Commentaire

Apport de la fabrication additive au soutien médical des engagements opérationnels

M. BRIONE[(1)], A. GUYEN[(2)], J.-U. MULLOT[(3)], O. DUBOURG[(4)]

(1) Académie de Santé des Armées, Écoles Militaires de Santé de Lyon-Bron, Lyon
(2) Direction Centrale du Service de Santé des Armées, État-Major Opérationnel Santé, Villacoublay
(3) Direction Centrale du Service de Santé des Armées, Division Santé de Défense, Paris
(4) Académie de Santé des Armées, École du Val-de-Grâce, Paris

Auteur correspondant : matthias.brione@gmail.com

Open access DOI
10.17184/eac.10131

Reçu
le 4 août 2025

Accepté
le 24 avril 2026

Publié
le 5 juin 2026

Conflit d'intérêt
Les auteurs ne déclarent pas de conflit d'intérêt.

Résumé :
Face à l'évolution des conflits et à la nécessité de renforcer l'autonomie et l'efficience logistique des forces armées, la fabrication additive ou impression 3D émerge comme une technologie de rupture prometteuse. Après des débuts dans le maintien en condition opérationnelle des véhicules de l'armée de Terre et un rôle ponctuel lors de la crise Covid-19, elle devrait s'imposer progressivement dans le soutien médical aux engagements opérationnels, à des fins de formation, de production ou de réparation de dispositifs médicaux ainsi que pour la recherche biomédicale.
Cet article propose une synthèse du principe de l'impression 3D et de ses principales technologies actuellement disponibles et applicables au domaine médical, illustrées par différentes applications pour le Service de santé des armées, qu'il s'agisse de modèles anatomiques, d'outils chirurgicaux, de bio-impression ou d'organoïdes sur puces.
À terme, en prenant en compte le contexte opérationnel et plus particulièrement un engagement majeur avec des phases de haute intensité, l'utilisation de l'impression 3D de dispositifs médicaux sur un théâtre d'opérations, notamment pour faire face à des consommations imprévues ou pallier un défaut d'approvisionnement, apparaît comme l'usage le plus réaliste. Un logigramme proposé détaille le processus de fabrication d'un dispositif médical sur un théâtre d'opérations, depuis la demande terrain jusqu'au contrôle final, intégrant les rôles des différents acteurs impliqués, et des flux numériques sécurisés par *blockchain* pour le transfert de fichiers 3D.
En permettant une production décentralisée, rapide et potentiellement personnalisée, la fabrication additive renforce la résilience du soutien médical. Cependant, son déploiement reste conditionné à l'amélioration des technologies d'simpression,

à la standardisation des pratiques, à la consolidation d'un cadre réglementaire spécifique et à une mutualisation des moyens avec les autres armées. Bien que ne relevant pas directement du soutien médical aux engagements opérationnels, le volet personnalisation des guides et implants chirurgicaux et des médicaments pourrait trouver des applications au sein des hôpitaux militaires.
À plus long terme, la bio-impression ouvre des perspectives en matière de recherche de nouvelles thérapeutiques et de régénération tissulaire plus efficace pour les blessés, à condition de lever des verrous techniques et réglementaires en suspens.

Mots-clés : Fabrication additive. Impression 3D. Production décentralisée. Soutien médical aux engagements opérationnels. Médecine d'armée.

Abstract:
ADVANTAGES OF ADDITIVE MANUFACTURING IN MEDICAL SUPPORT FOR OPERATIONAL MISSIONS

In the face of evolving conflicts and the need for more logistical autonomy and efficiency of armed forces, additive manufacturing (3D printing) has emerged as a promising disruptive technology. Initially implemented to maintain the operational readiness of army vehicles, and sporadically used during COVID-19 pandemic, it should now gradually become an integral part of medical support for military operations, serving purposes such as training, production, and repair of medical devices, as well as biomedical research.
This article synthesizes the principles of 3D printing and its main technologies currently available and applicable to the medical field, illustrated by various applications relevant to military health services, including anatomical models, surgical tools, bioprinting, and organ-on-a-chip technologies.
Ultimately, considering the operational context, and particularly a major engagement with high-intensity phases, the use of 3D printing for medical devices in a theatre of operations, especially to address unforeseen consumption or mitigate supply shortfalls, appears to be the most realistic application. A proposed flowchart details the process for manufacturing a medical device in an operational theater, from the initial field request to final quality control. It incorporates the roles of various stakeholders involved and digital workflows secured by blockchain technology for 3D file transfers.
By enabling decentralized, rapid, and potentially personalized production, additive manufacturing strengthens the resilience of medical logistics. However, its broader deployment remains dependent upon further technological improvements, the standardization of practices, the establishment of a dedicated regulatory framework, and resource-sharing among different branches of the armed forces. Although not directly

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

related to operational medical support, personalized surgical guides, implants, and pharmaceuticals could also find applications within military hospitals.
In the longer term, bioprinting holds promise for discovering new therapies and achieving more effective tissue regeneration for injured personnel, provided outstanding technical and regulatory barriers can be overcome.

Keywords: Additive manufacturing. 3D printing. Decentralized production. Medical support for operational deployments. Military medicine.

Introduction

L'instabilité géopolitique croissante de ces dernières années a conduit à un recours accru de la Force, désormais appuyée par l'utilisation de technologies duales et de solutions numériques. Pour mieux faire face à une éventuelle guerre d'usure majeure, nos armées doivent augmenter leur résilience qui repose sur leur capacité à accroître leurs volumes d'hommes et de ressources logistiques telles que les munitions, les carburants, les capacités de transport, les vivres et les produits de santé (1,2).
C'est dans cette optique d'autonomie et de renforcement du soutien que s'inscrit la Fabrication additive (FA). Initialement expérimentée au Mali par l'armée de Terre, dans le cadre de l'opération Barkhane en 2019 afin de gagner du temps sur les délais de disponibilité technique opérationnelle des véhicules (3), la FA a commencé à se démocratiser dans le secteur médical pendant la crise du Covid-19. En effet, des fermes d'imprimantes ont vu le jour dans le but de fabriquer des Dispositifs médicaux (DM) afin de pallier les pénuries comme des visières de protection ou des valves pour respirateur artificiel d'urgence en accord avec les instances réglementaires (4,5). Depuis 2018, l'Établissement central des matériels du service de santé des armées (ECMSSA) s'est progressivement doté de sept imprimantes 3D. En décembre 2024, il est officiellement désigné comme établissement de référence en FA pour le Service de santé des armées (SSA), confirmant l'intérêt croissant de cette technologie pour le Service.

L'objectif de cette synthèse est d'éclaircir les principes de la FA, d'illustrer ses applications à travers des cas d'usage dans différents domaines d'intérêt pour le SSA, de présenter un premier logigramme d'emploi en opération et de discuter des limites actuelles et des perspectives de développement.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

1 La fabrication additive : principe et classification des techniques utilisables en santé

1.1 Définition

Technologie dont les premiers brevets ont été déposés dans les années 1980, la FA, également appelée impression 3D est un « procédé d'assemblage de matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèles 3D, en général couche après couche, à l'inverse des méthodologies de fabrication soustractive et de fabrication mise en forme » (6). En d'autres termes, elle regroupe l'ensemble des techniques qui consistent à ajouter de la matière *a contrario* de celles qui en retirent telles que l'usinage, la découpe laser ou par jet d'eau.

1.2 Principe

Quel que soit le procédé d'impression 3D utilisé, la chaîne de fabrication (figure 1) débute par la modélisation d'un objet en trois dimensions au moyen d'un logiciel de conception assistée par ordinateur. Récemment, certains logiciels proposent de la conception générative, c'est-à-dire la production d'un modèle 3D grâce à l'Intelligence artificielle (IA) sans prémodèle conçu initialement par un humain. Cela permet entre autres de réduire le poids des composants, de renforcer certaines parties et de diminuer les temps d'impression.

En dehors de la conception initiale, l'usage de bibliothèques de fichiers existants et la rétro-ingénierie *via* numérisation 3D (*via* l'utilisation d'un logiciel de conception assistée par ordinateur ou l'utilisation d'un scanner 3D) d'un objet physique sont deux autres approches pour obtenir un fichier. L'utilisation de l'imagerie médicale d'un patient pour obtenir ce fichier rentre dans ce cadre.
Le modèle généré doit ensuite être converti dans un format exploitable par l'imprimante. Le format le plus courant est le .stl (stéréolithographie), qui décrit la surface de l'objet sous forme de maillage triangulaire.
Le fichier est ensuite traité par un logiciel de tranchage ou *slicer* qui segmente le modèle en couches successives et génère un code d'instruction machine, le *G-code.* Ce logiciel donne également accès à différents paramètres, tels que la vitesse d'impression, la résolution et la configuration des structures de support.
Après l'impression, une phase de post-traitement est généralement requise. Elle dépend de la technologie utilisée et peut inclure nettoyage, séchage, polissage ou exposition aux ultraviolets (7,8).

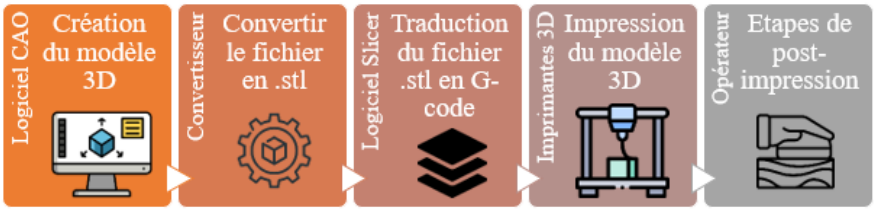


Fig. 1 : Schéma récapitulatif des différentes étapes d'impression

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

1.3 Classification

L'impression 3D ne concerne pas qu'un seul procédé de fabrication, mais un large éventail de techniques d'impression classées en sept familles selon la norme ISO/ASTM 52900, à savoir, l'extrusion de matière, la photopolymérisation, la fusion sur lit de poudre, la projection de matière, la projection de liant, le dépôt de matière sous-énergie concentrée et la stratification de couches. Les deux dernières sont les plus marginales en santé (9). Il est possible d'ajouter une classification selon l'état physique des matériaux de départ qui seront imprimés ou bien à partir de critères technologiques comme les imprimantes à cuve ou à buse ou bien selon que l'impression se déroule en mono ou multiphases (10). Cette classification par l'état physique du matériau permet une simplification efficace (figure 2). En revanche, il n'est pas possible de procéder à un regroupement par domaine d'application, un objet pouvant être imprimé par plusieurs techniques. Les sous-techniques que nous retrouvons le plus en santé sont le dépôt de fil fondu (FDM), la stéréolithographie (SLA), le frittage sélectif par laser (SLS), le traitement numérique de la lumière (DLP), le PolyJet (PJ), la projection de liant (BJ) et la fusion sélective par laser (SLM).

Le choix d'utiliser l'une ou l'autre dépend de plusieurs critères tels que le coût des imprimantes, la vitesse et la résolution d'impression, les propriétés des matériaux disponibles ainsi que les contraintes spécifiques d'utilisation. De manière simplifiée, la SLA et le DLP offrent une très bonne résolution, mais un éventail de matériaux plus restreint. Le FDM est généralement la solution la plus économique, au prix d'une fidélité dimensionnelle et de performances mécaniques souvent inférieures. Enfin, le SLS et le SLM sont les imprimantes les plus coûteuses qui disposent des meilleures propriétés mécaniques, mais nécessitent des étapes de post-traitement plus importantes (11).

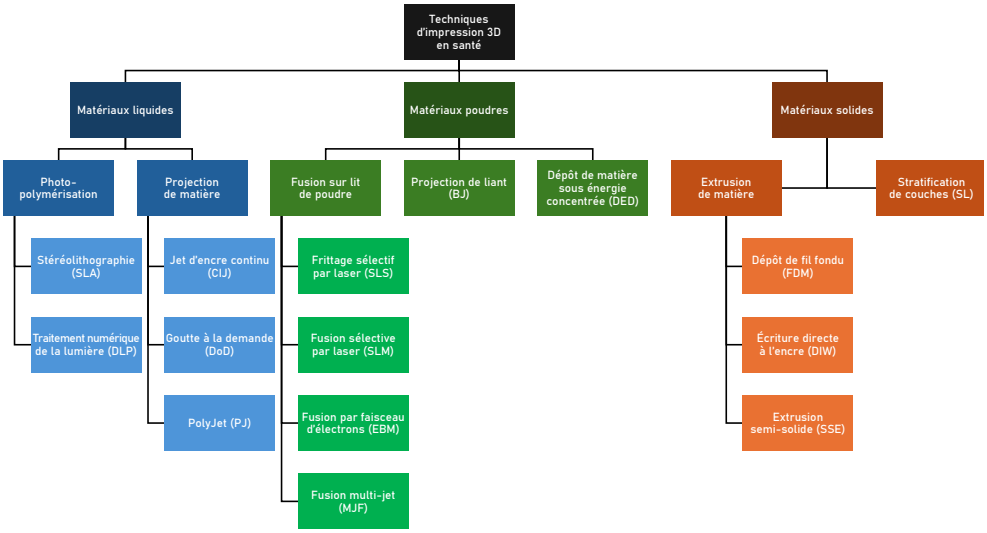


FIG. 2 : Classification des différentes technologies d'impressions 3D utilisées dans le secteur médical - les technologies les plus utilisées sont en gras

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

2 Les applications pour le Service de santé des armées

2.1 Les domaines d'application en santé

Nous pouvons diviser les domaines de l'impression 3D en quatre parties avec les modèles anatomiques pour la formation et la planification chirurgicale, les dispositifs médicaux allant des outils chirurgicaux aux implants, les médicaments et la bio-impression. Cette dernière, qui se définit comme l'impression d'une matrice avec des cellules vivantes, se subdivise en deux grands domaines ; les organoïdes dont font partie les organoïdes-sur-puces (OoC) et les organes. Le tableau 1 complète la figure 2 en répartissant les différentes techniques par domaine d'application (12). L'écriture directe à l'encre (DIW), bien que non spécifique à la bio-impression s'est imposée comme une technique de choix dans ce domaine (13). La bio-impression par jet d'encre ou *inkjet bioprinting* est un dérivé du procédé goutte à la demande également en plein essor dans la bio-impression (14,15).

Dans les parties suivantes, nous ne développerons pas de cas d'usage concernant les médicaments, car ils ne présentent actuellement pas d'applications pertinentes dans le cadre du Soutien médical aux engagements opérationnels (SMEO). En effet, la plupart des traitements d'urgence étant administrés par voie injectable, et les militaires étant généralement jeunes et en bonne santé, la personnalisation des dosages contrairement à la standardisation actuelle présente peu d'avantages au regard des contraintes logistiques qu'elle implique (16).

Tab. 1 : Répartition des techniques d'impression 3D majoritairement utilisées par domaine d'application

Domaines d'application	Techniques majoritairement utilisées
Simulation	FDM, SLA, DLP, PolyJet
Dispositifs médicaux	FDM, SLS, SLM, EBM, SLA
Médicaments	SSE, BJ, FDM
Bio-impression	DIW, *Inkjet bioprinting,* DLP

2.2 La formation

En opération, et plus particulièrement à l'avant, le médecin d'unité peut se trouver isolé, sans pouvoir compter sur l'aide d'un médecin senior comme c'est le cas sur le territoire national. Face à cela, un entraînement spécifique et renforcé s'impose avant un départ en opération. Actuellement, ces entraînements passent par des simulations sur des mannequins ou des répliques, souvent coûteuses et peu flexibles, ou encore par des enseignements réalisés sur des animaux ou des cadavres, qui soulèvent des questions éthiques. C'est dans ce contexte que l'impression de modèles anatomiques trouve tout son intérêt notamment pour l'entraînement aux gestes médicaux rares comme la simulation de cricothyrotomie directement sur une personne (figure 3) (17).

De manière générale, un modèle anatomique est créé à partir de données d'imagerie médicale d'un patient au format DICOM puis transformées en fichier 3D après optimisation sur logiciel permettant d'atteindre les caractéristiques techniques attendues avant l'impression finale. Une fois le matériau choisi en fonction de ses propriétés,

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

l'impression peut alors débuter. Le degré de réalisme et le coût modéré des impressions comparé aux simulations classiques et à la réalité virtuelle laissent entrevoir la possibilité d'une intégration des imprimantes au niveau du centre d'enseignement et de simulation de médecine opérationnelle, et potentiellement au sein des cellules secourismes. Cela permettrait de fabriquer des modèles directement sur place, selon les souhaits des formateurs et de diversifier les entraînements actuels.

Cependant, il existe encore certaines limites. Le coût initial des imprimantes reste élevé, et les matériaux actuellement disponibles ne permettent pas de reproduire toutes les caractéristiques des tissus, comme leur élasticité. L'impression 3D, en plus de l'achat initial des appareils, nécessite des logiciels spécialisés et du personnel formé. Ce qui représente un coût non négligeable et nécessiterait une étude coût-efficacité comparée aux méthodes d'apprentissage actuelles, les études existantes manquant souvent de standardisation et d'un nombre de participants suffisants (18).

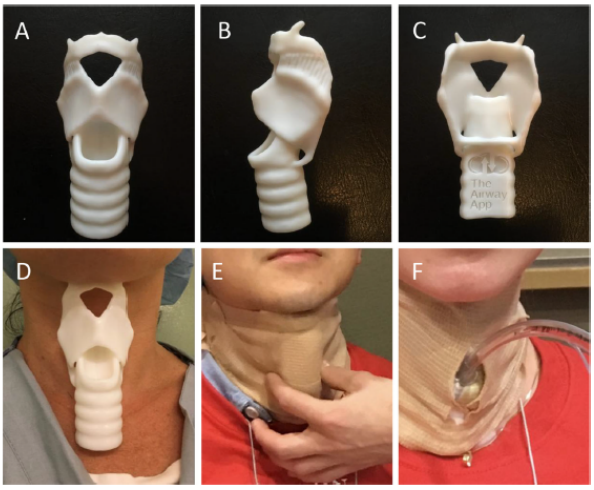


Fig. 3 : Modèle de cricothyrotomie imprimé en 3D et applicable directement sur une personne, d'après Duggan L. *et al.* (17)

2.3 Le ravitaillement médical

Les dispositifs médicaux représentent respectivement environ 67 % et 73 % des articles du catalogue du ravitaillement médical au sein d'un poste médical et d'une capacité chirurgicale de l'avant. Lors de phases de haute intensité, nous pouvons anticiper une consommation accrue de ces produits. Il sera crucial de garantir à la fois leur recomplètement et leur réparation pour maintenir un soutien médical efficace. La FA en opérations extérieures (OPEX) pourrait offrir une solution transitoire pour répondre à la demande en attendant les réapprovisionnements depuis le territoire national. Cette technologie a déjà été testée dans son principe, sur le territoire national par l'ECMSSA pour la réparation ponctuelle de pièces d'appareils biomédicaux sans impact sur la sécurité et la performance comme une poignée d'autoclave ou bien un extracteur de capteur à oxygène sur un ventilateur médical. L'utilisation de la FA pourrait être étendue à un plus grand ensemble de DM comme ceux de l'urgence et les instruments chirurgicaux une fois les verrous techniques et réglementaires levés.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

Des garrots tourniquets imprimés en 3D dont l'Armée américaine a montré la preuve de concept, ont déjà été utilisés sur le terrain par les Palestiniens et les Ukrainiens (figure 4) (19).

En plus de répondre aux fonctions de recomplètement et de réparation, l'impression 3D permet d'améliorer les propriétés mécaniques de certains DM complexes. Contrairement aux méthodes conventionnelles qui nécessitent l'assemblage de plusieurs pièces, l'impression 3D les fabrique directement en une seule étape, ce qui optimise leurs propriétés mécaniques. De plus, des prototypes ont montré qu'il est possible de fabriquer des instruments chirurgicaux multifonctions regroupant, par exemple, une pince à biopsie et une fibre optique (20). Ce qui permettrait de réduire le nombre total des articles du catalogue du ravitaillement médical et donc de simplifier les flux.

Ces différents avantages doivent toutefois être nuancés en raison d'une réglementation actuelle des dispositifs médicaux qui peine à s'adapter à cette nouvelle méthode de fabrication (21). En effet, de fortes incertitudes subsistent quant au régime de responsabilité et aux droits de propriété intellectuelle applicables à la FA de DM au sein de l'UE, les législateurs se montrant très prudents. Ce qui a pour conséquence de freiner le champ des possibles de l'impression 3D *a contrario* de certaines parties du monde (22). De plus, la durée d'impression de dispositifs volumineux et la disponibilité des consommables restent des défis. Si nous envisageons une réutilisation de DM invasifs imprimés, nous devrons mettre en place des procédures de stérilisation adaptées aux matériaux, notamment pour les thermoplastiques sensibles à la chaleur (23).

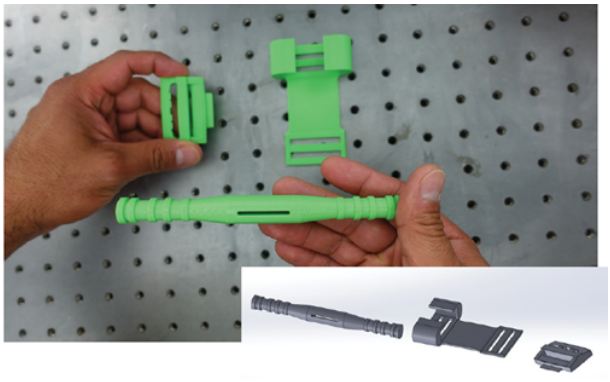


Fig. 4 : Preuve du concept d'impression 3D de pièces du garrot tourniquet réalisé par l'Armée américaine, d'après Michael B.*et al.* (19)

2.4 Les hôpitaux

Dans les conflits récents, les brûlures représentent 10 % des blessures de guerre. Depuis 2017, un projet lyonnais financé par l'Agence de l'innovation de défense (AID), Bloc-Print cherche à reconstruire le derme et l'épiderme grâce à la bio-impression. À l'aide d'un bras robotisé, l'impression dépose une bioencre composée de cellules souches issues du tissu adipeux de patient et des matériaux biocompatibles. Contrairement aux prises en charge traditionnelles, longues, complexes et présentant des limites chez les grands brûlés, cette méthode imprime directement les cellules sur la blessure permettant de surmonter ces limitations et d'obtenir une meilleure cicatrisation (24).

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110



FIG. 5 : Bras robotisé en train d'imprimer des cellules de peau ©M. Brione

Pour les militaires brûlés, cette avancée pourrait réduire significativement la durée de leur convalescence, facilitant ainsi une réinsertion professionnelle et sociale plus rapide.

Dans le domaine de la bio-impression, la peau est aujourd'hui l'organe qui a reçu les plus grandes avancées. D'autres tissus ont également été imprimés comme des os, des muscles, du cartilage et même des réseaux de neurones fonctionnels, mais avec une efficacité moindre. En effet, pour produire des tissus vivants, la bio-impression doit répondre à plusieurs défis qui sont de reproduire les propriétés mécaniques similaires aux tissus naturels, former un réseau vasculaire spécifique et viable, et qui sera lui-même intégré dans un système vasculaire général. Ces objectifs devront être atteints avant d'envisager des transplantations d'organes imprimés. La vascularisation reste le principal obstacle. Une cellule meurt si elle est située à plus de 100 à 200 μm d'un capillaire et cela compromet la viabilité des tissus actuellement imprimés (25). De plus, les biomatériaux utilisés présentent actuellement des propriétés mécaniques insuffisantes, et les processus d'impression peuvent altérer l'activité biologique des cellules. Enfin, seules deux normes encadrent les bioencres, mais aucune d'entre elles n'est encore appliquée par les chercheurs, ce qui freine l'harmonisation des pratiques (26).

2.5 La recherche

L'émergence de nouvelles armes chimiques et biologiques impose le développement de contre-mesures médicales efficaces. Cependant, ces développements sont souvent longs et limités par la difficulté de transposer chez l'homme les résultats obtenus *in vitro* ou sur modèle animal. Une phase d'étude préclinique optimisée et harmonisée permettrait d'accélérer le développement de ces contre-mesures.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

Depuis quelques années, un nouveau type de modèle d'évaluation de la toxicité des médicaments a vu le jour : les *organ-on-a-chip* (OoC) ou organoïdes sur puces en français. Ils se définissent comme des systèmes *in vitro* qui consistent à placer des organoïdes sur des puces de la taille d'une lame de microscope (figure 6). Ces puces sont des dispositifs microfluidiques contenant des réseaux de canaux extrêmement fins qui permettent de manipuler des volumes allant du millilitre au picolitre. La FA est une des méthodes de fabrication les plus utilisées pour la conception des canaux microfluidiques de ces puces. De surcroît, la bio-impression permet de déposer avec précision les cellules, créant ainsi des structures 3D bien plus représentatives de la réalité que les cultures cellulaires en 2D.
Par exemple, il serait possible d'imprimer un OoC constitué de cellules du système nerveux central, dans lequel un neurotoxique organophosphoré serait introduit *via* les canaux microfluidiques. La structure 3D de l'OoC permettrait de visualiser les interactions entre les cellules et l'agent toxique et ainsi de déterminer le mécanisme physiopathologique qui en découle. Par la suite, l'ajout de nouvelles molécules en développement permettrait d'évaluer leur efficacité plus rapidement et à terme espérer la commercialisation de nouvelles contre-mesures médicales.

Les organoïdes sur puces représentent donc un modèle prometteur, offrant des comportements proches de ceux des organes *in vivo*, ce qui accélèrerait l'autorisation de mise sur le marché de nouvelles thérapeutiques pour la protection des Forces.

Néanmoins, les OoC sont encore à leurs débuts.
La bio-impression d'organoïdes complexes de grande taille pose des défis, notamment en ce qui concerne la création d'une vascularisation viable comme pour la bio-impression d'organes. En outre, les pratiques des chercheurs ne sont pas encore standardisées, ce qui ralentit leur diffusion à grande échelle. Ces défis devront être surmontés avant de permettre l'émergence des *body-on-a-chip*, c'est-à-dire des plateformes intégrant plusieurs OoC interconnectés. Elles viseraient à étudier les interactions entre les différents organoïdes dans une approche systémique, offrant ainsi des analyses se rapprochant encore plus de la réalité physiopathologique humaine (27).

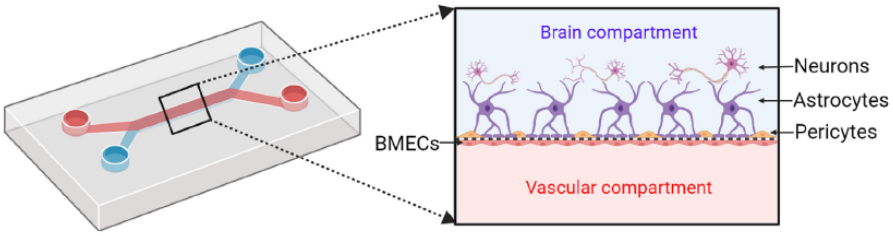
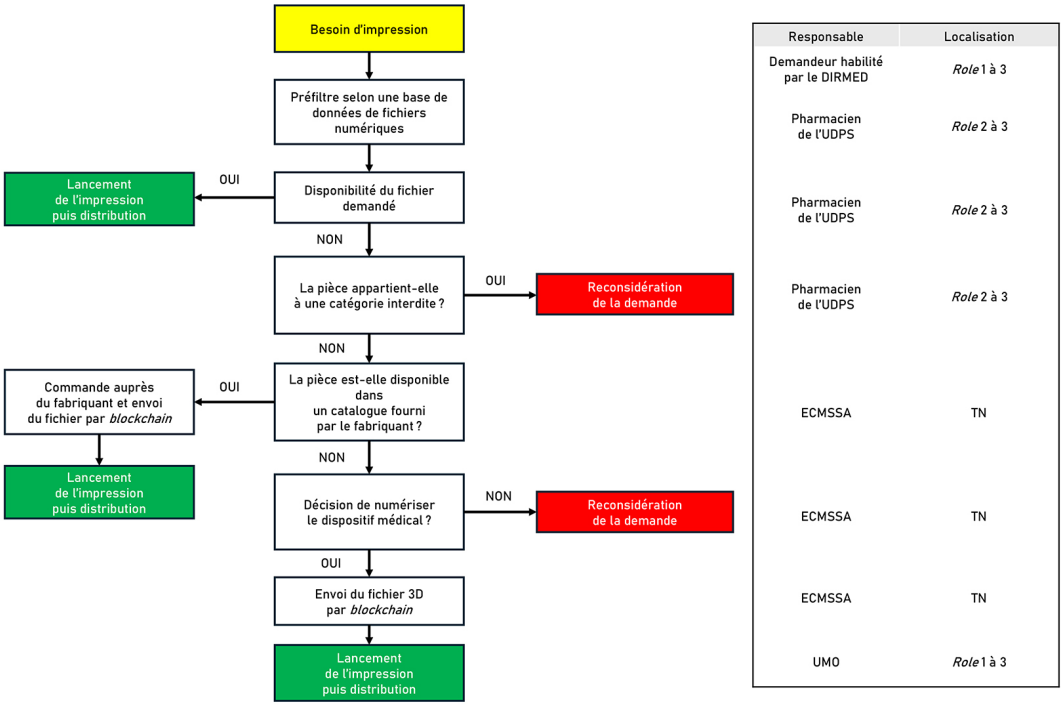


Fig. 6 : Image d'un *Organ-on-a-Chip* représentant un organoïde de cellules composant la barrière hématoencéphalique, d'après Ying-Jin S. *et al.* (27)

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

3 Proposition d'un logigramme pour l'impression à venir de dispositifs médicaux en opérations extérieures

Dans une optique de déploiement à court/moyen terme et au regard des faisabilités techniques actuelles, nous avons choisi de détailler un logigramme du processus d'impression d'un DM imprimé en 3D sur un théâtre d'opérations (figure 7).



Notes. Un *Role* 1 correspond à un poste médical, un *Role* 2 à une capacité chirurgicale de l'avant et un *Role* 3 à un hôpital médico-chirurgical. ECMSSA : Établissement central des matériels du Service de santé des armées. TN : Territoire national. UDPS : unité de distribution des produits de santé. UMO : Unité médicale opérationnelle

Fig. 7 : Logigramme de l'utilisation de l'impression 3D de dispositifs médicaux sur un théâtre d'opérations

Le processus débute par une demande formalisée émise par un demandeur habilité par le directeur médical, *via* un fichier type, pour la réparation ou la fabrication d'un DM. Ensuite, le pharmacien chef de l'Unité de distribution des produits de santé (UDPS) s'occupe de vérifier si le DM demandé est présent numériquement dans une base de données. Si c'est le cas, l'impression peut débuter directement et est réalisée sous le contrôle d'un Technicien de maintenance des matériels biomédicaux (TMS).
En cas de fortes demandes ou d'indisponibilité du TMS, le préparateur en pharmacie hospitalière adjoint de l'UDPS pourra le seconder. Si la pièce appartient à une catégorie dite interdite, c'est-à-dire pouvant affecter l'intégrité du DM ou la sécurité du patient, la demande sera reconsidérée et affinée. Si elle n'appartient ni à cette catégorie ni à la base de fichier, la demande est envoyée à la direction des approvisionnements en produits de santé qui vérifiera si la pièce numérique est disponible dans le catalogue d'un fabricant. Dans le cas contraire, elle donnera ou non son accord

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

pour que le DM soit numérisé grâce à un scanner 3D ou créé *de novo* par le département ingénierie santé de l'ECMSSA. Le fichier numérique sera ensuite transmis par *blockchain* pour enrichir la base de données en OPEX. La *blockchain* est ici à la fois utilisée pour authentifier le fichier 3D et pour sécuriser le transfert jusqu'aux serveurs informatiques de l'UDPS (28). Une fois le DM imprimé, le pharmacien effectue un dernier contrôle de libération avant d'autoriser sa distribution.

Dans ce modèle, la robustesse de la base de données accessible en OPEX et la disponibilité des matériaux conditionnent directement la fluidité et la réactivité de la chaîne d'impression.

4 Limites technologiques et réglementaires

La FA appliquée au domaine de la santé et de manière plus générale demeure confrontée à d'importantes limitations tant sur le plan technologique que réglementaire.
Sur le plan technique, l'hétérogénéité des matériaux, poudres, filaments ou résines impose une phase préalable d'évaluation et d'optimisation, visant à identifier le motif de remplissage et la densité adaptés afin de garantir les meilleures propriétés mécaniques possibles au plus faible coût unitaire (29). L'un des principaux obstacles à l'industrialisation de la FA réside dans la variabilité dimensionnelle et structurelle des pièces imprimées, en particulier dans le cas des dispositifs personnalisés.
Une étude menée sur plus de 2 100 guides chirurgicaux fabriqués par fusion Multijet a mis en évidence que les modèles d'apprentissage automatique peuvent prédire les déformations géométriques dès la conception, avant l'impression (30). Cette approche basée sur les modèles pouvant utiliser les algorithmes, l'intelligence artificielle et les jumeaux numériques favorise le passage d'un modèle empirique, où chaque pièce va subir des essais en postimpression à un modèle prédictif où l'objectif vise à démontrer que le processus est robuste. Cela permet une réduction significative des coûts et des délais de qualification, mais ces modèles manquent encore de robustesse pour faire l'unanimité notamment dans des secteurs industriels critiques tels que la défense et le médical (31,32).
Parallèlement, la *supply chain* de la FA demeure largement tributaire de fournisseurs venant de l'industrie pétrochimique pour la production de consommables destinés aux technologies d'extrusion de matière et de photopolymérisation. Cette dépendance soulève des interrogations quant à la soutenabilité du modèle actuel sur le long terme. En réponse, des solutions émergent, telles que le recyclage de matériaux ou le développement de filaments et de résines biosourcés, encore à un stade précoce.

Sur le plan réglementaire, le cadre normatif applicable à l'impression 3D en santé reste en construction. Les référentiels en vigueur sont identiques à ceux applicables aux produits de santé standards et ne prennent pas en compte les spécificités associées à la personnalisation des DM et à la production décentralisée au point de soin. Des avancées ont eu lieu au Royaume-Uni afin de sécuriser la fabrication de lots de taille réduite dans des environnements hospitaliers et isolés en assurant qualité et traçabilité. Au niveau européen, l'Agence européenne des médicaments (EMA) a instauré un *quality innovation group* afin d'accompagner l'intégration des technologies de fabrication avancées, dont l'impression 3D, dans les référentiels qualité. Ce groupe prévoit la publication prochaine d'un document de type « questions-réponses » visant à clarifier

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

les attentes réglementaires et les exigences en matière de bonnes pratiques de fabrication applicables à ces innovations (32). Cette initiative pourrait favoriser l'essor et la sécurisation des usages cliniques de la FA déjà en cours dans plusieurs hôpitaux et officines en Europe (33).

Par ailleurs, la personnalisation des DM et la bio-impression soulèvent des préoccupations sur la propriété intellectuelle des objets imprimés entre les fabricants, les soignants et les patients, les cadres réglementaires actuels étant trop généraux pour couvrir les spécificités de la FA (34). Si les imprimantes, les encres et les matériaux de support peuvent faire l'objet de brevets, les bioencres contenant des cellules humaines, les fichiers numériques issus de données médicales ainsi que les tissus imprimés restent mal encadrés par les dispositifs juridiques actuels et soulèvent des problèmes éthiques (35). Enfin, des études sur la santé et la sécurité au travail concernant l'impact des impressions en environnement confiné sont également à réaliser notamment pour une utilisation dans un espace confiné tel un conteneur en OPEX, des composés organiques volatils et des particules en suspension étant produites lors du processus d'impression (36).

Ces différentes limites conduisent à des niveaux de maturité hétérogènes entre les différents segments de la FA en santé (figure 8). Alors que les modèles anatomiques et les guides chirurgicaux imprimés en 3D sont déjà utilisés en formation et en clinique, les autres sont majoritairement en phase d'expérimentations et en attente de certifications ou bien encore à des stades très précoces (16). C'est notamment le cas pour la bio-impression, dont l'enthousiasme montré dans des publications récentes masque des verrous techniques qui nécessiteront d'être levés avant d'envisager la faisabilité technique d'imprimer entièrement des organes en 3D (26).

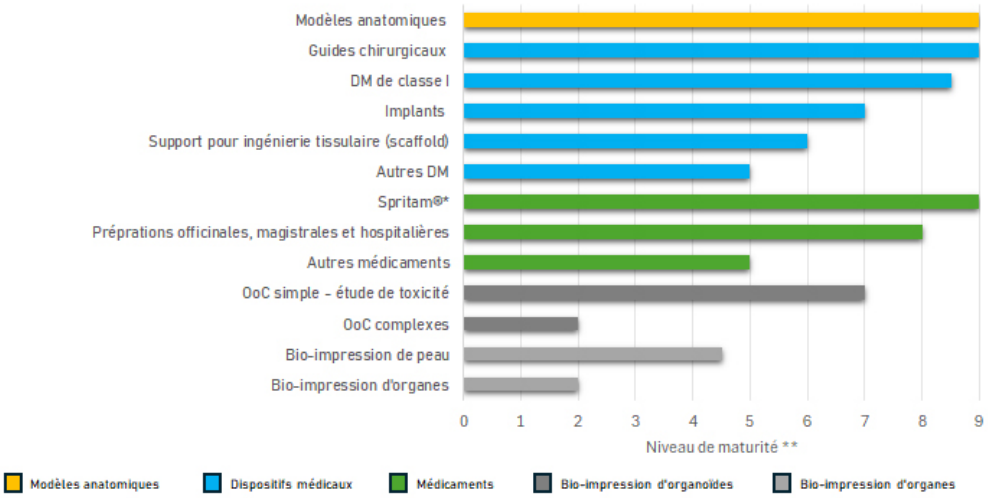


Fig. 8 : Niveau de maturité des domaines d'application de l'impression 3D

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

5 Cohérence avec les autres travaux sur la fabrication additive dans le Service de santé des armées et avec les armées, directions et service

Un premier recensement des imprimantes et des initiatives au sein du SSA a déjà été effectué par l'ECMSSA qui devrait préfigurer d'une harmonisation des pratiques et des procédés. De plus, l'intégration de l'ECMSSA dans le comité de coordination de la mise en œuvre de la FA au sein du ministère des Armées (CCFA[1]), dont la première réunion a eu lieu le 27 mars 2025, a pour objectif de créer une cohérence commune aux armées et services et de garantir une interopérabilité essentielle sur le fonctionnement des imprimantes, notamment en ce qui concerne la connectivité à *Intradef* et le partage d'une base de données et d'une *blockchain* communes.
Par ailleurs, la ferme d'imprimantes implantée sur le site de l'école militaire de Bourges (3), destinée à la production de masse pourrait servir de renforts aux besoins d'impression du SSA en dehors de ceux nécessitant des techniques et des conditions particulières comme la bio-impression réalisable uniquement par un établissement spécialisé de santé.

6 Perspectives

La définition claire des besoins et la constitution d'une première banque harmonisée de fichiers 3D de santé permettraient de réaliser de premiers essais pour exploiter les solutions proposées, de procéder aux premières certifications ainsi que de tester leur faisabilité en conditions réelles comme l'a déjà effectué l'Armée américaine, que cela soit à bord d'un bâtiment de l'*US Navy,* dans le désert africain et en Arctique (37–39).

Cela offrirait l'opportunité de lancer la formation initiale du personnel concerné, tout en constituant un vivier de compétences mobilisables en cas d'engagement majeur. À terme, des solutions de FA mobiles, intégrées à l'intérieur d'un conteneur, pourraient voir le jour (figure 9) (40).

De surcroît, le développement de nouvelles techniques d'impression et d'innovations émergentes telles que les impressions multimatériaux, l'impression avec des matériaux en quatre dimensions ou encore l'intégration avec d'autres technologies comme l'électrofilage ouvre la voie à un élargissement des capacités actuelles et à un dépassement des limites technologiques existantes (41,42). Plus récemment, l'AID a entamé des réflexions pour intégrer la FA dans un *métavers* afin de rassembler dans un même espace numérique immersif, les scanners, les fichiers 3D et les fermes d'imprimantes.

Conclusion

La FA s'impose comme une technologie de rupture, susceptible à terme de permettre la production de produits de santé directement en OPEX. Elle pourrait répondre à des consommations imprévues ou en forte hausse, contribuant ainsi à maintenir l'autonomie des soignants dans l'attente d'un réapprovisionnement depuis la zone arrière.

[1]N° D-24-004586/EMA/DSA/MCO/NP et N° 2024/22/DGA/DOMN/SDAMI/DMCO/NP

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110



FIG. 9 : Image générée par l'intelligence artificielle illustrant un conteneur aménagé pour l'impression 3D de produits de santé, monté sur un camion en opération extérieure dans des conditions désertiques

En amont, l'impression 3D trouve progressivement sa place dans les modules de formation, en fournissant des outils de simulation réalistes, particulièrement utiles pour la préparation opérationnelle des soignants.

Au-delà de l'aspect opérationnel, la FA devient également un outil dans la recherche. Elle facilite le test de nouvelles molécules et ouvre la voie à des protocoles de régénération tissulaire innovants, avec des applications potentielles pour la prise en charge des militaires blessés.

À ce jour, le MCO et la fabrication de dispositifs médicaux par impression 3D apparaissent comme les usages les plus techniquement réalisables en OPEX. En dehors du champ du SMEO, la personnalisation de guides chirurgicaux, d'implants ou de certains médicaments pourrait également trouver des applications au sein des hôpitaux militaires.

Financement

Aucun

Contributions des auteurs

Rédaction : MB - Relecture, participation au travail prospectif de la fabrication additive pour le Service : AG, JUM, OD

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

Remerciements au linguiste relecteur : Pierre-Alexandre Clerc

Références bibliographiques

1. De Jerphanion L. Conflits et crises actuels : quels retours d'expérience stratégiques et opérationnels ? Rev Déf Natl. 2025 ;877(2) :70-4.
2. Partenariat. Le soutien santé des forces aéroterrestres au combat à l'horizon 2027 : RETEX du conflit ukrainien et pistes d'optimisation (II de III). Opérationnels – Soutien, Logistique, Défense, Sécurité [En ligne]. 2024 [cité le 31 juill 2025]. Disponible : https://operationnels.com/2024/11/05/le-soutien-sante-des-forces-aeroterrestres-au-combat-a-lhorizon-2027-retex-du-conflit-ukrainien-et-pistes-doptimisation-ii-de-iii/
3. Ministère des Armées. Impression 3D, changement de paradigme pour le soutien opérationnel [En ligne]. 2022 [cité le 19 mai 2025]. Disponible : https://www.defense.gouv.fr/terre/linnovation/impression-3d-changement-paradigme-soutien-operationnel
4. W M. L'AP-HP se dote de 60 imprimantes 3D pour concevoir des dispositifs médicaux en urgence [En ligne]. 3Dnatives. 2020 [cité le 19 mai 2025]. Disponible : https://www.3dnatives.com/ap-hp-imprimante-3d-covid-19-060420203/
5. Assistance Publique – Hôpitaux de Paris. Fabrication de matériel critique en 3D pour les soignants et les patients rendue possible par le soutien de Kering [En ligne]. 2020 [cité le 12 déc 2023]. Disponible : https://www.aphp. fr/contenu/fabrication-de-materiel-critique-en-3d-pour-les-soignants-et-les-patients-rendue-possible
6. International Organization for Standardization. ISO/ASTM 52900 :2021(fr). Fabrication additive — Principes généraux — Fondamentaux et vocabulaire [En ligne]. [cité le 19 mai 2025]. Disponible : https://www.iso.org/obp/ui/\#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:fr
7. Sala D, Richert M. Perspectives of Additive Manufacturing in 5.0 Industry. Materials. 2025 ;18(2) :429.
8. Kholgh Eshkalak S, Rezvani Ghomi E, Dai Y, Choudhury D, Ramakrishna S. The role of three-dimensional printing in healthcare and medicine. Mater Des. 2020 ;194 :108940.
9. Salmi M. Additive Manufacturing Processes in Medical Applications. Materials. 2021 ;14(1) :191.
10. Koltsaki M, Mavri M. A Comprehensive Overview of Additive Manufacturing Processes Through a Time-Based Classification Model. 3D Print Addit Manuf. 2024 ;11(1) :363-82.
11. Ling K, Wang W, Liu J. Current developments in 3D printing technology for orthopedic trauma : A review. Medicine (Baltimore). 2025 ;104(12) :e41946.
12. Auel T, Mentrup AFC, Oldfield LR, Seidlitz A. 3D printing of pharmaceutical dosage forms : Recent advances and applications. Adv Drug Deliv Rev. 2025 ;217 :115504.
13. Paul DLB, Susila PA. Direct ink writing of bioceramic prosthetics and scaffolds : advances, challenges, and biomedical applications. Prog Addit Manuf [En ligne]. 8 févr 2025 [cité le 20 mai 2025] ; Disponible : https://doi.org/10.1007/s40964-025-01002-x
14. Ghosh E, Rego GP, Ghosh RN, Sahithi VB, Poojary DP, Namboothiri PK, *et al.* Advances in In Situ Bioprinting : A Focus on Extrusion and Inkjet-Based Bioprinting Techniques. Regen Eng Transl Med [En ligne]. 15 mai 2025 [cité le 20 mai 2025] ; Disponible : https://doi.org/10.1007/s40883-025-00420-1
15. Li Z, Chen L, Wu J, Chen Y, Zhu Y, Xie G, *et al.* A review of 3D bioprinting for organoids. Med Rev. 2025.
16. Brione M, Mullot JU. Evaluation de l'apport de la fabrication additive dans le cadre du soutien médical aux engagements opérationnels. 2024.
17. Duggan LV, Lockhart SL, Romano KR, Weingart SD, Levitan RM, Brindley PG. Front-of-neck airway meets front-of-neck simulation : improving cricothyroidotomy skills using a novel open-access three-dimensional model and the Airway Ap. Can J Anesth Can Anesth. 2017 ;64(10) :1079-81.
18. Mounsef PJ, Mulé P, Bernstein M, Hamdy R. The Use of 3D Printing as an Educational Tool in Orthopaedics. JBJS Open Access. 2025 ;10(2) :e25.00062.
19. Army University Press [En ligne]. 3D Printing Solutions for Contested Medical Logistics ; [cité le 15 juin 2025]. Disponible : https://www.armyupress.army.mil/Journals/Military-Review/English-Edition-Archives/May-June-2024/MJ-24-3D-Printing/
20. Culmone C, Henselmans PWJ, van Starkenburg RIB, Breedveld P. Exploring non-assembly 3D printing for novel compliant surgical devices. PloS One. 2020 ;15(5) :e0232952.
21. Comité scientifique permanent « matériovigilance et réactovigilance » de l'ANSM. Ordre du jour de la séance du 30 janvier 2023 de 10h00 à 13h30, retour d'expérience : DM et impression 3D [En ligne]. 2023. Disponible : https://ansm.sante.fr/uploads/2023/01/27/20230130-odj-csp-mv-rv.pdf

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110

22. Pettersson ABV, Ballardini RM, Mimler M, Li P, Salmi M, Minssen T, *et al.* Core Legal Challenges for Medical 3D Printing in the EU. Healthcare. 2024 ;12(11) :1114.
23. Pérez-Davila S, González-Rodríguez L, Lama R, López-Álvarez M, Oliveira AL, Serra J, *et al.* 3D-Printed PLA Medical Devices : Physicochemical Changes and Biological Response after Sterilisation Treatments. Polymers. 2022 ;14(19) :4117.
24. Ministère des Armées. [FID 2023] Bloc-Print II : vers la bio-impression pour soigner les grands brûlés [En ligne]. 2023 [cité le 25 avr 2024]. Disponible : https://www.defense.gouv.fr/actualites/fid-2023-bloc-print-ii-bio-impression-soigner-grands-brules
25. Jiang H, Li X, Chen T, Liu Y, Wang Q, Wang Z, *et al.* Bioprinted vascular tissue : Assessing functions from cellular, tissue to organ levels. Mater Today Bio. 2023 ;23 :100846.
26. O'Connell CD, Dalton PD, Hutmacher DW. Why bioprinting in regenerative medicine should adopt a rational technology readiness assessment. Trends Biotechnol. 2024 ;42(10) :1218-29.
27. Ying-Jin S, Yuste I, González-Burgos E, Serrano DR. Fabrication of organ-on-a-chip using microfluidics. Bioprinting. 2025 ;46 :e00394.
28. TerreMag. La maintenance se transforme [En ligne]. [cité le 20 mai 2025]. Disponible : https://www.terremag.defense.gouv.fr/dossiers/la-maintenance-se-transforme
29. Fales A, Černohlávek V, Štěrba J, Dian M, Suszyński M. Innovative Approaches to Material Selection and Testing in Additive Manufacturing. Materials. 2025 ;18(1) :144.
30. Conway CH, McGregor DJ, Antonsen T, Wood C, Shao C, King WP. Geometry repeatability and prediction for personalized medical devices made using multi-jet fusion additive manufacturing. Addit Manuf Lett. 2024 ;9 :100200.
31. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Methods for Enhancing Additive Manufacturing Qualification and Certification for Defense Applications : A Workshop [En ligne]. [cité le 21 mai 2025]. Disponible : https://www.nationalacademies.org/our-work/methods-for-enhancing-additive-manufacturing-qualification-and-certification-for-defense-applications-a-workshop
32. Parramon-Teixido CJ, Rodríguez-Pombo L, Basit AW, Worsley A, Cañete-Ramírez C, Alvarez-Lorenzo C, *et al.* A framework for conducting clinical trials involving 3D printing of medicines at the point-of-care. Drug Deliv Transl Res [En ligne]. 9 mai 2025 [cité le 21 mai 2025] ; Disponible : https://doi.org/10.1007/s13346-025-01868-y
33. Jørgensen A, Goyanes A, Basit A. Entering New Domains for 3D Printing of Drug Products. MJH Life Sciences. 2025 ;49 :24-7.
34. Akpa-Inyang F, Rocher A, O'Connor M, Marais L. Ethical and regulatory issues in the application of 3D printing in orthopaedics : A scoping review. J Orthop Rep. 2025 ;4(2, Supplement) :100610.
35. Kantaros A, Ganetsos T, Petrescu FIT, Alysandratou E. Bioprinting and Intellectual Property : Challenges, Opportunities, and the Road Ahead. Bioeng Basel Switz. 2025 ;12(1) :76.
36. Beard JM, Royer BM, Hesita JM, Byrley P, Lewis A, Hadynski J, *et al.* Lung cell toxicological effects of 3D printer aerosolized filament byproducts. Environ Sci Pollut Res. 2025 ;32(9) :5078-90.
37. Maxwell D, Brocuglio T, Gilbert C, Kirby C, Becerra D. Additive Manufacturing for Forward-Deployed Shipboard Surgical Teams. Mil Med. 2025 ;190(5-6) :e938-43.
38. Barnhill J, Gaston J, Deffenbaugh P, Wagner L, Liacouras P, Ho V. Additive Manufacturing for Fabrication of Point-of-Care Therapies in Austere Environments. Mil Med. 2023 ;188.
39. Wisdom C, Chartrain N, Blaize-Wise K, Klarmann GJ, Gilchrist KH, Ho VB. Point-of-Need Additive Manufacturing in Austere Arctic Environments : An Evaluation of Medical Logistics Requirements and Capabilities Demonstration. Bioengineering. 2024 ;11(3) :232.
40. Open AI 2025. Vue latérale d'un camion militaire type KC20 en camouflage Centre-Europe désert, stationné dans un environnement désertique. Le conteneur ouvert révèle un atelier de fabrication additive médical structuré en trois zones : imprimantes 3D en fonctionnement, outillage de post-production, et stockage de filaments. À l'intérieur, un opérateur en treillis désert de l'armée française travaille debout sur une imprimante. L'ensemble est fonctionnel, épuré et baigné de lumière naturelle. [prompt d'image générée]. 2025.
41. Abdullah KK, Molnár K. Current Trends and Future Prospects of Integrating Electrospinning With 3D Printing Techniques for Mimicking Bone Extracellular Matrix Scaffolds. J Polym Sci. 2025 ;63(6) :1481-504.
42. Hassan M, Mohanty AK, Wang T, Dhakal HN, Misra M. Current Status and Future Outlook of 4D Printing of Polymers and Composites-A Prospective. Compos Part C Open Access. 2025 ;100602.

Published in : SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES, - (dir.), *Médecine et Armées Vol.52 No.2.*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813006110, doi : 10.17184/eac.9782813006110