S.) et HUANG (K.C.). – *Inkjet printing of nano-sized silver colloids*. Nanotechnology, 16, 2436-2441 (2005).
- [26] *The METAL X ; An Industrial Revolution*. <https://markforged.com/metal-x/> (2017).
- [27] WEI (C.), MA (X.), YANG (X.), ZHOU (M.), WANG (C.), ZHENG (Y.), ZHANG (Y.) et LI (Z.). – *Microstructural and property evolution of Ti6Al4V powders with the number of usage in additive manufacturing by electron beam melting*. Materials Letters, 221, 111-114 (2018).
- [28] *Poudres pour fabrication additive*. <https://www.aubertduval.com/fr/products/poudres-metalliques-fabrication-additive-impression-3d/> (2019).
- [29] CHANDLER (D.L.). – *Researchers design one of the strongest, lightest materials known*. <http://news.mit.edu/2017/3-d-graphene-strongest-lightest-materials-0106> (2017).
- [30] EL ACHABY (M.). – *Nano-composites Graphène-Polymère Thermoplastique : Fabrication et Étude des Propriétés Structurales, Thermiques, Rhéologiques et Mécaniques*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00818644/document> (2012).

- [31] CHEN (O.), DACULA MANGADLAO (J.), WALLAT (J.D.), DE LEON (A.L.C.), POKORSKI (J.K.) et ADVINCULA (R.C.). – *3D Printing Biocompatible Polyurethane/Poly (lactic acid)/ Graphene Oxide Nanocomposites : Anisotropic Properties*. ACS Applied Material Interfaces, DOI:10.1021/acsami.6b11793 (2016).
- [32] SCAFFARO (R.), BOTTA (L.), PASSAGLIA (E.), OBERHAUSER (W.), FREDIANI (M.) et DI LANDRO (L.). – *Comparison of different processing methods to prepare poly(lactic acid)-hydrotalcite composites*. Polym. Eng. Sci., 54, 1804-1810 (2014).
- [33] CHEN (M.), GU (Y.), SINGH (A.), ZHONG (M.), JORDAN (A.M.), BISWAS (S.), KORLEY (L.T.J.), BALAZS (A.C.) et JOHNSON (J.A.). – *Living Additive Manufacturing : Transformation of Parent Gels into Diversely Functionalized Daughter Gels Made Possible by Visible Light Photoredox Catalysis*. ACS Cent. Sci., Article ASAP – DOI:10.1021/acscentsci.6b00335 <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acscentsci.6b00335> (2017).
- [34] COMPTON (B.G.) et LEWIS (J.A.). – *3D-Printing of Lightweight Cellular Composites*. Advanced Materials, 26, 5930-5935 (2014).
- [35] CHARTIER (T.) et CHAPUT (C.). – *Stereo-lithography as a shaping technique for ceramics*. Bulletin of the European Ceramic Society, 1, 29-32 (2003).
- [36] GONZALEZ (J.A.), MIRELES (J.), LIN (Y.) et WICKER (R.B.). – *Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology*. Ceramics International, 42, 10559-10564 (2016).
- [37] DÉJOU (J.). – *Les céramiques*. <http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap17/site/html/cours.pdf> (2010).
- [38] BENSOUSSAN (H.). – *Interviewing XtreeE : 3D Printing Concrete to Push the limits of Construction*. https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/07/interviewing-xtreee-3d-printing-concrete-to-push-the-limits-of-construction/?utm_medium=email&utm_campaign=NL%20US%2071216&utm_content=NL%20US%2071216&utm_source=Campaign%20Newsletter&utm_term=Learn%20More (2016).
- [39] PRINGLE (A.), RUDNICKI (M.) et PEARCE (J.). – *Wood Furniture Waste-Based Recycled 3-D Printing Filament*. Forest products journal, Forest Products Research Society, 68, 10.13073/FPJ-D-17-00042 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02111355/document> (2017).
- [40] MOORE (D.G.), BARBERA (L.), MASANIA (K.) et STUDART (A.R.). – *Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins*. Nature Materials <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0525-y> (2019).
- [41] BOZEC (H.). – *Cellulose, a promising material for 3D Food Printing*. <https://3dprintingindustry.com/news/cellulose-a-promising-material-for-3d-food-printing-76306/> (2016).
- [42] SINGH (S.), RAMAKRISHNA (S.) et SINGH (R.). – *Material issues in additive manufacturing : A review*. Journal Manufacturing Processes, 25, 185-200 (2017).
- [43] OROS DARABAN (A.E.), NEGREA (C.S.), ARTIMON (F.G.P.), ANGELESCU (D.), POPAN (G.), GHEORGHE (S.I.) et GHEORGHE (M.). – *A Deep Look at Metal Additive Manufacturing Recycling and Use Tools for Sustainability Performance*. Sustainability, 11, 5494 ; doi:10.3390/su11195494 (2019).
- [44] *Fabrication des poudres*. Encyclopædia Universalis <https://www.universalis.fr/encyclopedie/metallurgie-des-poudres/1-fabrication-des-poudres/> (2019).
- [45] *Poudres métalliques pour fabrication additive*. <https://www.renishaw.fr/fr/poudres-metalliques-pour-fabrication-additive-31457> (2019).
- [46] DUMOULIN (E.). – *Fabrication additive de pièces en polymères thermoplastiques hautes performances et en polyamide 12 par le procédé de frittage sélectif par laser*. Thèse Mines ParisTech <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01021861/document> (2013).
- [47] CRUZ SANCHEZ (F.A.). – *Impression 3D : « recycler à volonté des polymères n'est peut-être pas un doux rêve ! »*. <http://plastic-le-mag.com/impression-3d--recycler-a-volonte-des-polymeres-nest-peut-etre-pas-un-doux-reve> (2016).
- [48] CRUZ SANCHEZ (F.A.). – *Methodological proposition to evaluate polymer recycling in open-source additive manufacturing contexts*. Thèse de l'Université de Lorraine (2016).
- [49] LIN (S.L.), LIN (C.C.), LIN (D.Y.) et CHUANG (C.S.). – *Fabrication and analysis of 3D objects using layer wise manufacturing technology*. IEEE/NEMS 2013, 763-766 (2014).
- [50] YU (W.H.), SING (S.L.), CHUA (C.K.), KUO (C.N.) et TIAN (X.L.). – *Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting : A state of the art review*. Progress in Materials Science, 104, 330-379 (2019).
- [51] SLOTWINSKI (J.A.), GARBOCZI (E.J.) et HEBENSTREIT (K.M.). – *Porosity measurements and analysis for metal additive manufacturing process control*. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 119, 494-528 (2014).
- [52] LUHRS (C.). – *Evolution of Raw Powder Characteristics through the Metal Additive Manufacturing Reuse Cycle*. <http://hdl.handle.net/10945/60532> (2018).
- [53] GÜNTHER (J.), BRENNE (F.), DROSTE (M.), WENDLER (M.), VOLKOVA (O.), BIERMANN (H.) et NIENDORF (T.). – *Design of novel materials for additive manufacturing – Isotropic microstructure and high defect tolerance*. Scientific Reports, 8, 1298 (2018).
- [54] HAUDIN (J.M.). – *Solidification. Mise en forme des polymères*. http://mms2.enscm.fr/mat_paris/elaboration/polycop/Ch_11_Solidif_Polymeres.pdf (2001).
- [55] GUTIERREZ-OSORIO (A.H.), RUIZ-HUERTA (L.), CABALLERO-RUIZ (A.) et BORJA (V.). – *Energy consumption analysis for additive manufacturing processes*. The International Journal of Advanced Manufacturing, 105, 1735-1743 (2019).
- [56] BOPARAI (K.S.), SINGH (R.), FABBROCINO (F.) et FRATERNALI (F.). – *Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing applications*. Composites, B106, 42-47 (2016).
- [57] CRUZ (F.), LANZA (S.), BOUDAUD (H.), HOPPE (S.) et CAMARGO (M.). – *Polymer Recycling and Additive Manufacturing in an Open Source context : Optimization of processes and methods*. <https://pdfs.semanticscholar.org/6ef5/c5f4b2c00eba4c19e-be25a8b5c9dd5252c02.pdf> (2015).
- [58] MORROW (W.R.), QI (H.), KIM (I.), MAZUMDER (J.) et SKERLOS (S.J.). – *Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing*. Journal of Cleaner Production 15, 932-943 (2007).
- [59] REEVES (P.). – *Example of Econolyst Research – Understanding the Benefits of AM on CO₂*. http://www.econolyst.co.uk/reso-urces/documents/files/Presentation_2012_AM_and_carbon_footprint.pdf (2012).
- [60] KELLENS (K.), BAUMERS (M.), GUTOWSKI (T.G.), FLANAGAN (W.), LIFSET (R.) et DUFLOU (J.R.). – *Environmental Dimensions of Additive Manufacturing : Mapping Application Domains and Their Environmental Implications*. Journal of Industrial Ecology, 21, S49-S68 (2017).
- [61] HUANG (S.H.), LIU (P.), MOKASDAR (A.) et HOU (L.). – *Additive manufacturing and its societal impact : a literature review*. Int. J. Manuf. Technol., 67, 1191-2103 (2013).
- [62] INDUSTRIE & TECHNOLOGIES. – *Recyclage ; un enjeu émergent*. <https://www.sculpteo.com/media/press/2017/10/01/nesw.PDF> (2017).
- [63] *Impression 3D : Développement durable*. <https://guides.biblio.polymtl.ca/c.php?g=479773&p=3280494> (2019).
- [64] *Qu'est-ce que l'ACV ?* <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/analyse-cycle-vie/quest-lacv> (2018).
- [65] *L'analyse du cycle de vie d'un produit ou d'un service*. CDD (Cahiers du Développement Durable) <http://les.cahiers-developpement-durable.be/outils/analyse-du-cycle-de-vie> (2019).
- [66] STEWART (R.), FANTKE (P.), BJØRN (A.), OWSIANIAK (M.), MOLIN (C.), HAUSCHILD (M.Z.) et LAURENT (A.). – *Life cycle assessment in corporate sustainability reporting : Global, regional, sectoral, and company-level trends*. Business Strategy and the Environment, 27, 1751-1764 (2018).
- [67] BELBOOM (S.) et LEONARD (A.). – *Teaching of Life Cycle Assessment methodology to sensitize future engineers to sustainable development*. http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/202511/1/Leonard_belboom_EESD2016.pdf (2016).
- [68] D'ONOFRIO (A.), ROSSI (E.), DI NICOLANTONIO (M.) et BARCAROLO (P.). – *Investigation of the Impact of Sustainability on 3D Printing Technologies*. <http://lensconference3.org/images/program/VOLUME4.pdf> (2019).
- [69] *Analyse du cycle de vie*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie (2019).
- [70] LE BOURHIS (F.). – *Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière*. Application

- à la projection de poudres métalliques. Thèse de l'École Centrale de Nantes (2014).
- [71] LE BOURHIS (F.), KERBRAT (O.), HASCOËT (J.Y.) et MOGNOL (P.). – *Évaluation et modélisation des impacts environnementaux en fabrication directe, application à la projection de poudre*. Proceedings of Apr'12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00844885/document> (2012).
- [72] LE BOURHIS (F.), KERBRAT (O.), HASCOËT (J.Y.) et MOGNOL (P.). – *Sustainable manufacturing : evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69, 1927-1939 (2013).
- [73] KERBRAT (O.), LE BOURHIS (F.), PONCHE (R.), MOGNOL (P.) et HASCOËT (J.Y.). – *Évaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication*. 21^e Congrès Français de Mécanique. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00914003/document> (2013).
- [74] ROUSSEAUX (P.). – *Analyse du Cycle de Vie (ACV)*. Techniques de l'ingénieur, [G 5 500v1] (2005).
- [75] BENETTO (E.). – *Analyse du cycle de vie – Réalisation de l'inventaire*. Techniques de l'Ingénieur, [G 5 510v1] (2005).
- [76] SCHNEIDER (F.), CHEVALIER (J.) et NAVARRO (A.). – *Analyse du cycle de vie – Problèmes d'affectation*. Techniques de l'Ingénieur, [G 5 550v1] (1998).
- [77] QUERINI (F.) et ROUSSEAUX (P.). – *Analyse du cycle de vie – Évaluation des impacts*. Techniques de l'ingénieur, [G 5 610v2] (2012).
- [78] BECAERT (V.). – *Conception environnementale et cycle de vie*. Presses internationales de Polytechnique Ed., Montréal (2010).
- [79] BECAERT (V.). – *L'analyse du cycle de vie environnementale et sociale : une boussole vers le développement durable*. https://www.sifree.org/static/uploaded/Files/ressources/actes-des-colloques/monreal/pleniere-1-1/BECAERT_DIAPO.pdf (2011).
- [80] GEBLER (M.), SCHOOT-UITERKAMP (A.J.M.) et VISSER (C.). – *A global sustainability perspective on 3D printing technologies*. Energy Policy, 74, 158-167 (2014).
- [81] TANG (Y.), MAK (K.) et ZHAO (Y.F.). – *A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing*. Journal of Cleaner Production, 137 1560-1572 (2016).
- [82] ROSSI (E.), DI NICOLANTONIO (M.), BARCAROLO (P.) et LAGATTA (J.). – *Sustainable 3D Printing : Design Opportunities and Research Perspectives*. https://www.researchgate.net/publication/308970924_Sustainability_of_3D_Printing_A_Critical_Review_and_Recommendations (2020).
- [83] WATSON (J.K.) et TAMINGER (K.M.B.). – *A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption*. Journal of Cleaner Production, 176, 1316-1322 (2018).
- [84] FREDRIKSSON (C.). – *Sustainability of metal powder additive manufacturing*. Procedia Manufacturing, 33, 139-144 (2019).
- [85] ADARGOMA SUAREZ GARCIA (L.) et DOMINGUEZ (L.). – *Sustainability and environmental impact of fused deposition modelling (FDM) technologies*. International Journal of Advanced Manufacturing, Technology, 1-13 – Doi:10.1007/s00170-019-04676-0 (2019).
- [86] MIOLA (A.). – *The Digital Revolution and Sustainable Development : Opportunities and Challenges*. International Institute for Applied Systems Analysis. <https://www.die-gdi.de/uploads/media/TWI2050-for-web.pdf> (2019).
- [87] BÖCKIN (D.) et TILLMAN (A.M.). – *Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry*. Journal of Cleaner Production, 226, 977-987 (2019).
- [88] FORD (S.) et DESPEISSE (M.). – *Additive manufacturing and sustainability : an exploratory study of the advantages and challenges*. Journal of Cleaner Production, 137, 1573-1587 (2016).
- [89] GIURCO (D.), LITTLEBOY (A.), BOYLE (T.), FYFE (J.) et WHITE (S.). – *Circular Economy : Questions for Responsible Minerals, Additive Manufacturing and Recycling of Metals*. Resources, 3, 432-453 ; doi:10.3390/resources3020432 (2014).
- [90] FALUDI (J.), BAYLEY (C.), BHOGAL (S.) et IRIBARNE (M.). – *Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment*. Rapid Prototyping Journal. <https://escholarship.org/content/qt0gv882qk/qt0gv882qk.pdf> (2015).
- [91] FLIPO (F.), DOBRE (M.) et MICHOT (M.). – *La face cachée du numérique ; l'impact environnemental des nouvelles technologies*. Ed. de l'Echappée, Paris (2013).
- [92] KOHTALA (C.). – *Addressing sustainability in research on distributed production : an integrated literature review*. J. Cleaner Prod., 106, 654-668 (2015).
- [93] KREIGER (M.A.), MULDER (M.L.), GLOVER (A.G.) et PEARCE (J.M.). – *Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament*. J. Cleaner Prod., 70, 90-96 (2014).
- [94] WITTBRODT (B.T.), GLOVER (A.G.), LAURETO (J.), ANZALONE (G.C.), OPLIGER (D.), IRWIN (J.L.) et PEARCE (J.M.). – *Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers*. Mechatronics, 23, 713-726 (2013).
- [95] JONES (R.), HAUFÉ (P.), SELLS (E.), IRAVANI (P.), OLLIVER (V.), PALMER (C.) et BOWYER (A.). – *RepRap – the replicating rapid prototype*. Robotica, 29, 177-191 (2011).
- [96] BAECHLER (C.), DEVUONO (M.) et PEARCE (J.M.). – *Distributed Recycling of Waste Polymer into RepRap Feedstock*. Rapid Prototyping Journal, 19, 118-125. <http://dx.doi.org/10.1108/13552541311302978> (2013).
- [97] PENG (T.), KELLENS (K.), TANG (R.), CHEN (C.) et CHEN (G.). – *Sustainability of additive manufacturing : An overview on its energy demand and environmental impact*. Additive Manufacturing, 21, 694-704 (2018).
- [98] TOVAR (I.). – *In a circular economy 3D printing can help unlock \$5bn of waste*. <https://3dprintingindustry.com/news/circular-economy-3d-printing-can-help-unlock-5bn-waste-97792/> (2016).
- [99] Imagine 2050. – *Veolia imagines a future in which industry is redesigned to take up the challenges of the world of tomorrow*. <https://www.planet.veolia.com/en/imagine-2050> (2019).
- [100] KUMAR (S.) et CZEKANSKI (A.). – *Roadmap to sustainable plastic additive manufacturing*. Materials Today Communications, 15, 109-113 (2018).
- [101] DESPEISSE (M.) et FORD (S.). – *The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability*. IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems APMS 2015 : Advances in Production Management Systems : Innovative Production Management Towards Sustainable Growth, 129-136. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22759-7_15 (2015).
- [102] GHODS (S.), SCHULTZ (E.), WISDOM (C.), SCHUR (R.), PAHUJA (R.), MONTELLONE (A.), AROLA (D.) et RAMULU (M.). – *Electron beam additive manufacturing of Ti6Al4V : Evolution of powder morphology and part microstructure with powder reuse*. Materialia, 9, 100631 (2020).
- [103] GORJI (N.), O'CONNOR (R.), MUSSATTO (A.), SNELGROVE (M.), GONZÁLEZ (P.M.G.) et BRABAZON (D.). – *Recyclability of stainless steel (316 L) powder within the additive manufacturing process*. Materialia, 8, 100489 (2019).
- [104] LE (V.T.), PARIS (H.), MANDIL (G.) et BRISSAUD (D.). – *A direct material reuse approach based on additive and subtractive manufacturing technologies for manufacture of parts from existing components*. Procedia CIRP, 61, 229-234 (2017).
- [105] TERRASSA (K.L.), HALEY (J.C.), MACDONALD (B.E.) et SCHOENUNG (J.M.). – *Reuse of powder feedstock for directed energy deposition*. Powder Technology, 338, 819-829 (2018).
- [106] 3D-ReKlaimer : un système de recyclage pour les poudres d'impression 3D métallique. <http://www.primante3d.com/sytemekasyon-14032018/> (2018).
- [107] Nouveau système d'alimentation et de tamisage de poudre PSV pour les machines SLM Solutions. <https://www.multistation.com/nouveau-systeme-de-recuperation-tamisage-de-poudre-psv-machines-slm-solutions/> (2017).
- [108] DOTCHEV (K.) et YUSOFF (W.). – *Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process*. Rapid Prototyping Journal, 15, 192-203. <https://doi.org/10.1108/13552540910960299> (2009).
- [109] ZHAO (P.), RAO (C.), GU (F.), SHARMIN (N.) et FU (J.). – *Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing : An experimental investigation and life cycle assessment*. Journal of Cleaner Production, 197, 1046-1055 (2018).

- [110] KERBRAT (O.), LE BOURHIS (F.), MOGNOL (P.) et HASCOËT (J.Y.). – *Environmental impact assessment studies in Additive Manufacturing*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-0606-7_2 (2016).
- [111] Une nouvelle méthode pour transformer toute pièce métallique en poudre à imprimer. <https://www.usinenouvelle.com/editorial/une-nouvelle-methode-pour-transformer-toute-piece-metallique-en-poudre-a-imprimer.N912454> (2019).
- [112] HENRY (P.). – *Le recyclage dans l'impression 3D*. <https://www.makershop.fr/blog/le-recyclage-dans-impression-3d/> (2018).
- [113] PAKKANEN (J.), MANFREDI (D.), MINETOLA (P.) et IULIANO (L.). – *About the Use of Recycled or Biodegradable Filaments for Sustainability of 3D Printing – State of the Art and Research Opportunities*. 776-785 in G. Campana et al. Ed., Sustainable Design and Manufacturing 2017, Smart Innovation, Systems and Technologies, 68, DOI:10.1007/978-3-319-57078-5_73. https://www.researchgate.net/profile/Paolo_Minetola/publication/316465179_About_the_Use_of_Recycled_or_Biodegradable_Filaments_for_Sustainability_of_3D_Printing/2017.
- [114] ARRIGHI (P.A.). – *Les filaments écologiques*. <https://www.aniwaa.fr/les-filaments-ecologiques/> (2019).
- [115] FEDEREC. – *L'industrie du recyclage à l'horizon 2030 – Livre Blanc « Prospective et Innovation »*. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-26008-industrie-recyclage-horizon-2030.pdf> (2019).
- [116] CRUZ (F.), BOUDAUD (H.), HOPPE (S.) et CAMARGO (M.). – *Polymer Recycling in an Open-Source Additive Manufacturing Context : Mechanical Issues*. Additive Manufacturing Journal. https://www.researchgate.net/publication/318921880_Polymer_Recycling_in_an_Open-Source_Additive_Manufacturing_Context_Mechanical_Issues (2017).
- [117] MOHAMMED (M.I.), DAS (A.), GOMEZ-KERVIN (E.), WILSON (D.) et GIBSON (I.). – *EcoPrinting : Investigating the use of 100 % recycled Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) for Additive Manufacturing*. Solid Freeform Fabrication 2017 : Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference – Reviewed Paper. <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2017/Manuscripts/EcoprintingInvestigatingtheUseof100Recycle.pdf> (2017).
- [118] *Recyclage des solvants d'impression 3D*. <https://istsurface.com/fr/applications/distillation-du-solvant/recyclage-des-solvants-dimpression-3d/> (2019).
- [119] CHRISTENSEN (P.R.), SCHEUERMANN (A.M.), LOEFFLER (K.E.) et HELMS (B.A.). – *Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent di-ketoenamine bonds*. Nature Chemistry, 11, 442-448 (2019).
- [120] SHI (Q.), YU (K.), KUANG (X.), MU (X.), DUNN (C.K.), DUNN (M.L.), WANG (T.) et Qi (H.J.). – *Recyclable 3D printing of vitrimer epoxy*. Materials Horizons, 4. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/mh/c7mh00043j/unauth#!divAbstract> (2017).
- [121] MCKEOWN (P.), ROMAN-RAMIREZ (L.A.), BATES (S.), WOOD (J.) et JONES (W.D.). – *Zinc Complexes for PLA Formation and Chemical Recycling : Towards a Circular Economy*. ChemSusChem, 12, 5233-5238. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/cssc.201902755> (2019).
- [122] COTTELEER (M.), HOLDOWSKY (J.) et MAHTO (M.). – *The 3D opportunity primer : the basics of additive manufacturing*. Deloitte University Press, Westlake, Texas, USA cité par VERHULST (J.) (2014, 2015).
- [123] SHORT (D.), SIRINTERLIKCI (A.), BADGER (P.) et ARTIERI (B.). – *Environmental, health, and safety issues in rapid prototyping*. Rapid Prototyping Journal, 21, 105-110. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2012-0111> (2015).
- [124] VÄISÄNEN (A.J.K.), HYTTINEN (M.), YLÖNEN (S.) et ALONEN (L.). – *Occupational exposure to gaseous and particulate contaminants originating from additive manufacturing of liquid, powdered, and filament plastic materials and related post-processes*. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 16, 258-271 (2019).
- [125] ROTH (G.A.), GERACI (C.L.), STEFANIAK (A.), MURASHOV (V.) et HOWARD (J.). – *Potential occupational hazards of additive manufacturing*. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 16, 521-528 (2019).
- [126] MELLIN (P.), JÖNSSON (C.), ÅKERMOA (M.), FERNBERG (P.), NORDENBERG (E.), BRODIN (H.) et STRONDL (A.). – *Nano-sized by-products from metal 3D printing, composite manufacturing and fabric production*. Journal of Cleaner Production, 139, 1224-1233 (2016).
- [127] MOYLAN (S.), SLOTWINSKI (J.), COOKE (A.), JURRENS (K.) et DONZEE (M.A.). – *Lessons Learned in Establishing the NIST Metal Additive Manufacturing Laboratory*. NIST Technical Note 1801. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1801.pdf> (2013).
- [128] PATRASCU (C.). – *Risques et prévention pour la fabrication additive utilisant des poudres métalliques*. <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/risques-prevention-fabrication-additive-utilisant-poudres-metalliques> (2019).
- [129] *Fabrication additive ou impression 3D utilisant les poudres métalliques – Fiche pratique de sécurité*. <http://www.inrs.fr/media.html?reflNRS=ED%20144> (2019).
- [130] *Quels sont les risques liés à l'utilisation de poudres métalliques en impression 3D ?*. <https://www.3dnatives.com/poudres-metalliques-risques-040920193/> (2019).
- [131] GU (J.), WENSING (M.), UHDE (E.) et SALTHAMMER (T.). – *Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer*. Environment International, 123, 476-485. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018323663> (2019).
- [132] BAU (S.), PAYET (R.), ROUSSET (D.) et KELLER (F.X.). – *Assessing exposure to aerosols emitted from a direct metal deposition additive manufacturing process*. 5th Working & Indoor Aerosols Conference. https://www.researchgate.net/profile/Francois_Xavier_Keller/publication/325443097_Assessing_exposure_to_aerosols_emitted_from_a_direct-metal-deposition-additive-manufacturing-process (2018).
- [133] FOLK (E.). – *How to Avoid Waste When 3D Printing*. <https://3dprint.com/262154/how-to-avoid-waste-when-3d-printing/> (2020).
- [134] AFSHAR-MOHAJER (N.), WU (C.Y.), LADUN (T.), RAJON (D.A.) et HUANG (Y.). – *Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer*. Building & Env., 93, 293-302 (2015).
- [135] MERLO (F.) et MAZZONI (S.). – *Gas evolution during FDM 3D printing and health impact*. http://www.3dsafety.org/3dsafety/download/mf2015_eng.pdf (2015).
- [136] Zimble, l'impression 3D sans émissions toxiques. <http://www.3dnatives.com/zimble-interview-140320173/> (2017).
- [137] Alveo3D, un filtre pour imprimer en 3D dans un environnement sain. <https://www.3dnatives.com/alveo3d-filtre-imprimante-180720193/> (2019).
- [138] WOJTYLA (S.), KLAMA (P.) et BARAN (T.). – *Is 3D printing safe ? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics : ABS, PLA, PET, and nylon*. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 14, D80-D85, DOI:10.1080/15459624.2017.1285489 (2017).
- [139] O'NEAL (B.B.). – *Researchers Discuss Health Hazards of 3D Printed Implants & Biomaterials*. <https://3dprint.com/237181/researchers-discuss-health-issues-3d-printed-tissue-biomaterials/> (2019).
- [140] BERDAH (P.). – *L'impact de l'imprimante 3D sur la propriété intellectuelle*. <http://glorieusefrance.fr/wp-content/uploads/2014/03/Imprimante-3D.pdf> (2014).
- [141] *L'industrie de la plasturgie*. Travail & Sécurité n° 768. <http://www.travail-et-securite.fr/ts/dossier.html> (2016).
- [142] POTTER (P.M.), AL-ABED (S.R.), LAY (D.) et LOMNICKI (S.M.). – *VOC Emissions and Formation Mechanisms from Carbon Nanotube Composites during 3D Printing*. Environmental Science and Technology, 53, 4364-4370 (2019).
- [143] HOGUIN (S.). – *Le marché mondial de la fabrication additive métallique explose*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/le-marche-mondial-de-la-fabrication-additive-metallique-explose-69765/> (2019).
- [144] *Marché mondial de l'acier*. <https://www.planetoscope.com/Commerce/1149-production-mondiale-d-acier.html> (2020).
- [145] OSAGHAE (E.). – *3D Printing and the Circular Economy Part 7 : the Viability of 3D Printing*. <https://3dprint.com/248793/3d-printing-and-the-circular-economy-part-7-the-viability-of-3d-printing/> (2019).
- [146] *L'Europe est un pionnier mondial en matière de réglementation de la technologie*. https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/vecteurs/vecteurs-actualites/vecteurs-actualites-details?no_cache=1tx_tnews%5Btt_news%5D=24381&hash=a6b51655a72e93ca05f03188c672d81c (2020).

À lire également dans nos bases

Principes et enjeux

Fabrication additive – Principes généraux. [BM 7 017].

Créativité et fabrication additive – Infographie. [IBM 7 017].

Fabrication additive : révolution ou simple évolution sociétale ?. [AG 115].

L'impression 3D dans une perspective de développement durable. [AG 6 753].

L'impression 3D et développement durable – Infographie. [IAG 6 753].

Propriété intellectuelle et enjeux réglementaires de l'impression 3D. [BM 7 980].

Procédés de fabrication additive

Fabrication additive en aéronautique et en spatial. [BM 7 940].

Fabrication additive : contrôles. [BM 7 950].

Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques. [BM 7 900].

Numérisation 3D et prototypage rapide – Exemples d'industrialisation de produits. [AG 3 404].

Stéréolithographie par photopolymérisation. [BM 7 910].

Procédés par familles de matériaux

Élaboration de pièces céramiques par fabrication additive. [N 4 807].

Microstéréolithographie de pièces céramiques complexes. [RE 13].

Panorama des technologies de fabrication additive utilisant la silicone. [BM 7 925].

Matériaux et poudres

Caractérisation et analyse des poudres – Propriétés physiques des solides divisés. [J 2 251].

Caractérisation et analyse des poudres – Propriétés comportementales des solides divisés. [J 2 252].

Fabrication de poudres métalliques par la méthode PREP. [IN 221].

Frittage : aspects physico-chimiques – Partie 1 : frittage en phase solide. [AF 6 620].

Frittage : aspects physico-chimiques – Partie 2 : frittage en phase liquide. [AF 6 621].

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur



INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente



MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillesse
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites



MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D



ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement



ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications



GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception



ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique



TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information



AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique



INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime



MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif



PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire



SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière



BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques



CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillesse, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques