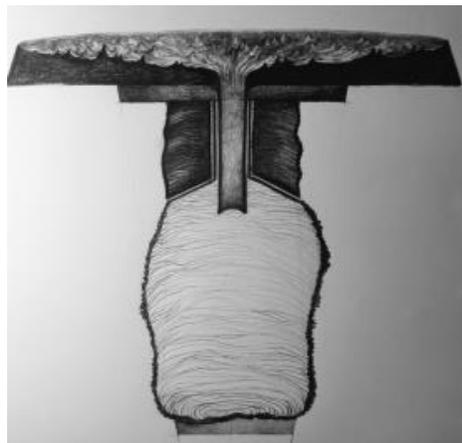


# RAPPORT DE PROJET

---

## Conception d'un matériau éco-responsable pour les urnes funéraires



Tutrices : BOUCHETOU Marie-Laure & ZAHND Caroline

Membres : BENCTEUX Alexis & GABAY Marion

Année 2020 - 2021

# SOMMAIRE

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	3
REMERCIEMENTS .....	4
INTRODUCTION .....	5
EXIGENCES DU PROJET .....	6
Exigences du produit.....	6
Exigences du projet.....	6
PRESENTATION DU PROJET .....	7
Définition de notre matériau .....	7
Assemblage du projet.....	9
Principe de l'Oya .....	9
Conception de l'urne.....	10
UTILISATION DES CENDRES .....	11
Cendres issues de sylviculture .....	11
Cendres humaines .....	11
IMPRESSION 3D.....	13
Historique .....	13
Techniques.....	14
Matériaux compatibles.....	18
Applications .....	20
Avantages et inconvénients.....	21
RECHERCHES DE MATERIAUX.....	22
Matériaux issus de la sylviculture.....	22
Matériaux issus de l'agriculture .....	23
Matériaux issus de recyclage .....	26
Plastiques biosourcés et biodégradables .....	26
Autres catégories.....	32
Essais à effectuer .....	33
Esthétisme.....	34
CONCLUSION.....	36
REFERENCES .....	37
BIBLIOGRAPHIE .....	38
RESUME .....	41
ABSTRACT.....	41

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Composition du projet.....	9
Figure 2 : Principe de l'oya .....	9
Figure 3 : Prothèse imprimée en 3D.....	13
Figure 4 : Différence entre l'impression SLA et DLP .....	15
Figure 5 : Schéma explicatif de l'impression 3D par SLM, crédit Materialise.....	16
Figure 6 : Schéma représentatif de l'imprimante pour la méthode FDM.....	17
Figure 7 : Schéma représentatif du fonctionnement de l'impression LOM .....	18
Figure 8 : Schéma de répartition des matériaux polymères en fonction de leur origine et de leur critère de biodégradabilité, <a href="http://www.preventpack.be/fr/dossier/biopackaging">http://www.preventpack.be/fr/dossier/biopackaging</a> .....	27
Figure 9 : Capacité de productions mondiales de bioplastiques en 2018.....	28
Figure 10 : Facteurs influents de la décomposition du PLA .....	29
Figure 11 : Cycle de vie de la résine selon le fabricant.....	33

# REMERCIEMENTS

Nous tenons particulièrement à adresser nos remerciements à Polytech Orléans, de nous avoir permis de réaliser ces dix semaines de projet.

Merci à Marie-Laure BOUCHETOU, directrice de la spécialité Innovation en Conception et Matériaux, encadrante de notre projet, pour nous avoir apporté son soutien, ses conseils et d'avoir été disponible.

Merci à Caroline ZAHND, enseignante à l'ESAD, Ecole Supérieure des Arts et de Design d'Orléans et collaboratrice du projet pour sa gentillesse, sa disponibilité et son suivi.

Merci à Stéphane RAULT, technicien à Polytech Orléans, pour son investissement, ses recherches et son aide.

Merci à toute l'équipe de l'ESAD, pour leur accueil, leur avis et le temps que vous nous avez accordé et qui nous a permis de progresser.

# INTRODUCTION

Ce projet, à destination d'une entreprise de pompes funèbres et en collaboration avec l'ESAD, l'Ecole Supérieure d'Art et de Design d'Orléans, s'étale sur une durée de trois ans. Le but du projet est de concevoir un nouveau matériau dit éco-responsable ayant comme caractéristique d'être biosourcé et biodégradable pour confectionner une urne funéraire.

Sa forme sera déterminée par un algorithme en fonction des caractéristiques de chacun et imprimable en trois dimensions. La vitesse de biodégradabilité visée devra se situer entre quelques semaines et un an maximum. En effet, l'urne funéraire sera placée autour d'une céramique microporeuse, aussi appelée oya, qui permettra d'alimenter un arbrisseau planté à proximité.

Dans cette première phase de réflexion, nous devons proposer différents matériaux compatibles avec les contraintes du projet et avec la technique d'impression 3D.

Par la suite, nous allons expliquer quelles sont les exigences du projet, les différentes utilisations des cendres en fonction de leur provenance, ainsi que les différents types d'impressions 3D qui existent et nos recherches bibliographiques sur les matériaux.

# EXIGENCES DU PROJET

Lors de la distribution des sujets, nous avons pris contact avec notre tutrice, Marie-Laure BOUCHETOU, afin de comprendre les aboutissements et les exigences du projet. Nous avons pu écrire l'exigence générale du projet : permettre aux cendres d'un défunt de pénétrer la terre à faible profondeur pour servir à la croissance d'un arbrisseau grâce à une urne conçue dans un matériau compostable. Nous avons défini les exigences relatives au produit et au projet :

## Exigences du produit

- Nous devons concevoir un matériau éco-responsable, biosourcé, biodégradable qui se décompose dans un temps raisonnable inférieur à un an.
- Nous devons pouvoir manipuler l'urne facilement à mains nues sans altérer sa forme et sa surface.
- Nous devons pouvoir réaliser l'urne grâce à une impression 3D.
- L'impression 3D devra pouvoir être faite dans un délai inférieur à six jours entre le décès et la crémation.
- L'urne devra pouvoir être personnalisable pour chacun des défunts en fonction d'un algorithme pour la rendre unique et personnelle.

## Exigences du projet

- Nous devons effectuer une pré-étude afin de faciliter les recherches qui seront réalisées dans les années à venir.
- Le coût des matières premières et de l'impression 3D devront respecter le budget alloué.
- Le projet devra aboutir sur la sélection de plusieurs matériaux possibles.

# PRESENTATION DU PROJET

Pour pouvoir mieux comprendre les attentes de notre projet, nous allons définir les différentes notions que nous allons aborder.

## Définition de notre matériau

Tout d'abord, nous devons choisir un matériau dit éco-responsable, c'est-à-dire que ce dernier devra à la fois être biosourcé et biodégradable. Nous allons donc caractériser ces deux appellations.

### Matériau biosourcé

Un matériau biosourcé est un matériau écologique provenant d'origine animale ou végétale. Il s'inscrit dans une démarche de développement durable de sa conception jusqu'à son recyclage. Afin d'être caractérisé comme étant éco-responsable, les matériaux sont éligibles à la norme NF EN 16575 établi en 2014 et il est nécessaire de correspondre aux critères suivants :

- Matériau durable
- Matériau recyclable
- Matériau issu de ressources renouvelables
- Matériau sain n'ayant aucun impact négatif sur l'environnement et sur les êtres vivants
- Matériau étant fabriqué localement pour limiter les frais de transport et la pollution

Les avantages de ce matériau sont les suivants :

- Fabriquer avec des fibres naturelles dont le processus de fabrication est moins polluant
- Être recyclable, le cycle de vie consomme moins d'énergie grise qu'un matériau classique : c'est la quantité d'énergie qui est consommée durant le cycle de vie d'un matériau.

## Matériau biodégradable

Le deuxième terme majeur de ce projet est la biodégradabilité. A l'heure actuelle, il est important de pouvoir concevoir des matériaux biodégradables en utilisant des matériaux biosourcés et de sensibiliser l'opinion publique.

Par exemple, il y a deux ans, le gouvernement s'est penché sur la question des emballages plastiques. Ses derniers étaient très polluants et se retrouvaient généralement dans les océans. Ils ont été remplacés par des emballages en carton, des bioplastiques ou encore des emballages réutilisables en tissu. Donnons quelques exemples de la durée de vie de certains déchets afin de visualiser l'impact néfaste sur l'environnement :

- Mégot de cigarette : environ 1 à 5 ans
  
- Canette en aluminium : environ 100 ans
  
- Verre : environ 5000 ans

Ainsi, le recyclage et la biodégradabilité sont des notions qui sont de plus en plus recherchées et qui sont très importantes. En effet, nous pouvons considérer un produit comme étant biodégradable à partir du moment où un organisme vivant permet de le décomposer naturellement sans causer aucun dommage sur le milieu avoisinant. C'est un processus chimique qui est caractérisé par l'action enzymatique de micro-organismes et des éléments naturels : eau, chaleur, rayonnement UV. Ses micro-organismes omniprésents vont se nourrir par le biais des résidus organiques et relâchent par la suite des molécules d'eau et de dioxyde de carbone. Dans notre cas, nous allons nous concentrer sur l'action de l'eau de pluie et la chaleur du sol.

## Assemblage du projet

Pour mieux comprendre l'assemblage de notre projet, il est nécessaire de différencier les différentes parties le composant. Ainsi, l'urne sera comprise entre l'oya et le support de maintien.

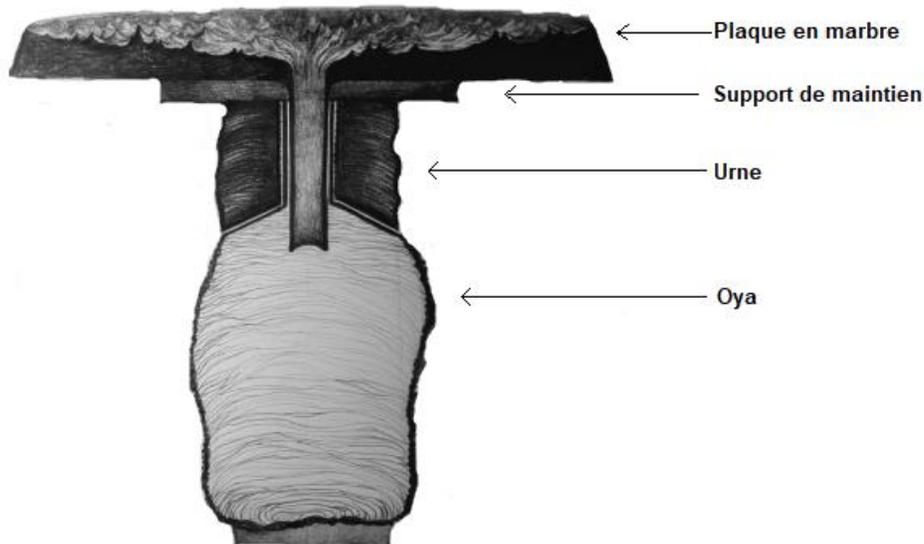


Figure 1 : Composition du projet

## Principe de l'Oya

Nous avons parlé du principe de l'oya et nous allons maintenant expliquer son utilité et son fonctionnement. L'irrigation par jarre, appelée communément par oya, est une technique ancestrale d'irrigation souterraine pour des plants. Apparue selon les agronomes il y a près de 4000 ans en Chine, nous retrouvons également beaucoup de vestiges datant de l'époque de l'Empire Romain. Appelé oya pour 'ollas' en espagnol qui signifie 'pot', ces jarres sont, en fait, des poteries en terre cuite : céramiques microporeuses. Ces jarres sont enterrées jusqu'à leurs cols et ensuite remplies d'eau.

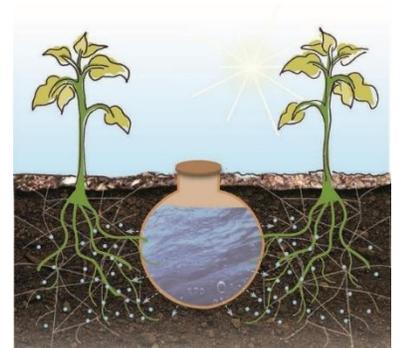


Figure 2 : Principe de l'oya

Traditionnellement, dans les jardins, nous les remplissons nous-même néanmoins ces oyas peuvent tout à fait être remplis grâce à la récupération des eaux de pluies. Dans notre cas, le trou situé sur la plaque en marbre servira de système de récupération. Par capillarité et grâce à la porosité des jarres, l'eau va s'infiltrer peu à peu dans la terre environnante en fonction de ses besoins et ainsi créer une zone d'humidité autour des racines des plantes à proximité.

Cette technique a plusieurs avantages : le filet d'eau qui atteint les plantes est au "compte-goutte", la terre n'est pas noyée et les plantes reçoivent ainsi le juste volume d'eau nécessaire à leur évolution, nous faisons donc une grande économie d'eau par ce biais. Le fait qu'il n'y ait pas d'excès d'eau réduit également le risque d'apparition de mauvaises herbes et de champignons dans les plantations. L'oya a l'avantage d'être modifiable et imprimable en 3D.

Bien que millénaire, cette technique, l'ancêtre de l'arroseur automatique, a peu à peu disparu au fil des siècles et revient au goût du jour depuis les années 1970 et est particulièrement utile en été et dans les zones très chaudes où l'économie d'eau est primordiale.

## Conception de l'urne

L'urne et l'oya seront modélisés et construits à l'aide d'un système de pilotage, Grasshopper. En effet, cet algorithme va permettre de modifier leurs formes afin d'être compatibles en fonction des origines et des caractéristiques du défunt. Les principaux avantages de ce logiciel sont sa capacité à créer des formes complexes, la possibilité de faire varier la géométrie uniquement en changeant les valeurs des paramètres et d'effectuer des changements facilement.

Par exemple, pour modéliser l'urne, il faudra dans un premier temps, définir la forme générique en fonction du volume souhaité : rayon et hauteur. Ensuite, nous devons l'uniformiser en fonction du nombre de points et de leurs répartitions. La création d'un trou permettant de traverser l'urne et d'amener l'eau à s'écouler jusqu'à l'oya sera nécessaire. Nous pouvons modifier le diamètre et l'orientation de l'angle d'inclinaison, ce qui changera également la forme intérieure de l'urne. Puis, il suffit de mailler et de choisir l'épaisseur.

# UTILISATION DES CENDRES

## Cendres issues de sylviculture

Depuis 1900 avant J-C, les cendres de bois sont utilisées dans le domaine de l'agriculture comme engrais pour sa teneur élevée en sels minéraux. Les deux sels minéraux les plus souvent rencontrés sont la potasse, qui favorise le développement des organes : racines, tubercules et fruits (qui n'impacte pas la pousse car elle ne contient pas d'azote) et les oligo-éléments qui sont essentiels à la vie des végétaux : bore, cuivre, manganèse et zinc.

Ces cendres permettent de valoriser la croissance des plantes et de réguler le pH du sol grâce à la chaux qui les compose : à raison d'un point de pH pour quatre tonnes de cendres par hectare soit 0,4 kg/m<sup>2</sup>. Grâce à des analyses, il est possible d'évaluer la quantité de cendres à ajouter par amendements pour recharger la terre en sels minéraux sans causer la mort des micro-organismes avoisinants tels que les bactéries, les champignons et les algues.

Il est aussi possible d'utiliser des cendres de combustion des centrales électriques thermiques ou d'incinération de déchets ménagers pour fabriquer des bétons ou certains liants hydrauliques.

## Cendres humaines

Dans notre cas, nous allons utiliser des cendres humaines après une crémation qui serviront de nutriments pour un arbrisseau à raison d'environ deux litres à deux litres et demi en fonction du genre du défunt et de sa morphologie. Mais nous nous demandons si les cendres humaines sont toxiques pour l'environnement ?

Lors d'une crémation, les corps des défunts sont mis dans des cercueils certifiés PEFC [1] : cette certification permet de garantir que le produit est fabriqué à partir de ressources responsables et qu'il participe à la gestion durable des forêts. Ainsi, le cercueil est placé dans un four à haute température allant jusqu'à 850°C. La matière organique va être réduite en gaz carbonique et les seuls résidus sont les minéraux des os : 85 % de phosphate de calcium, 9 % de carbonate de calcium, 4 % de fluorure de calcium et 2 % de phosphate de magnésium. Les gaz toxiques qui peuvent être émanés viennent de cercueils non certifiés.

Le phosphate de calcium et le carbonate de calcium n'ont aucun impact nocif sur l'environnement d'après leurs fiches sécurités [2] [3]. Une grande quantité peut être néfaste pour

l'environnement mais à notre échelle, l'impact est mineur. Néanmoins, le fluorure de calcium est une substance totalement insoluble dans l'eau [4], il est donc nécessaire de vérifier au préalable si sa concentration naturelle de fluorine ne dépasse pas  $2,5\text{mg/m}^3$ , afin de respecter la norme française. Puis, le phosphate de magnésium quant à lui est un produit considéré comme étant également insoluble dans l'eau ce qui rend sa mobilité dans le sol presque improbable [5]. Cependant, il faut faire attention à ce que les cendres ne soient pas déversées à proximité d'un point d'eau car ce composé a un effet d'eutrophisation : baisse de la limpidité de l'eau et diminution de la teneur en  $\text{O}_2$  entraînant la mort de tous les êtres aquatiques.

Les cendres humaines ne sont pas néfastes pour l'environnement mais le lieu et la quantité déversée doivent être contrôlés afin d'avoir un impact positif. En fonction du sexe, nous pouvons estimer le poids des cendres entre 2kg et 3,5kg.

Une inhumation est beaucoup moins saine à cause des composants utilisés pour l'embaumement : ammoniac et chlorure. C'est pour ses raisons que certains d'Asie privilégient la crémation à 99,8%.

Nous savons que les cendres de bois ont un pH très basique d'environ 12. De plus, comme énoncé, la variation du pH est constatée uniquement lorsque nous avons une grande quantité de cendres dispersées, ce qui n'est pas notre cas. Il convient néanmoins de limiter la quantité à 4 litres pour  $5\text{m}^2$  dans le cas de sols calcaires.

# IMPRESSION 3D

Le monde dans lequel nous vivons est orienté sur la recherche et le développement de nouvelles techniques qui pourraient faciliter nos vies. L'impression 3D est l'ensemble des procédés de fabrication de pièce en volume par ajout de couches successives de matière. Il faut d'abord dessiner l'objet voulu (en 3D) sur un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Un autre logiciel prendra alors le relais pour organiser le découpage en couches successives et enverra les informations à l'imprimante 3D.

## Historique

L'impression 3D a vu le jour au cours des années 1980, des premiers tests ont été effectués par le docteur Kodama, un chercheur japonais. Il voulait créer une méthode de prototypage rapide avec une production couche par couche (ancêtre de la SLA – stéréolithographie) : ici, une résine photosensible était polymérisée par une lampe à UV. N'ayant pas eu le temps de déposer un brevet, il perd le bénéfice de sa découverte.



Figure 3 : Prothèse imprimée en 3D

En 1986, l'Américain Chuck Hull dépose un brevet pour ce même procédé de stéréolithographie et fonde la première entreprise spécialisée dans l'impression 3D : 3D Systems Corporation. Seulement deux ans plus tard, Carl Deckard, pensionnaire de l'université du Texas, dépose un brevet pour une autre méthode d'impression 3D : le frittage sélectif par laser ou SLS, suivi par Scott Crump qui invente, lui, la méthode de dépôt de fil (FDM) en 1992.

Durant les années 1990, l'impression 3D et ses entreprises commencent à se développer et à prospérer, que ce soit en Amérique ou en Europe. Le sujet est tellement novateur et intéressant que les chercheurs médicaux essaient de combiner leur domaine avec celui de l'impression 3D, c'est ainsi que des organes artificiels commencent à être imprimés en 3D dans les années 2000 :

- En 2008, la première impression d'une prothèse de membre complète en 3D est effectuée, ces avancées deviennent de moins en moins coûteuses.
- En 2009, le brevet de la méthode du dépôt de fil : FDM, devient public et démocratise son accès. Nous observons que le produit est maintenant accessible à tout le monde, sa visibilité s'accroît également drastiquement.
- Depuis le début des années 2010, de nombreuses entreprises comprennent les avantages multiples de l'impression 3D, principalement économiques et temporels, pour effectuer directement dans leurs locaux, leurs propres prototypes ou même des productions de faible série.
- En 2011, une université américaine entreprend même des recherches sur la fabrication d'une imprimante 3D capable d'imprimer des denrées alimentaires sous les ordres de la NASA pour que leurs astronautes puissent imprimer leur propre nourriture dans l'espace.
- En 2013, le premier rein artificiel est implanté et les organes sont maintenant complètement fonctionnels.

Tout s'accroît dans cette décennie avec la réduction de la taille des imprimantes et l'avènement, donc, des imprimantes dites « de bureau » : technique FDM.

## Techniques

Pour pouvoir fabriquer en impression 3D, nous avons besoin de trois choses : le ou les matériaux, l'énergie apportée et un modèle CAO représentant la forme finale de l'objet. Selon la méthode de fabrication, le matériau de base peut se présenter selon plusieurs formes : liquide, fil ou poudre.

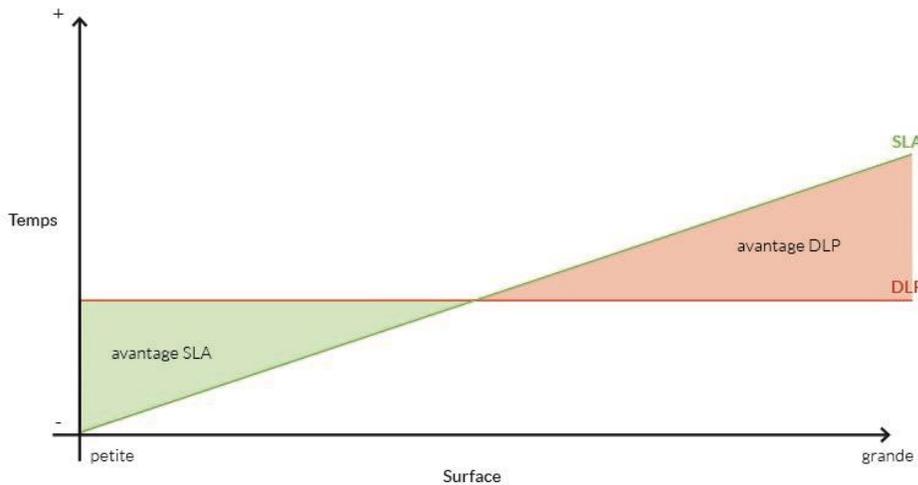
Après la fabrication dans la machine d'impression 3D, nous pouvons trouver un traitement post-fabrication pour travailler l'état de surface de l'objet ou améliorer certaines de ses performances. Nous retrouvons trois familles de processus d'impression 3D que nous allons brièvement présenter :

## Photopolymérisation

## ➤ SLA : Stéréolithographie Apparatus

Cette méthode fonctionne avec une lumière UV qui va solidifier couche par couche de la résine synthétique liquide dont ses propriétés font changer lors de son contact avec de la lumière. Nous allons obtenir un objet de grande qualité et très résistant. Néanmoins, le prix d'achat de la machine est très élevé et les pièces peuvent se modifier toutes seules avec le temps et son exposition lumineuse.

## ➤ DLP : Traitement numérique de la lumière



Comme la SLA, cette technique utilise la lumière mais elle va être projetée grâce à un écran ou un projecteur et non pas à l'aide de miroirs. De plus, le DLP a un temps d'impression plus long si plus la surface est grande.

Figure 4 : Différence entre l'impression SLA et DLP

## ➤ CLIP : Continuous Liquid Interface Production

La technologie CLIP se rapproche de celle de la SLA. La présence d'oxygène est contrôlée ce qui permet de réduire considérablement le temps d'impression. Par exemple, pour la même impression, la SLA mettra presque 12h et le CLIP seulement 7 minutes. Cette différence est explicable car le type de machine est plus avancée et plus coûteuse.

➤ DPP : Daylight Polymer Printing

Contrairement à toutes les autres, le DPP est la gamme la plus précise existante dans cette catégorie de photopolymérisation et elle est destinée à l'impression de petites pièces.

Fusion sur lit de poudre

➤ SLS : Selective Laser Sintering

Ce procédé de fabrication additive consiste à utiliser un laser haute puissance pour des séries de petite taille ou sur mesure. C'est le plus répandu pour son faible coût unitaire et chauffe de fines particules pour construire les modèles.

➤ SLM : Selective Laser Melting

Dans ce cas-ci, nous retrouvons le SLM pour la production de pièces métalliques par des poudres. Elles vont être chauffées et vont se fusionner couche par couche par un laser.

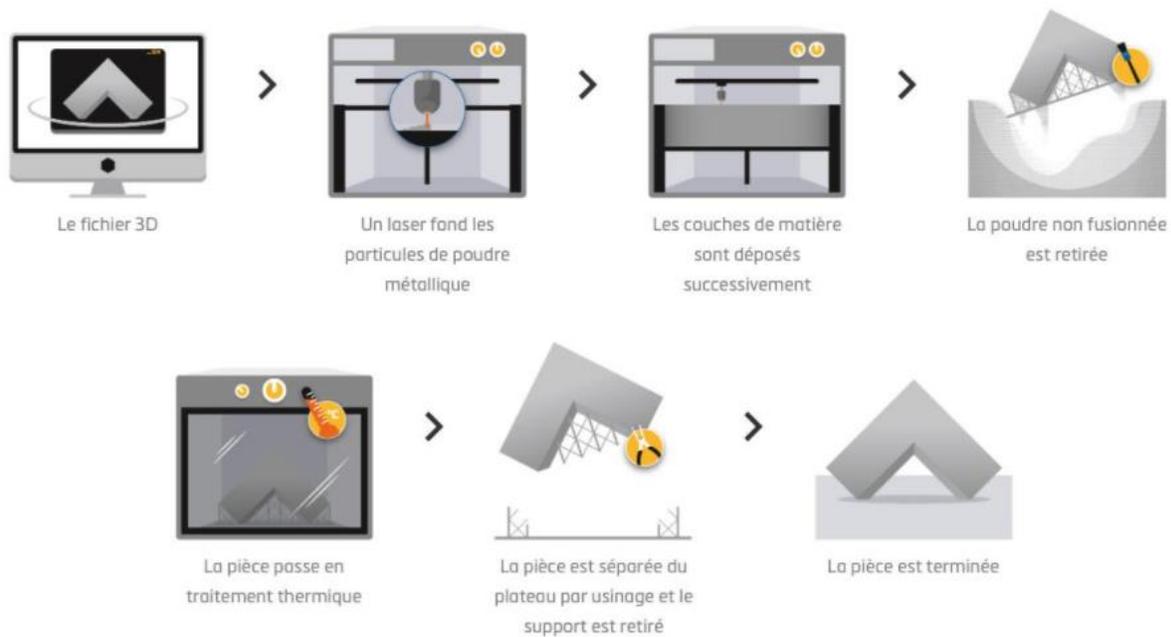


Figure 5 : Schéma explicatif de l'impression 3D par SLM, crédit Materialise

- EBM : Electron Beam Melting

La différence avec la méthode précédente est la source d'énergie qui est, ici, un faisceau d'électrons.

- MJM : Modelage à jet multiples

Le modelage à jet multiples se charge de pulvériser de la matière sous forme liquide. Sa précision jusqu'à 16 microns d'épaisseur et son mode de fonctionnement par couche lui permettent d'obtenir une pièce stable, multi-matériaux et très résistant. Cependant, les matériaux ne seront pas thermoplastiques.

### Projection de liant

- DFF : Dépôt de fil fondu ou FDM : Fused deposition modeling ou FFF : Fused Filament Fabrication

Ces méthodes sont les plus connues et les plus répandues. Les buses d'impression vont déposer couche par couche un matériau plastique ou composite chauffé afin d'être maniable. Les pièces vont être conçues avec un support qui nécessitera un traitement post impression pour le retirer. Il a pour rôle d'empêcher la pièce de s'affaisser sous son propre poids. Elles sont simples d'utilisation, accessibles à tout type de publics et peu coûteuses. Néanmoins, ce concept n'est pas assez précis pour fabriquer de petites pièces.

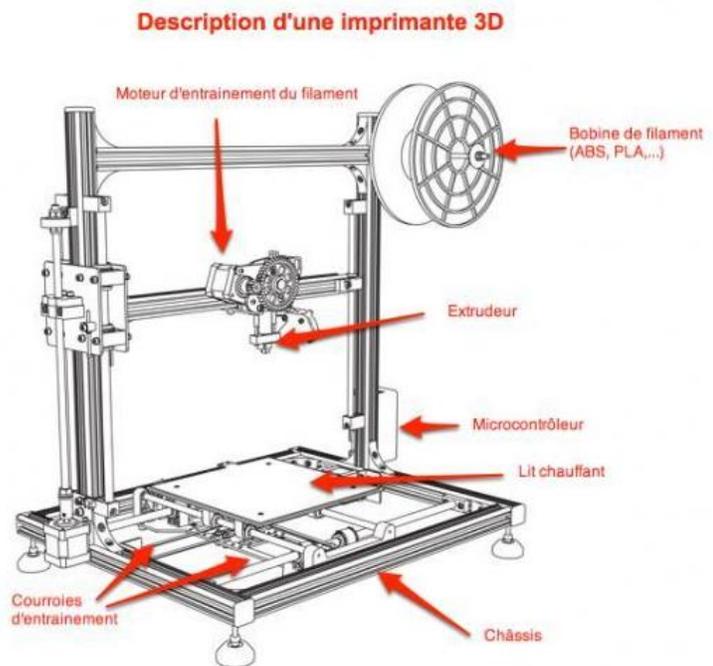
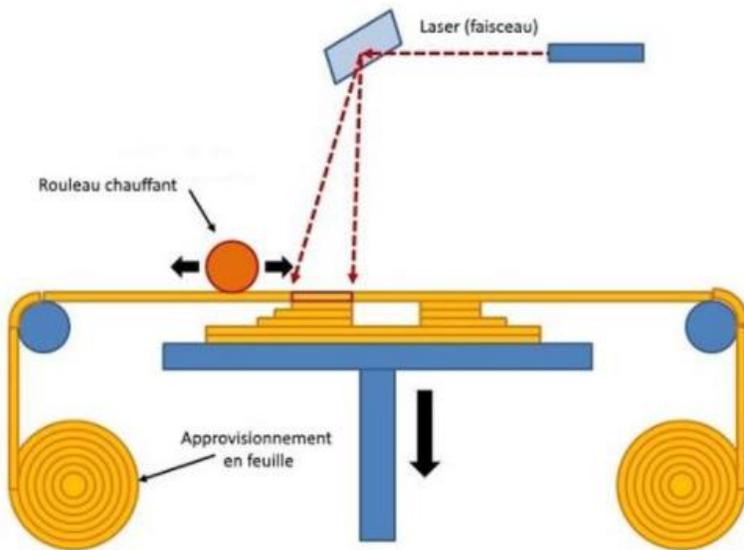


Figure 6 : Schéma représentatif de l'imprimante pour la méthode FDM

- Laminage de feuille : LOM (Modélisation d'Objets Laminés) ou SL (Sheet Lamination)



Cette technique de fabrication additive est caractérisée par un encollage de papiers. C'est-à-dire que la pièce est imprimée grâce à une stratification de feuilles collées les unes entre elles et coupées selon la forme souhaitée par un laser ou une lame. Ce procédé n'est pas utilisable de façon industrielle car le traitement post-impression est très important pour avoir un rendu propre. De plus, la phase de retrait est très délicate.

Figure 7 : Schéma représentatif du fonctionnement de l'impression LOM

## Matériaux compatibles

De nouveaux matériaux sont testés tous les jours depuis la démocratisation de l'imprimante 3D pour savoir s'il est possible de les imprimer. En effet, si les premières imprimantes 3D utilisaient majoritairement de la résine, et ce que pour des prototypages, la multiplication des utilisations de la fabrication additive a poussé les chercheurs à trouver beaucoup d'autres matériaux adéquats à cette technique.

### Plastique

Nous savons que le PLA, acide poly lactique est principalement utilisé pour la méthode FDM. Issu de l'amidon de maïs, il a l'avantage d'être biodégradable mais il est sensible à l'eau et à la chaleur : des dégradations peuvent apparaître lors de contact à l'un ou l'autre, son prix moyen est d'environ 25€/kg. Parmi les matériaux utilisables en méthode FDM, il y a aussi l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène). Il présente des meilleures résistances à la chaleur et à l'eau que son collègue le PLA et le produit sort plus lisse de l'imprimante 3D, ce qui engendre moins de traitement de surface post-fabrication.

Les résines sont aussi issues des plastiques et utilisées avec la méthode SLA. Les propriétés diffèrent selon chaque type de résine mais elles permettent toutes des impressions très précises et solides. Elles donnent généralement des formes complexes dont le traitement post-fabrication est quasi inexistant : leur coût est estimé entre 100€/L et 600€/L.

### Céramiques

Les céramiques sont choisies pour des impressions 3D qui servent à créer des objets complexes. Souvent exécutées avec le procédé SLA, nous les couplons avec de la résine liquide mais nous pouvons également l'utiliser sous forme de poudre avec le process SLS. Néanmoins, l'impression 3D des céramiques ne permet pas de s'affranchir de l'émaillage post-traitement, ce qui entraîne une nouvelle cuisson : le temps de peaufinage est donc assez long.

### Verre

L'université du Massachusetts Institute of Technology (MIT) a conçu une imprimante 3D pour fabriquer des objets en verre. Celui-ci est fondu et maintenu à haute température grâce à un four attaché à l'imprimante. La buse qui permet de déposer le fil est également chauffée et composée de céramique pour pouvoir supporter cette chaleur.

### Métal

L'aluminium est retrouvé dans l'impression 3D avec l'alliage AlSi10Mg. Il a l'avantage d'être résistant et léger, nous le retrouvons principalement dans l'aérospatiale et le prix vaut entre 100€/kg et 150€/kg.

Nous retrouvons également l'acier inoxydable, qui est beaucoup utilisé dans l'industrie, notamment grâce à ses excellentes caractéristiques mécaniques et sa facilité d'usinage après impression : son prix varie entre 90€/kg et 250€/kg.

Le cobalt-chrome, lui est rattaché avec le procédé EBM. Avec une résistance exceptionnelle face à l'usure, le domaine médical l'utilise particulièrement pour les prothèses médicales et dentaires. Ce matériau présente également une grande résistance aux hautes températures (plusieurs centaines de degrés) : son prix s'élève à 250€/kg.

L'autre matériau biocompatible est le titane : son rapport solidité/poids et sa résistance à la corrosion lui offre une place de choix dans l'industrie. Présentant une très bonne adhérence aux tissus et aux os, son impression 3D est d'une très bonne qualité (entre 400 et 500€/kg).

### Matériaux organiques

Parmi les matériaux organiques, nous retrouvons la cire pour créer des moules de haute précision, notamment pour les domaines comme la bijouterie ou le domaine dentaire. Sa très grande résistance à la chaleur lui permet de pouvoir servir de moule pour des objets métalliques également.

De plus en plus d'aliments sont imprimés en 3D comme le chocolat ou le fromage pour fabriquer des décorations comestibles : la NASA recherche à en créer pour ses astronautes. Le chocolat est très maniable et permet de créer des formes très complexes. L'utilisation d'un alliage de bois recyclé, à hauteur de 40% et d'un polymère est possible, nous nous rapprochons d'un rendu visuel proche du bois et nous pouvons faire varier la couleur de celui-ci en fonction de la température d'extrusion.

## Applications

Un des avantages de l'impression 3D est sa grande rapidité d'exécution, grâce à cela, nous pouvons dénombrer beaucoup de domaines d'utilisation des produits issus de ce process.

Le domaine militaire l'utilise dans ses "usines mobiles". Ce sont des conteneurs où nous pouvons retrouver des imprimantes 3D d'assez grandes tailles utilisables directement sur le champ de bataille. Nous pouvons notamment créer des armes à feu en incluant certaines parties en plastiques.

Les domaines qui convoitent le plus cette technique sont les domaines qui concernent le médical et la recherche : nous comptons tout ce qui est prothèses osseuses ou implants : hanches, appareils dentaires, auditifs et également des membres entiers ou des organes.

L'aéronautique bénéficie aussi de ce procédé en réalisant certaines parties d'avions et en réduisant leur poids d'environ 30% à 55%. SpaceX a même réussi à remplacer des composantes métalliques de leurs fusées.

Dans l'alimentaire, l'impression 3D permet de créer des formes trop complexes pour être réalisées à la main, même par les meilleurs cuisiniers. Certains restaurants spécialisés possèdent même plusieurs imprimantes et ne servent que des plats réalisés par ce procédé.

Dans le domaine de la musique, de plus en plus d'instruments sont fabriqués en impression 3D tels que des guitares : imprimées en nylon, c'est surtout la personnalisation qui est adaptable à la demande de chaque musicien qui est très intéressante.

## Avantages et inconvénients

### Avantages

Les principaux avantages de l'impression 3D sont la grande précision pour des formes complexes et la grande gamme de matériaux différents utilisables. Elle est particulièrement utile lors d'un prototypage puisque les délais sont relativement courts et que nous pouvons l'actionner directement sur le lieu de travail sans avoir besoin de passer par une entreprise tierce. Les coûts de développement sont également considérablement réduits puisque nous avons une main d'œuvre très réduite et pas d'étapes de préfabrication ou de pré-industrialisation. La créativité est boostée avec ce procédé de fabrication puisque nous pouvons modéliser tous les volumes voulus grâce aux logiciels 3D comme Catia

### Inconvénients

D'un autre côté, malgré la présence de nombreux matériaux, une seule machine peut utiliser qu'une seule technique et donc un seul type de matériau ce qui peut entraîner des coûts lourds. En effet, lorsque nous voulons travailler sur plusieurs matériaux, une imprimante 3D n'est pas l'investissement idéal.

L'état de surface post-impression n'est pas toujours parfait à cause de l'accumulation de couches, les pièces sortantes nécessitent souvent un traitement de surface pour avoir un rendu lisse et propre. De plus, il faut des connaissances solides et savoir manipuler des logiciels 3D, qui ne sont pas toujours très intuitifs.

# RECHERCHES DE MATERIAUX

## Matériaux issus de la sylviculture

### Bois

Le bois est une ressource renouvelable et recyclable. A l'issue du recyclage des déchets de l'industrie du bois, nous pouvons récupérer des fibres de bois qui sont fabriquées grâce aux chutes de résineux et qui sont par la suite défibrées. Elles se trouvent sous la forme de vrac, de rouleau, de bande ou de plaque.

Nous pouvons défibrer les copeaux résineux afin d'obtenir de la laine de bois. Nous pouvons soit par adjonction d'eau soit à l'air, obtenir une pâte qui peut être utilisée pour produire des panneaux autoagglomérés après laminage et séchage. La densité de la fibre de bois en vrac est estimée à 35kg/m<sup>3</sup> mais la densité des panneaux peut varier en fonction de sa rigidité. Pour des panneaux de laine de bois semi-rigide, nous avons une densité de 40kg/m<sup>3</sup>. Cela permet au matériau de rester élastique, souple et facile de manipulation. Ils sont régulièrement sollicités dans le cadre de l'isolation intérieure. Pour des panneaux de laine de bois rigide, nous avons une densité e 60 à 280kg/m<sup>3</sup>. Ils sont utilisés dans l'isolation extérieure.

Au niveau de la décomposition, en les immergeant dans l'eau, les fibres de bois vont être protégées des attaques fongiques. En effet, sans oxygène, les champignons nécessaires à sa décomposition ne vont pas subsister.

Dans notre cas, il faut se concentrer sur un bois clair considéré comme non durable. De plus, nos conditions thermiques et environnantes sont favorables à la décomposition des fibres de bois. Contrairement aux impressions 3D classiques, les impressions 3D de filaments de bois sont beaucoup plus propres et le rendu est beaucoup plus esthétique. Néanmoins, le temps de décomposition va peut-être poser problème. En effet, une allumette met environ 6 mois à se décomposer. Il est donc susceptible que cela soit un frein à notre projet. Néanmoins, il existe des bioplastiques à base de bois dont nous parlerons par la suite.

## Liège

Le liège est un matériau issu et extrait de l'écorce des chênes-lièges. Ses arbres possèdent la caractéristique de refabriquer leur écorce une fois enlevée. Néanmoins, il faut attendre environ 20 ans avant de pouvoir retirer la première couche qui sera renouvelée naturellement tous les 9 ans. Cette opération demande une grande délicatesse pour ne pas abîmer la couche mère de l'arbre et s'effectue uniquement de manière artisanale à l'aide de hache.

Chaque année, nous estimons la production mondiale de 300 000 tonnes de liège principalement au Portugal : c'est-à-dire que la totalité des produits présents en France sont importés. Ses caractéristiques lui permettent d'être mis à profit dans de nombreux domaines comme l'aérospatial, la musique, l'automobile et surtout la viticulture. Il est important de relever que ce matériau est cher : son prix se situe entre 25 € à 40 € le m<sup>2</sup>

Par rapport à son côté esthétique, il a un aspect doux au toucher, ne colle pas aux mains. De plus, il est facilement malléable pour lui donner une forme ou une couleur souhaitée. De nos jours, l'aspect esthétique est très recherché dans le monde de la mode en liège à base de chaussures, de sacs, etc... Le liège est composé de subérine, une substance présente à 50% de sa composition permettant de réguler et de contrôler la biodégradabilité qui le rend totalement imperméable ne laissant passer aucun liquide et aucun gaz. Ainsi, ce matériau ne correspond pas à nos critères.

## Matériaux issus de l'agriculture

Un matériau dit biosourcé et biodégradable provenant d'origine première agricole est plus communément appelé agro matériau.

### Chanvre

Le chanvre est une plante connue pour sa croissance très rapide et ne nécessitant aucune modification génétique, elle n'a donc pas besoin de traitement chimique. Une fois la récolte faite, nous pouvons récupérer trois parties valorisables, les fibres, la chènevotte et le chènevis : l'écorce, le centre et la graine. Afin d'obtenir ses produits, il faut les défibrer après séchage. Les fibres sont utilisées car elles sont très flexibles, manipulables et résistants. Il est tout de même

possible de faire des pâtes à base de chanvre mais elles n'ont encore jamais été testées à l'impression ni au séchage. Les seuls dérivés présents sur le marché sont les papiers composés de chanvre mais ils nécessitent des traitements chimiques

De plus, il existe des bioplastiques à base de chanvre qui peuvent se décomposer très rapidement sans produire de dioxyde de carbone en seulement 80 jours. De nos jours, il existe certains bioplastiques composés à 100% de chanvre qui sont considérés comme étant biosourcés et biodégradables et qui peuvent être imprimés en 3D grâce à des filaments. Nous évoquerons ce sujet ultérieurement.

## Paille

La paille peut provenir du blé, du seigle, de l'orge ou encore de la lavande. Nous estimons son temps de décomposition à environ 5 centimètres de profondeur en moins d'un an. La paille va donc être une source d'énergie en carbone pour les micro-organismes comme les champignons et les bactéries.

De nouvelles techniques ont été mises en place afin de mettre en forme la paille sous la forme de filaments. Comparable au PLA sur les performances environnementales, ce nouveau produit a été développé par l'entreprise chinoise Jiangsu Jinghe Hi-Tech et arriverait sur le marché à un prix deux fois inférieur, notamment grâce à la facilité de croissance et de récolte de la paille à travers le monde.

Pour la réduire en forme de filament, la paille doit être broyée et mélangée à plusieurs additifs (polypropylène, silane, éthylène). Après cette phase, la paille est transformée en granules qui servent pour le moulage par injection puis en filament adaptable à l'impression 3D. Autant par sa forme, sa couleur et sa solidité, le filament à base de paille se rapproche beaucoup des impressions 3D en bois. Le problème de ce produit est que les additifs ne sont pas dégradables à court terme ni compostables.

## Laine de mouton

L'élevage de moutons représente de nombreux avantages que ce soit pour sa viande ou pour sa laine. En effet, il est obligatoire, pour la bonne santé des animaux, de les tondre au moins une fois dans l'année pour éviter l'accumulation de poux, tiques et pour permettre à la peau de respirer. Cette laine est dite impropre et doit être lavée avant d'être transformée en rouleaux,

panneaux, ou en vrac. Cependant, nous savons que les produits d'origine animale sont hydrophiles, ils sont capables d'absorber jusqu'à 33 % de leur poids et de la réinstaurer au fur et à mesure. La laine de mouton ne se décompose donc pas ou très lentement à raison d'environ 100 ans. La plus vieille date de plus de 3000 ans. De plus, grâce à sa composition et construction moléculaire, elle est protégée contre les microbioens. Ainsi, ce matériau ne correspond pas à nos attentes tout comme toutes les laines animales.

### Algues brunes

L'algue brune est une espèce d'algues présente en grande quantité sur les côtes bretonnes. Dans les années 210, Rémy Lucas, plasturgiste s'est penché sur la question des algues pour remplacer les plastiques. En effet, l'algue brune est un polymère 100 % végétal très similaire à celui pétro-sourcé utilisé pour fabriquer les plastiques. Cet homme a réussi à créer un matériau : Algopack, composé à 100 % d'algues et qui est 100 % biodégradable. L'avantage majeur de ce matériau est son temps de décomposition d'environ 12 semaines et qui une fois enterré permet d'avoir un apport nutritif aux plantes avoisinantes. Les algues brunes sont donc séchées grâce à un traitement thermique puis une poudre naturelle sans additifs ni adjuvants est ajoutée : nous obtenons donc des granules d'un millimètre. Après avoir été chauffé à 200°C, il est possible de le mettre en forme par injection grâce à des moules. Europlastiques utilise déjà cette méthode pour réaliser des supports alimentaires étant donné que le prix à la tonne de plastiques et de granules d'algues est équivalent. Néanmoins, cette technique nécessite de chauffer les composants et le type d'impression n'est pas idéal.

Afin de savoir si ce matériau est compatible avec d'autres types d'impressions, nous avons contacté l'entreprise Algopack et nous attendons leur réponse. En fonction de cette dernière nous pourrions sélectionner ou non ce composé pour notre projet.

### Pommes de terre

Les pommes de terre sont les féculents les plus cultivés, elles sont connues et réputées pour leur fécule. En effet, l'amidon présent et extrait des tubercules possède des propriétés très prisées en cuisine principalement. Néanmoins, il est possible de le retrouver dans d'autres domaines comme celui de l'industrie. Pour lutter contre la surconsommation du plastique, des chercheurs se sont penchés sur ses caractéristiques. Certains couverts de fast-food sont maintenant fabriqués grâce à cette molécule. Afin de l'obtenir il est nécessaire de chauffer

l'amidon à très haute température en y ajoutant de la glycérine végétale puis de les modeler. Le rôle de la glycérine est de rendre le mélange onctueux et permet de générer la viscosité. L'inconvénient de cette méthode est le temps de séchage, il faut que le produit soit placé dans un environnement chauffant pour durcir totalement. Ce matériau et surtout cette méthode ne sont pas du tout appropriés aux objectifs du projet.

## Matériaux issus de recyclage

### Coton recyclé

De nos jours, l'univers de la mode concerne environ 75 millions de personnes autour du globe, cela représente une quantité vertigineuse de vêtements produits et donc jetés à terme. C'est pourquoi, la production de matériaux grâce à des textiles recyclés venant soit des chutes de fabrication soit des bennes de tri permet de se développer. Après avoir été hachées et défibrées, les fibres de textiles sont soit présentées en tant que vrac soit thermos liées avec du polyester afin de forer des rouleaux ou des panneaux semi-rigides. Néanmoins, le polyester est un polymère de synthèse composé de deux composants du pétrole. Ainsi, ce produit est considéré comme biosourcé pour l'isolant mais n'est pas biodégradable et ne correspond donc pas à nos critères.

### Ouate de cellulose

La ouate de cellulose est obtenue grâce au recyclage des journaux. Ce matériau est régulièrement utilisé pour l'isolation thermique par technique de soufflage. Seulement 50% des journaux sont recyclés, ce qui réduit considérablement les possibilités de cette filière. Néanmoins, le temps de séchage est de 1 à 3 mois. Ce temps est beaucoup trop élevé car nous ne devons pas dépasser 6 jours. De plus, ce matériau est presque totalement biodégradé au bout de 50 ans. La ouate de cellulose ne convient donc pas.

## Plastiques biosourcés et biodégradables

Un plastique est un matériau composé de polymères. Cette molécule est un ensemble de macromolécules qui existent sous forme naturelle et synthétique. Elle peut être élaborée à partir de : [6]

- Matières pétrochimiques pétrosourcés : synthétisés par des procédés industriels comme le polyéthylène PE ou le polycaprolactone PCL
- Matières renouvelables :
  - Biopolymères produits naturellement par les êtres vivants, animaux ou végétaux : amidon, celluloses, lignines, gluten, collagène ou lipides issus de fermentation bactérienne de sucres et de l'amidon.
  - Matériaux issus de la sylviculture et de l'agriculture avec ou sans ajout d'additifs chimique tels que la laine de mouton, ou le bois et la paille.
  - Matériaux composites : Matière première et d'un renfort, constitué de fibres telles que bois, lin, chanvre, paille.

Nous pouvons regrouper ses différents matériaux en fonction de leur origine et de leur critère de biodégradabilité :

### Matrice des matériaux polymères

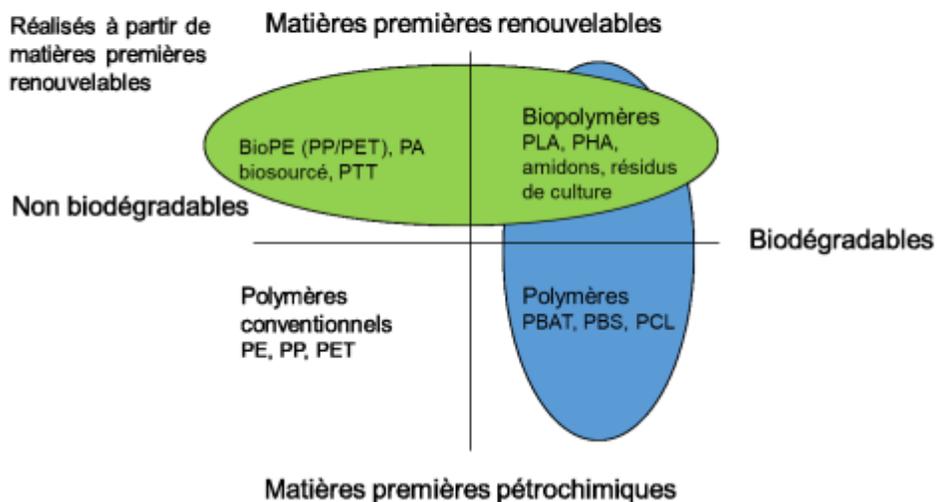


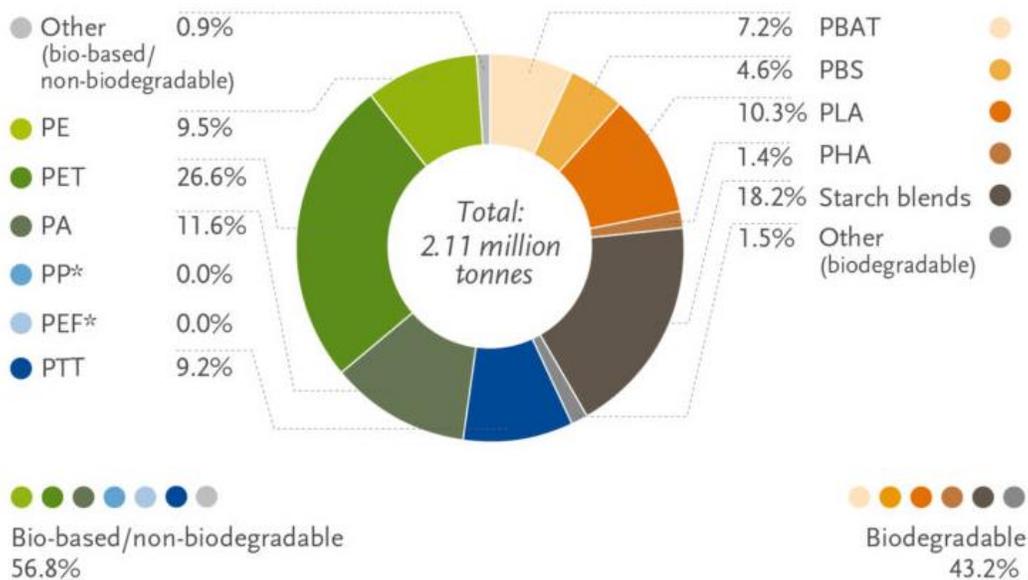
Figure 8 : Schéma de répartition des matériaux polymères en fonction de leur origine et de leur critère de biodégradabilité, <http://www.preventpack.be/fr/dossier/biopackaging>

Nous pouvons ainsi définir un bioplastique comme étant un matériau biosourcé et / ou biodégradable. Nous pouvons distinguer trois familles différentes :

- Les matériaux biosourcés et durables
- Les matériaux non biosourcés issus des ressources fossiles comme le pétrole mais biodégradables
- Les matériaux biosourcés et biodégradables issus des ressources renouvelables.

Nous allons nous intéresser à cette dernière catégorie. Selon la norme ASTM D6400, un plastique biodégradable : « Se dit d'un plastique dégradé dont la dégradation résulte de l'action de microorganismes naturellement présents dans le milieu tels que les bactéries, les mycètes ou les algues » (ASTM ;2012). Grâce à ce graphique, nous pouvons visualiser que plus de la moitié des bioplastiques en 2018 étaient biosourcés mais pas biodégradables. Nous allons effectuer des recherches sur les PLA, PHAs, PBAT et leurs alternatives.

### Global production capacities of bioplastics 2018 (by material type)



\*Bio-based PP and PEF are currently in development and predicted to be available at commercial scale in 2023

Figure 9 : Capacité de productions mondiales de bioplastiques en 2018

## PLA

Le PLA (Polylactic acid – acide polylactique) est une matière plastique d'origine végétale. Principalement composé d'amidon de maïs, le PLA est l'un des matériaux les plus utilisés en impression 3D (avec la méthode FDM) et la principale matière première d'origine naturelle utilisée.

Il s'agit d'un produit de la fermentation de l'amidon grâce à des bactéries pour créer une forme d'acide lactique. Cet acide lactique ainsi synthétisé va subir une polymérisation grâce à un nouveau procédé de fermentation qui conduit à la formation de l'acide polylactique.

Majoritairement utilisé pour fabriquer des emballages dans l'alimentaire à la place des plastiques d'origine pétrolière (polyéthylène), il est l'un des matériaux utilisés par les imprimantes 3D grand public. On peut maintenant créer du PLA avec de nombreux matériaux tels que l'aluminium, les fibres de bois ou du bronze... s'il est translucide à l'état naturel, il peut être teinté très facilement dans des nuances de blanc, bleu, rouge, orange et bien d'autres coloris à des fins esthétiques.

Il est sensible à différents facteurs comme : (voir figure 4 ci-contre)

Dans notre cas, nous avons principalement l'action de : la chaleur, l'oxygène, l'humidité et des agents biologiques qui vont provoquer la dégradation de notre polymère. C'est donc une hypothèse très crédible pour notre projet puisque notre urne sera enfouie sous terre : elle sera exposée à une température plus élevée que celle ambiante ainsi qu'un contact régulier à l'eau de pluie qui va favoriser le développement de bactéries et de

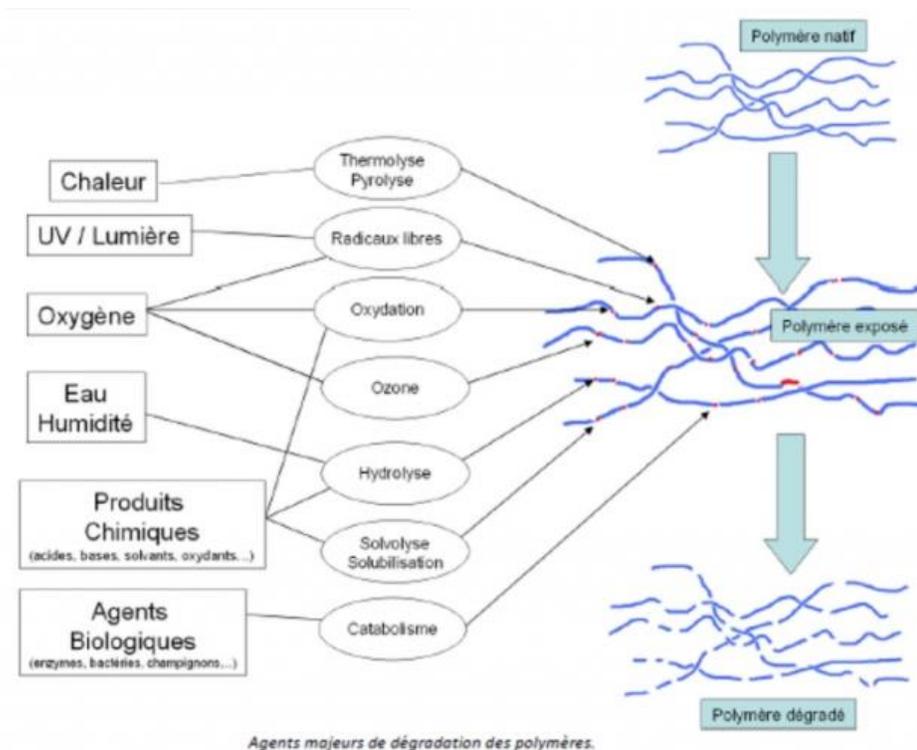


Figure 10 : Facteurs influents de la décomposition du PLA

champignons. A des températures de 20°C et en présence d'eau, le PLA mettra environ 60 jours à se décomposer. Même en enterrant notre oya à une profondeur de 30 cm, nous ne pourrions pas atteindre cette valeur. Ainsi, notre décomposition sera plus longue mais restera quand même inférieure à 6 mois.

Il est également possible de l'imprimer en 3D grâce à des filaments, à une température d'environ 180°C. Le seul problème réside dans sa faible tenue aux traitements post-impression, puisqu'un simple ponçage risque d'échauffer l'objet et de le faire fondre à cet endroit en particulier. En effet, post impression, il est nécessaire de retirer les supports d'impression, cela peut laisser quelques traces sur les points de contact mais il est possible de les estomper : le rendu ne sera jamais parfait.

#### 60 % PLA et 40 % de fibre de bois

Dans notre cas, les formes seront simples et n'auront pas besoin de traitement supplémentaire manuel. C'est pour cette raison que nous pouvons utiliser les filaments EasyWood. Ses filaments sont fabriqués à base de 40 % de fibre de bois et 60 % de PLA. Cette composition lui permet d'avoir les mêmes caractéristiques qu'un PLA classique mais les fibres de bois vont permettre d'apporter des finitions plus propres.

En effet, le bois est connu pour son rendu lisse et élégant, c'est pour cela, qu'il serait une option envisageable. De plus, en fonction de la provenance des fibres de bois : olive, bouleau, cèdre, noix de coco, ébène, pin et saule, il est possible d'avoir diverses couleurs.

#### PHAs

Le PHAs, aussi appelé le polyhydroxyalcanoate est un polyester naturel provenant de la fermentation bactérienne des sucres présents dans la canne à sucre, la betterave ou encore des lipides contenus dans l'amidon de maïs, blé ou pomme de terre. Cette molécule est synthétisée dans un substrat de matière carbone. Sa méthode de fabrication peut être expliquée grâce à ce schéma fourni par le magazine "La Recherche" :

Nous pouvons relever diverses caractéristiques comme sa bonne résistance aux UV, sa faible résistance aux acides et aux bases. Néanmoins, ce matériau est totalement insoluble dans l'eau et le rend donc incompatible avec notre projet.

## PBAT

Le poly butyrate adipate téréphtalate est un copolymère totalement biodégradable composé d'acide adipique, de 1,4 – butane diol et d'acide téréphtalique. L'inconvénient de ce matériau est sa mise en forme. A l'heure actuelle, il est uniquement possible de les mouler, l'impression 3D n'est pas envisageable. De plus, ce matériau ne peut pas être coloré. Nous n'allons donc pas poursuivre nos études sur ce polymère car il n'est pas compatible.

## Plastique à base de chanvre

Les plastiques à base de chanvre est une bonne alternative pour remplacer les matières premières à base de pétrole. La culture du chanvre ne nécessite aucun pesticide et n'est pas endommagée par les insectes grâce à sa vitesse de croissance très élevée.

De plus, le chanvre possède une grande quantité de cellulose, en effet, lorsque la tige est défibrée, il en reste 77%. Ce type de plastique a la particularité d'être presque 3 fois plus résistant qu'un plastique classique, cela permet d'avoir une excellente prise en main. Son avantage majeur est son temps de décomposition de 3 à 6 mois.

A l'heure actuelle, ce plastique est souvent mis en forme par moulage mais il est possible de créer des filaments conçus pour l'impression 3D. La fibre du chanvre est dosée à moins de 0,2 % de THC est mélangée avec une faible dose de PLA afin d'être mise sous forme de bobines. Néanmoins, les filaments ne sont pas encore colorés mais peuvent l'être en fonction de la demande du client. Ce matériau est donc envisageable dans le cadre de notre projet.

## Impact du PLA sur l'environnement

Comme expliqué précédemment, le PLA est un bioplastique considéré comme biosourcé et biodégradable. Néanmoins, la notion de biodégradabilité est à prendre en compte avec précaution. Dans le cas de ce matériau, il est compostable uniquement en milieu industriel, c'est-à-dire à en moins de 6 mois à une température d'environ 60°C. Pour respecter nos objectifs, nous devons avoir un compostage domestique, en moins d'un an à température ambiante.

De nouvelles alternatives ont été mises en place pour venir à bout de ce problème. En effet, avec l'ajout d'un additif 100 % naturel, il est dorénavant possible de rendre le PLA totalement

dégradable à la maison. L'Evanesto est un additif enzymatique permettant d'accroître sa biodégradabilité de 30 % à 40 %. L'entreprise Carbiolice a donc réussi à mettre au point une audacieuse méthode étant considéré comme un engrais naturel pour l'environnement avoisinant et totalement éliminé en 200 jours.

## Autres catégories

Il existe de nombreuses méthodes d'impression par poudre pour les métaux comme l'acier, l'aluminium ou encore le titane. Cette technique va permettre d'obtenir un résultat d'impression très précis qui serait compatible à la fabrication de petites pièces. Nous allons nous renseigner sur les différents matériaux compatibles et vérifier s'ils correspondent à notre projet.

### Polyamide sous forme de poudre

Le frittage de poudre de Polyamide est une technique par laser. Ce matériau est reconnu comme étant très résistant aussi bien thermiquement que mécaniquement. Néanmoins, ce matériau est très néfaste pour l'Homme et pour l'environnement. En effet, sa production nécessite beaucoup d'énergie mais également du pétrole. Aussi appelé PA 12, ce polymère d'origine pétro sourcé ne correspond pas à nos critères relatifs au projet.

Cependant, des chercheurs ont essayé de mettre en place le PA 11, 100 % biosourcé à base d'huile de ricin. La principale propriété du RILSAN PA 11 est d'être résistant aux attaques chimiques de l'eau et possède une faible reprise d'humidité grâce à sa stabilité dimensionnelle. Ainsi, ce produit est biosourcé et durable. Nous ne pouvons pas l'utiliser.

### Résine liquide par photopolymérisation

L'utilisation de résine liquide revient à utiliser le principe de photopolymérisation. Cette méthode est une impression par couche et nécessite des traitements post-impressions. En effet, il est indispensable de laver la pièce et d'enlever les supports. En fonction de la résine choisie, il est possible d'avoir un rendu plus propre directement. De plus, les imprimantes restent très accessibles financièrement. La résine est une substance très visqueuse d'origine végétale ou synthétique. Nous allons nous informer sur les différents types de résine naturelle existante et leurs caractéristiques.

La résine Anycubic Plant-based UV Resin est fabriquée à base d'huile de soja et est considérée comme étant totalement biodégradable. Elle ne possède pas de composés organiques volatils (hydrogène, hydrocarbures, azote, chlore, soufre et oxygène), de bisphénol A (produit reprotoxique) et de produits chimiques dangereux. De plus, elle est compatible avec les impressions Photon, Photon S, DLP et LCD.

Le site fabriquant ce produit nous indique que sa résine est compostable en moins d'un an. Nous devons vérifier si c'est du compost industriel ou domestique, c'est pour cette raison que nous avons contacté par courriel l'entreprise et nous sommes dans l'attente de leur réponse. Cette dernière nous permettra de valider ou non ce produit.



Figure 11 : Cycle de vie de la résine selon le fabricant

## Essais à effectuer

L'entreprise Barilla a mis en place une imprimante servant à produire des pâtes fraîches à l'aide de poudre de blé dur et d'eau. Il serait donc pertinent de réaliser des essais en faisant varier les proportions de ses mélanges :

- Eau + poudre de blé dur
- Eau + poudre de blé dur + fécule de maïs
- Eau + poudre de blé dur + fécule de pomme de terre
- Eau + fécule de maïs
- Eau + fécule de pomme de terre

- Eau + fécule de maïs + fécule de pomme de terre
- Chacune des mixtures citées ci-dessus + gélifiant naturel comme de la gélatine, de l'agar-agar ou de la pectine

Ses expérimentations auront pour but de vérifier et de modifier la viscosité de toutes ses associations afin d'obtenir une pâte compatible avec l'impression 3D. Tout d'abord, il faut effectuer ses manipulations avec des seringues pour estimer dans un premier temps les proportions puis avec une imprimante. Il sera aussi pertinent de faire varier les temps de séchage.

## Esthétisme

Nous savons que l'urne est un objet qui se doit esthétique. Pour cela, il existe plusieurs méthodes. Tout d'abord, il est possible d'utiliser des filaments colorés ou de colorer naturellement les pâtes d'impressions, nous retrouvons pour les couleurs suivantes :

- **Bleu** : Spiruline extraite des algues marines, des pétales de fleurs de Pois bleus ou du jus de chou rouge avec du bicarbonate
- **Orange** : Jus de carottes, purée de tomate, pelure d'oignon, paprika
- **Rose** : Jus de betteraves, jus de fruits rouges, jus de chou rouge
- **Vert** : Jus d'épinards, herbes aromatiques, thé matcha
- **Jaune** : Curcuma, curry, pissenlit
- **Marron ou beige** : Café, cacao, chicorée, marc de café, cannelle, thé noir
- **Noir** : Charbon de bois

Ensuite, pour obtenir un rendu lisse et une finition plus propre, il est possible d'utiliser plusieurs solutions. En s'inspirant des enrobages alimentaires qui servent de protections pour certains aliments, nous pouvons retrouver la cire animale comme la cire d'abeille aussi connue

sous l'étiquette E 901 ou la cire végétale comme la cire de carnauba sécrétée par les feuilles de palmier, E 902.

Nous avons aussi le principe de pelliculage des médicaments, ce procédé est utilisé pour colorer et cacher le goût de certains d'entre eux. Nous pouvons adopter l'agent de pelliculage gastro solubles : SEPIFILM PW. Ce produit est un polymère filmogène avec un plastifiant conçu pour être soluble dans l'eau sous la forme de poudre. Il existe de différentes couleurs, néanmoins, il y a des restrictions par rapport à quelques pigments mais nous n'avons pas les licences pour avoir accès à sa fiche de sécurité. Il faudra donc approfondir ce point afin de le valider ou non.

# CONCLUSION

Au bout de nos dix semaines de projet, nous avons réussi à éliminer et à sélectionner certains types de matériaux. Pour cela, nous avons orienté nos recherches sur leurs différentes caractéristiques : le temps de décomposition, le temps de fabrication, le type d'impression 3D compatible, la provenance, l'impact environnemental et le côté esthétique.

Grâce à ces critères, nous avons pu déterminer que l'utilisation de produits recyclés comme le coton présent dans les vêtements n'était pas une idée à approfondir. En effet, il convient de dire que c'est un produit biosourcé mais la présence de polyester ne le rend pas biodégradable.

Les matériaux issus de la sylviculture ont l'avantage quant à eux d'être durables dans le temps, ce qui est très utile dans certaines situations. Cependant, nous avons un délai de décomposition maximum d'un an, ces matériaux sont donc exclus.

Nous avons principalement analysé la spécificité des bioplastiques. Nous avons pu déterminer que le PLA, venant de l'amidon de maïs est un matériau biosourcé et compostable en milieu industriel uniquement car il sécrète des résidus toxiques pour l'environnement. Toutefois, nous pouvons le coupler avec l'enzyme Evanesto afin de le rendre compostable domestiquement. De plus, en y ajoutant des fibres de bois, nous allons avoir des finitions plus propres après l'impression 3D de ses filaments.

L'imprimante que possède l'ESAD est une imprimante à pâte, ainsi nous avons établi l'hypothèse de quelques mélanges à réaliser afin de vérifier les viscosités, les tenues et le temps de séchage de ses derniers.

Par la suite, il faudra reprendre contact avec l'entreprise Algopack et Anycubic qui ne nous ont toujours pas répondu et approfondir les essais à effectuer. De plus, la possibilité de colorer les pâtes grâce à des colorants naturels est une excellente alternative à examiner.

# REFERENCES

[1] : Certification des cercueils

<https://www.pefc-france.org/le-label-pefc/#:~:text=Le%20label%20PEFC%20garantit%20ainsi,dimensions%20environnementales%20C%20soci%C3%A9tales%20et%20%C3%A9conomiques>

[2] : Fiche de données de sécurité du phosphate de calcium

[https://www.merckmillipore.com/FR/fr/product/msds/MDA\\_CHEM-102143?Origin=PDP](https://www.merckmillipore.com/FR/fr/product/msds/MDA_CHEM-102143?Origin=PDP)

[3] : Fiche de données de sécurité du carbonate de calcium, partie 3.2

<https://www.yvelines.gouv.fr/content/download/12277/79369/file/7%202%20FDS%20FILLER.pdf>

[4] : Fiche de données de sécurité du fluorure de calcium

<https://echa.europa.eu/documents/10162/72f96b1e-5b06-49f6-bf46-ebd7b3d2324e>

[5] : Fiche de données de sécurité du phosphate de magnésium

[https://www.fishersci.fr/chemicalProductData\\_uk/wercs?itemCode=12645157&lang=FR](https://www.fishersci.fr/chemicalProductData_uk/wercs?itemCode=12645157&lang=FR)

[6] : Thèse de Fida Mrad, Décomposition de résidus de culture et de matériaux biosourcés : impact sur les communautés microbiennes des sols agricoles et les fonctions associées, 20/12/2019 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02420629/document>

# BIBLIOGRAPHIE

## Présentation du projet

<https://www.parc-naturel-chevreuse.fr/une-autre-vie-sinvente-ici/habitat-et-jardin-jardins-au-naturel/les-oyas-de-leau-pour-les-plantes>

[https://www.youtube.com/watch?v=-W2\\_scVvrOk&ab\\_channel=Lac%C3%A9deschamps](https://www.youtube.com/watch?v=-W2_scVvrOk&ab_channel=Lac%C3%A9deschamps)

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation\\_par\\_jarre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Irrigation_par_jarre)

<https://www.rustica.fr/l-eau-jardin/comment-fonctionne-l-arrosage-avec-oyas,15650.html>

[https://www.google.com/search?q=stress+hydrique&rlz=1C1CHBF\\_frFR859FR859&oq=stress+hydrique&ags=chrome..69i57j0l3j0i395l6.4940j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=stress+hydrique&rlz=1C1CHBF_frFR859FR859&oq=stress+hydrique&ags=chrome..69i57j0l3j0i395l6.4940j1j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)

<https://monjardinmamaison.maison-travaux.fr/mon-jardin-ma-maison/conseils-jardinage/oya-tout-savoir-systeme-irrigation-jarre-284164.html#item=1>

## Cendres

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Oligo-%C3%A9l%C3%A9ment>

<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-975-potasse-elements-essentiels-sol.html>

<https://urnabios.com/fr/la-cremation-est-toxique-ou-pas/#:~:text=Que%20contiennent%20les%20cendres%20humaines,phosphates%2C%20entre%20autres%20composants%20inertes.>

[https://www.energie-environnement.ch/conseils-de-saison/1412-toutes-les-cendres-ne-sont-pas-bonnes-repandre-dans-le-jardin#:~:text=Les%20cendres%20ne%20sont%20ni,engrais%20complet%2C%20ni%20du%20compost&text=Et%20que%20nous%20y%20retournerons%20tous%20%C3%A0%20notre%20mort.&text=De%20plus%20les%20cendres%20sont,tr%C3%A8s%20alcalines%20\(pH%20%C3%A9lev%C3%A9](https://www.energie-environnement.ch/conseils-de-saison/1412-toutes-les-cendres-ne-sont-pas-bonnes-repandre-dans-le-jardin#:~:text=Les%20cendres%20ne%20sont%20ni,engrais%20complet%2C%20ni%20du%20compost&text=Et%20que%20nous%20y%20retournerons%20tous%20%C3%A0%20notre%20mort.&text=De%20plus%20les%20cendres%20sont,tr%C3%A8s%20alcalines%20(pH%20%C3%A9lev%C3%A9)

[https://www.lefigaro.fr/jardin/questions-reponses/2017/08/22/30010-20170822QERFIG00125-la-cendre-de-bois-est-elle-benefique-pour-le-jardin.php#:~:text=Du%20fait%20de%20leur%20pH,b%C3%A9n%C3%A9fiques%20dans%20les%20sols%20acides.&text=Du%20fait%20de%20leur%20composition,\(pH%20inf%C3%A9rieur%20%C3%A0%207](https://www.lefigaro.fr/jardin/questions-reponses/2017/08/22/30010-20170822QERFIG00125-la-cendre-de-bois-est-elle-benefique-pour-le-jardin.php#:~:text=Du%20fait%20de%20leur%20pH,b%C3%A9n%C3%A9fiques%20dans%20les%20sols%20acides.&text=Du%20fait%20de%20leur%20composition,(pH%20inf%C3%A9rieur%20%C3%A0%207)

## Impression 3D

<http://www.primante3d.com/materiaux/>

<https://www.lesnumeriques.com/imprimante-3d/quels-sont-materiaux-utilises-en-impression-3d-a1884.html>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression\\_3D](https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression_3D)

<https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/techniques-fabrication-additive/qu-est-ce-que-la-fabrication-additive>

<https://www.3dnatives.com/technologies-3d/>

<https://www.3dnatives.com/narbon-souvenirs-3d-cendres-10082017/>

<https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive-polymeres/limpression-3d-stereolithographie-sla>

<https://www.makershop.fr/blog/wp-content/uploads/2017/02/comparaison-sla-dlp-vitesse.jpg>

<https://www.3dnatives.com/clip-revolutionner-impression-3d/>

<https://www.machines-3d.com/imprimante-3d-liquid-crystal-precision-dpp-xml-351-2206.html>

<https://www.a3dm-magazine.fr/news/autres-materiaux/procede-dimpression-3d-lom-sl>

## Matériaux

[https://www.m-habitat.fr/terrassement-et-fondation/maconnerie/les-eco-materiaux-materiaux-de-construction-ecologiques-4095\\_A](https://www.m-habitat.fr/terrassement-et-fondation/maconnerie/les-eco-materiaux-materiaux-de-construction-ecologiques-4095_A)

<https://www.geo.fr/environnement/la-biodegradabilite-une-notion-au-caeur-des-problematiques-environnementales-167485>

<http://cniid.fr/Biodegradable,246>

<https://www.hexagonevert.fr/le-bio-plastique-de-chanvre-le-futur-de-lemballage-vert/>

<http://natureplast.eu/fournisseur-de-bioplastiques/biocomposites-fibres-coproduits/>

<https://sensiseeds.com/fr/blog/plastique-de-chanvre-quest-ce-que-cest-comment-se-fabriquer-t-il/>

<http://natureplast.eu/le-marche-des-bioplastiques/production-des-bioplastiques/>

<https://www.3dnatives.com/filament-a-base-de-chanvre-3d-24102018/#!>

<https://nordicoil.fr/blog/voici-4-raisons-pour-lesquelles-le-plastique-de-chanvre-est-meilleur-que-le-plastique-ordinaire/>

[https://filament2print.com/fr/bois-ceramique/1190-pla-easywood.html#/719-couleur-pin/217-diametre-175\\_mm/260-format-bobine\\_500\\_g](https://filament2print.com/fr/bois-ceramique/1190-pla-easywood.html#/719-couleur-pin/217-diametre-175_mm/260-format-bobine_500_g)

<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/content/lexemple-du-pla>

<http://le-bioplastique.e-monsite.com/pages/iii-les-avantages-et-inconvenients.html>

<http://natureplast.eu/fournisseur-de-bioplastiques/biocomposites-fibres-coproduits/>

<http://natureplast.eu/le-marche-des-bioplastiques/production-des-bioplastiques/>

<https://www.linfordurable.fr/technomedias/suede-un-plastique-vegetal-base-de-pommes-de-terre-8176>

<https://agriculture.gouv.fr/des-algues-pour-reduire-la-dependance-au-plastique>

[https://www.youtube.com/watch?v=R9oJvL9Wj3o&ab\\_channel=LaQuotidienne](https://www.youtube.com/watch?v=R9oJvL9Wj3o&ab_channel=LaQuotidienne)

<http://www.algopack.com/algopack.php>

<https://www.ekopolis.fr/les-materiaux-biosources#paille>

<https://www.lesimprimantes3d.fr/filament-de-paille-ecologique-deux-fois-moins-cher-20140501/>

[https://www.boisetaillage.fr/images/documentationisolants/laine\\_mouton.pdf](https://www.boisetaillage.fr/images/documentationisolants/laine_mouton.pdf)

[http://www.vegetal-e.com/page.php?lg=fr&id\\_nav=129](http://www.vegetal-e.com/page.php?lg=fr&id_nav=129)

[https://www.notre-planete.info/actualites/2784-bouchons\\_liege\\_environment](https://www.notre-planete.info/actualites/2784-bouchons_liege_environment)

[https://www.latelierduliege.com/decouvrez-le-liege/#Resistant\\_et\\_souple](https://www.latelierduliege.com/decouvrez-le-liege/#Resistant_et_souple)

<https://www.carbiolice.com/bioplastique-et-pla/>

<https://www.lesoptimistes.fr/polyamide/#:~:text=Le%20polyamide%20a%20les%20m%C3%AAs,plan%C3%A8te%20et%20pour%20les%20hommes.&text=Les%20v%C3%AAtements%20fabriqu%C3%A9s%20%C3%A0%20partir,cause%20d'une%20pollution%20invisible>

<https://www.anycubic.com/collections/uv-resin/products/anycubic-plant-based-uv-resin>

<https://www.3dnatives.com/imprimante-3d-barilla-10052016/>

<https://www.mieux-vivre-autrement.com/le-colorant-vegetal-100-naturel-ideal-pour-donnez-des-couleurs-a-vos-recettes.html/amp>

<https://www.seppic.com/fr/sepifilm-pw>

# RESUME

Dans le cadre de notre parcours scolaire à Polytech Orléans en spécialité Innovation en conception et Matériaux, nous avons effectué un projet industriel de fin d'étude au cours de notre cinquième année. Il a été réalisé pendant dix semaines en collaboration avec l'ESAD, Ecole Supérieure des Arts et de Design d'Orléans avec Marie-Laure BOUCHETOU, directrice de notre spécialité et Caroline ZAHND, coordinatrice à l'ESAD. Ce projet sera poursuivi durant les années à venir afin de faire aboutir nos recherches à propos des crémations et du futur des cendres.

Nous avons eu pour mission de concevoir un matériau éco-responsable pour les urnes funéraires. Ces dernières devaient être construites à l'aide d'une imprimante 3D, avec des matériaux biosourcés, biodégradables et compostables domestiquement en moins d'un an.

Notre second objectif est de pouvoir proposer un ou plusieurs matériaux compatibles avec nos critères et d'instaurer des fondations solides pour nos repreneurs.

# ABSTRACT

To complete our educational background at Polytech Orléans in Design Innovation and Materials, our mission was to work on an industrial project during our fifth year. For ten weeks, we worked in collaboration with the ESAD, with Marie-Laure BOUCHETOU, headteacher of our specialty and Caroline ZAHND, coordinator at ESAD. This project will continue of years to carry out our research on cremation and the future of ashes.

Our main objective was to design an environmentally responsible material for funerary urns. The latter had to be made through the 3D-printing technology, while being bio-based, biodegradable and it has to be domestic composting in less than a year.

Secondly, we had to ensure that we could suggest one or more materials compatible with our criteria and lay the foundations, materials speaking, for the future people that will work on the project.