

## Produire et consommer à l'ère de la transition écologique

### Note d'analyse 1 : Des processus de production réduisant les consommations de matières

Jean-Loup Loyer

Cette note d'analyse est issue de l'étude de Futuribles International, « Produire et consommer à l'ère de la transition écologique », qui vise à analyser le potentiel de développement de modes de production et de consommation aujourd'hui émergents, et leurs impacts sur la consommation de ressources et les externalités. Après une première phase de diagnostic de la production et la consommation en France et dans le monde, un catalogue de 100 pratiques émergentes innovantes a été constitué. Il a permis d'identifier 10 familles d'innovations qui sont autant de leviers possibles de réduction de la consommation de ressources. La présente note constitue l'un de ces leviers. Dans la dernière phase de l'étude, des scénarios présentant des modes de production et de consommation durables à l'horizon 2030 ont été rédigés.  
Présentation de l'étude et documents publiés : <http://www.futuribles.com/fr/groupes/produire-et-consommer-en-france-en-2030/>

#### I. Définition/champ couvert

Cette note d'analyse porte sur les innovations techniques entraînant des économies substantielles de ressources naturelles non renouvelables au cours des procédés de production dans le domaine de l'ingénierie mécanique : automobile, aéronautique, ferroviaire, navale, jouet... Elle couvre une partie seulement du processus de production, à savoir la fabrication et l'assemblage des pièces finales (Figure 1 – parties vertes) ; la phase amont de production de matières premières n'est donc pas décrite dans cette note (Figure 1 – partie rouge).

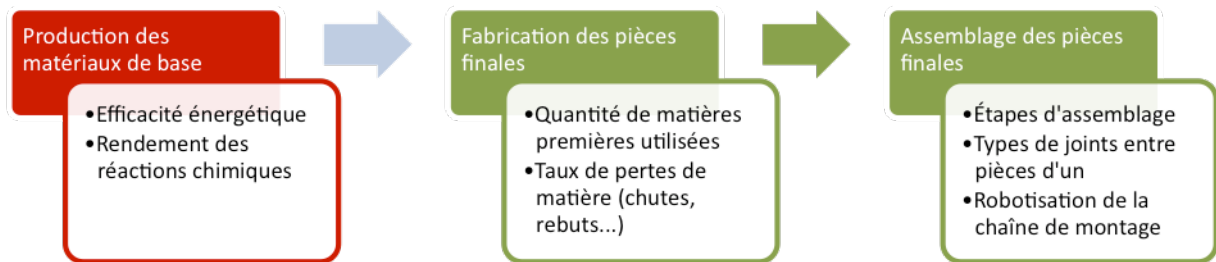


Figure 1 - Vision simplifiée des phases du processus de production et quelques leviers de gains de ressources

Les innovations couvertes par ce champ étant potentiellement très vastes, la note prend appui sur quelques exemples représentatifs des leviers d'économie de ressources non renouvelables : un procédé de fabrication plus économe en matières premières minérales, des technologies d'assemblage innovantes ainsi que des robots de production de nouvelle génération. Par contre, cette note d'analyse ne traite qu'indirectement et marginalement le vaste sujet de la réduction de la consommation d'énergie par les procédés de production.

La note se concentre essentiellement sur la phase de fabrication. Dans ce cadre, on s'intéressera en premier lieu aux procédés dits de *near net shape (NNS) manufacturing*, qui intègrent différentes techniques de production visant à réduire les consommations de

ressources minérales non renouvelables. Ces procédés NNS s'opposent aux techniques de production plus traditionnelles dites « soustractives » (usinage, tournage...) qui ôtent d'importantes quantités de matières à partir d'une pièce intermédiaire ; ils sont mis en œuvre par des entreprises telles que Rolls-Royce et s'appliquent à des produits de moyenne et haute performances des industries mécaniques (automobile, aéronautique-espace-défense, ferroviaire, construction navale, machines et équipements industriels, industrie pétrolière). De plus, cette note s'intéresse uniquement aux pièces métalliques, pour lesquelles le potentiel de réduction de la consommation de ressources non renouvelables est le plus important<sup>1</sup>. Étant donné que les procédés NNS sont cousins des techniques de fabrication additive (*additive manufacturing*), également appelée « impression 3D », quelques rappels plus généraux sur les technologies d'impression 3D seront effectués.

Quant à la phase d'assemblage, différentes technologies seront mentionnées : les nanorobots de la société Zyvex, la méthode de jointure innovante de la société Rotite et le robot de production humanoïde Baxter.

## II. Fondements à l'origine de l'innovation

La volonté d'augmenter la productivité, de satisfaire aux exigences environnementales et de diminuer les coûts poussent les industriels à réduire la consommation de matières premières transformées au cours des processus de production. Des techniques génériques nouvelles laissent entrevoir des progrès importants dans ce champ, dont les procédés de fabrication à la forme la plus juste (*near net shape manufacturing*), des méthodes de jointure innovantes, les robots de production reconfigurables ou les robots manipulateurs de nano-objets.

Le *near net shape manufacturing* est au centre de cette note. Ce terme désigne une famille de procédés réduisant la perte de matière durant les processus de production (chutes, copeaux, rebuts...). Développés dès les années 1950 pour les besoins du Ministère de la Défense américain, les procédés NNS ont trouvé des applications industrielles dans les années 1970 (aéronautique militaire), puis 1980 (aéronautique civile) avant de se diffuser lentement à partir du milieu des années 1990. Les procédés de fabrication à la forme la plus juste sont cousins des procédés d'impression 3D qui se sont développés ces dernières années auprès du grand public pour la fabrication de petits simples objets du quotidien.

## III. Innovation principale et autres innovations repérées

**Innovation principale:** La technique de fabrication de pièces dite de *Near Net Shape Manufacturing* développée par des entreprises du secteur de l'aéronautique et de la défense, notamment Rolls-Royce plc. Cette innovation remplace les procédés habituels de fabrication des pièces mécaniques dits « soustractifs » - dont l'usinage est l'exemple le plus répandu - qui consistent à ôter de la matière à un produit métallique semi-fini afin d'obtenir la pièce finale. Le procédé permet donc d'importants gains de matières premières, jusqu'aux deux-tiers de la masse de la pièce initiale.

---

<sup>1</sup> En effet, pour ce qui est des matières plastiques, les techniques d'injection, proches des procédés NNS, sont d'ores et déjà très fortement utilisées et n'offrent plus qu'un potentiel limité d'économies de ressources naturelles non renouvelables.

## Autres innovations du champ :

- L'entreprise britannique **Rotite** a mis au point de **nouvelles méthodes de jointure** entre composants aboutissant à réduire de quelques pourcents la consommation de matières premières et d'énergie lors des phases de fabrication d'un produit. Ces jointures sont pour l'instant en matières plastiques et ne s'appliquent pas encore à des produits à hautes performances.
- Le robot « **Baxter** » de la société américaine **Rethink Robotics** est un des exemples les plus perfectionnés de la **nouvelle génération de robots industriels**. D'une taille réduite, transportable par une personne, ils sont aisément programmables et s'adaptent à une grande variété de tâches auparavant réalisées par des robots dédiés. Interactifs et pourvus de nombreux capteurs, ils peuvent opérer en toute sécurité au milieu d'opérateurs humains. Plus précis et plus économes, ils contribuent à la réduction de la consommation d'énergie et de matières premières entrant dans les procédés de production, en particulier dans la phase d'assemblage des composants.
- Les robots de la société texane **Zyvex** sont capables de **manipuler des objets à l'échelle nanométrique**, permettant de fabriquer avec une plus grande précision des produits plus légers et plus performants, donc nécessitant une moindre consommation de ressources énergétiques et minérales. Si pour l'instant la technologie est surtout utilisée dans les domaines de la défense et du semi-conducteur, elle est aussi applicable à terme à la plupart des secteurs de l'économie.

## IV. Rolls Royce, fabrication à la forme la plus juste

### 1) Description de l'innovation

#### *Une innovation cousine de l'impression 3D*

Les entreprises industrielles sont en permanence confrontées à de nombreuses pressions : concurrence internationale sur les prix et/ou la qualité de l'offre, exigences environnementales et réglementaires, impératifs de sécurité et de fiabilité, etc. Or, la fabrication de pièces métalliques finales entrant dans de nombreux produits industriels se fait actuellement très souvent par enlèvement de matière à partir d'un « bloc » de métal, grâce à des procédés de fabrication dite « soustractive » tels que l'usinage. Pour remédier à cet inconvénient majeur des procédés actuels, entreprises et centres de recherche mettent au point de nouveaux procédés de fabrication pour réduire leur consommation de matières premières (minéraux métalliques, énergie...).

Les technologies de fabrication additive – souvent qualifiées « d'impression 3D » - consistent en l'empilement successif de couches de matière l'une sur l'autre afin d'obtenir à la forme finale désirée. Plus précises, elles n'utilisent que les quantités de matière strictement nécessaires à la fabrication d'un produit donné.

#### *Les techniques de Near Net Shape (NNS) Manufacturing*

Les techniques de *Near Net Shape (NNS) Manufacturing* – expression qui peut être librement traduite en français par « fabrication à la forme la plus juste » ou « fabrication près des côtes » - peuvent être considérées comme les « cousines » des techniques d'impression 3D. En effet, elles visent également à limiter la consommation de matières premières par la diminution des pertes en copeaux, chutes et rebuts. Néanmoins, alors que l'impression 3D fabrique un objet en une seule opération « d'impression », la particularité des procédés NNS réside dans la fabrication d'une pièce intermédiaire dont la forme est la plus proche possible de la forme

finale. Ainsi, seules subsistent des opérations de finition consommant peu d'énergie et de matières premières.

La fabrication des pièces au plus près de leur forme finale regroupe en fait plusieurs dizaines de méthodes de production, aux caractéristiques assez diverses, dont les principales sont (Figure 5):

- Le procédé de compaction isostatique à chaud des poudres (« Powder Hot Isostatic Pressing » PHIP en anglais) consiste à enfermer le métal sous forme de poudre dans un conteneur hermétique ayant la forme de la pièce finale (EPMA, 2011). Puis, les poudres métalliques sont chauffées à des températures de plusieurs centaines de degrés Celsius dans l'enceinte pressurisée à des centaines de bars (i.e. plusieurs centaines de fois la pression atmosphérique) afin que les poudres fusionnent en un ensemble de densité homogène prenant la forme désirée. Enfin, la pièce obtenue est refroidie afin d'obtenir la pièce finale (Figure 2). La métallurgie des poudres est mieux adaptée aux pièces de grandes dimensions faites d'alliages exotiques (nickel, cobalt...) et aux géométries complexes, même si son spectre d'application est très large : pièces pesant de quelques centaines de grammes à quelques dizaines de tonnes pouvant être fabriquées dans des séries comprenant de une à plusieurs dizaines de milliers de pièces. Elle a été mise au point par des entreprises américaines du secteur de la défense dans les années 1960, puis a été reprise par des fabricants de turbomachines tels que Rolls-Royce (Figure 3).

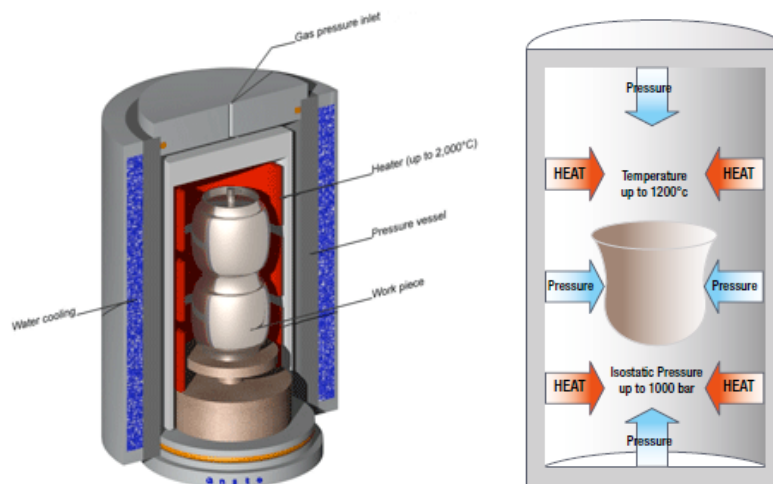


Figure 2 - Procédé "PHIP" de compaction isostatique à chaud des poudres



Figure 3 - Exemples de composants de turbomachines fabriqués par *near net shape manufacturing*

- Développé par des chercheurs de l'université d'Austin au Texas, le frittage sélectif par laser consiste en l'utilisation de puissants faisceaux laser pour réaliser la fusion locale d'un métal en poudre déposé sur un substrat. Le procédé conduit ainsi à créer la forme voulue en trois dimensions en additionnant progressivement « couche par couche ». La production additive par lasers peut être considérée comme une version « professionnelle » de la désormais populaire « impression 3D », qu'elle a précédée de plusieurs décennies dans des applications industrielles. Cette technique est adaptée à la fabrication de petites pièces aux formes complexes et de grande précision. Il est à noter que cette technologie complexe, jusqu'il y a peu réservée aux entreprises industrielles, sera commercialisée pour le grand public à partir de 2014, suite au passage dans le domaine public d'un certain nombre de brevets déposés en 1989 par la société 3D Systems. D'après certains experts, la commercialisation du frittage sélectif par laser représente un « nouveau bond technologique dans les imprimantes 3D libres et open-source<sup>2</sup> » car les utilisateurs pourront « imprimer » des pièces métalliques alors que les imprimantes 3D actuelles restent limitées à des pièces en matières plastiques.
- Mis au point dès les années 1940, le moulage par injection de métal en poudre se diffuse depuis une quinzaine d'années mais reste sous-utilisé au regard de son potentiel d'application considérable (Kermarrec, 2003). Au cours de ce procédé, le métal en poudre est porté à quelques centaines de degrés Celsius pour entrer en fusion, avant d'être injecté dans un moule ayant la forme de la pièce finale. Ce procédé se prête particulièrement bien à la fabrication en grandes séries de petites pièces complexes. Le moulage par injection existe, depuis des décennies et sous de nombreuses variantes, pour la fabrication d'objets plastiques ; il a fallu attendre d'importants progrès techniques pour pouvoir l'appliquer aux métaux, dont la viscosité est inférieure et les températures de fusion plus élevées par rapport à celles des matières plastiques.

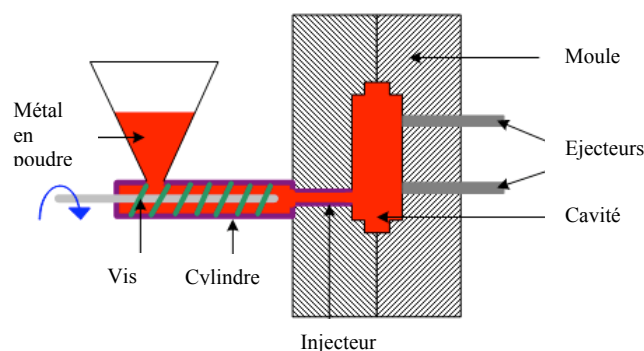


Figure 4 – Schéma de principe du procédé de moulage par injection de métal en poudre

- Le fluotournage consiste en une déformation plastique, pratiquée à froid ou à chaud, d'une pièce intermédiaire simple en forme de disque, de cylindre, de plaque ou de tube, afin de leur donner une forme plus complexe. En pratique, la pièce est placée entre un mandrin et des molettes en rotation et en translation afin d'être progressivement déformée jusqu'à obtenir la forme finale désirée. Le fluotournage est adapté presque uniquement aux pièces dites « de révolution » (cylindres, tubes, cônes,

<sup>2</sup> <http://www.numerama.com/magazine/26574-impression-3d-une-technologie-amelioree-sera-libre-debut-2014.html>

coiffes...).

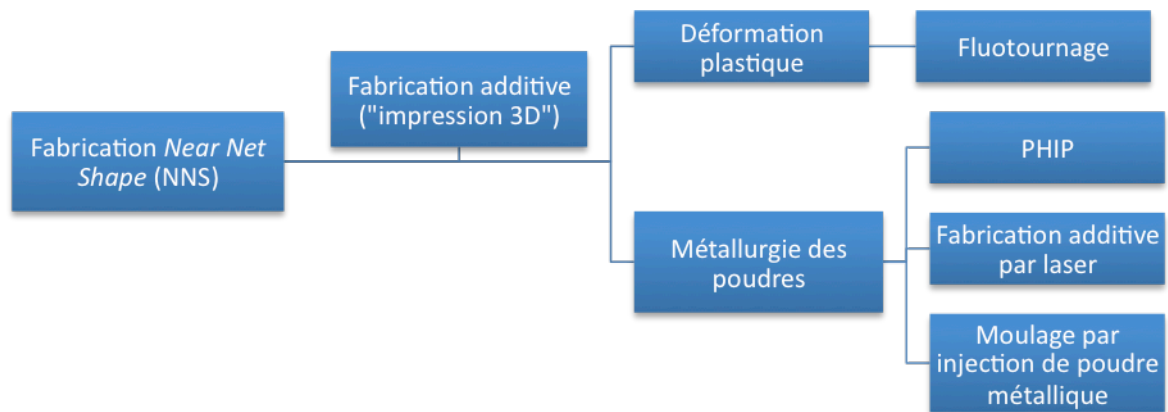


Figure 5 - Les principales techniques de la famille des procédés de production à la forme la plus juste

D'une certaine manière, à la vue de ces nombreuses techniques, on peut considérer la fabrication près des côtes comme une forme intermédiaire entre les techniques d'usinage traditionnelles et des technologies de fabrication purement additives dites « d'impression 3D ». D'un côté, la diminution de la consommation de matières premières est l'objectif principal commun aux deux méthodes et les résultats sont équivalents dans les deux cas. D'un autre côté, la « philosophie » de production diffère fortement entre impression 3D et fabrication NNS : la première est par essence décentralisée (éventuellement jusqu'au consommateur final) alors que la seconde est centralisée dans les entreprises industrielles, à l'instar des procédés de production classiques. Ainsi, les procédés NNS sont bien plus rapides et abordables que l'impression 3D, ce qui permet de les utiliser aussi bien dans des industries de petites (naval), moyennes (aéronautique, ferroviaire) et grandes séries (automobile). Enfin, les techniques de fabrication près des côtes apportent de nombreux autres gains transversaux (Zimmerman, 2008):

- fabrication de pièces aux formes complexes, inenvisageables avec d'autres méthodes de production. Par exemple, il est possible de fabriquer des pièces intégrales (« d'un seul tenant ») au lieu d'avoir à usiner individuellement puis souder plusieurs pièces d'un sous-ensemble.
- réduction de la complexité de l'ensemble de la chaîne de production – à travers la réduction du nombre et de la complexité de chaque étape - se traduisant en d'importants gains en termes de coûts et de temps de cycle de production
- réduction des coûts liés aux volumes de matériaux moindres et qu'il n'est plus nécessaire de fabriquer certains moules très onéreux
- diminution de l'énergie consommée durant les étapes de la production permise par des procédés de production simplifiés et plus économes
- amélioration des propriétés mécaniques et métallurgiques des pièces réalisées par certaines de ces méthodes.

## 2) **Evaluation des impacts sur les ressources et sur les externalités**

### *L'impression 3D*

L'étude des impacts de l'impression 3D sur les ressources naturelles et les externalités autorise une comparaison avec ceux apportés par les technologies de production à la forme la plus juste. Le bilan environnemental n'est pas aisé à établir par rapport à la fabrication soustractive, car il nécessite de comparer:

- L'augmentation des externalités liées à la fabrication et surconsommation de multiples « imprimantes » (énergie, matières premières)
- Les gains de ressources liés à la matière non usinée par impression 3D.

Par ailleurs, du côté des externalités, certaines « imprimantes 3D » sont suspectées d'émettre des aérosols toxiques lors de la fusion du plastique utilisé pour fabriquer les objets.

### *Les méthodes de production NNS*

L'évaluation du bilan environnemental des procédés de production NNS suit une logique légèrement différente de celle de l'impression 3D puisque la production est centralisée, et que les externalités sont donc potentiellement moins nombreuses. Les méthodes NNS permettent de réduire jusqu'à plus de 60% la masse de métaux nécessaires à la fabrication d'une pièce donnée, étant donné qu'il n'est plus nécessaire de retirer par des procédés d'usinage le volume excédentaire de matière générés par les procédés traditionnels.

Ainsi, d'une manière agrégée, les technologies de production à la forme la plus juste autorisent d'importantes réductions de consommation de ressources naturelles non renouvelables. Il s'agit en premier lieu de la consommation totale de métaux par l'ensemble des industries mécaniques, qui pourraient être réduite de 7% si tous les procédés d'usinage venaient à être remplacés par des procédés NNS (Shan, 2012). La consommation de combustibles fossiles peut également être réduite à travers les gains d'énergie à toutes les étapes de la chaîne de production, mais dans des proportions moins importantes que pour les matières premières métalliques, de l'ordre dans le meilleur des cas jusqu'à 1% de la production annuelle. Étant donné qu'elle s'applique à des pièces métalliques, cette innovation n'a pas d'impact sur la ressource naturelle renouvelable qu'est la biomasse.

Enfin, le *near net shape manufacturing* n'a qu'un impact positif indirect et limité sur les externalités, qu'il s'agisse de la qualité de l'air et du climat, de la biodiversité, de la qualité de l'eau ou des sols.

## 3) **Potentiel de diffusion des technologies NNS d'ici 2030**

### *Applicabilité des procédés NNS*

La grande majorité des entreprises industrielles, quel que soit le secteur ou le pays, sont impliquées dans ces évolutions. Les procédés NNS s'appliquent à un nombre important de pièces métalliques de produits issus des industries mécaniques traditionnelles: automobile, aéronautique-espace-défense, ferroviaire, industrie pétrolière, machines et équipements, construction navale. En effet, ces produits contiennent bien souvent des pièces dites de « révolution » de grandes dimensions et de moyenne à grande séries se prêtant bien aux procédés de fabrication à la forme la plus juste; à l'opposé, de nombreuses pièces profilées longues (barres, fils, rails, poutres...) ou plates (tôles) sont souvent plus simples à produire et dans ce cas d'autres procédés de production s'avèrent être plus avantageux économiquement. Des applications dans le secteur de la santé apparaissent également, en particulier pour des petites pièces complexes nécessitant une grande précision de fabrication (Tableau 1). Par contre, les industries de réseau (gaz, électricité, télécommunications), celles dites « lourdes » (sidérurgie et métaux, matériaux de construction), à production continue (papier, plastiques, chimie) ou de « grande consommation » (électronique, textile, agroalimentaire, ameublement...) sont beaucoup moins concernées car les produits qu'elles génèrent n'ont pas les caractéristiques adaptées aux procédés NNS.

Tableau 1 - Exemples d'applications des procédés NNS, par secteur et produits

Secteur	Applications
<b>Automobile</b>	Roues, essieux, arbres, système bielle-manivelle et autres éléments de transmission ; pièces de châssis ; têtes de cylindres
<b>Aéronautique – espace-défense</b>	Arbres, disques et carters de moteurs ; coiffes de fusées et missiles ; parties de fuselage et d'aérostructures ; trains d'atterrissage et roues ; dispositifs de protection (gilets pare-balles...)
<b>Ferroviaire</b>	Roues, essieux, arbres, système bielle-manivelle et autres éléments de transmission ; pièces de bogies ; éléments moteurs de locomotives
<b>Industrie pétrolière</b>	Rotors, turbines et autres composants de machines tournantes; valves ; composants de plateformes pétrolières
<b>Machines et équipements</b>	Pièces et sous-ensembles tournants ; éléments de transmission
<b>Construction navale</b>	Arbres, carters, disques et éléments de transmission de moteurs ; éléments de coque
<b>Médecine et santé</b>	Implants dentaires ; prothèses génériques ; dispositifs médicaux

Quant aux matériaux concernés, les procédés NNS s'appliquent indifféremment à la plupart des alliages et métaux malléables usuellement utilisés dans les produits et pièces sus-cités : aciers inoxydables, nickel, titane, aluminium, cuivre, laiton. Ces techniques de production s'appliquent également aux matériaux céramiques, quoique dans une moindre mesure.

## *Historique de la diffusion des procédés NNS*

Les premiers travaux de recherche sur les techniques de production à la forme la plus juste remontent à plus de 50 ans, notamment avec le développement du procédé PHIP par l'entreprise américaine Battelle en 1955 (Zimmerman, 2008). De leur côté, les procédés de fluotournage ont été utilisés depuis des millénaires (principe du tour de potier) avant d'atteindre il y a seulement quelques décennies des performances adaptées au travail de matériaux métalliques plus durs. Du point de vue des applications industrielles, les secteurs pionniers ont été la défense dès les années 1970 et 1980, puis l'aéronautique dans les décennies 1980 et 1990 pour des pièces de hautes performances de moteurs, réalisées en alliages onéreux (nickel, cobalt). Puis ces techniques ont fait leur apparition dans le secteur automobile dans les années 1990 et 2000, tout d'abord dans les voitures de courses puis dans les voitures commerciales de luxe. Enfin, plus récemment, ces techniques se sont développées dans le secteur médical (implants dentaires, prothèses) et autres applications de hautes performances (roulements céramiques, protections militaires...). Il en va de même pour le procédé de fluotournage, tout d'abord réservé à des applications militaires (pièces cylindriques de missiles ou d'avions de chasse, carters de moteurs) avant de se diffuser il y a une vingtaine d'années dans les industries chimique et pharmaceutique (cylindres et réservoirs pressurisés). Les procédés NNS sont promis à un bel avenir et à une diffusion toujours plus importante dans des produits commerciaux et grand public, remplaçant les techniques actuelles d'usinage, de fonte, de moulage et de coulée.

## *Limites à la diffusion des procédés NNS*

Les freins actuels sont essentiellement d'ordre économique, notamment à cause du coût initial en équipements de production, qui sont plus élevés que celui des techniques classiques : de 75000 dollars pour une « imprimante 3D » industrielle de base contre 1 million de dollars pour certaines machines plus complexes (McKinsey, 2013). En effet, les machines et outils de production de *near net shape* commencent tout juste à s'appliquer à des produits commerciaux courants ; à mesure que les procédés NNS seront adoptés pour des produits de grandes séries, les fabricants d'équipements pourront baisser leurs prix, enclenchant un cycle vertueux. Par exemple, depuis quelques années, les équipements servant à la production par NNS connaissent une croissance en taille, autorisant la production en lots plus importants, générant des économies d'échelle et une diminution des coûts unitaires (Zimmerman, 2008). L'inertie des industriels est un second facteur explicatif d'une diffusion encore modérée des procédés NNS : les outils de production actuellement en utilisation doivent pour beaucoup encore être amortis, ce qui peut prendre jusqu'à plusieurs décennies dans certaines industries. Comme souvent, l'essor des procédés NNS se fera en premier lieu au sein des entreprises leaders dans leurs domaines respectifs - généralement des multinationales de taille importante produisant des volumes conséquents - avant de se diffuser aux fournisseurs de rangs 1 puis 2. Les secteurs de haute technologie (aéronautique-défense, industrie pétrolière, applications médicales) devraient rester en pointe, suivis de l'automobile et des machines/équipements puis enfin de l'industrie ferroviaire et de la construction navale. Il reste toutefois difficile d'avancer des chiffres précis de diffusion à l'horizon 2030.

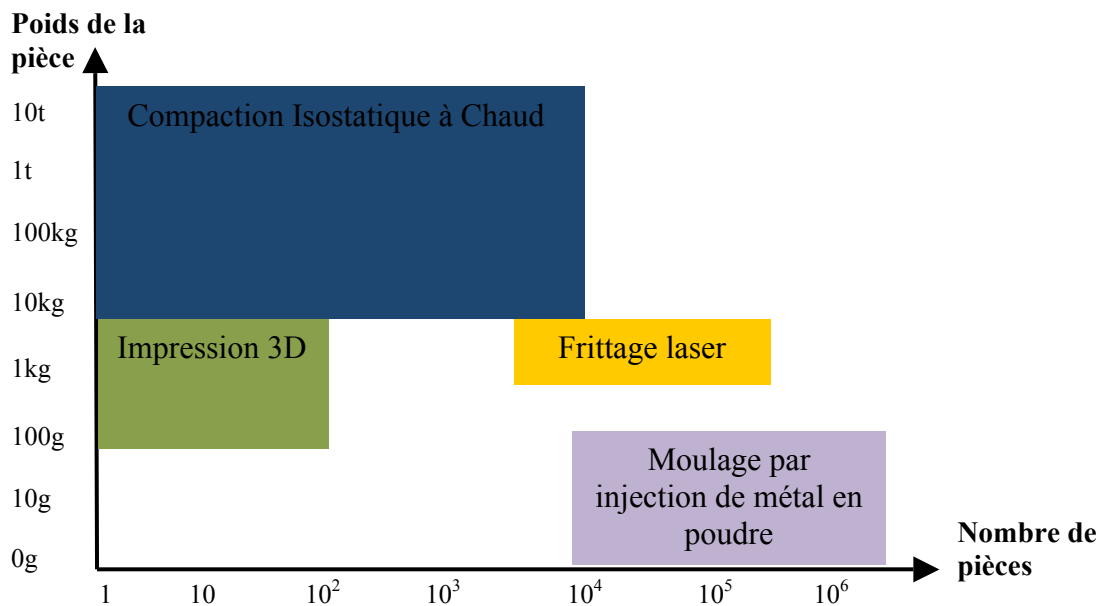


Figure 6 - Positionnement des procédés de fabrication additive en fonction des tailles des pièces et des volumes de production (adapté de EPMA, 2013)

Enfin, les procédés de fabrication à la forme la plus juste ne sont pas la panacée. De par leurs caractéristiques techniques et économiques, ils ne pourront probablement jamais concurrencer d'autres techniques, éprouvées et/ou plus économiques, pour la fabrication de certaines pièces (Figure 6) :

- Produits « commodités » longs ou plats, au coût volumique réduit (acier, aluminium) et pour lesquelles les pertes par usinage sont faibles: tôles des véhicules de transports, barres et autres produits longs grossiers utilisés dans la construction...
- Pièces de dimensions moyennes à grandes fabriquées en volumes importants : blocs moteurs d'automobiles...
- Pièces de petites dimensions (moins de quelques kilogrammes, soit quelques dizaines de centimètres) produites en petites séries : certaines prothèses, éléments de technologies dans le domaine de la défense...

Pour autant, cela ne signifie pas que les pièces susmentionnés ne peuvent pas être produites par les procédés NNS, mais simplement que l'équation économique leur est défavorable vis-à-vis d'autres procédés. En particulier, les techniques d'impression 3D ou NNS peuvent s'avérer très intéressantes sur le marché secondaire, pour la réparation de pièces dont la production n'est plus assurée.

*In fine*, les procédés de fabrication NNS resteront donc essentiellement confinés à certains composants bien identifiés (cf. Tableau 1), tout en étant de plus en plus courants.

#### 4) Impacts sur les ressources

##### *L'impact environnemental de l'impression 3D*

L'impact environnemental des techniques d'impression 3D reste relativement difficile à établir d'une manière agrégée car les gains en matières premières peuvent aisément être compensés par les surconsommations inhérentes à toute décentralisation de la production (Kreiger, 2013). La littérature académique sur le sujet est encore très lacunaire tandis que les analyses de cycle de vie ne peuvent être menées qu'au niveau de chaque technologie d'impression 3D, voire même de l'objet fabriqué.

Le Département américain de l'Énergie estime<sup>3</sup> – sans toutefois fournir de justification solide à l'appui – que l'impression 3D pourrait économiser jusqu'à 90% de matières premières. De leur côté, des chercheurs chinois ont estimé<sup>4</sup> que la réduction de matières premières (plastiques pour la plupart) pouvait aller jusqu'à 70% avec les procédés d'impression 3D. Des chercheurs américains de l'Université du Michigan ont établi le bilan environnemental complet (consommation d'énergie et de matières premières) de 3 modèles d'imprimantes 3D sur 3 produits réalisés avec plusieurs types de matières plastiques. Les résultats sont plutôt positifs : les gains cumulés d'énergie – et donc également d'émissions de CO<sub>2</sub> – sont presque toujours supérieurs de 10% par rapport aux procédés de production traditionnels et peuvent aller jusqu'à 40% (utilisation d'un type particulier de matière plastique), voire même 75% dans certaines configurations (photovoltaïque comme source d'énergie, réduction de la masse de l'objet par « impression en creux ») même si dans certains cas le bilan environnemental est négatif. Enfin, des chercheurs de l'Université de Berkeley se sont également penchés<sup>5</sup> sur le bilan environnemental de l'impression 3D, en comparant l'impression d'un objet plastique avec l'usinage d'un bloc de matière plastique<sup>6</sup>. Utilisant une méthode innovante d'analyse de cycle de vie appelée (ACV) « ReCiPe EndPoint H<sup>7</sup> », les chercheurs ont pu normaliser l'ensemble des impacts (toxicité, émissions de CO<sub>2</sub>, consommation de matières premières...). Les résultats sont mitigés puisque l'impression 3D est moins bénéfique que les traditionnelles techniques d'injection. Ils en ont déduit que la consommation d'électricité représentait la variable la plus importante dans l'ACV de l'impression 3D et que son impact environnemental s'améliore si le taux d'utilisation des « imprimantes » augmente.

Par ailleurs, ces différentes estimations correspondent aux chiffrages présentés au paragraphe suivant pour les procédés NNS, pour lesquels la réduction de pertes de matières premières tient à la fin des procédés soustractifs d'usinage.

### *L'impact environnemental des procédés NNS*

Tout d'abord, les procédés de fabrication à la forme la plus juste n'ont pas d'impact sur la consommation de ressources renouvelables (biomasse) ou sur les minéraux industriels et de construction puisqu'ils s'appliquent essentiellement aux métaux. Par contre, les procédés NNS contribuent à réduire la consommation de deux types de ressources non renouvelables : les combustibles fossiles et les métaux.

---

<sup>3</sup> [www1.eere.energy.gov/manufacturing/pdfs/additive\\_manufacturing.pdf](http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/pdfs/additive_manufacturing.pdf)

<sup>4</sup> <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6377/Big-Step-to-Reduce-Materials-in-3D-Printing.aspx>

<sup>5</sup> <http://www.greenbiz.com/blog/2013/07/19/3d-printing-environmental-win>

<sup>6</sup> Il est intéressant de noter que les auteurs rappellent – à raison – que cette comparaison n'a strictement aucun sens puisque les pièces plastiques sont presque exclusivement réalisées par des procédés d'injection, et jamais par usinage. Cette mise en garde qui aboutit à relativiser les conclusions des auteurs et à s'interroger sur la difficulté à établir des bilans environnementaux de l'impression 3D, et par ricochet à douter de la véracité des estimations qui sont réalisées.

<sup>7</sup> <http://www.lcia-recipe.net/>

La réduction de la consommation de métaux est comparativement la plus importante, puisque la principale caractéristique des procédés de production à la forme la plus juste est précisément de ne pas générer de pertes de matière métallique, contrairement aux procédés d'usinage. Or, d'après des estimations de sociétés savantes chinoises reprises par (Shan, 2012), 100 millions de tonnes (Mt) de métaux – d'une valeur de 250 milliards de dollars - sont perdus chaque année par usinage, représentant près de 7% de la production annuelle mondiale des métaux de base utilisés dans les alliages les plus courants (Brown et *al.*, 2012) : acier (1334 Mt), aluminium (40 Mt), manganèse (38 Mt), chrome (25 Mt), cuivre (18 Mt), titane (16 Mt). Malgré ces chiffres, il reste hasardeux d'estimer la réduction agrégée totale de la consommation de métaux apportée par les procédés NNS car ceux-ci dépendent des caractéristiques techniques des pièces concernées. A partir de cas particuliers, il est possible de chiffrer les gains de consommation en métaux dans une fourchette large comprise entre 30% et 300% :

- Dans le cas d'un élément de transmission d'une voiture mesurant 30cm de long (papier), les procédés d'usinage habituels ont abouti à enlever près de 3.8kg de matière pour produire une pièce finale de 1.9kg à partir d'une pièce initiale de 5.6kg alors que le procédé NNS de fluotournage concurrent ne crée aucune perte à partir d'un tube standard de 1.9kg. Dans cet exemple pratique d'une pièce présente dans toute voiture, le gain s'élève donc à près de 70% de la masse initiale de métal à usiner, soit 200% de la masse de la pièce finale. Pour une voiture contenant en moyenne 1000kg de métal, les techniques NNS permettent donc d'économiser au total plusieurs dizaines de kilogrammes de métal, soit un gain de quelques pourcents sur la masse totale du véhicule, et ce sans perte de performances. Ces composants de transmission relativement standards se retrouvent dans presque tous les produits issus de l'industrie mécanique (cf. Tableau 1).
- Dans le cas de disques de turbomachines utilisées en aéronautique et production d'électricité, la réduction de métaux usinés représente 50kg sur un disque de masse finale de 100kg, soit un gain de 50% de la masse de la pièce finale.

La réduction de la consommation de combustibles fossiles s'effectue quant à elle de deux manières :

- Directe, par la réduction des besoins en liquide de coupe, lubrifiants comme refroidissants, souvent issus de la pétrochimie. Il est difficile de chiffrer précisément les gains mais la réduction de consommation de liquide de coupe est probablement comprise entre quelques pourcents et quelques dizaines de pourcents, soit un impact totalement négligeable sur la réduction sur l'ensemble de la consommation mondiale annuelle de combustibles fossiles.
- Indirecte, à travers une moindre consommation d'électricité durant la phase de production de métaux et de fabrication des pièces mécaniques ; cette réduction concerne surtout les pays disposant d'industries mécaniques puissantes dont une importante partie de l'électricité est générée à partir de pétrole, gaz ou charbon : Etats-Unis, Chine, Japon, Allemagne, Corée du Sud, Inde et Australie. D'après l'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2008), les industries de production de métaux ferreux et non-ferreux représentent 22% de la consommation totale d'électricité par l'industrie au niveau mondial, elle-même absorbant 30% de la production mondiale totale d'électricité. Puisque 66% de l'électricité mondiale est produite à partir de combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole) et considérant une diminution sus-citée de 7% de la consommation de métaux permise par un remplacement total des procédés d'usinage par les procédés NNS, on aboutit à une réduction maximale de 1% de la

consommation de combustibles fossiles au niveau mondial. L'impact positif de la production à la forme la plus juste passe également par la réduction de la consommation d'électricité durant la fabrication des pièces métalliques, comprise entre quelques pourcents et au maximum 20% par rapport aux procédés actuels. Or, l'Agence Internationale de l'Energie estime que les industries mécaniques (catégories « transport equipment » et « machinery ») représentent 15% de la consommation industrielle d'électricité. Les industries concernées par les procédés NNS représentent donc moins de 5% de la consommation totale d'électricité: dans le scénario le plus favorable, les procédés NNS aboutissent à réduction de la consommation mondiale totale de combustibles fossiles de 1% ; dans la réalité, les gains sont négligeables, et le resteront probablement à l'horizon 2030.

## 5) Impacts sur les externalités

Les procédés NNS ont un impact indirect positif sur la qualité de l'air et du climat par la réduction de l'énergie consommée lors des procédés de production, ainsi que par une moindre consommation d'hydrocarbures entrant dans les liquides de coupe abondamment utilisés durant les procédés d'usinage. La moindre consommation de liquides de coupe - polluants, toxiques et difficiles à recycler – a également un impact potentiellement positif sur la qualité de l'eau, et probablement marginal, quoique difficile à mesurer.

Enfin, l'innovation retenue a un impact positif mais négligeable sur la biodiversité, la qualité des surfaces et des sols, à travers la réduction générale des intrants qui en résulte.

## 6) Quels effets rebond ou contre-productifs (sur la consommation de ressources naturelles non renouvelables) peut-on envisager en cas de diffusion massive de l'innovation ?

Les procédés NNS ne nécessitent pas plus d'énergie ou de métaux en amont que les autres procédés de production, par exemple pour fabriquer les poudres métalliques utilisées dans la compaction isostatique à chaud.

Durant la phase de fabrication à proprement parler, les procédés de compaction isostatique à chaud consomment des quantités importantes d'énergie pour pressuriser le conteneur et chauffer les poudres métalliques. De plus, un procédé tel que le fluotournage nécessite l'utilisation de volumes plus importants de liquides de coupe et de refroidissement - dont la plupart sont produits à partir d'hydrocarbures – à cause de l'émission de grandes quantités de chaleur lors de la déformation mécanique des pièces. Cependant, en comparaison des gains de matières premières métalliques obtenus par les techniques de NNS, ces surconsommations de liquides de refroidissement restent mineures.

On peut donc affirmer que les effets rebond ou contre-productifs des procédés de production *near net shape* sont tout à fait négligeables au regard des gains de consommation en ressources naturelles non renouvelables qu'ils autorisent.

## V. Conclusion générale

La consommation de ressources naturelles non renouvelables est susceptible d'être réduite à toutes les étapes des processus de production. Dès la première étape, des procédés de production plus efficaces limitent l'impact environnemental de l'extraction. La purification ou la première transformation des matières premières minérales bénéficient des progrès techniques de la sidérurgie ou de la chimie (réacteurs chimiques plus efficaces, catalyseurs, technologies membranaires, biochimie...). Les transformations ultérieures – fabrication des composants à partir des matières premières puis assemblage de ces composants - visent essentiellement à améliorer l'efficacité des procédés de production, d'une manière transversale et à travers plusieurs leviers : réduction des pertes de matières, meilleure efficacité énergétique... Bien qu'il soit difficile de chiffrer les gains exacts rendus possibles par ces améliorations, on peut estimer leur impact maximal à quelques pourcents de la consommation totale de ressources naturelles non renouvelables, qu'elles soient métalliques ou énergétiques.

En particulier, au cours de la transformation des matières premières en produits (semi)finis dans les industries mécaniques, les innovations telles que le *near net shape manufacturing* permettent des gains non négligeables, quoique limités au mieux à quelques pourcents, de la consommation de ressources naturelles. Issus de secteurs de hautes technologies (aéronautique, défense) et s'appliquant à un pan conséquent de l'industrie et des produits qui nous entourent, elles ont atteint au cours des trois dernières décennies une maturité technique qui autorise leur diffusion aussi bien à des produits plus courants (automobiles, dispositifs médicaux) que des produits de plus petites séries issus d'industries de plus basses technologies (construction navale, industrie pétrolière, ferroviaire, machines et équipements). Sans toutefois pouvoir remplacer de nombreux procédés plus avantageux économiquement pour des pièces mécaniques simples (produits plats ou longs en sidérurgie), leur développement est probablement inéluctable et touchera en premier lieu tous les pièces dites « de révolution ». En effet, les gains en matières premières et en énergie, alliés à la possibilité de réaliser des pièces plus complexes et précises, justifient leur adoption. Comme dans toute avancée majeure des techniques de production, leur diffusion se fera cependant lentement, à mesure que 1) les barrières culturelles tombent, 2) les équipements de production se renouvellent et que 3) l'avantage économique créé par les économies d'échelle ne devienne finalement décisif.

Bien d'autres technologies, aux caractéristiques très diverses, sont à l'origine d'économies de ressources naturelles lors de la production de biens. Les systèmes de fixation et de jointure innovants tels que ceux développés par la société Rotite, bien que souvent ignorés, autorisent la réduction de masse à l'interface de pièces mécaniques ainsi que les pertes de matières par usinage de trous pour les fixations. Les robots de production quant à eux ont une action plus transversale : 1) ils contribuent à l'augmentation de la productivité des opérations de production, entraînant bien souvent une diminution de la consommation de matières premières, 2) ils réduisent le risque de mauvaise manipulation et de perte pour non-qualité et 3) de plus en plus économes en énergie et précis, ils réduisent les besoins en ressources naturelles non renouvelables.

## Bibliographie

- Agence Internationale de l'Énergie. 2008. "Electricity information". *IEA Statistics*
- T. J. Brown, R.A. Shaw, T. Bide, E. Petavratzi, E. R. Raycraft, A.S. Walters. 2012. "World Mineral Production 2007-2011". British Geological Survey.
- R. Cominotti, E. Gentili. 2008. "Near net shape technology: An innovative opportunity for the automotive industry." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 24:722-727
- EPMA. 2011. "La Technologie PM HIP." European Powder Metallurgy Association.
- EPMA. 2013. "Introduction to PM HIP technology - A guide for Designers and Engineers." European Powder Metallurgy Association.
- M. Kermarrec. 2003. "MIM: Metal injection moulding. Etats des lieux de la technologie en France et dans le monde." Agence Rhône-Alpes pour la maîtrise des matériaux.
- M. Kreiger, J.M. Pearce. 2013. « Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. » *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(12) : 1511-1519
- McKinsey Global Institute. 2013. « Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy »
- Z. Shan, S. Qin, Q. Liu, F. Liu. 2012. « Key manufacturing technology & equipment for energy saving and emissions reduction in mechanical equipment industry. » *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 13(7):1095-1100
- F. Zimmerman, J. Toops. 2008. « Hot isostatic pressing : today and tomorrow ». <http://tozmetalurji.com/tozpdf/HIP-Today-and-Tomorrow.pdf>

## Liens Internet

- [http://www.rolls-royce.com/about/technology/manu\\_tech/net\\_shape\\_manufacture.jsp](http://www.rolls-royce.com/about/technology/manu_tech/net_shape_manufacture.jsp) ;
- <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA521732> ;
- [http://www.aubertduval.com/fileadmin/user\\_upload/pdf\\_gb/brochure\\_PM\\_HIP\\_NNS.PDF](http://www.aubertduval.com/fileadmin/user_upload/pdf_gb/brochure_PM_HIP_NNS.PDF)
- <http://www.hotisostaticpressing.net/>