



Universidad de  
Oviedo



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.**

**GRADO EN INGENIERÍA (Mecánica)**

**ÁREA DE DISEÑO Y FABRICACIÓN**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Concepción de un producto inteligente a base de material programable**

**D. Rubén Magaz Fidalgo**  
**TUTOR: D. Miguel Ángel José Prieto**

**FECHA: (20/06/2015)**

# Índice

1. Motivación y ámbito. ....	2
2. Introducción. ....	3
3. Resumen del TFG. ....	4
3.1 Búsqueda de información ....	4
3.1.1 Materiales programables. ....	4
3.1.2 Impresión 4D. ....	5
3.1.3 Artículos relacionados. ....	6
3.2 Producto. ....	7
3.2.1 Presentación de la idea. ....	7
3.2.2 Desarrollo del producto. ....	7
3.2.3 Funcionamiento del producto. ....	8
3.2.4 Modelado CAD ....	9
3.2.5 Fabricación del producto. ....	9
3.2.6 Limitaciones del producto. ....	10
3.2.7 Ventajas e innovaciones presentadas por el producto. ....	10
3.2.8 Conclusión del trabajo desarrollado. ....	10
4. Proyecto original. ....	11

# 1. Motivación y ámbito.

Por la oportunidad que dan a los alumnos las becas Erasmus, tanto de aprender una lengua extranjera, como de trabajar con las universidades de destino. Se ha podido desarrollar este TFG en colaboración con la universidad francesa UTBM (Université de Technologie de Belfort Montbeliard).

Animado por la posibilidad de trabajar con el departamento de nuevas tecnologías de una universidad extranjera, así como de conocer y ampliar mis conocimientos en una tecnología desconocida y aún en desarrollo, se ha realizado este TFG en el ámbito de la tecnología de impresión 4D.

Este TFG no ha sido desarrollado solamente con la motivación de trabajar con nuevas tecnologías, sino también motivado por el reto personal de ser capaz de hacer un TFG en una lengua extranjera como el francés, lo cual también es muy interesante de cara a las empresas cuando se opta a un puesto de trabajo.

Además el sector de la impresión 3D está siendo uno de los más explotados en los últimos años. Por lo tanto se ha considerado que la nueva evolución de esta tecnología, que es la impresión 4D, es un terreno más que interesante para el desarrollo de este TFG.

## 2. Introducción.

Dentro del ámbito de los materiales programables y este nuevo tipo de tecnologías, es donde se ha desarrollado la tecnología de impresión 4D. La cual nos permite usar materiales con memoria de forma combinada con la tecnología de impresión 3D.

Para este proyecto se ha llevado a cabo el desarrollo de un producto a base de material programable con la impresión 4D. Dentro de este ámbito tan amplio se ha escogido el campo médico de la recuperación en lesiones de rodilla donde se ha tenido previa experiencia en este tipo de productos.

Para hacer posible el desarrollo de un producto, se ha usado la base de datos del laboratorio IRTES M3M de la UTBM, de la cual se han obtenido ciertos documentos para la fase de investigación previa al desarrollo del producto. Así como de artículos científicos publicados en internet.

Gracias a la UTBM se ha podido trabajar con una empresa de impresoras 3D como es STRATASIS, la cual colabora con esta universidad desarrollando la tecnología de impresión 4D, obteniendo datos reales de materiales y resinas más indicadas para el desarrollo de la prótesis para la recuperación de operaciones de ligamentos en la rodilla. Se ha procurado que estos materiales sean así mismo reciclables, para poder reutilizar estos materiales y que el producto sea lo más respetuoso posible con el medio ambiente.

Para finalizar, este producto busca la total integración de la tecnología de impresión 4D en el ámbito médico, lo cual nos proporcionará la adaptación del producto a cada cliente, algo que es muy útil en el campo de la medicina.

## 3. Resumen del TFG.

### 3.1 Búsqueda de información

La etapa inicial de este TFG ha consistido en una búsqueda de información del tipo de materiales a utilizar en este proyecto, ya que son materiales nuevos y normalmente no se conoce su funcionamiento, así como de la tecnología a utilizar. Este trabajo de búsqueda se ha dividido en varias fases.

#### 3.1.1 Materiales programables.

Los materiales programables tienen la capacidad de cambiar sus propiedades y su forma para adaptarse a las condiciones de su entorno o a las necesidades del usuario.

Estos tipos de materiales necesitan energía para realizar estos cambios. Estos diferentes tipos de energía pueden ser:

- Térmica
- Eléctrica
- Respuestas a cambios de presión, temperatura o condiciones ambientales

Se pueden controlar los cambios en los materiales a partir de sensores o bien determinar la estructura de los materiales para responder a los cambios en su entorno.

El fin de este tipo de materiales es el de poder trabajar junto a un tipo de unión programable la cual hace posible la adaptación de nuestro producto a las necesidades en cada instante. Los productos programables nos darán la capacidad de adaptar un solo producto a varias necesidades con el fin de facilitar la vida al usuario.

El futuro de este tipo de material es el de poder programarse en función de las necesidades del usuario. Esto será posible combinando pequeñas cadenas de elementos formados por estos materiales unidas entre sí por juntas programables, estos programas que modificaran estas uniones y por tanto las propiedades del material, se llaman “voxels”.

Utilizando este tipo de materiales, podríamos beneficiarnos de una auto regeneración del material convirtiendo a este mismo en reutilizable. Por otra parte si confiamos vidas humanas a construcciones con este tipo de material, y alguien cambia las programaciones de los “voxels” cuando haya personas en la construcción, se pueden poner vidas humanas en peligro.

### 3.1.2 Impresión 4D.

La tecnología que se está desarrollando como impresión 4D, tiene como base a la tecnología 3D, conservando además todas las ventajas con respecto a los métodos de fabricación tradicionales.

Con la combinación de las nuevas propiedades de los materiales programables y la impresión 3D, se podrán diseñar productos muy complejos capaces de adaptarse a las necesidades del usuario. Para poder hacer esta tecnología realidad, la marca Stratasis en colaboración con el MIT y otras universidades como la UTBM, trabajan para desarrollar la tecnología de impresión 4D.

Según sus investigadores, las fases de investigación se deben desarrollar para mejorar la maniobrabilidad de esta tecnología para el usuario en los aspectos siguientes:

1. Diseño: cómo preparar los futuros programas CAD para las nuevas propiedades de los materiales.
2. Materiales: cómo fabricar y preparar estos materiales.
3. Unión entre voxels: cómo podemos desarrollar los programas entre las diferentes fases del producto.
4. Energía: cómo vamos a proceder para crearla, guardarla y utilizarla para modificar los voxels.
5. Electrónica: necesitaremos un gran rendimiento en productos de muy pequeña escala.
6. Cómo podremos comunicar los voxels entre diferentes piezas.
7. Adaptabilidad a los diferentes entornos: encontrar la manera de diseñar y comunicar los voxels según las diferentes condiciones ambientales.
8. Ensamblaje: fuerzas exteriores necesarias para activar los voxels.
9. Estandarización: estandarizar voxels y sistemas.
10. Certificaciones: hacer nuevas normas o adaptar las antiguas a las nuevas necesidades.
11. Seguridad física y cibernética: asegurar la seguridad del usuario en todos los aspectos.
12. Fabricación: desarrollar las maquinas ya existentes para adaptarse a estos nuevos productos.
13. Caracterización: cómo se pueden caracterizar los voxels y los nuevos equipos.
14. Reciclaje: reutilizar la materia antigua para nuevos productos.

Una vez desarrollados estos aspectos en la impresión 4D se podrán construir nuevos productos como se imaginan en el MIT.

Por el momento estos materiales tienen las capacidades muy limitadas, aunque nos ofrecen unas propiedades nuevas y muy interesantes como con las que se han trabajado en este TFG.

### 3.1.3 Artículos relacionados.

Dentro del artículo proporcionado por la UTBM “Active origami by 4D printing” se encuentran demostraciones matemáticas de las formas de trabajar con la impresión 4D. Dentro de este artículo se encuentran los diferentes parámetros de los polímeros con memoria de forma, así como la manera de trabajar con ellos.

En el artículo mencionado, se encuentran los resultados de las experiencias de los autores con estos materiales y sus conclusiones. Todo ello plasmado en fórmulas que nos dan el comportamiento de los materiales como se explica en el artículo de los anexos.

Por último, indicar que gracias a este trabajo, y a otros como este, hoy en día se empiezan a desarrollar productos programables con polímeros.

Por otra parte, existen productos ya comercializados con este tipo de materiales. La empresa Nervous Systems, en los Estados Unidos, ha comercializado un producto llamado Kinematics. Este es un tipo de productos que utilizan los materiales con memoria de forma, capaces de recuperar su forma inicial después de una deformación. Esta empresa da también la oportunidad de imprimir en nuestras casas cierto tipo de productos, siempre y cuando el usuario tenga una impresora 3D en su casa.

Dentro del sitio web de esta empresa (<https://n-e-r-v-o-u-s.com/index.php>), en la pestaña de proyectos, se puede encontrar el proyecto Kinematics. Este tipo de productos, desarrollados mediante esta tecnología, empiezan a aproximarse a los objetivos de la tecnología 4D.

Por otra parte, en el artículo titulado “Nanolet”, se pueden encontrar diferentes resultados de estudios con materiales programables y sus respuestas a diferentes estímulos (radiación y térmicos). En este artículo, están reflejados también las medidas del tiempo de ensamblaje de diferentes formas impresas con la tecnología 4D, dependiendo de diferentes estímulos térmicos. Así como el tiempo de recuperación a su forma inicial.

## 3.2 Producto.

### 3.2.1 Presentación de la idea.

Gracias a experiencias anteriores en España, se ha escogido el dominio médico para este TFG. Dentro de este ámbito tan amplio, y a causa de experiencias pasadas con lesiones de rodilla, se ha desarrollado una prótesis para la inmovilización y la reeducación de la articulación, después de una operación en la misma. El producto ha de cumplir las especificaciones propuestas por el TFG siguientes:

1. El producto debe ser completamente imprimible.
2. El producto debe utilizar la tecnología 4D.
3. Es necesario que se fije la rodilla sin permitir el movimiento.
4. La prótesis ha de adaptarse perfectamente a los usuarios.

### 3.2.2 Desarrollo del producto.

Una vez definida la idea, se continúa definiendo las diferentes partes de las que estará compuesto el producto, así como los materiales que se utilizarán. Estas partes siempre deber verificar las especificaciones del producto. Las partes de las que se compone el producto son las siguientes:

1. Batería extraíble.
2. Unidad de control.
3. Soporte superior.
4. Soporte inferior.
5. Soporte lateral.
6. Fijaciones.

Seguidamente, se han de definir las diferentes funciones de cada parte del producto como se muestra a continuación:

1. Batería: alimentación del sistema eléctrico de la prótesis.
2. Unidad de control: regulación de los movimientos de rehabilitación de la prótesis.
3. Soporte superior: fijar la parte superior de la pierna a los soportes laterales y a las fijaciones, guardar la unidad de control y la batería, transmitir la electricidad a través de un circuito impreso gracias a la plastrónica.
4. Soporte inferior: fijar la parte inferior de la pierna a los soportes laterales y a las fijaciones.



5. Soportes laterales: conectar los soportes superior e inferior, conservar la pierna recta y guiar los movimientos de rehabilitación de la pierna, controlados eléctricamente.
6. Fijaciones: unir los soportes superior e inferior a la pierna.

### 3.2.3 Funcionamiento del producto.

Para poder comprender bien el funcionamiento de este producto, hace falta saber que después de una operación de rodilla, esta no debe moverse. Unos días más tarde, la articulación ha de empezar a moverse gradualmente.

Por esta razón, se ha elegido la fibra de carbono programable para los soportes laterales, ya que esta es capaz de guardar la pierna rígida además de moverse usando como estímulo la electricidad.

La prótesis debe fijar la pierna en posición rígida de reposo durante varios días. A continuación, cuando el médico lo considere oportuno, se comenzará con la fase de rehabilitación en la articulación. Esto tendrá lugar cuando el médico instale en la prótesis, en las cavidades destinadas a ello, la batería y la unidad de control en el soporte superior del producto.

Gracias a la unidad de control, se podrá controlar el tiempo y la intensidad de la corriente eléctrica que llega a los soportes laterales, modificando así las propiedades del material programable e iniciando los movimientos de rehabilitación de la rodilla.

Con esta tecnología, se podrá controlar el ángulo de doblez de la rodilla, y por lo tanto las diferentes fases y ejercicios de rehabilitación. De esta forma, se evita que el paciente tenga que desplazarse todos los días a fisioterapeuta, lo cual además de ser incómodo, es un peligro para el paciente, exponiéndole a riesgos innecesarios durante su recuperación.

Por último, como ventajas más significativas, se puede indicar que se suprimirán la necesidad de máquinas de rehabilitación caras y muy específicas. Así como que cada prótesis estará diseñada para cada usuario adaptándose a cada cliente de manera exacta.

### 3.2.4 Modelado CAD

Para el diseño 3D del producto se ha utilizado el software CATIA V5 R20 proporcionado por la UTBM. Antes de comenzar con el diseño de la prótesis, se han de tomar medidas de la pierna del usuario, en este caso se modelará una genérica. Aunque en el apartado siguiente del resumen se verá cómo se han de tomar las medidas para su posterior fabricación.

Se ha comenzado por la modelización del interior realizado en silicona RTV, con un espesor de 5mm para asegurar el confort del usuario. Continuando con las capas exteriores de los soportes inferior y superior, fabricados en polímero ABS, el cual dotará de la rigidez necesaria a la prótesis. Incorporando en el soporte superior una capa con el circuito electrónico así como los emplazamientos de la unidad de control y la batería.

La última parte a modelar son los soportes laterales, que realizarán el trabajo de reeducación de la articulación. Están compuestas de capas, estas mismas, compuestas de otras 3 capas de 3mm cada una (2 mm de resina, 0.5mm de una plancha de fibra de carbono y 0.5mm de resina programable).

La etapa siguiente de la modelización consiste en el ensamblaje de las diferentes partes del producto. En esta etapa se usará el asistente de ensamblaje de CATIA V5 R20, donde se establecerán las relaciones entre las partes, así como las restricciones de movimiento entre las partes.

Finalmente, es necesario establecer las relaciones cinemáticas del producto. Estas relaciones permiten doblar la articulación durante la fase de rehabilitación de la lesión.

### 3.2.5 Fabricación del producto.

Dentro del ámbito de la producción, se ha desarrollado un producto totalmente imprimible, como condición indispensable dentro de este TFG, para facilitar la adaptación a cada usuario. Para obtener esta última característica, se necesita la ayuda de un nuevo método de fabricación, que ayuda a mejorar la adaptabilidad del producto, a partir de ella se desarrollarán los puntos siguientes:

1. Se necesitará utilizar un escaneado de la pierna para poder adaptar perfectamente la prótesis al usuario. Utilizando un escáner de prototipado rápido en 3D, se consigue un producto más adaptable a cada persona. Para facilitar el paso del escáner a la adaptación del modelo CAD, se utilizarán adhesivos que son puntos de referencia en

el modelo 3D. Estos adhesivos serán colocados por los médicos en los puntos clave de medidas en la pierna.

2. Seguidamente se adaptan las medidas tomadas en el paso anterior, esto es posible mediante un software que adapta las medidas del usuario a las de la prótesis generada con las medidas generales en el modelo CAD.
3. Impresión del producto.
4. Mecanizado de las imperfecciones causadas por la impresión del producto.
5. Colocación de los velcros de sujeción.
6. Colocación de la batería y de la unidad de control (cuando el médico quiera iniciar la etapa de recuperación).

### 3.2.6 Limitaciones del producto.

Con relación al proceso de fabricación y de las limitaciones del material, se obtienen ciertas limitaciones a conocer del producto:

- El ángulo de doblaje limite por limitaciones de deformación de los materiales utilizados en el producto.
- Las operaciones de mecanizado para eliminar imperfecciones en el producto, pero en el entorno de un hospital, es difícil de implementar a causa de la suciedad que genera esta operación.

### 3.2.7 Ventajas e innovaciones presentadas por el producto.

Gracias a esta nueva tecnología, se pueden facilitar las tareas ligadas a este tipo de operaciones como son:

- La extracción de sondas utilizadas para controlar los líquidos en la articulación.
- Facilidad de seguimiento de la evolución de la cicatrización de la herida.
- Adaptabilidad a las diferentes operaciones.
- Cambio de vendajes.
- Resistente al agua.
- Adaptabilidad a cada usuario.
- Movilidad controlada.
- 100% reciclable.

### 3.2.8 Conclusión del trabajo desarrollado.

Para concluir, este proyecto ha sido muy instructivo, ya que se han trabajado con un nuevo tipo de materiales, así como con programas y técnicas de diseño muy innovadoras. También se ha trabajado con tecnología de impresión 3D y 4D, las cuales, están actualmente siendo muy demandadas en el mercado laboral.

Con respecto al producto, se ha trabajado dentro de cuadro médico, el cual siempre resulta interesante. Así como trabajar con la fibra de carbono y materiales composites, los cuales, además de ser reciclables, no presentan efectos de fatiga y tienen un coste mucho más bajo que el de los metales.

Esperando que este proyecto y los documentos asociados a él ayuden a futuros estudiantes a aumentar sus conocimientos en este tipo de materiales programables, y les ayude al desarrollo de nuevos productos utilizando esta nueva tecnología 4D.

## 4. Proyecto original.



**UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD**

## Conception d'un produit intelligent à base de matériau programmable

**Rapport final de TW51– P2015**

**MAGAZ FIDALGO Rubén** Erasmus

**Département Génie Mécanique et Conception  
(GMC)**

Superviseur UTBM :

Mr Frédéric DEMOLY

# Table des matières

Table des Figures .....	3
Introduction.....	4
Travail de recherche .....	5
Matériaux programmables.....	5
Impression 4D.....	6
Origami et Kinematics. ....	11
Nanolett.....	13
Produit.....	14
Présentation de l'idée. ....	14
Développement du produit. ....	14
Fonctionnement du produit. ....	16
C.A.O.....	17
Fabrication du produit.....	19
Contraintes du produit .....	20
Avantages et innovations .....	21
Conclusion du travail développé .....	22

# Table des Figures

Figure 1 : Petit chaîne de matériaux programmable.....	6
Figure 2 : Ventages des nouvelles technologies par rapport aux méthodes de fabrication classiques	10
Figure 3 : Exemple d'un objet produit avec l'impression 3D .....	10
Figure 4 : Doublage d'une lamine de matériau avec la mémoire de forme. ....	11
Figure 5: Exemples des produits faites en utilisant la technologie 4D.....	12
Figure 6: Web Nervous System (Kinematics project).....	12
Figure 7 : Exemples des réponses différentes matériaux à l'irradiation.....	13
Figure 8 : Mesure du temps d'assemblage et désassemblages d'un produit 4D.....	13
Figure 9: Premier design à main levée. ....	14
Figure 10 : Description des différentes parties du produit. ....	15
Figure 11: Définitions des fonctions de chaque partie du produit .....	15
Figure 12: Machine de réhabilitation pour les blessures de genou. ....	16
Figure 13 : emplacement exact où il faudra prendre les mesures pour la prothèse. ....	17
Figure 14 : Intérieurs des supports inférieur et supérieur respectivement.....	17
Figure 15 : Support supérieur et inférieur respectivement .....	18
Figure 16 : Couche de matériel programmable et fixation latéral complète respectivement.....	18
Figure 17 : assemblage final 1 .....	19
Figure 18 : assemblage final plie .....	19
Figure 19: Scanner 3D.....	20
Figure 20 : Pli d'une barre .....	21

# Introduction

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Frédéric DEMOLY et Madame Elise GRUHIER pour leur aide et leur disponibilité lors de mon projet tout au long de ce semestre, et pour avoir eu l'opportunité de travailler sur cette nouvelle technologie.

Dans le cadre de l'UV TW51 je développe un nouveau produit avec des matériaux programmables avec l'aide du département M3M de l'UTBM et le logiciel CAO CATIA V5 R20. Ce type de matériaux est une approche de comment va se développer la technologie des matériaux dans les prochaines années.

Pour la fabrication de notre produit nous allons utiliser la technologie STRATASYS d'impression 4D, avec la quelle travail l'UTBM. En utilisant ce type de technologie, l'objectif est développer un produit intelligent qui s'adapte à son environnement selon le besoin de l'utilisateur. Pour ce projet, les matériaux ne doivent pas être inertes, et doivent avoir la capacité de modifier leur structure ou leur forme afin de s'adapter aux besoins des clients et de son environnement. Pour rendre possible ce changement de structure, propriétés, ou forme, l'objet a besoin de recevoir une stimulation qui peut être électrique, thermique, lumineuse, électromagnétique, etc. L'objectif de mon projet est développer ce produit et de contrôler les stimulations qui vont rendre possible le processus de mouvement de l'assemblage de notre produit.

Mon projet étant une suite du travail réalisé par le MIT (Massachusetts Institute of Technology). Nous avons trouvé une nouvelle application pour ce type de produit, et l'avons développée.

Vous trouverez dans la suite de ce rapport la procédure de développement de mon produit réalisé lors de ce semestre.



# Travail de recherche

## Matériaux programmables

Les matériaux programmables ont la capacité de changer leurs propriétés et leur forme pour s'adapter aux conditions de leur environnement ou aux besoins de l'utilisateur.

Ces types de matériaux ont besoin d'énergie pour effectuer ses changements. Ces différents types d'énergie peuvent être :

- Thermique
- Electrique
- Réponses aux changements de pression et température et des conditions environnementales.

Nous pouvons contrôler les changements des matériaux à partir des senseurs ou déterminer la structure des matériaux pour répondre aux changements de son environnement.

L'objectif final de ce type des matériaux est pouvoir travailler ensemble avec un type liaison programmable lequel rend possible l'adaptation de notre produit aux nos besoins à chaque instant. Les produits programmables nous donneront la capacité d'adapter un seul produit a plusieurs besoins afin de faciliter notre vie.

Le futur de ce type de matériel est pouvoir se programmer en fonction des besoins de l'utilisateur. Selon le MIT, ils imaginent un futur avec des petites chaînes d'éléments comme présentées sur la Figure 1. Celles-ci pourront avoir une relation les uns par rapport aux autres de façon se modeler en produits différentes grâce la programmation des liens. Les liens seront petites chaînes de matériaux programmables que l'on pourra modifier avec des petites ``voxels`` (petits programmes qui permettent de modifier les propriétés et la forme des matériaux, et construire une relation entre différentes pièces), comme on peut voir dans le film Big Hero 6 (Disney), similaire au MIT imagine le futur.

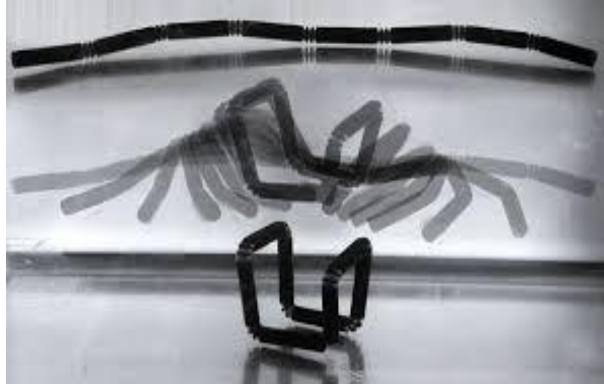


Figure 1 : Petit chaîne de matériaux programmable.

Les avantages de ce type de produit sont nombreux. Le premier, le plus important, est la capacité de régénération autonome d'un produit en utilisant des voxels de réparation incluses dans le programme initial. Cette propriété nous permet de recycler les matériaux en utilisant les anciens produits avec de nouveaux voxels pour constituer de nouveaux produits, et permettre au produit d'avoir une nouvelle vie grâce à ce recyclage.

Le problème le plus important du MIT est que si nous pouvons construire un bâtiment avec matériaux programmables en le programmant, quelqu'un pourrait effectuer une attaque informatique et détruire le produit très rapidement. Ce type de risque est très élevé aujourd'hui, parce que nous sommes dans une ère informatique où quelqu'un peut créer un tel programme et mettre en danger beaucoup des vies humaines.

## Impression 4D.

L'impression 4D a comme base l'impression 3D. Elle a tous les avantages par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles :

Pour mieux connaître les avantages et les inconvénients de cette technologie, nous pouvons regarder le tableau de comparaison entre la technologie 4D et la production de pièces en 3D.

Advantages over Traditional Manufacturing	3D Printing	4D Printing
Increased product design freedom	Traditionally, product designs are constrained by the limitations of the machines that will produce them. An immediate benefit of 3DP is the ability to create complex	4DP could offer the ultimate state of design freedom. With the ability to shape-shift physical objects from one form to another at will, 4DP goes one step beyond the design of

	<p>shapes that cannot be produced by any other means. Fundamentally, 3DP processes allow designers to selectively place material only where it is needed, thus saving weight and material by creating bone-like structures.<sup>31</sup> The design freedom thus extends to the internal structure of a product, not just its outside shape.</p>	<p>static objects by adding dynamics and performance capabilities into the material itself. Preliminary results shown by MIT already demonstrate significant adaptability from nearly any shape to any other. Further, 4DP will allow parts to adapt their geometry and structure, on-demand, as forces and requirements change, further increasing material efficiency.</p>
<p>No cost for complexity</p>	<p>In traditional manufacturing, the more complicated a product, the more expensive it is to manufacture. In 3DP, “fabricating an ornate and complicated shape does not require more time, skill or cost than printing a simple block.”<sup>32</sup> 3DP is a “single tool” process—no matter the desired geometry, there is no need to change any aspect of the process. This, in effect, makes shape complexity free—there is no additional cost or lead time between making an object complex or simple.</p>	<p>Once processes are streamlined, 4DP would require no additional cost or time to embed actuation, logic, and sensing into printable parts. This has significant implications for electronics-like capabilities and manufacturing/ assembly processes for robotics and other electromechanical devices.</p>
<p>On-demand production in batches of one</p>	<p>A given manufacturing facility is capable of printing a huge range of products without retooling—and each printing run can be customized without additional cost. Moreover, products can be printed on demand without the need to build-up inventories of products and spare parts.</p>	<p>Similar to 3DP, products can be customizable in batches of one or more since 4DP won’t add complexity or cost to the printing process itself.</p>
<p>From mass production to mass customization</p>	<p>Since printing one-of-a-kind products is no more costly than mass-producing the same object, 3DP technology enables the design and efficient manufacture of personalized products. This unique capability of 3DP is driving a transition from mass production to mass customization, where each item produced is customized</p>	<p>Personalizing products would be a particular strength of 4DP. Several examples discussed in the main text highlight the capabilities of 4DP— universal spare parts, morphable electronics, user-responsive products, environmentally adaptive structures, etc. — all these and more may be possible with 4DP.</p>

	for the user at little or no additional production cost.	
Simplification of manufacturing process	Since 3DP creates physical products directly from a standardized digital file, these computer-controlled processes require a low level of operator expertise and reduce the amount of human interaction needed to create an object. In fact, the processes often operate unmonitored. This allows for overnight builds and dramatically decreases the time and human precision to produce products—thus reducing the time between design iterations.	With 4DP, the manufacturing processes become even simpler than 3D printing. Extremely simple structures can be printed and then activated by external stimulus to change into complex functional structures and systems. Further, the printed part can now be produced, shipped, and left unmonitored while it senses and responds physically to its surrounding environment.
From making prototypes to manufacturing finished products	As material properties and process repeatability improved, 3DP technologies' use has evolved from solely creating prototypes to fabricating parts for functional testing, to creating tooling for injection molding and sand casting, and finally, to directly producing end-use parts.	Once 4DP materials have been created and embedded with dynamic functionality, finished products would be more the expectation than the exception with 4DP.
Eliminating supply chains and assembly lines for many products	The final product—or large pieces of a final product such as a car—can be produced by 3DP in one process, unlike conventional manufacturing in which hundreds or thousands of parts are assembled. And those parts are often shipped from dozens of factories from around the world—factories that may have in turn assembled their parts from external suppliers.	Similar to 3DP, supply chains and assembly lines could dramatically change or, in some cases, become obsolete with widespread adoption of 4DP.
Designs, not products, move around the world	Digital files can be printed anywhere by any printer that meets the designed parameters. The Internet first eliminated distance as a factor in moving information instantly across space. Just as a written document can be emailed as a PDF and an identical copy printed in 2 dimensions, an “STL” design file can be sent instantly to the	Designs and programs would digitize our world with 4DP. The ability to take a collection of voxels anywhere in the world, access the program in the cloud and then instruct those voxels to form a multifunctional object offers a game-changing design-to-production cycle.

	<p>other side of the planet via the Internet and printed as an identical 3-dimensional physical object. A digital file of bits can be rematerialized into a physical object composed of atoms.</p>	
<p>Instant production on a global scale</p>	<p>The representation of physical artifacts with a digital file enables rapid global distribution of products, thus potentially transforming product distribution much in the same way the MP3 did for music. The digital file can be sent to any printer anywhere that can manufacture any product within the design parameters of the file—i.e., which can print the size, resolution, and materials called for in the file.</p>	<p>Voxels and their respective designs and programs would decouple the need for traditional manufacturing on site through 4DP. Digital files would be sent anywhere in the world with the right collection of voxels to enable matter formation on demand. Recycling of voxels into other 3D objects, as described in the main text, could reduce the need for further shipping of additional voxels.</p>
<p>A major boost to innovation</p>	<p>The rise of 3DP will likely lead to the reinvention of many old products, as well as to extraordinary new innovations. Since 3DP processes can print virtually anything that can be designed on a computer—thus eliminating the limitations posed by machine tools, stamping, and molding—engineers and designers will no longer be limited in their designs because of previous manufacturing technologies. New hybrid materials, such as nanocomposites via 3DP, are being researched to take design and material properties manipulation even further</p>	<p>4DP would inherently boost innovation. Design and fabrication of voxels would become a new industry as new materials and functionality are enabled beyond what exists today with traditional manufacturing processes. We are only just scratching the surface in imagining the possibilities of 4DP. The innovation created by 4DP and related disruptive industries and military applications will be profound.</p>
<p>Stimulation of new interest in design and engineering</p>	<p>The direct relationship between the designer and the product—a relationship that has been constrained by the past 200 years of industrial production methods— will be similar to the relationship between software engineers and their products. As a result, interest in engineering and industrial design has</p>	<p>Freeing the student to think at the level of multifunctional dynamic objects and then full material programming through 4DP would stimulate a new generation of engineers and scientists. An entirely new field of “matter programmers” may emerge, similar to today’s computer programmers. Further, students and</p>

	increased, as has happened in the field of computer science and software engineering over the last half century.	researchers can now learn and discover through dynamic and intelligent physical models—offering new educational models for the future.
--	--	--

Figure 2 : Avantages des nouvelles technologies par rapport aux méthodes de fabrication classiques

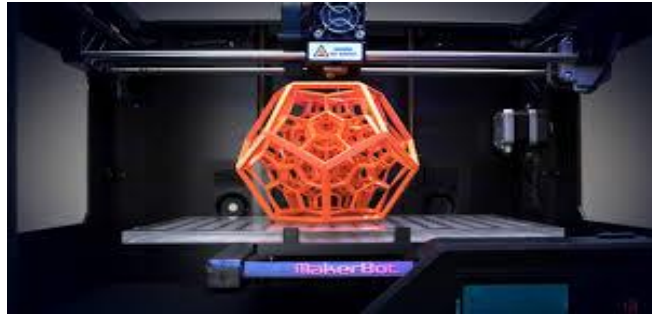


Figure 3 : Exemple d'un objet produit avec l'impression 3D

Avec la combinaison des nouvelles propriétés des matériaux programmables et l'impression 3D, nous pourrions designer des produits très complexes capables de s'adapter à nos besoins. Pour pouvoir faire de cette technologie une réalité la marque Stratasis travaille avec le MIT pour arriver au développement de la technologie 4D.

Selon le document (the next wave : 4D printing. Programming the material world), les phases d'investigation doivent se développer pour améliorer la maniabilité de la technologie pour l'utilisateur dans les cadres suivants:

1. Design : comme préparer les futurs logiciels CAD pour les nouvelles propriétés des produits.
2. Matériaux : comme créer et préparer les matériaux.
3. Adhésion entre les voxels : comment nous pouvons développer les programmes entre les différentes phases du produit.
4. Energie : comment nous allons procéder pour créer, garder and utiliser l'énergie pour activer les voxels.
5. Electronique : besoin d'un grand rendement à petite échelle.
6. Comment nous pouvons communiquer avec les voxels et les différentes pièces.
7. Adaptation aux différents environnements : trouver la façon de designer et communiquer les voxels selon les différentes conditions ambiantes.
8. Assemblage : forces extérieures nécessaires pour activer les voxles.
9. Standardisation : standardiser voxels et systèmes.

10. Certifications : faire de nouvelles normes ou adapter les anciennes aux nouveaux besoins.
11. Sécurité physique et cybernétique : garder la sécurité de l'utilisateur dans tous les aspects.
12. Fabrication : développer les machines déjà existantes pour s'adapter à ce nouveau type de produit.
13. Caractérisation : comment nous pouvons caractériser les voxels, et le nouvel équipement.
14. Recyclage : réutiliser l'ancienne matière pour nouveaux produits.

## Origami et Kinematics.

Dans l'article « Active origami by 4D printing » nous trouvons les démonstrations mathématiques de façon à travailler avec l'impression 4D. Dans cet article nous découvrons les différents paramètres des polymères avec la mémoire de forme (figure 3) et comment nous pouvons travailler avec eux.

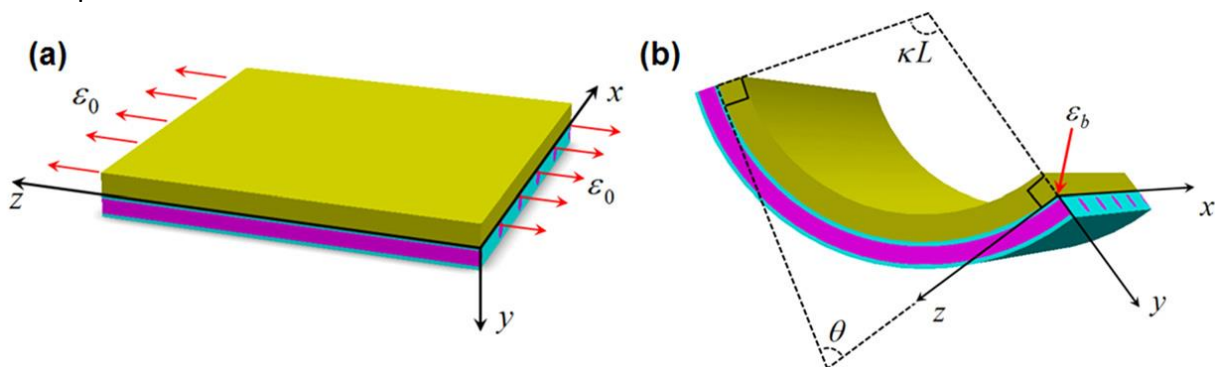


Figure 4 : Doublage d'une lamine de matériau avec la mémoire de forme.

Dans cet article nous trouvons des résultats des expériences des auteurs de ce type de matériau et ses conclusions. Ils ont développé des formules pour pouvoir travailler avec certains matériaux comme expliqué dans les annexes de l'article.

Grâce à ce travail, ils sont capables de développer des produits programmables avec des polymères comme nous le voyons sur la figure 4.

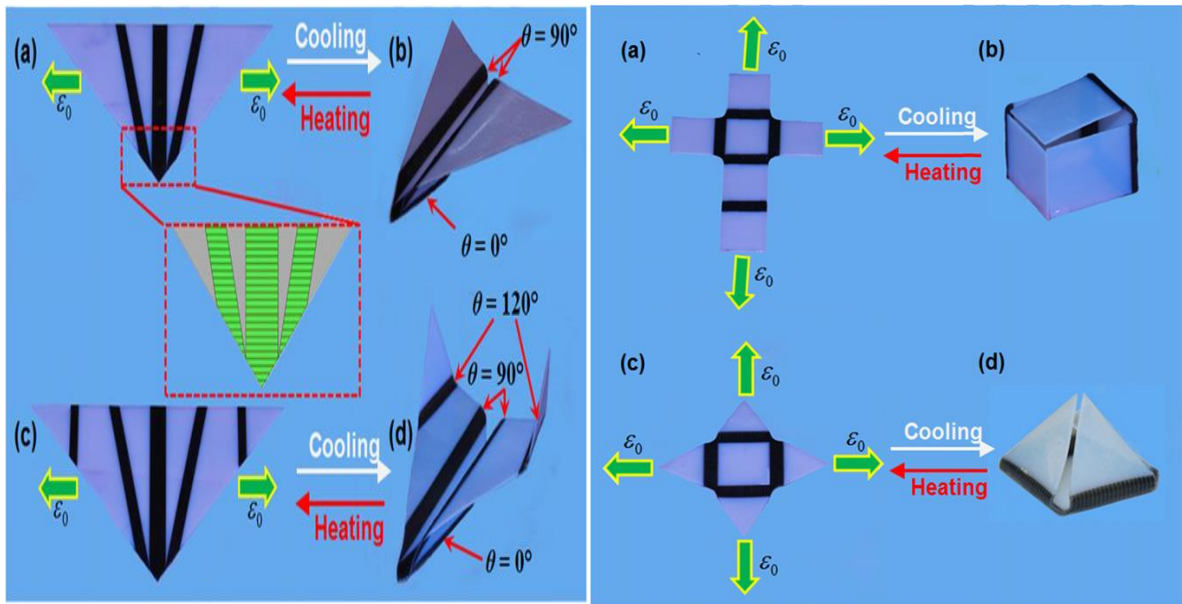


Figure 5: Exemples des produits faites en utilisant la technologie 4D.

Il y a également des produits déjà commercialisés, l'entreprise Nervous System aux Etats-Unis a commercialisé un type de produit appelé Kinematics. C'est un type de produit avec la mémoire de forme, il est capable de reprendre sa forme après une déformation. Cette entreprise nous donne aussi la possibilité d'imprimer chez nous certain type de produits si nous sommes équipés d'une imprimante 3D.

Dans le site web de cette boîte (<https://n-e-r-v-o-u-s.com/index.php>), dans le dossier projets, nous pouvons trouver le projet Kinematics. Ce type de produit commence à se rapprocher des débuts de la technologie 4D.

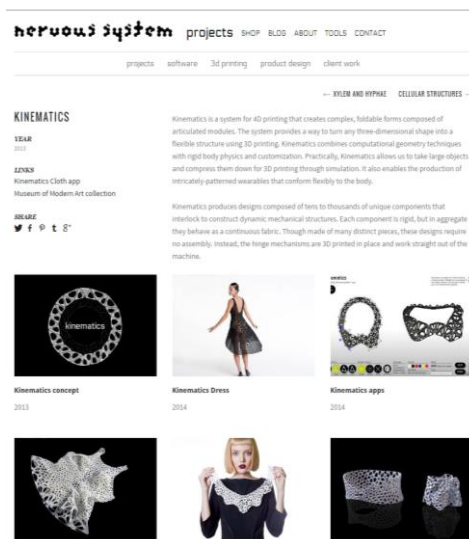


Figure 6: Web Nervous System (Kinematics project)



# Nanolett

Dans cet article nous pouvons trouver différents résultats des études avec les matériaux programmables et des différentes réponses aux différentes stimulations (radiation et thermique).

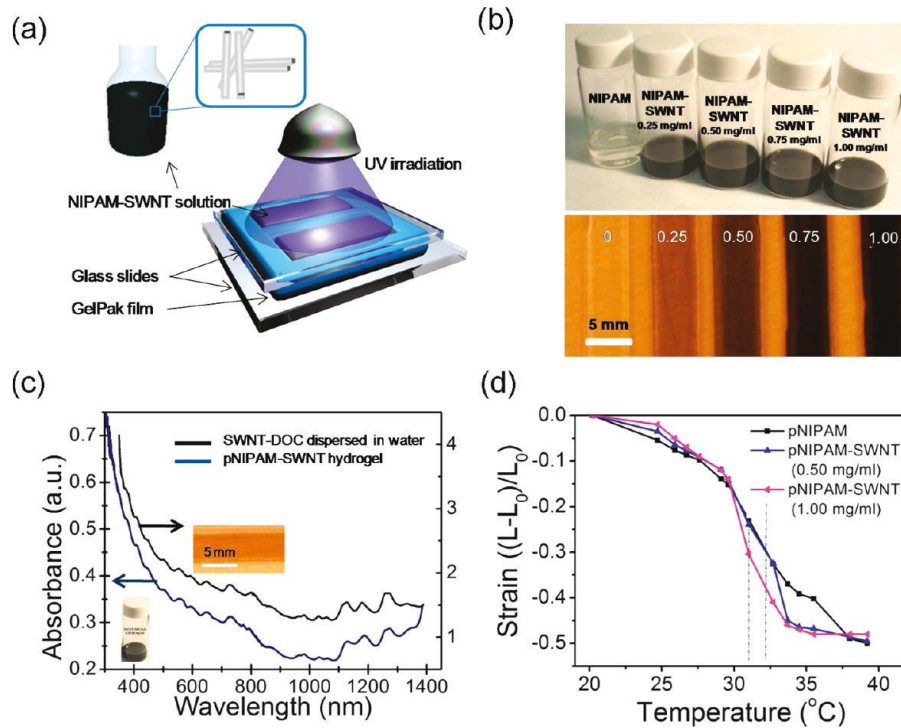


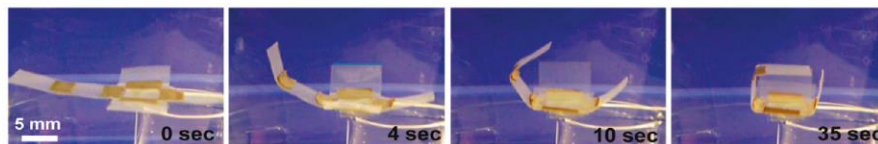
Figure 7 : Exemples des réponses différents matériaux à l'irradiation

Dans cet article, il y a aussi des mesures de temps d'assemblage des différents produits imprimés avec la technologie 4D aux stimulations thermiques.

## (a) Fabrication scheme for folding cube



## (b) Cube folding at 48°C in water



## (c) Cube unfolding upon cooling down

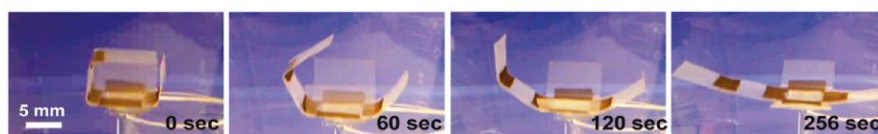


Figure 8 : Mesure du temps d'assemblage et désassemblages d'un produit 4D.

# Produit.

## Présentation de l'idée.

Grâce à mon expérience en Espagne, dont d'autres projets traités, j'ai choisi le domaine médical pour ce projet. Dans ce cadre, et par mon expérience avec des blessures au genou, j'ai développé une prothèse pour l'immobilisation et la rééducation après une opération dans l'articulation. Le produit doit vérifier certaines contraintes:

1. Le produit doit être complètement imprimable.
2. Le produit doit utiliser la technologie 4D.
3. Il faut fixer le genou et ne pas permettre le mouvement.
4. La prothèse doit s'adapter parfaitement aux clients.

Dans la figure 6 nous voyons le premier design à main levée, à partir duquel j'ai développé et réalisé le model 3D avec le logiciel CATIA\_V5\_R20 et défini les spécifications.

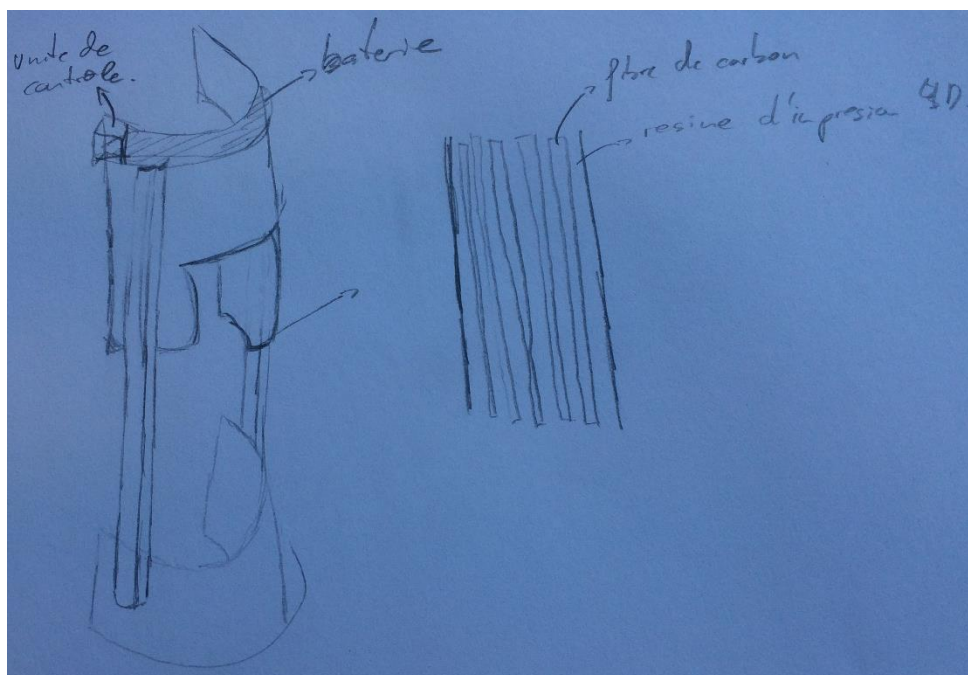


Figure 9: Premier design à main levée.

## Développement du produit.

Une fois l'idée de développement définie, il faut poursuivre en définissant les différentes parties composant le produit, et les différents matériaux que nous allons utiliser.

Un des objectifs du projet, et que toutes ces parties doivent être imprimables avec des matériaux plastiques et composites en utilisant la technologie 4D.

Dans le tableau 1 (figure 7) nous pourrions vérifier les différentes parties du produit et ses caractéristiques :

Référence	Définition	Nombre d'unités	Matériau	Caractéristiques
1	Batterie	1	Aluminium	Légèreté et flexibilité
2	Unité de contrôle	1	Composites	Programmable, amovible et légèreté
3	Support supérieur	1	Polymère ABS plus silicone RTV	Être confortable, intégrer le circuit électronique, légèreté et recyclable
4	Support inférieur	1	Polymère ABS plus silicone RTV	Être confortable, légèreté et recyclable
5	Support latéral	2	Fibre de carbone programmable et résine	Rigide, permettre le mouvement seulement dans la phase de rééducation et légèreté
6	Fixation	4	Velcro	Adaptabilité et légèreté

Figure 10 : Description des différentes parties du produit.

Tout en suite, nous allons définir les différentes fonctions de chaque partie du produit dans le tableau 2 (figure 8):

Reference	Définition	Fonction
1	Batterie	Alimentation du système électrique de la prothèse
2	Unité de contrôle	Régulation de l'électricité et des mouvements de réhabilitation de la prothèse
3	Support supérieur	Fixer la partie supérieure de la jambe aux supports latéraux et aux fixations, fixer l'unité de contrôle et la batterie et transmettre l'électricité grâce à un circuit imprimé avec la technologie de la plastronique
4	Support inférieur	Fixer la partie inférieure de la jambe aux supports latéraux et aux fixations
5	Support latéral	Fixer les deux supports de la jambe, garder la jambe rigide et aider à l'articulation avec des mouvements contrôlés par électricité
6	Fixations	Fixer l'union entre le support supérieur et inférieur avec la jambe

Figure 11: Définitions des fonctions de chaque partie du produit

## Fonctionnement du produit.

Pour pouvoir bien comprendre le fonctionnement de cette prothèse, il faut savoir qu'après une opération de l'articulation, le genou ne doit pas bouger. Quelques jours plus tard, la rééducation doit commencer graduellement.

Pour cette raison, nous choisissons la fibre de carbone programmable comme matériau du support, car il est capable de garder la jambe rigide et en plus elle peut se bouger grâce à l'électricité.

La prothèse doit fixer la jambe pendant plusieurs journées. Ensuite, quand le médecin décide commencer la phase de rééducation, il va installer la batterie et l'unité de contrôle dans la partie support supérieure de la prothèse.

Grâce à cette unité de contrôle, nous pouvons contrôler le temps et l'intensité de l'électricité qui arrivera au matériel programmable contrôlant de cette façon l'angle de l'articulation. Ce produit, nous permettra contrôler les différentes phases de rééducation sans avoir besoin de retirer la prothèse à chaque exercice de rééducation, les réaliser aussi à la maison et ne pas avoir besoin d'un outil médical cher et très spécifique (cf. Figure 9).



Figure 12: Machine de rééducation pour les blessures du genou.

## C.A.O.

Pour le design 3D, nous utilisons le logiciel CATIA V5 R20 que nous utilisons à l'UTBM. Mais avant de commencer cette partie nous prenons les mesures de la jambe pour pouvoir fabriquer le produit. Nous devons les garder ces mesures pour la partie fabrication et vérification du produit. Le médecin doit prendre les mesures l'endroit où il va placer les adhésifs pour la fabrication à posteriori (les mesures doivent se prendre selon la figure10), elles sont celles utilisées pour la C.A.O. Il faut prendre les premières mesures tout en haut et tout en bas de l'articulation, puis se déplacer 5 cm haut et bas



Figure 13 : emplacement exact où il faut prendre les mesures pour la prothèse.

Nous commençons par les intérieures avec le matériel de protection (Silicone RTV). On va utiliser une épaisseur de 5 mm pour assurer le confort et l'adaptabilité à l'utilisateur. Les mesures des diamètres intérieures sont prises comme l'indiquent les figures suivantes.

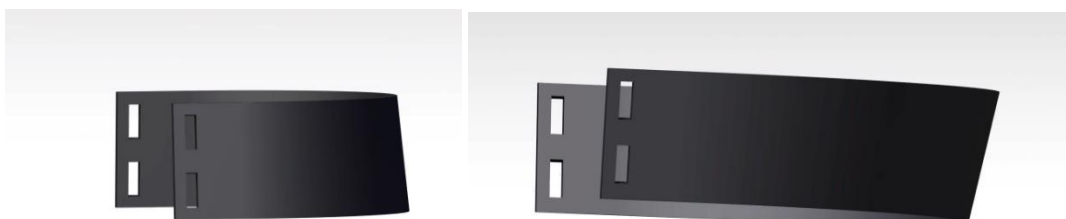


Figure 14 : Intérieurs des supports inférieur et supérieur respectivement.

Nous continuons par les différents supports qui donnent la rigidité nécessaire à la structure. Pour cette rigidité, nous utilisons le polymère ABS. Dans ces supports il faut introduire les unions avec les barres, et introduire dans le support supérieur les boîtes pour transporter la batterie et l'unité de contrôle.



Figure 15 : Support supérieur et inférieur respectivement

La dernière partie à modéliser est les barres qui vont faire le travail de rééducation dans l'articulation. Elles sont composées des différentes couches elles même composées par 3 couches (résine 2mm, fibre de carbone 0.5mm et résine de fine épaisseur 0.5mm), la dernière couche est en résine programmable, c'est elle s'occupera de la mobilité de l'articulation.

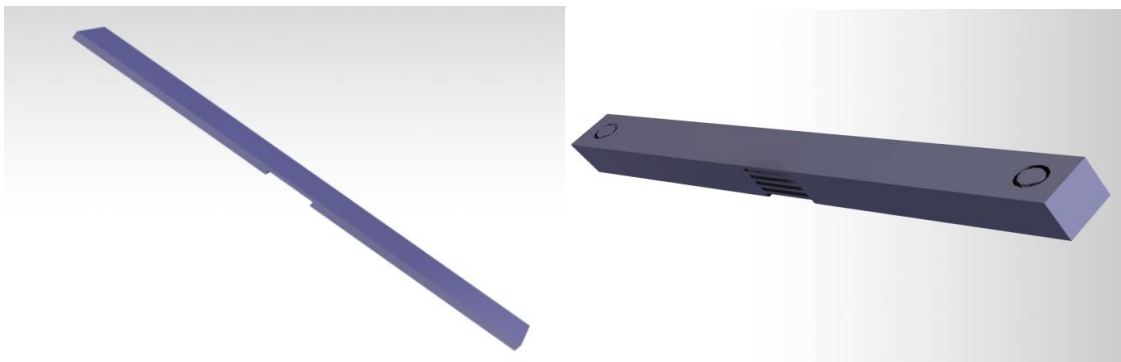


Figure 16 : Couche de matériel programmable et fixation latérale complète respectivement

L'étape suivante consiste à faire l'assemblage du produit en utilisant la partie assemblage du logiciel. Dans cette étape nous assemblons les différentes parties du produit et les positionnons en établissant des contraintes entre elles.

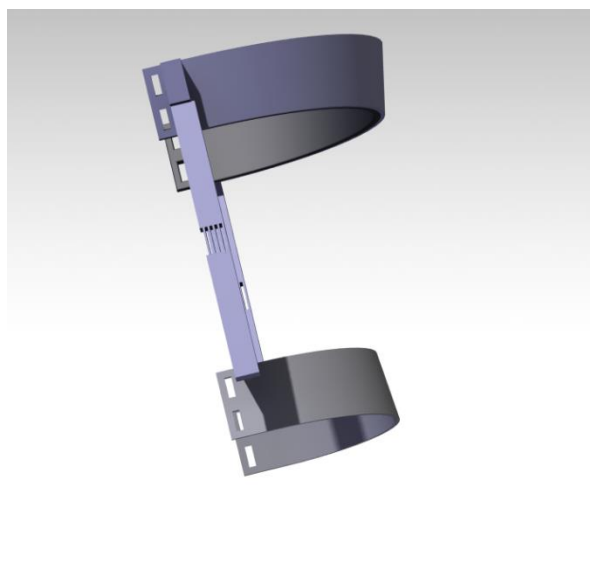


Figure 17 : assemblage final 1

Finalement, Il faut établir les relations cinématiques du produit, ces relations nous permettent de plier l'articulation dans la phase de rééducation.



Figure 18 : assemblage final plie

## Fabrication du produit.

Dans le cadre de la production, nous développons un produit complètement imprimable, pour faciliter l'adaptabilité du produit à l'utilisateur. Pour obtenir cette caractéristique, on a besoin d'une nouvelle méthode spéciale de fabrication pour améliorer l'adaptabilité du produit à partir de laquelle nous développons les points suivants :

1. Nous avons besoin d'un scanner de la jambe pour pouvoir adapter parfaitement la prothèse à l'utilisateur. Nous pouvons faire un scanner 3D en utilisant une machine comme sur la figure 10. Pour rendre le produit plus adaptable et faciliter l'utilisation par personnes sans formation en conception, nous utilisons des adhésifs dans les points clés de l'articulation. Ces adhésifs permettent de trouver les points en commun pour créer une image 3D de l'articulation, que nous utilisons pour dimensionner la prothèse. Ces adhésifs, les médecins doivent les coller dans les mêmes emplacements où les mesures ont été effectuées (périmètre de la cuisse, du mollet et de l'articulation) et noter ces mesures pour vérifier la prothèse avant l'étape 3.



Figure 19: Scanner 3D.

2. A la suite du scan 3D, nous faisons la CAO du produit. Pour faciliter l'utilisation aux médecins qui ne sont pas habitués à ce type de travail, nous mettons au point un logiciel qui prend les mesures de l'image de la jambe en 3D, et les adapte à une prothèse standard que nous aurons dans le logiciel.
3. Une fois nous avons le modèle CAO du produit, nous allons en utilisant un imprimeur 3D, des composites et de la fibre de carbone programmable (ne existe pas aujourd'hui).
4. Apres de l'opération d'impression, nous avons besoin d'un petit usinage sur parties qui viennent des opérations d'impression.
5. Une fois que nous avons la prothèse, nous pouvons continuer avec la phase de sa mise en place par les velcros, en vérifiant l'adaptation à l'articulation.
6. Finalement, nous mettons en place la batterie et l'unité de contrôle dans la partie supérieure du support (cette opération seulement se fait quand le médecin veut commencer la phase de rééducation).

## Contraintes du produit

En raison du processus de fabrication et des contraintes des matériaux, nous avons des contraintes à connaître dans notre produit :



- Angle de pliage limite par contraintes de déformation des matériaux utilisés dans le produit.  
Pour notre produit nous allons utiliser les angles suivants :  
Angle maximale 180°  
Angle minimal 90°

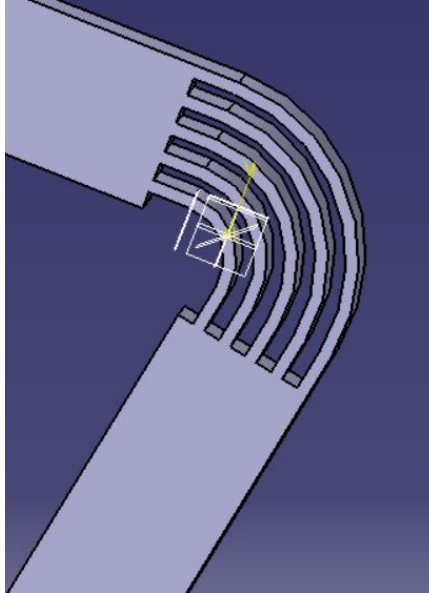


Figure 20 : Pli d'une barre

- L'usage du produit après l'impression 4D est nécessaire, mais dans l'environnement d'un hôpital il est difficile de l'implémenter à cause de la saleté générée.

## Avantages et innovations

Grâce à cette nouvelle technologie, nous pourrions faciliter les tâches liées à ce type d'opérations tel que :

- L'extraction des sondes utilisées pour contrôler les liquides dans l'articulation
- Facilite le suivi de l'évolution de la cicatrisation due à l'opération
- Possibilité d'utilisation dans différentes opérations
- Changement des bandages
- Résistance à l'eau
- Facilite l'adaptabilité
- Mobilité contrôlée
- 100% Recyclable

## Conclusion du travail développé

Pour conclure, ce projet a été très instructif pour moi. J'ai affiné mes connaissances sur CATIA V5 et plus particulièrement mes connaissances sur les nouveaux matériaux programmables, et leurs possibilités. C'est pour ces raisons que je trouve ce projet très intéressant.

J'ai réussi à développer un produit complètement imprimable en utilisant la nouvelle technologie d'impression 4D. J'ai mis en pratique les connaissances apprises dans le travail de recherche, malgré les possibilités restreintes d'aujourd'hui pour ces types de produit. Il faudra développer la technologie de fabrication, car actuellement il n'y a pas la technologie nécessaire à la fabrication d'un produit multi-composant comme notre produit (plastique, résine et fibre de carbone). L'autre obstacle pour le développement de ce type de produit est le coût de fabrication de la fibre de carbone, cependant un ensemble de groupes d'entreprises sont en train de développer un nouveau système de production de fibre de carbone qui réduira le coût de production du matériel à hauteur de 80%. Ce développement fera de la fibre de carbone le meilleur matériel pour la fabrication de produits, puisqu'en travail de flexion, il n'y a pas d'effet de fatigue pour un coût réduit.

Enfin j'ai essayé de commenter mes connaissances sur ce type de matériaux et de développer un produit intéressant dans le cadre médical, dans lequel j'ai eu des antécédents qui m'ont apporté de l'expérience.

J'espère que ce projet et les documents associés aideront les futurs étudiants et leur permettront de gagner du temps lors de la prise de connaissance des matériaux programmables, et les aidera dans le développement de nouveaux produits avec la technologie 4D.