

# LES MATÉRIAUX

## AUTORÉPARABLES : UN DÉFI

### POUR L'AVENIR ?



PSEUDONYME : Solvay

DEPARTEMENT : Français et sciences (chimie)

GROUPE : 2n BAT (BATXIBAC)

« Le nitrogène présent dans notre ADN, le calcium dans nos dents, le fer dans notre sang, le carbone dans les tartes aux pommes... tous ont été créés à l'intérieur d'étoiles qui sont entrées en collision les unes avec les autres. Nous sommes faits à partir des matériaux des étoiles. »

Carl Sagan

# REMERCIEMENTS :

Ce travail a été possible grâce à la participation de nombreuses personnes qui y ont contribué d'une manière ou d'une autre. Comme il est évident, je ne peux pas tous les citer car la liste serait interminable, je tiens à remercier tout particulièrement les personnes suivantes pour leur collaboration et leur aide :

- Louis Van Renterghem, doctorant de l'Université de Mons : Pour m'avoir aidé à faire toute la partie pratique, pour m'avoir si bien accueilli à l'Université de Mons, pour m'avoir montré toutes les installations, les machines dans les laboratoires et pour avoir été à mon côté pendant toute la partie pratique. En effet, vous avez été une collaboration essentielle et une aide précieuse pour mon travail et si je n'avais pas compté sur votre soutien, je n'aurais pas pu le mener à bien. Je vous suis donc très reconnaissante.
- Jean-Marie Raquez, professeur de l'Université de Mons : Je vous suis très reconnaissante de m'avoir donné l'opportunité de me rendre en personne à l'Université de Mons, de m'avoir permis de faire un court entretien avec vous, de m'avoir fait visiter les laboratoires et de m'avoir donné le contact de Louis pour pouvoir faire la partie pratique de mon travail.
- José Miguel Martín Martínez, professeur de l'Université d'Alicante : Je vous suis très reconnaissante d'avoir été la première personne à me répondre, c'est pourquoi je tiens à vous remercier d'avoir accepté de m'aider dans mon travail en réalisant un entretien en ligne avec vous. Toutes les informations que vous m'avez données m'ont été d'une grande aide pour compléter la partie théorique de mon travail et j'ai obtenu des réponses claires, faciles à comprendre et à maîtriser. Pour moi, vous avez été la première porte ouverte que j'ai trouvée au cours de ma procédure du travail.
- Professeure de technologie : pour avoir toujours eu la volonté de m'aider même si vous n'étiez pas la tutrice de mon travail, pour m'avoir conseillée et pour avoir toujours été là pour moi quand j'en avais besoin.

- Professeure de français : pour avoir corrigé mon travail durant les derniers jours avant de le rendre et pour m'avoir conseillé et fait des changements sur certains aspects de mon travail afin d'obtenir un résultat meilleur.
- Famille : pour m'avoir aidé à chercher des informations lorsque je pensais ne pas pouvoir effectuer le travail, pour avoir toujours été à mon côté pendant les bons et les mauvais moments et pour m'avoir toujours accompagné dans tous les endroits où je devais me rendre pour réaliser ce travail, par exemple à l'université de Mons.

# ABSTRACT

We live in a world that is in constant movement and change due to new technologies. One of the areas most affected by this need for renewal and modernity is that of materials. This is an essential area for the development of life in the future, which will be marked by the need to find materials that are more efficient, sustainable and ecological. This is what the world of self-healing materials brings us, materials which are capable of repairing themselves.

The aim of this project is to raise awareness of these types of materials and how they work, to investigate why they are so scarce on the market and why no further studies have been carried out on them for almost ten years.

The present project consists of two parts: a theoretical part in which the concepts of self-healing materials are explained, together with their applications and characteristics. And a practical part in which self-healing is demonstrated by means of two different processes, from which results and conclusions are extracted.

Keywords: self-healing materials, circular economy, efficiency and future

# RESUM

Vivim en un món que està en constant moviment i canvi a causa de les noves tecnologies. Un dels àmbits més afectats per aquesta necessitat de renovació i modernitat és el dels materials. Es tracta d'un camp/ àmbit essencial per al desenvolupament de la vida en el futur, que vindrà marcada per la necessitat de trobar materials que siguin més eficients, sostenibles i ecològics. Tot això és el que ens aporta el món dels materials autoreparables, uns materials capaços de reparar-se ells mateixos.

La finalitat d'aquest treball és donar a conèixer aquest tipus de materials i el seu funcionament, investigar sobre la seva poca presència en el mercat i perquè, en gairebé deu anys, no s'han realitzat més estudis sobre ells.

El present treball consta de dues parts. Una part teòrica on s'expliquen els conceptes de materials autoreparables, amb les seves aplicacions i característiques. I una altra de pràctica on es demostra l'autoreparació mitjançant dos processos diferents, a partir dels quals s'extreuen uns resultats i unes conclusions.

Paraules clau: materials autoreparables, economia circular, eficiència i futur

# RÉSUMÉ

Nous vivons dans un monde en perpétuel mouvement et changement grâce aux nouvelles technologies. L'un des domaines les plus touchés par ce besoin de renouvellement et de modernité est celui des matériaux. Il s'agit d'un domaine essentiel pour le développement de la vie dans le futur, qui sera marqué par la nécessité de trouver des matériaux plus efficaces, durables et écologiques. C'est ce que nous apporte le monde des matériaux autoréparables, des matériaux capables de s'auto-réparer.

L'objectif de ce travail est de faire connaître ces types de matériaux et leur fonctionnement, d'étudier les raisons pour lesquelles ils sont si peu répandus sur le marché et pourquoi aucune autre étude n'a été menée sur eux depuis près de dix ans.

Le présent travail se compose de deux parties : une partie théorique dans laquelle sont expliqués les concepts des matériaux autoréparables, ainsi que leurs applications et caractéristiques. Et une partie pratique dans laquelle l'autoréparation est démontrée grâce à deux processus différents, dont on tire des résultats et des conclusions.

Mots-clés : matériaux autoréparables, économie circulaire, efficacité et avenir

# SOMMAIRE

INTRODUCTION ET OBJECTIFS :	8
1. CONTEXTE	10
1.1 QU'EST-CE QUE LES MATÉRIAUX ?	10
1.2 MATÉRIAUX INTELLIGENTS :	11
1.3 QU'EST-CE QUE LA R&D&I ?	11
1.4 TYPES DE MATÉRIAUX INTELLIGENTS :	12
1.5 EXEMPLES DE MATÉRIAUX DE L'AVENIR :	15
1.5.1 LE GRAPHÈNE :	15
1.5.2 LE SHRILK :	16
1.5.3 LA MOUSSE MÉTALLIQUE :	17
1.5.4 LE STANNÈNE :	18
2. MATÉRIAUX AUTORÉPARABLES :	19
2.1 DÉFINITION :	19
2.2 DIFFÉRENCE ENTRE LES TERMES AUTORÉPARATION ET RÉGÉNÉRATION :	22
2.3 TYPES/MÉTHODES D'AUTO-RÉPARATION :	23
2.4 TYPES DE DOMMAGES :	25
2.5 LES CARACTÉRISTIQUES NÉCESSAIRES À L'AUTORÉPARATION :	28
2.6 PROBLÈMES ET INCONVÉNIENTS :	29
2.7 MATÉRIAUX AUTORÉPARABLES DANS DIFFÉRENTS DOMAINES	31
3. L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE :	34
4. L'OBSOLESCENCE	36
5. PARTIE PRATIQUE :	39
6. CONCLUSION :	72
7. LES SOURCES D'INFORMATION	74
8. ANNEXES :	79
8.1 VISITE DU LABORATOIRE DE L'UNIVERSITÉ DE MONS :	79
8.2 ENTRETIEN AVEC JOSÉ MIGUEL MARTÍN MARTÍNEZ	81
8.3 ENTRETIEN AVEC JEAN-MARIE RAQUEZ	93



## **INTRODUCTION ET OBJECTIFS :**

Nous sommes matière, tout ce qui nous entoure est matière, le cosmos et l'existence sont matière. Si nous y réfléchissons, tout est fait à partir d'un matériau, et c'est pour cette raison que les matériaux, bien que la plupart des gens ne leur accordent pas beaucoup d'importance, sont essentiels à la vie.

Il a toujours été clair pour moi que j'aimerais étudier de l'ingénierie. Mais dans un domaine si vaste, il me fallait choisir un sujet plus précis et assez motivant. C'est dans cette démarche que j'ai trouvé le génie des matériaux : l'étude des matériaux appliquée à n'importe quel domaine de notre société. Et au sein des matériaux, nous trouvons encore les matériaux intelligents et plus ceux qui ont la capacité de s'autoréparer, qu'ils soient intelligents ou non. En d'autres termes, les matériaux auto-réparateurs, s'inspirent de l'observation de la nature, comme le fait que lorsque nous faisons une blessure, elle se "répare" elle-même. Mais la difficulté et la réussite sont celles de la chimie appliquée. Je trouvais donc étonnant qu'un ciment ou une peinture puisse se réparer, face à une agression ou une rupture.

Le présent travail se compose de deux parties, une partie théorique où sont expliqués les concepts de matériau et de matériaux intelligents et où est développé le thème central : les matériaux autoréparables, avec leurs applications, leurs caractéristiques, leurs types et leurs exemples. Nous mettons ensuite en relation les modèles d'économie circulaire et d'obsolescence avec ces matériaux, qui sont favorables au premier et clairement opposés au second. Enfin, la partie pratique du travail est incluse, qui représente la partie la plus étendue et permet une approximation du fonctionnement des matériaux autoréparables. Pour son élaboration, deux tests expérimentaux ont été réalisés au Service des matériaux polymères et composites de l'Université de Mons -Materia Nova- en Belgique, où l'autoréparation d'un matériau est démontrée par deux processus différents.

En fait, cette caractéristique possédée par certains matériaux fait partie d'un monde que l'on pourrait considérer très avancé au niveau scientifique et relativement nouveau puisque c'est dans notre siècle que la découverte de ces matériaux a eu lieu. La vérité

est que, grâce aux nouvelles avancées technologiques, nous nous rapprochons de plus en plus à la science-fiction. Mais le point est que les matériaux autoréparables existent déjà aujourd'hui et il s'agit donc de matériaux assez méconnus que j'ai choisi d'étudier afin de leur accorder l'importance qu'ils méritent.

Au fur et à mesure que j'avais dans mes recherches, je m'étonnais que des matériaux aussi extraordinaires puissent exister et je me suis demandé pourquoi ils étaient si peu utilisés dans l'industrie d'aujourd'hui. À partir de ce moment-là, j'ai décidé que je devais faire connaître ce type de matériaux, justifier leurs applications et essayer d'expliquer pourquoi ils ne sont pas intéressants pour certains, alors qu'ils entraînent des conséquences sur le changement climatique et favorisent l'économie circulaire. En somme, des aspects qui contribuent à un monde meilleur. Malgré la difficulté de la tâche, j'avais en tête l'idée, dès la minute zéro, de pouvoir démontrer moi-même comment cette autoréparation des matériaux s'effectue en laboratoire. C'est pourquoi j'étais convaincue que le sujet de mon travail de recherche devait concerner les matériaux autoréparables. De plus, un autre objectif que j'aimerais atteindre serait dans le domaine linguistique, car le fait de le faire en français est un défi et j'espère élargir mon vocabulaire dans ce domaine et surtout améliorer mon niveau de compréhension et d'écriture.

En conclusion, trouver le sujet idéal pour mon travail a été un choix assez facile car il englobe différents aspects qui me fascinent : les matériaux, l'ingénierie, la chimie, l'amélioration du changement climatique et la recherche sur un type très spécifique de matériaux dont j'ignorais l'existence il y a seulement quelques mois. C'est pour cette raison que, tout au long du processus, malgré l'apparition de quelques problèmes dû au manque d'informations sur le sujet, j'ai pu vraiment m'amuser en m'imprégnant de toutes leurs connaissances.

J'espère qu'en le lisant, je vais susciter chez vous le même intérêt que j'ai éprouvé à découvrir ce genre de matériaux et à effectuer ce travail.

# 1.CONTEXTE

## 1.1 QU'EST-CE QUE LES MATÉRIAUX ?

Avant de commencer à parler des matériaux autoréparables, il est utile de préciser ce que nous entendons lorsque nous parlons de matériau(x). Le terme "matériau" désigne une substance solide présentant une structure et des propriétés homogènes. Aujourd'hui, nous disposons d'une grande variété de matériaux, tant naturels que synthétiques, et grâce aux nouvelles technologies, il est possible d'en créer constamment de nouveaux pour améliorer ou remplacer les matériaux que nous utilisons quotidiennement et qui nuisent de plus en plus à l'environnement. En outre, le mot "matériau" prend des significations différentes selon le domaine dans lequel il est utilisé. Par exemple, dans le domaine de l'ingénierie, un matériau est une substance (élément ou composé chimique) ayant une propriété spécifique, tandis que dans le domaine des sciences, un matériau est toute accumulation de matière ou de masse.

Les matériaux naturels sont ceux que l'on trouve dans la nature et qui sont donc très anciens, comme la pierre, le bois, l'argile ou le cuir. Les matériaux synthétiques sont ceux qui sont élaborés artificiellement, c'est-à-dire fabriqués par l'homme en manipulant et parfois en mélangeant des matières premières naturelles. Chaque matériau possède un certain nombre de propriétés qui le distinguent des autres. Les principales propriétés sont : mécaniques, électriques, thermiques, magnétiques, optiques et chimiques.

## **1.2 MATÉRIAUX INTELLIGENTS :**

Dans le vaste et immense monde des matériaux, nous nous approcherons de notre objectif final en parlant d'abord des matériaux intelligents. Ces matériaux, tout en variant certaines de leurs propriétés, ont la particularité de pouvoir être modifiés pour réagir de manière maîtrisable et réversible à différents stimuli physiques ou chimiques.

Par exemple, les vêtements de sport sont dotés de valves de respiration qui fonctionnent en relation avec la température et l'humidité et qui interviennent lorsque la personne commence à transpirer. Un autre exemple serait celui des médicaments qui sont immédiatement distribués dans la circulation sanguine lorsqu'une infection virale est identifiée. En outre, le perfectionnement de ces nouveaux produits fondés sur des matériaux intelligents est incessant, comme l'apparition des OLED (Organic Light Emitting-Diode), des écrans plats d'ordinateurs ou de téléphones portables composés de polymères multicouches qui produisent de la lumière en fonction de stimulations électriques et nous garantissent des créations plus souples et plus légères. Il existe à présent différents types de matériaux intelligents et, grâce aux efforts d'investissement dans la R&D&I, de plus en plus de nouveaux matériaux surgissent chaque jour.

## **1.3 QU'EST-CE QUE LA R&D&I ?**

La R&D&I correspond à la somme de trois concepts : recherche, développement et innovation. La recherche vise à étendre les connaissances scientifiques, même si elle n'a pas d'application pratique. Le développement fait référence à une évolution économique qui permet d'atteindre de meilleurs niveaux et conditions de vie. Enfin, l'innovation consiste à inventer quelque chose de nouveau ou à améliorer ou remplacer ce qui existe déjà afin de le perfectionner, par exemple pour le rendre plus durable ou plus efficace. Certaines activités sont considérées comme de la RDI :

- La recherche et le développement d'un nouveau matériau aux propriétés similaires à celles du plastique afin de le remplacer.
- Nouveau type de procédé de construction des fondations, pour augmenter la résistance d'un terrain, en réduisant les temps de fonctionnement.
- Reformulation de la composition d'un produit afin de maintenir ses propriétés, en réduisant la présence d'agents nocifs pour l'environnement.

## **1.4 TYPES DE MATÉRIAUX INTELLIGENTS :**

### **MATÉRIAUX PIÉZOÉLECTRIQUES :**

Il s'agit de matériaux qui subissent un changement de forme en fonction d'une impulsion électrique ou produisent une charge électrique en fonction de la pression mécanique à laquelle ils sont soumis. C'est-à-dire, ce sont des matériaux qui, lorsqu'ils sont exposés à une contrainte à caractère mécanique, génèrent une polarisation électrique. Ils sont par conséquent réputés pour leur capacité à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa. La piézoélectricité est un procédé qui se déroule dans certains cristaux comme le quartz ou le nitrate de sodium. De plus, cet effet piézoélectrique est habituellement réversible, puisque lorsque les cristaux ne sont plus soumis à une contrainte extérieure, ils reviennent à leur forme antérieure.

### **DES MATÉRIAUX QUI CHANGENT DE FORME :**

Ces types de matériaux intelligents ont la particularité de se transformer, ou de revenir à leur forme de départ, lorsqu'ils sont exposés à un stimulus, généralement la chaleur ou l'humidité. Ils sont susceptibles de se déformer et de reprendre leur forme initiale un grand nombre de fois sans se dégrader. Nous pouvons discerner 3 types de matériaux au sein des matériaux qui changent de forme :

- Matériaux autoréparables
- Matériaux à mémoire de forme

- Matériaux avec changement de volume

Les premiers, comme leur nom l'indique, sont des matériaux capables de se reconstruire après avoir été endommagés, tels que des fissures, des rayures et des ébréchures. Pour se rétablir, ils ont normalement besoin d'un facteur de stimulation thermique. Ces deuxièmes sont des matériaux qui récupèrent leur forme naturelle après avoir été déformés. Et les dernières, sont celles qui modifient leur dimension, c'est-à-dire leur volume, lorsqu'elles sont en train de réagir avec un élément extérieur.

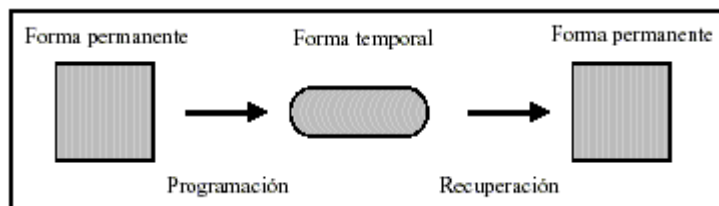


Figure 1: Représentation schématique de l'effet de mémoire de forme. Source : Interpresas.net. Matériaux et structures intelligents (2003)

### LES MATÉRIAUX CHROMO-ACTIFS :

Ce groupe de matériaux intelligents se caractérise par le fait qu'ils changent de couleur lorsqu'ils sont soumis à un stimulus externe. Le changement de couleur est normalement réversible et, selon le stimulus qui active le matériau, on distingue différents types :

- **Les matériaux photochromiques** : ce sont ceux qui changent de couleur de manière réversible lorsqu'une certaine lumière à forte composante ultraviolette tombe sur eux et disparaissent lorsque la lumière s'arrête. C'est pourquoi ils ne sont pas visibles dans l'obscurité.
- **Matériaux thermochromiques** : Ce sont des matériaux qui changent de couleur avec la température. Il existe une grande diversité de couleurs et de niveaux de température, ce qui permet de répondre à un large éventail d'applications. Ce sont habituellement des matériaux semi-conducteurs et ils peuvent être réversibles ou

changer de couleur de façon permanente selon le pigment utilisé en raison de l'augmentation de la température.

- **Matériaux électrochromes** : Ce sont des matériaux qui changent de couleur grâce à un flux électrique. Ce courant provoque des réactions d'oxydoréduction(redox) dans le matériau, ce qui conduit à une modification des bandes d'énergie au moment où le matériau est en contact avec la lumière visible.
- **Matériaux hydrochromiques** : Il s'agit des matériaux qui changent de couleur lorsqu'ils entrent en présence d'eau.
- **Matériaux halochromes** : Ces matériaux sont en mesure de changer de couleur en fonction des variations du pH. Ils sont couramment connus pour leur emploi dans les laboratoires chimiques comme indicateurs de pH.

#### **MATÉRIAUX PHOTOACTIFS :**

Ces matériaux sont caractérisés par le fait qu'ils sont altérés de différentes manières sous l'action de la lumière ou qu'ils sont capables d'émettre de la lumière sous l'effet de différents facteurs externes. Il en existe plusieurs types :

- **Matériaux électroluminescents** : Ce sont ceux qui, lorsqu'ils sont stimulés par un courant électrique, émettent une lumière de différentes couleurs.
- **Matériaux photoluminescents** : Contrairement au précédent, ces matériaux produisent de la lumière lorsqu'ils sont soumis à une certaine longueur d'onde, généralement dans la gamme des ultraviolets.
- **Matériaux fluorescents** : Ces matériaux transmettent de la lumière lorsque leurs électrons sont excités vers un niveau d'énergie plus élevé. Il faut donc de la lumière, c'est-à-dire une source continue d'excitation, pour accroître l'énergie et produire des couleurs très frappantes.

## 1.5 EXEMPLES DE MATÉRIAUX DE L'AVENIR :

### 1.5.1 LE GRAPHÈNE :

Le graphène est un matériau nanométrique caractérisé par une couche unique d'atomes de carbone liés par des liaisons hybrides positionnées de manière hexagonale. Il a été découvert par les docteurs Konstantin Novoselov et Andre Geim en 2004, qui ont reçu le prix Nobel de physique en 2010. Comme le graphite et le diamant, le graphène est également l'une des formes allotropiques\* du carbone. C'est le matériau le plus résistant connu, encore plus fort que l'acier et plus dur que le diamant. Il possède donc une légèreté, une flexibilité, une dureté, une conductivité et une résistance extraordinaires. En outre, il peut être considéré comme un matériau biodégradable, écologique, bidimensionnel et hydrofuge, car il repousse l'eau et la corrosion. Toutes ces caractéristiques, ainsi que l'abondance du carbone dans la nature, puisqu'il s'agit d'un matériau composite en carbone pur, font que ce matériau a été largement étudié et que ses possibilités sont infinies. De nombreux secteurs industriels l'utilisent déjà : l'alimentation, la santé, l'automobile, les carburants, le sport, ainsi que des secteurs liés à l'énergie et à l'environnement, l'électronique et l'informatique ou les équipements de défense. Comme la plupart de ces nouveaux matériaux intelligents, le graphène présente un certain nombre de difficultés pour son application dans davantage de produits. Le premier serait la complexité technique pour le produire industriellement et le second serait l'augmentation du coût ajouté des produits. Ainsi, aujourd'hui, ce matériau, considéré par beaucoup comme le matériau d'avenir par excellence, doit être utilisé de manière justifiée et non comme un effet de mode.

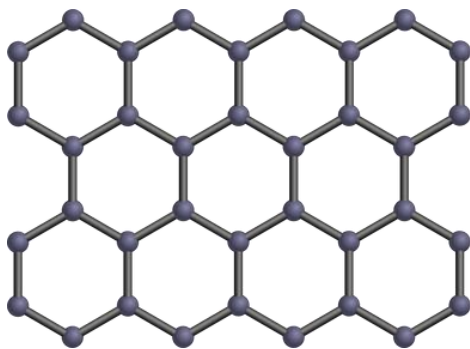


Figure 2: Le graphène est un matériau composé d'un groupement d'atomes de carbone positionnés selon un motif hexagonal. Source: Atria innovation



### 1.5.2 LE SHRILK :

Le Shrilk est un matériel biodégradable élaboré par des scientifiques du Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering de l'université de Harvard. Le matériau a été obtenu à partir de la cuticule d'insectes et de crustacés (arthropodes), qui est essentiellement composée de différentes couches de chitine arrangées en une structure semblable à celle du bois. La chitine est un polysaccharide qui se comporte comme un ciment et donne de la rigidité à de nombreux organismes. Lorsque la chitine est soumise à une série d'interactions physiques et chimiques, elle devient un matériel polyvalent car elle est solide, tenace et facile à manipuler. Le Shrilk est un substitut sûr du plastique, également biocompatible et dégradable, fabriqué à partir de chitine et de protéines dérivées de la soie, et c'est pour cette raison que le Shrilk présente ce design laminaire. Les utilisations de ce matériau sont nombreuses, mais plus particulièrement dans l'industrie médicale et dans la fabrication d'objets en plastique. En fait, ce matériau a été inventé pour solutionner certains des problèmes environnementaux les plus critiques du moment et pour réaliser d'importantes découvertes médicales. L'une des plus importantes difficultés est le prix, car la soie employée pour obtenir le matériau est trop coûteuse par rapport au plastique. C'est pourquoi, afin de limiter les coûts, des alternatives à la soie sont envisagées. Le Shrilk est considéré comme l'un des "cinq matériaux qui pourraient changer le monde" avec le graphène par The Guardian et comme un "supermatériau" par National Geographic.

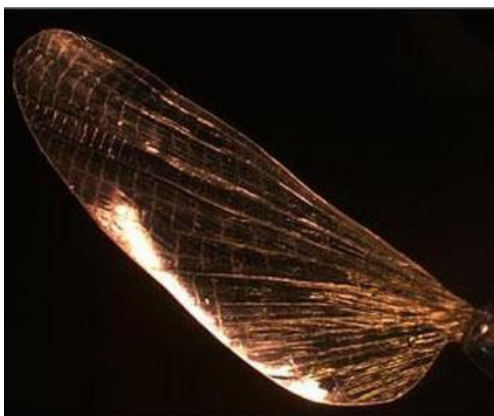


Figure 3: Institut Wyss. Réplique d'une aile d'insecte fabriquée à partir du nouveau matériau appelé Shrilk. Source: ABC.es

### 1.5.3 LA MOUSSE MÉTALLIQUE :

La mousse métallique est un matériau qui se caractérise par une structure cellulaire d'un élément métallique (généralement de l'aluminium) composé de pores remplis de gaz. Cette mousse métallique est extra-légère et très solide, ce qui la destine aux applications aérospatiales, automobiles et de construction. Il existe une tendance à la hausse pour les structures solides et légères qui ne sont pas seulement de basse densité, mais qui possèdent également des caractéristiques telles que l'isolation acoustique et thermique. Les mousses métalliques présentent un certain nombre de propriétés remarquables, telles que la résistance à la déformation mécanique, la maniabilité et la facilité de mise en forme. En tant que matériaux à basse densité, ils peuvent atténuer la consommation de matériaux et d'énergie tout en diminuant les coûts. En outre, ces mousses sont dotées d'une très bonne conductivité électrique et thermique et d'une faible capacité thermique. Ils offrent également une résistance chimique à l'oxydation et à la corrosion, une résistance aux températures élevées et un blindage électromagnétique. Par conséquent, ces matériaux ne sont ni combustibles ni inflammables, mais plutôt recyclables. Les mousses métalliques se subdivisent en mousses à pores ouverts et mousses à pores fermés. Les mousses à pores ouverts sont employées pour leurs caractéristiques thermiques et sont obtenues par la mise en œuvre de charges qui sont ensuite éliminées. Les mousses à cellules fermées, quant à elles, se définissent par leur grande rigidité, sont produites par l'injection de gaz dans la masse fondue ou par adjonction d'agents gonflants et sont destinées à des fins structurelles.

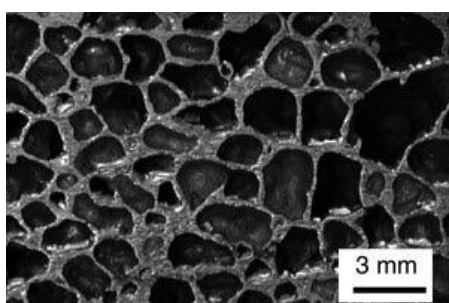


Figure 4: Mousse d'aluminium à pores ouverts. Source : Pathologie+réhabilitation+construction. Site d'information et de formation pour les professionnels et les étudiants

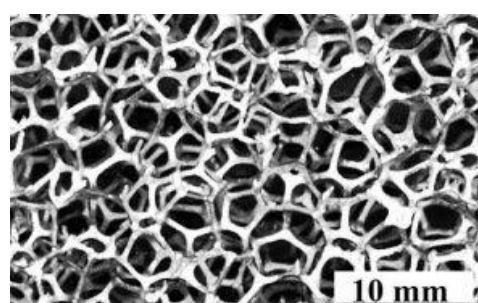


Figure 5: Mousse d'aluminium à pores fermés. Source : Pathologie+réhabilitation+construction. Site d'information et de formation pour les professionnels et les étudiants

### 1.5.4 LE STANNÈNE :

Le stannène est un matériau qui se compose d'atomes d'étain arrangés en une seule couche et qui pourrait être le premier conducteur électrique au monde présentant une efficacité de 100 %, c'est-à-dire qu'il serait encore plus conducteur que le graphène. Ce matériau n'a pas encore été fabriqué en série. En théorie, le stannène possède un atome d'étain et est efficace à 100% pour conduire l'électricité à température ambiante. Ce matériau est un isolant topologique, qui se caractérise par une conductivité électrique par ses contours ou ses surfaces et non par son intérieur. Auparavant, les scientifiques ont affirmé que des éléments tels que le tellure, l'antimoine, le bismuth et le sélénium sont des isolants topologiques, mais aucun d'entre eux n'est un bon conducteur électrique à température ambiante. Ce nouveau matériau permettrait aux électrons de se propager à température ambiante sans avoir recours à la chaleur. Ce matériau en deux dimensions serait donc idéal pour produire des circuits électriques de faible puissance, même si cela n'a pas encore été affirmé. L'une de ses principales applications pourrait se situer dans les systèmes de câblage qui connectent les différentes parties d'un microprocesseur, et il pourrait également améliorer la vitesse et réduire la consommation d'énergie des processeurs informatiques à l'avenir. Cependant, le stannène est un matériau qui se trouve encore en phase de recherche et dont les caractéristiques font l'objet d'une étude intensive.

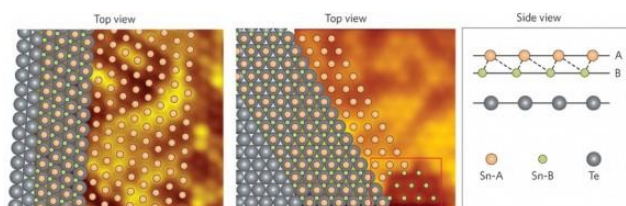
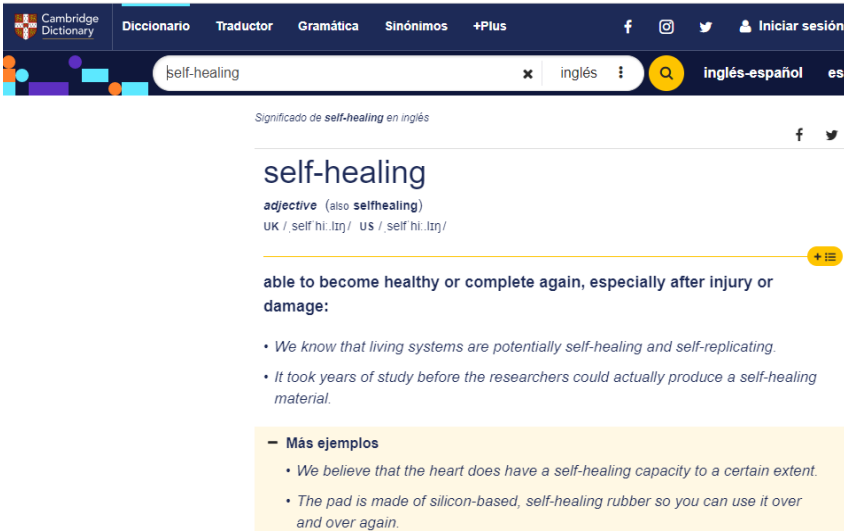


Figure 6: Modèle de structure atomique pour le stanène en 2D. Source: Chris Cesare, "Physicists announce graphene's latest cousin : stanene", News, Nature, 03 Aug 2015.

## 2. MATÉRIAUX AUTORÉPARABLES :

### 2.1 DÉFINITION :

Peu de gens connaissent probablement ou ont entendu parler des matériaux autoréparables. Qu'est-ce qu'ils sont vraiment ? Eh bien, une façon de commencer à expliquer ce qu'ils sont et en même temps facile à comprendre est de regarder quelques exemples qui ont lieu dans le corps humain et que nous connaissons tous. L'exemple par excellence de matériaux autoréparables est, bien sûr, la peau humaine. Cependant, notre épiderme contient également les germes d'une matière qui cesse progressivement de fonctionner. Par exemple, lorsque nos os se brisent, ils se soudent entre eux, ou lorsque nous avons une blessure sur la peau, elle guérit et puis disparaît. En effet, nous avons une grande capacité à nous réparer nous-mêmes et cette caractéristique existe déjà aujourd'hui dans des matériaux capables de se réparer eux-mêmes, appelés matériaux autoréparateurs. Si nous cherchons le terme "autoréparable" dans le dictionnaire espagnol ou catalan, nous verrons qu'il n'a pas encore été ajouté, contrairement au français ou à l'anglais où nous pouvons le trouver comme "autoréparable" ou "self-healing material" en anglais.



The image shows a screenshot of the Cambridge Dictionary website. The search bar contains the text "self-healing". The page displays the definition for "self-healing" in English. The word is listed as an adjective (also selfhealing) with the phonetic transcription /self hi:liŋ/. The definition is "able to become healthy or complete again, especially after injury or damage:". Below the definition, there are two example sentences: "We know that living systems are potentially self-healing and self-replicating." and "It took years of study before the researchers could actually produce a self-healing material." A section titled "Más ejemplos" (More examples) contains two more sentences: "We believe that the heart does have a self-healing capacity to a certain extent." and "The pad is made of silicon-based, self-healing rubber so you can use it over and over again."

Figure 7: Self-healing. Source: Cambridge Dictionary

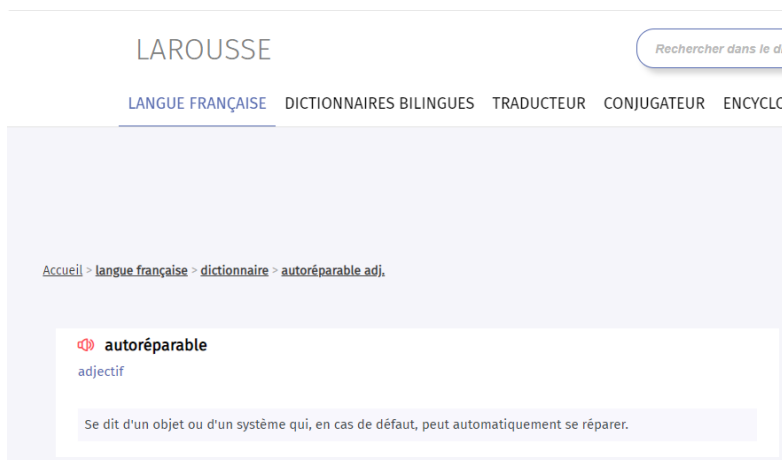


Figure 8.  
Autoréparable.  
Source:  
Dictionnaire de  
français  
Larousse

L'autoréparation est le concept que l'on cherche actuellement à incorporer dans de nouveaux matériaux, car rendre un matériau capable de s'autoréparer constitue une amélioration majeure pour les matériaux sujets à l'usure, tels que les revêtements de surface comme les peintures ou les protections d'écran de téléphone portable. En 2007, une conférence internationale sur les matériaux autoréparables a attiré de nombreux chercheurs. Ils ont expérimenté des matériaux autoréparables de diverses manières pour trouver cette caractéristique, comme le montre l'image. Par la suite, les matériaux autoréparables ont évolué sous de nombreuses formes.

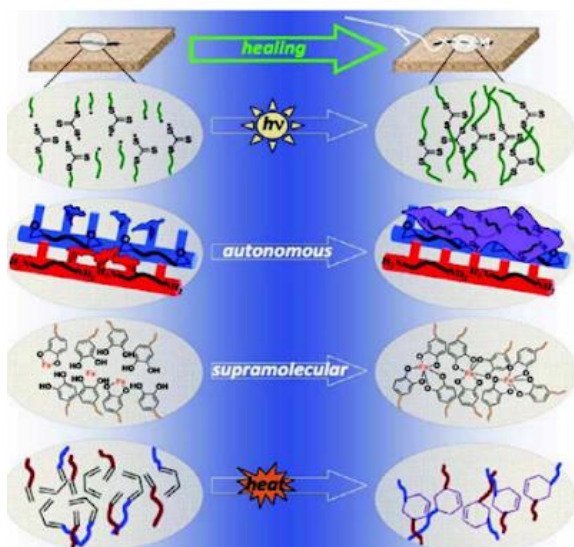


Figure 9. Différents processus  
d'autoréparation des matériaux.  
Source: Materials Today:  
Proceedings

Les matériaux cessent généralement de "fonctionner" avec le temps, ce qui oblige à réparer les produits, ou même à les amortir. Cela se produit principalement pour trois raisons :

- **L'usure** : la plupart des matériaux s'usent progressivement avec une utilisation constante, principalement en raison de la friction.
- **Défauts** : Certains matériaux se brisent soudainement lorsque des forces appliquées, généralement des contraintes ou des déformations, provoquent des fractures internes, principalement des fissures ou des défauts en leur sein, qui se propagent rapidement.
- **Vieillessement** : la plupart des matériaux se décomposent progressivement avec le temps. Par exemple, les plastiques finissent par se décomposer après de très nombreuses années, ou même plus tôt, sous l'effet de la lumière ou de la chaleur. En outre, nous pourrions inclure l'exemple du bois qui pourrit lorsqu'il est mangé par des insectes ou des micro-organismes.

Par conséquent, un matériau autoréparable est une substance artificielle (synthétique) qui se répare automatiquement sans diagnostic du problème ni intervention d'un être humain.

## **2.2 DIFFÉRENCE ENTRE LES TERMES AUTORÉPARATION ET RÉGÉNÉRATION :**

L'autoréparation, comme nous l'avons déjà mentionné et comme son nom l'indique, une fonction qui permet au corps de se réparer automatiquement après avoir subi des dommages. En outre, le cabinet d'analyse Forrester Research nous assure que l'autoréparation est la capacité de tout élément technologique à se surveiller lui-même et à diagnostiquer un problème, puis à lancer une solution pour corriger ou régler ce défaut. Dans le cadre de ce terme, nous pourrions donner l'exemple de la greffe dans le monde végétal, et lorsque nous la faisons correctement, nous pouvons voir que les deux branches se rejoignent pour ne faire qu'une.

La régénération, quant à elle, consiste en la reconstruction par un organisme vivant de ses propres parties qui ont été perdues ou endommagées. Dans ce cas, nous pourrions donner des exemples d'êtres vivants capables de se régénérer ; par exemple, l'étoile de mer qui, lorsqu'elle perd un de ses bras, se régénère après un certain temps, le bras perdu repoussant. Ou encore, il y a l'exemple du lézard, qui perd souvent un morceau plus ou moins petit de sa queue. Ce n'est pas vraiment un problème puisque, comme pour l'étoile de mer et de nombreux autres organismes, la partie perdue se régénère. En effet, dans le cas du lézard, par exemple, un blastème est d'abord produit, puis les cellules de ce blastème se multiplient rapidement pour former la peau, les écailles, les muscles, les os ou le cartilage nécessaires au remplacement de la queue manquante.

En conclusion, nous pourrions résumer cette section par un concept facile à comprendre : la régénération fait plutôt référence à la biologie et l'autoréparation à la technologie. C'est pour cette raison qu'il est important de ne pas prendre leurs significations pour acquises et, bien qu'ils semblent souvent synonymes, ces deux termes doivent être compris comme des concepts différents.

## **2.3 TYPES/MÉTHODES D'AUTO-RÉPARATION :**

Parmi les matériaux autoréparables, nous trouvons différents types de ces matériaux qui sont liés au type de méthode appliquée pour rendre l'autoréparation possible.

### **Matériaux avec agents de réparation intégrés :**

Les matériaux autoréparables les plus courants sont composés de microcapsules qui contiennent un liquide de type adhésif capable de réparer les dommages. C'est le système d'autoréparation le plus simple et, en même temps, le moyen le plus polyvalent de transformer un matériau commun en un matériau autoréparable. C'est pourquoi ces microcapsules sont incorporées à l'intérieur du matériau. Lorsque le matériau est fissuré, coupé ou fracturé, ces capsules se brisent et libèrent des substances qui donneront naissance au matériau de réparation. Elles remplissent la zone endommagée et, une fois solidifiées, scellent la cassure ou le dommage, laissant le matériau dans sa forme initiale. Cependant, un inconvénient de ce système d'autoréparation est la limitation du nombre de réparations possibles, car lorsque ces microcapsules qui contiennent le matériau agissent, elles se rompent dans la zone touchée, de telle sorte que si cette zone est à nouveau abîmée, elle n'aura pas la possibilité d'être à nouveau réparée.

### **Matériaux microvasculaires :**

Cette technique d'autoréparation d'un matériau est similaire à la précédente, car elle comporte également la libération d'un composé dans le matériau. La distinction est que les microcapsules ont une forme sphérique, ce qui altère parfois la structure du matériau et peut le rendre plus fragile. Ce type de matériau comporte donc des canaux qui présentent ces composés et se caractérisent par des tubes vasculaires extrêmement fins qui, comme le précédent, sont capables de pomper des agents réparateurs et d'accéder à la zone touchée ou endommagée. En outre, ces canaux peuvent être connectés à un réservoir externe, ce qui permet au liquide de réparation qu'ils contiennent de disposer d'une durée de vie plus longue, tout en solutionnant le problème des microcapsules qui, au lieu de n'avoir qu'une seule possibilité de s'auto-réparer, les canaux permettent de conserver la fonctionnalité d'auto-réparation pendant une plus longue période.



### Matériaux intrinsèquement autoréparables :

Ce dernier type de matériaux autoréparables englobe un large éventail. Ils font en sorte que certains matériaux reprennent d'eux-mêmes leur forme initiale. Ils ont généralement besoin d'une source d'énergie externe, comme la chaleur, la lumière ou leur propre nature. En général, pour redonner aux matériaux leur forme primitive, il faut les soumettre à la chaleur ou appliquer un système pour répartir la chaleur dans la zone où le dommage s'est manifesté. Par exemple, les monomères modifient leur structure physique de telle sorte qu'ils réparent le dommage et le remplissent parfois complètement. En outre, il est important de noter que, contrairement aux méthodes précédentes, ce type de matériau présente un intérêt : il a un comportement d'auto-réparation infini, c'est-à-dire qu'il n'a pas d'utilisation limitée et peut donc réparer les dommages plusieurs fois. Cependant, ils ne peuvent pas améliorer le comportement d'un matériau déjà existant et ne sont par conséquent utilisables que dans certaines conditions.

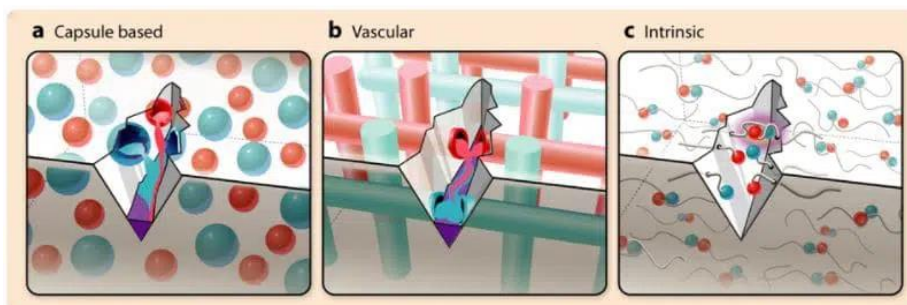


Figure 10. Deux approches permettant l'auto-réparation de matériaux polymères. Source: Hal. Open Science

## 2.4 TYPES DE DOMMAGES :

Dans ce type de matériaux, nous trouvons certaines applications qui sont liées au type de dommage qu'ils présentent.

### Fissures :

Une fissure est une ouverture normalement longue et étroite qui apparaît à la suite de la séparation de deux matériaux ou d'un même matériau. Les fissures apparaissent souvent à la suite de phénomènes naturels qui provoquent ces dommages dans le sol ou dans les régions froides en raison du dégel. En outre, les fissures se trouvent principalement dans les éléments de construction où leur réparation est généralement assez coûteuse et laborieuse. De nombreux matériaux et éléments perdent leur intégrité et leur fonctionnalité lorsqu'ils sont fissurés et doivent donc être remplacés le plus rapidement possible. C'est pourquoi les matériaux autoréparables permettent d'allonger la durée de vie de ces éléments. Par exemple, les ailes des avions ou l'asphalte des routes pourraient avoir une durée de vie plus longue et donc éviter de devoir réparer et remplacer à nouveau toute la structure, mais avec cette caractéristique d'autoréparation, nous pourrions parvenir à réparer uniquement la zone affectée et sans avoir besoin de la présence d'un spécialiste car elle se réparerait toute seule.

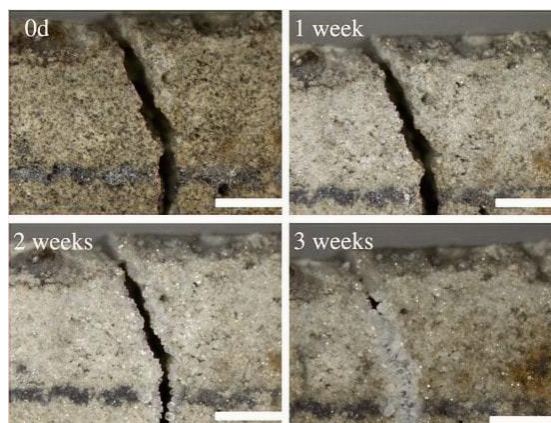


Figure 11. Application de matériaux autocicatrisants ou autoréparateurs. Type de fissures. Source: Atria Innovation

### Rayures :

Une rayure est une ligne ou une bande de largeur variable qui marque un tissu ou une surface. Si un matériau autocicatrisant présente une rayure, celle-ci peut être remplie et même refermée, ce qui donne un matériau qui semble n'avoir jamais été rayé. Cette caractéristique est déjà appliquée dans les revêtements et les peintures pour carrosseries automobiles. Par exemple, la marque Toyota a été l'une des premières à utiliser une peinture de surface contenant de l'auto-réparation sur certains de ses modèles. Ainsi, même les petites rayures se réparent d'elles-mêmes sans qu'il soit nécessaire d'appliquer une nouvelle couche de peinture. Une autre application est celle des téléphones portables, dont certains modèles intègrent déjà ces matériaux dans les protections d'écran et les boîtiers. Une fois encore, cela montre que ces matériaux contribuent à prolonger la durée de vie des produits.



Figure 12. Matériaux self-healing et autoréparateurs. Source: Atria Innovation

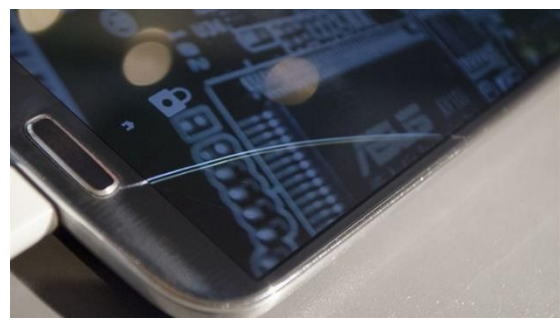


Figure 13. Le téléphone portable du futur réparera ses propres rayures comme par magie. Source: elDiario.es

### Casses :

Normalement, lorsqu'une rupture se produit, le composant est généralement considéré comme perdu et nécessite donc un remplacement complet ou même une tentative de réparation afin de rattacher les parties qui se sont séparées. C'est pourquoi des matériaux autoréparables ont déjà été mis au point, capables de réunir les segments séparés en appliquant simplement une pression sur ceux-ci. Le résultat est qu'ils sont complètement joints comme si de la colle avait été appliquée entre les deux segments ou comme s'ils avaient été soudés ensemble. De cette façon, le matériau reprend sa forme initiale et présente la même résistance au niveau du joint qu'avant la fente.



Figure 14. L'Université d'Alicante trouve un matériau capable de s'autoréparer. Source: Université d'Alicante. Actualité universitaire

### **Corrosion :**

Le phénomène de la corrosion consiste en un processus de détérioration des matériaux métalliques par des réactions chimiques et électrochimiques, dues au fait que ces matériaux cherchent à atteindre un état de potentiel énergétique inférieur. Ce phénomène peut être évité si ce revêtement protecteur peut s'autoréparer en peu de temps. Ce procédé a pour caractéristique d'isoler le substrat métallique de l'environnement extérieur et de prévenir ainsi la corrosion en le protégeant. Aujourd'hui, ces peintures et revêtements destinés à protéger le matériau contre la corrosion sont sur le marché et pourraient représenter un grand changement dans l'industrie dans un avenir proche.

Figure 15. Applications des matériaux autocicatrisants. Corrosion. Source: Atria Innovation



## 2.5 LES CARACTÉRISTIQUES NÉCESSAIRES À L'AUTORÉPARATION :

Il existe deux groupes de matériaux qu'il est essentiel de différencier, qui sont les deux mécanismes d'autoréparation les plus simples. L'un est le mécanisme extrinsèque et l'autre le mécanisme intrinsèque.

### **Mécanismes extrinsèques**

Ce groupe de matériaux signifie que, sous l'effet d'une force extérieure, le matériau peut s'autoréparer. Par exemple, si nous prenons un matériau quelconque, nous le coupons en faisant une rayure et nous le traitons ensuite à la chaleur, c'est-à-dire que nous le plaçons à une température différente de la température ambiante, par exemple à une température comprise entre 60 et 90 degrés pendant un certain temps, finalement ce matériau pourrait parvenir à s'autoréparer.

### **Mécanismes intrinsèques**

Il s'agit de matériaux qui s'autoréparent, c'est-à-dire sans modification ni source extérieure. Cependant, il existe très peu de matériaux qui peuvent être réparés par des mécanismes intrinsèques, car pour cela, trois caractéristiques doivent en principe être remplies :

1. Tout d'abord, le matériau doit être polymérique, un polymère.
2. En outre, il doit avoir une structure suffisamment mobile pour permettre aux chaînes de polymères de se déplacer.
3. Enfin, ce matériau doit également présenter des propriétés mécaniques suffisamment élevées pour que le matériau soit durable dans son utilisation.

C'est pour cette raison qu'au niveau scientifique, le grand défi actuel est d'atteindre un haut degré de mobilité des chaînes. Cela signifie que le matériau doit être souple pour que les chaînes puissent bouger, mais qu'il doit en même temps avoir une bonne résistance mécanique, ce qui signifie que les chaînes ne peuvent pas bouger. C'est donc l'un des objectifs que poursuivent de nombreux chercheurs.

De plus, l'une des questions les plus fréquemment posées est de savoir pourquoi le matériau doit être un polymère.

La réponse est que pour que l'autoréparation ait lieu, le matériau doit avoir des propriétés viscoélastiques. Fondamentalement, les matériaux viscoélastiques sont par essence des polymères et c'est pourquoi il existe de nombreux matériaux polymères, y compris, par exemple, de nombreux matériaux que nous avons dans la cuisine tels que les protéines, l'amidon, le riz, les légumineuses, etc. Ce sont tous des matériaux polymères. Ces matériaux ont une caractéristique spéciale et unique que les autres matériaux n'ont pas, celle d'être à la fois solides et liquides. Lorsque vous classez les matériaux, vous avez des matériaux solides comme une roche et des matériaux liquides comme l'eau, entre autres. Une roche est un matériau qui n'a pas de caractéristiques liquides et l'eau n'a pas de caractéristiques solides. Cependant, les polymères possèdent les deux caractéristiques à la fois. En combinant correctement la partie solide, que l'on appelle dans la science des matériaux la partie élastique, avec la partie liquide, que l'on appelle la partie visqueuse, l'autoréparation peut être obtenue.

## **2.6 PROBLÈMES ET INCONVÉNIENTS :**

Actuellement, les matériaux autoréparables ne sont pas encore bien connus, principalement pour deux raisons. La première raison est qu'il n'existe pas d'applications définies présentant un intérêt pour l'industrie. C'est-à-dire que, d'un point de vue scientifique, c'est un défi intéressant, surtout en science des matériaux, de savoir si nous sommes vraiment dans une situation où nous pouvons être en mesure de contrôler leur fonctionnement. Par exemple, nous pourrions le comparer au fait qu'après notre mort, nous revenons à la vie. La deuxième raison est que, bien que cela puisse paraître curieux dans l'état actuel de la technologie, de nombreuses entreprises ne tiennent pas compte de ce fait. Par exemple, si les écrans des appareils mobiles ou des ordinateurs étaient réellement autoréparables, ce qui fait d'ailleurs l'objet de nombreuses recherches actuellement, cela entraînerait une baisse des ventes de nouveaux appareils. Nous pourrions donc l'expliquer en deux parties ; en

commençant par la partie industrielle, il y a des entreprises qui trouvent les caractéristiques de ces matériaux intéressantes mais cela ferait baisser leurs ventes. Et la deuxième partie fait référence au niveau de diffusion, à l'heure actuelle, presque tout le monde se concentre sur les questions biomédicales, notamment en raison de la question du covid ou de la question de tout ce qui préoccupe davantage la société, à savoir la problématique de la santé. Là, par exemple, les matériaux autoréparables ne semblent pas être aussi importants que, par exemple, les asphaltes. En fait, l'une des technologies où ils sont actuellement appliqués à un niveau industriel est le génie civil, où ce type de matériau est utilisé dans l'asphalte et les routes. Bien que ce ne soit pas vraiment le système d'auto-réparation le plus souhaitable du point de vue des matériaux, il parvient néanmoins à encapsuler les matières premières en cas de rupture et à générer des réactions chimiques qui régénèrent le matériau.

Aujourd'hui, de nombreuses entreprises n'utilisent pas ces matériaux malgré le fait qu'ils nous offrent des caractéristiques innovantes et impressionnantes, et ce, principalement pour des raisons économiques. En effet, la fabrication de ce type de matériau n'est pas bon marché et, par conséquent, de nombreuses entreprises ne sont pas intéressées et finissent par utiliser un matériau plus simple et moins cher. En plus, il y a un autre facteur qui est aussi important, et c'est que l'un des aspects qui n'est pas suffisamment connu est comment l'auto-réparation des matériaux se produit. Il y a ici un manque de connaissances, et cela inclut les matériaux développés par les experts en la matière, puisqu'ils vérifient que cette autoréparation se produit et savent dans quelles conditions elle est favorable et dans quelles conditions elle ne l'est pas. Cependant, le mécanisme par lequel il se produit n'est pas connu actuellement. Ces deux raisons se rejoignent donc et il ne faut pas oublier que l'économie circulaire s'engage en faveur des matériaux qui ne changent pas de nature chimique. Par conséquent, presque tous les systèmes d'auto-réparation connus dans les matériaux impliquent des modifications chimiques du matériau, ce qui limite également leurs applications.

## 2.7 MATÉRIAUX AUTORÉPARABLES DANS DIFFÉRENTS DOMAINES

### LES ÉNERGIES RENOUVELABLES :

Dans le monde des énergies renouvelables, l'autoréparation est une propriété souhaitable et certaines entreprises qui travaillent dans ce domaine, notamment dans celui des éoliennes, tentent de mettre en œuvre des matériaux autoréparables. Le problème de la mise en application de matériaux autoréparables dans ce domaine est encore une fois que l'autoréparation exige souvent que le matériau ait cette mobilité de la chaîne. Pour comprendre et visualiser un polymère, on choisit souvent l'exemple des spaghettis : un polymère est comme une assiette de spaghettis sans aucun additif, exactement comme les spaghettis cuits, donc si on coupe les spaghettis en deux et qu'on les met sur l'assiette, ils apparaîtront séparés. Cependant, si nous les faisons bouillir à nouveau, ces spaghettis, sous l'effet de la chaleur, s'assemblent à nouveau et, par conséquent, lorsqu'ils s'assemblent, les spaghettis deviennent plus rigides que lorsqu'ils étaient dans leur état initial. Si nous coupons à nouveau les spaghettis et les cuisons à nouveau, cette autoréparation est perdue.

Cela dit, il y a trois choses qui limitent actuellement le déploiement de cette technologie :

La première est l'auto-réparation en plusieurs étapes, c'est-à-dire que le matériau se fissure et ensuite s'auto-répare plusieurs fois. Plus le nombre d'autoréparations augmente, plus la capacité du matériau à s'autoréparer diminue.

Le second est lié aux conditions environnementales, car les éoliennes sont situées dans des endroits où il y a des changements soudains de température, des changements soudains d'humidité, des changements soudains de vent, etc. Il est donc évident que tous ces changements affectent réellement les propriétés de ce type de matériaux. Par conséquent, nous ne sommes pas encore parvenus à un matériau suffisamment résistant à ces agents et qui maintient également son autoréparation.

Enfin, la troisième est une question de coût. Par exemple, l'une des éoliennes en cours d'installation, qui sont celles que l'on trouve dans la mer, chaque pale d'éolienne fait 80 mètres de long. Faire en sorte que cette pale de 80 mètres contienne un polymère



auto-réparateur nécessite donc un investissement énorme car, pour l'instant, ces matériaux sont plutôt sophistiqués.

Cependant, le génie civil et les énergies renouvelables sont des domaines où l'autoréparation a un très bon avenir à moyen terme.

## **LES PEINTURES ET LES ÉCRANS :**

Dans les secteurs de l'automobile et de la technologie, comme celui des smartphones, la science des matériaux progresse déjà de telle sorte qu'une rayure sur notre voiture ou notre téléphone portable peut être auto-réparée par la simple incidence de la lumière du soleil. Les polymères autoréparables vont dans cette direction depuis des années, mais le grand défi pour les chercheurs est de trouver la formule parfaite, c'est-à-dire que la rayure disparaisse d'elle-même, presque comme la peau humaine, sans dépendre d'un agent extérieur agressif, et que le matériau soit compatible et peu coûteux. Ce projet est développé par l'Institut coréen de recherche en technologie chimique et repose sur ces trois caractéristiques, à savoir que l'autoréparation doit être pratique, économique et durable. Il s'agit d'un revêtement protecteur avec un colorant photothermique organique transparent qui peut être appliqué sur n'importe quelle surface et qui s'auto-répare en quelques minutes seulement sous la lumière du soleil. En plus d'être rapide, il a la capacité de se régénérer à plusieurs reprises dans la même zone.

## **LES BIOMATERIALS :**

Il existe de nombreux types de biomatériaux : valves cardiaques, prothèses articulaires, implants dentaires... Ils sont fabriqués à partir de cellules, de tissus vivants, de métaux, de céramiques, de plastique ou de verre. L'Institut national américain d'imagerie biomédicale et de bio-ingénierie indique qu'ils peuvent être transformés en pièces moulées, en revêtements, en fibres, en mousses, en films, en tissus, entre autres. L'ingénieur américain Kristi Anseth, lauréate du prix L'Oréal-Unesco, estime que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour percer tous les mystères du corps humain. "Nous avons régénéré la peau, le cartilage et les vaisseaux sanguins, et nous avons également aidé les os à guérir plus rapidement, mais nous devons encore faire plus. Nous devons cependant aller plus loin : comment se fait-il que, lors d'une crise cardiaque, le cœur ne se régénère pas de la même manière que les muscles squelettiques que nous utilisons pour marcher et faire de l'exercice ? Les biomatériaux peuvent jouer un rôle clé en aidant notre corps à se guérir.

## **LA ROBOTIQUE :**

Appliquée à la robotique, l'autoréparation progresse également. Auparavant, les robots avaient besoin de chaleur pour se réparer, ce qui constituait une faille dans leur capacité à être utilisés sur le marché. Mais des chercheurs du département d'ingénierie de Cambridge ont mis au point des matériaux gélatineux qui détectent le stress, la température et l'humidité et qui, appliqués à des robots, peuvent se réparer partiellement à température ambiante. S'il est développé plus avant, il pourrait être incorporé dans des peaux artificielles. Il s'agit d'un autre exemple de matériau autoréparable, peu coûteux, biodégradable, biocompatible et facile à fabriquer, ce qui en fait la meilleure option pour la robotique à senseurs mous.

### **3.L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE :**

L'économie circulaire est un système ou un mode de production et de consommation qui vise à assurer une croissance écologique durable dans le temps et qui implique la réutilisation, la réparation, le renouvellement et le recyclage des matériaux et des produits existants, pour autant qu'ils soient employés aussi souvent que possible pour produire une valeur ajoutée. De cette façon, la vie des produits ne s'arrête pas si vite et ils peuvent être utilisés à d'autres usages. En d'autres termes, avec l'économie circulaire, nous voulons nous concentrer sur la maximisation des ressources, la diminution de la consommation de matières premières et la transformation des déchets. Il s'agit de minimiser les déchets et de s'opposer au modèle économique linéaire traditionnel, qui repose sur l'utilisation du principe "utiliser et jeter". Cela génère d'énormes quantités de matériaux et d'énergie qui ont la particularité d'être bon marché et faciles à trouver. L'objectif principal de l'économie circulaire est donc d'essayer d'utiliser au mieux les ressources matérielles dont nous disposons à présent et, dans le même temps, d'allonger le cycle de vie des produits. Cette idée a été créée dans l'intention d'agir comme le fait la nature, à nouveau présente et comme point de référence pour progresser vers un monde plus soutenable. Dans le monde de la nature, tout est utilisé et a une valeur, et les déchets deviennent une nouvelle ressource.

Fondamentalement, la principale raison d'adopter une économie circulaire est le manque de ressources et l'exploitation des matières premières. Ces matières premières indispensables sont de plus en plus limitées par rapport à la croissance continue de la population mondiale. Mais il y a d'autres facteurs contribuant à cela qui incluent la nécessité d'utiliser des matériaux provenant d'autres pays ou l'impact sur le climat, car l'extraction des matières premières, affectent négativement sur l'environnement. Actuellement, nous avons vécu avec des modèles de production linéaire, dans lequel, nous gaspillons nos ressources, une fois qu'elles sont produites et consommées. Ce mode de vie est principalement assez rapide mais en même temps, très peu durable. Cependant, l'économie circulaire nous offre un modèle de consommation plus écologique, car elle cherche à générer moins de déchets. L'économie circulaire, donc, pourrait nous être bénéfique en réduisant la pression sur

l'environnement, en améliorant l'approvisionnement en matières premières et, parallèlement, en favorisant la compétitivité, l'innovation et la longévité des produits. En même temps, elle protège l'environnement en diminuant les émissions et la production de déchets. Elle favorise également l'emploi lorsqu'elle vise à stimuler le développement d'un nouveau modèle industriel et incite l'indépendance des ressources.

Toutefois, nous connaissons presque tous la règle des 3R pour le développement durable : réduire, réutiliser et recycler. Mais pour obtenir une économie circulaire, 4 règles R supplémentaires doivent être mises en œuvre : redessiner, réparer, renouveler et récupérer. Toutes ces règles forment la règle des 7R, qui sont les étapes de référence pour accéder à une économie circulaire. En conclusion, la réduction mondiale du gaspillage des ressources doit être l'objectif de l'économie circulaire, ainsi que l'augmentation du bien-être et de la durabilité environnementale afin de déconnecter la consommation des ressources de la croissance du PIB. En effet, faire plus et mieux avec moins est crucial dans ce mouvement.

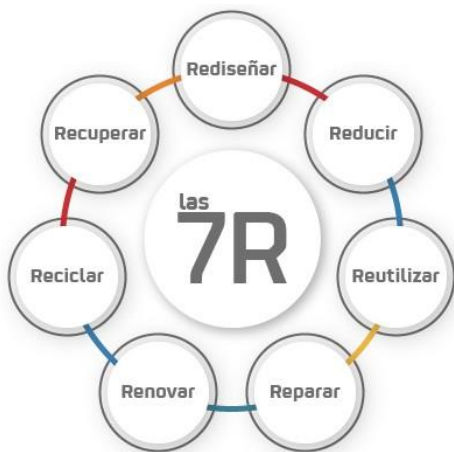


Figure 16. Quels sont les principes de l'économie circulaire?  
Source: Repsol Global

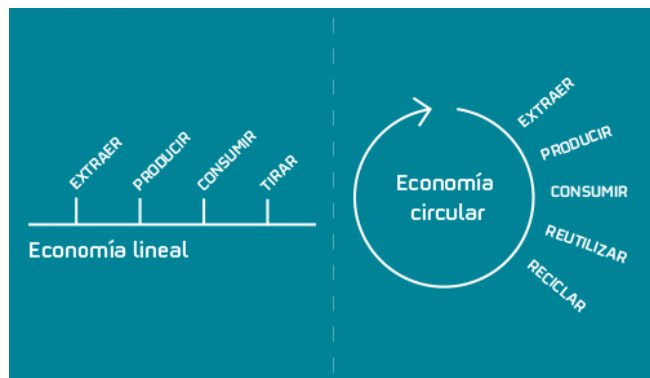


Figure 17. Quelle est la différence entre l'économie circulaire et l'économie linéaire?  
Source: Repsol Global

## 4.L'OBSOLESCENCE

L'obsolescence est le déclin des machines et des technologies, causé par l'insuffisance de leurs fonctionnalités par rapport aux nouvelles machines et technologies commercialisés. Par conséquent, les produits ne sont pas abandonnés en raison de leur dysfonctionnement naturel. Elle peut également être définie comme la réduction de la longévité d'un produit de consommation, en raison du progrès technologique ou de l'évolution économique.

Il y a plusieurs circonstances qui font qu'un appareil ou une technologie devient obsolète. La principale raison de cette obsolescence est le perfectionnement de nouveaux systèmes ou de nouvelles technologies qui offrent des prestations plus élevées et plus avantageuses. Par conséquent, le concept d'obsolescence peut être résumé comme étant de caractère plus économique que technologique.

Par ailleurs, l'obsolescence correspond parfois à la stratégie du fabricant. Il existe donc, trois sortes d'obsolescence :

- **Obsolescence planifiée ou programmée** : elle se manifeste dans le cas où une entreprise donnée, lors de la fabrication d'un produit, en anticipe la durée de vie utile. Ceci en vue de programmer, dans une certaine mesure, sa fracture ou son utilisation. De cette manière, l'entreprise empêche que ses produits soient réparés, sans altérer son identité de marque. En outre, l'entreprise incite à la consommation de son nouveau produit quand celui-ci commence à être en panne.

Les ampoules électriques sont un exemple d'obsolescence planifiée. Les premières ampoules fabriquées ont été conçues pour fonctionner le plus longtemps possible. Puis fut introduit un filament plus fin, qui se brisait plus facilement, ce qui impliquait des achats plus fréquents d'ampoules, et par conséquent, l'émergence de plus en plus de déchets. L'une des solutions proposées consiste donc à recourir au remplacement des ampoules électriques par des ampoules LED.

- **Obsolescence perçue** : Obsolescence perçue : cela se produit à partir du moment où l'entreprise, sur une base ponctuelle, modifie de façon superficielle l'apparence de son produit. Ainsi, l'entreprise favorise l'achat du nouveau produit, rendant le précédent obsolète. Il s'agit donc d'une démarche très utile lorsque l'entreprise souhaite atteindre un chiffre des ventes plus élevé.

L'obsolescence perçue a davantage à voir avec la publicité et les différents lancements des grandes entreprises. Un exemple très précis d'obsolescence perçue se situe dans le monde du textile. Les entreprises de vêtements, commercialisent des articles qu'elles ont déjà présentés sur le marché afin de gonfler leurs revenus. Elles réalisent cette stratégie en modifiant leurs couleurs ou quelques aspects superficiels. De cette façon, l'entreprise classe les vêtements comme si ces derniers faisaient partie d'une nouvelle collection, ce qui donne au vêtement désuet une apparence différente et dépassée.

- **L'obsolescence spéculative** : Nous parlons d'obsolescence spéculative quand une entreprise met un produit sur le marché, mais y ajoute des perfectionnements au fur et à mesure pour promouvoir les ventes. Cela permet à l'entreprise, en fonction des nouveautés et des modifications qui lui sont appliquées, de favoriser la vente du produit dans le temps

Ce type d'obsolescence peut concerner le secteur des ordinateurs, des téléphones portables ou des tablettes. Il est fréquent que nous achetions un téléphone portable, mais au bout de quelques mois, nous découvrons que l'entreprise a lancé une version avec un meilleur appareil photo ou un écran plus grand. La mise en œuvre de cette obsolescence vise à permettre son insertion sur le marché, mais aussi à favoriser la commercialisation du produit dans le temps.

En conclusion, l'obsolescence est une immense source de ressources gaspillées ou surexploitées, de perte de temps, d'émissions de gaz à effet de serre, de pollution et de consommation d'énergie évitable. Il est donc clair que l'obsolescence a un impact indéniable sur la production de déchets, puisqu'elle ne fait que créer le besoin de consommer encore plus, rendant les produits de moins en moins utiles. En d'autres termes, la production et la vente incessantes de toutes les catégories de produits génèrent toutes sortes de déchets de matériaux différents, recyclables ou non. Ces déchets aboutissent à polluer d'une quelconque manière, c'est pourquoi il est essentiel de réduire leur consommation.

Par conséquent, en ce qui concerne les matériaux autoréparables, nous pourrions dire qu'ils sont leurs principaux "ennemis", car ce que ces matériaux cherchent à faire, c'est prolonger la vie utile des produits, en les réparant et en les recyclant en même temps lorsqu'ils subissent des dommages, comme l'économie circulaire nous en avertit. De plus, comme nous venons de le voir, l'obsolescence consiste à réduire la durabilité des produits. C'est pourquoi tant l'application de ces matériaux dans l'industrie que l'obsolescence sont un jeu stratégique pour les industries et les entreprises, car il est beaucoup plus rentable pour elles que les produits aient une courte durée de vie utile afin qu'il y ait plus de production et plus de revenus.

## 5.PARTIE PRATIQUE :

### PRATIQUE RÉALISÉE dans le service des matériaux polymères et composites de l'université de Mons (site Materia Nova) 25/07/22



Le lundi 25 juillet, j'ai eu l'occasion de retourner dans les établissements de l'Université de Mons, en Belgique. Cette fois, j'ai pu réaliser quelques tests pour montrer et observer comment visualiser l'autoréparation des matériaux. Par ailleurs, j'ai eu la chance de rencontrer Louis Van Renterghem, doctorant à l'Université de Mons dans le domaine des matériaux polymères et composites. Grâce à lui, ce stage a été un succès, car il m'a fourni tout le matériel nécessaire, m'a laissé utiliser les installations et les machines des laboratoires et m'a aidé à tout moment. Durant cette pratique, j'ai fait deux tests : l'un à l'aide d'un microscope et l'autre à l'aide de la machine DMA (Analyse Mécanique Dynamique).

Je suis donc arrivé à Mons à 10 heures et j'ai terminé vers 17h, avec une pause d'une heure pour manger.

Dans l'ensemble, c'était une expérience très enrichissante et intéressante, et surtout j'ai pu apprendre beaucoup de choses

sur ce domaine, ce qui me donne encore plus envie d'étudier l'ingénierie des matériaux.





**Tout le matériel photographique, les graphiques et les images d'analyse sont réalisés par ma propre personne.**

Avant de commencer à analyser les tests que nous avons réalisés, je vais définir quelques concepts théoriques sur trois types de matériaux différents que j'ai également appris pendant mon expérience à Materia Nova. C'est pour cette raison que l'information



THERMOPLASTIQUES	VITRIMÈRE	THERMODURS
Soluble	Soluble ✗	Soluble ✗
Fusible	Fusible ✗	Fusible ✗
Reprocessable	Reprocessable	Reprocessable ✗

Soluble : Qui peut se dissoudre dans un solvant approprié, un liquide ou un corps liquéfié.

Fusible : Se dit d'un matériau qui fondre.

Reprocessable : Capacité d'un matériau à être réutilisé, par exemple si nous coupons un matériau en petits morceaux et appliquons de la chaleur, il se recollera.

## **LES MATÉRIAUX THERMOPLASTIQUES:**

Les thermoplastiques sont des matières plastiques qui peuvent être fondues à haute température, ce qui permet de leur donner diverses formes. Le matériau entre en fusion lorsqu'il est chauffé et durcit lorsqu'il est refroidi. Ce phénomène est important pour le recyclage des plastiques, car si nous les chauffons, nous pouvons modifier leur forme et les mouler en d'autres objets. Il faut cependant remarquer que lorsqu'ils sont fondus et moulés plusieurs fois, leurs propriétés physiques décroissent car les liaisons sont affaiblies. Ces matériaux possèdent une structure amorphe ou cristalline, mais il s'agit systématiquement de chaînes lâches qui ne sont pas liées entre elles. Les thermoplastiques peuvent être souples et flexibles, comme les gaines de câbles, ou rigides, comme les canalisations en PVC. En outre, les polymères thermoplastiques sont solubles si un solvant est capable de briser les interactions moléculaires qui les unissent, de sorte qu'ils peuvent être employés comme adhésifs ou comme revêtements.

Les caractéristiques des thermoplastiques sont donc : Soluble, fusible et reprocessable.

## **LES MATÉRIAUX THERMODURS :**

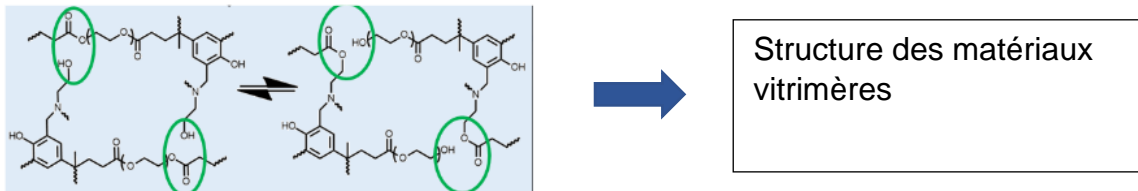
Les thermodurs sont parmi les premiers plastiques industriels et se définissent par leurs excellentes propriétés d'isolation mécanique et électrique. En plus de ces deux propriétés, les thermodurs sont réputés pour leur bonne résistance aux conditions climatiques, leur résistance chimique aux solvants organiques courants, leur capacité de résilience et leur résistance à la chaleur, ainsi que leur haute résistance thermomécanique. De plus, les thermodurs ne fondent pas, ils se détériorent sous l'effet de la température.

Par conséquent, nous pouvons le résumer comme étant des matériaux insolubles, infusibles et non reprocessables.

## LES MATÉRIAUX VITRIMÈRES :

Les vitrimères sont un nouveau genre de polymère organique léger et tenace qui, une fois durci, est capable de refondre et de remodeler comme le verre, tout en possédant des propriétés mécaniques plus élevées que ce dernier. En fait, les vitrimères sont les seuls matériaux organiques réputés ayant des propriétés viscoélastiques similaires à celles du verre. Ils ont donc les qualités des composites thermoplastiques, une catégorie de plastiques qui peuvent être refondus et remoulés, et donc recyclés, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de pouvoir être reprocessés. En outre, ils obtiennent les qualités des matériaux thermodurs, qui offrent de bonnes propriétés mécaniques, chimiques et thermiques, mais ne peuvent être réemployés (s'ils sont réchauffés, ils brûlent mais ne fondent pas), ce qui signifie que les vitrimères ne sont ni solubles ni fusibles. En ce qui concerne leur structure, les vitrimères sont très semblables aux thermodurcissables. La différence est qu'ils ont des liaisons qui sont continuellement échangées dans le matériau, ce qui favorise cette autoréparation.

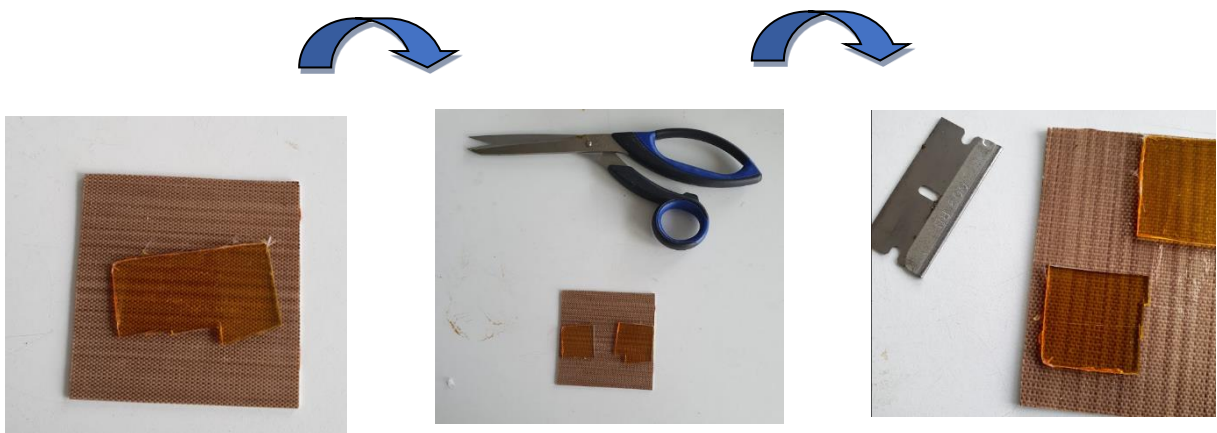
Tous les tests que nous avons effectués ont été réalisés avec des matériaux vitrimères.



Lors de cette journée, deux tests ont été réalisés pour caractériser le caractère autoréparant des vitrimères :

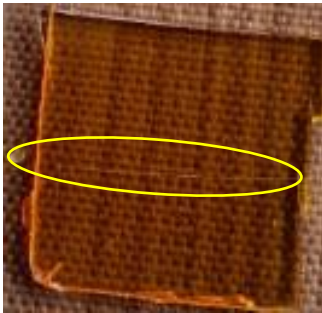
- Test microscope via la coupure avec une lame de rasoir (Test 1)
- Tests mécaniques par DMA (Test 2)

## PROCÉDURE TEST 1 (microscope) :



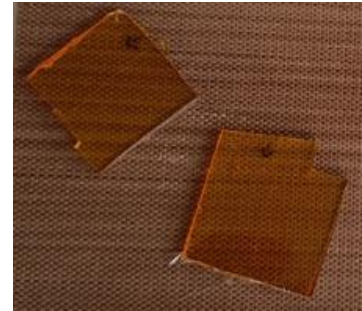
Le but de ce test est de réaliser une coupure sur un matériau et de visualiser l'évolution de cette entaille en fonction de la température.

Tout d'abord, nous prenons le matériau dont nous disposons, qui est un matériau vitrimère et qui a la caractéristique d'être souple. La première chose à faire est de couper le matériau en deux parties à l'aide d'une paire de ciseaux, nous avons fait cela pour comparer avec et sans pression. Ensuite, nous prenons une lame de rasoir qui fait des tailles très fines, et nous effectuons une petite fissure, pas trop profonde et très fine, dans les deux morceaux de matériau.



Ici, nous pouvons voir de plus près à quel point la fissure est fine.

Ensuite, nous dessinons quelques petites flèches avec un marqueur pour indiquer où se trouvent les fissures que nous avons faites et nous pouvons ainsi mieux les analyser.



Puis, nous mettons chaque morceau de matériau dans un sac avec des indications pour les distinguer, l'échantillon 1 sera réparé grâce à la température et la pression, tandis que l'échantillon 2 subira seulement une chauffe. De cette façon, nous pouvons comparer les résultats obtenus.

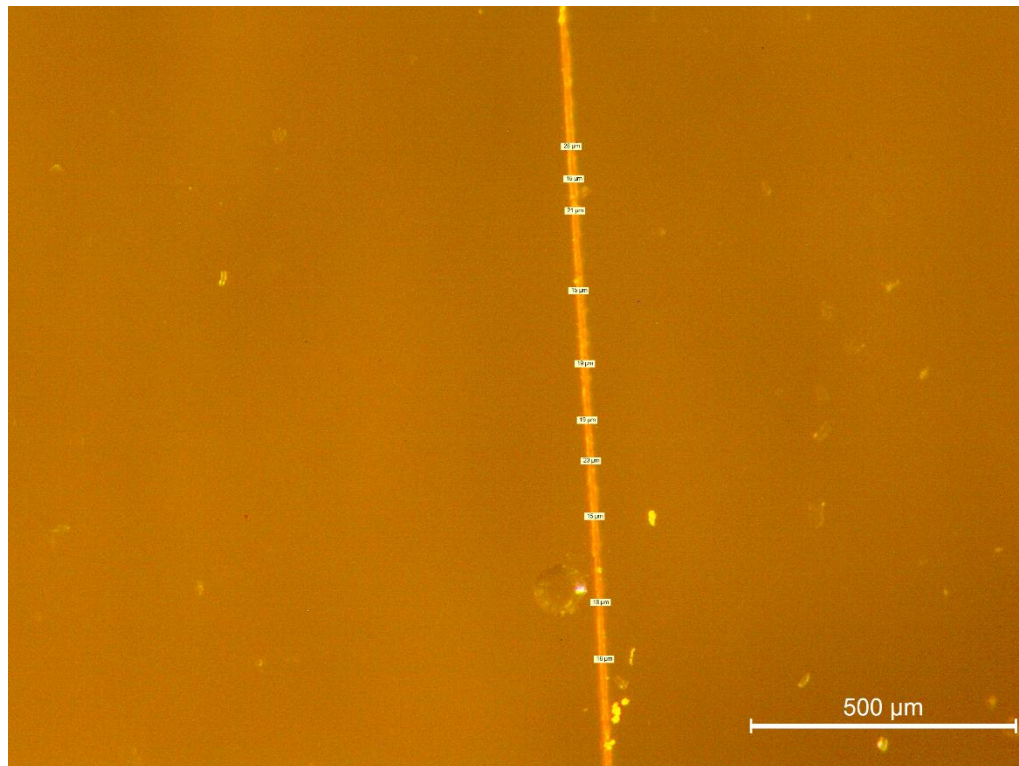


## ÉCHANTILLON 2 (SANS PRESSION) :

Les échantillons sont analysés sous le microscope pour analyser et mesurer l'épaisseur de la fissure avant de la chauffer, de cette façon nous pourrions savoir si une fois le matériau chauffé, la fissure a diminué, disparu ou reste la même.



- **ÉCHANTILLON 2 AVANT DE LE CHAUFFAGE :**



Nous pouvons observer la fissure au microscope à un grossissement de 500  $\mu\text{m}$ .

Grâce à l'ordinateur connecté au microscope, nous avons pu mesurer l'épaisseur de la fissure. Pour obtenir un résultat plus précis, nous avons mesuré la fissure 10 fois car selon la zone que vous mesurez, la valeur peut changer puisque la taille n'est pas la même pour toute la fissure.

Enfin, nous avons pris les 10 résultats obtenus et en avons fait la moyenne.

Measurement #	Image Name	Tool	Line Length (µm)	Width (µm)	Height (µm)	Angle (°)	X1	Y1	X2	Y2
1	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	28	23	16	35	1 417 367	1 449 345		
2	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	15	14	5	18	1 430 442	1 449 436		
3	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	21	18	9	27	1 430 526	1 455 514		
4	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	15	14	5	-18	1 442 720	1 461 726		
5	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	19	18	2	7	1 455 911	1 480 908		
6	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	19	18	2	-7	1 461 1 051	1 486 1 054		
7	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	23	23	2	6	1 467 1 158	1 499 1 154		
8	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	15	15	3	-9	1 482 1 296	1 502 1 299		
9	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	18	18	0	0	1 495 1 516	1 520 1 516		
10	Photo Paula 2.jpg	VectorLine	16	15	5	-18	1 506 1 658	1 527 1 665		

On peut voir ici les résultats obtenus sur la fissure avant d'être soumise à la chaleur. La moyenne des 10 mesures est de 18,9 µm.

- **ÉCHANTILLON 2 PENDANT LE CHAUFFAGE :**

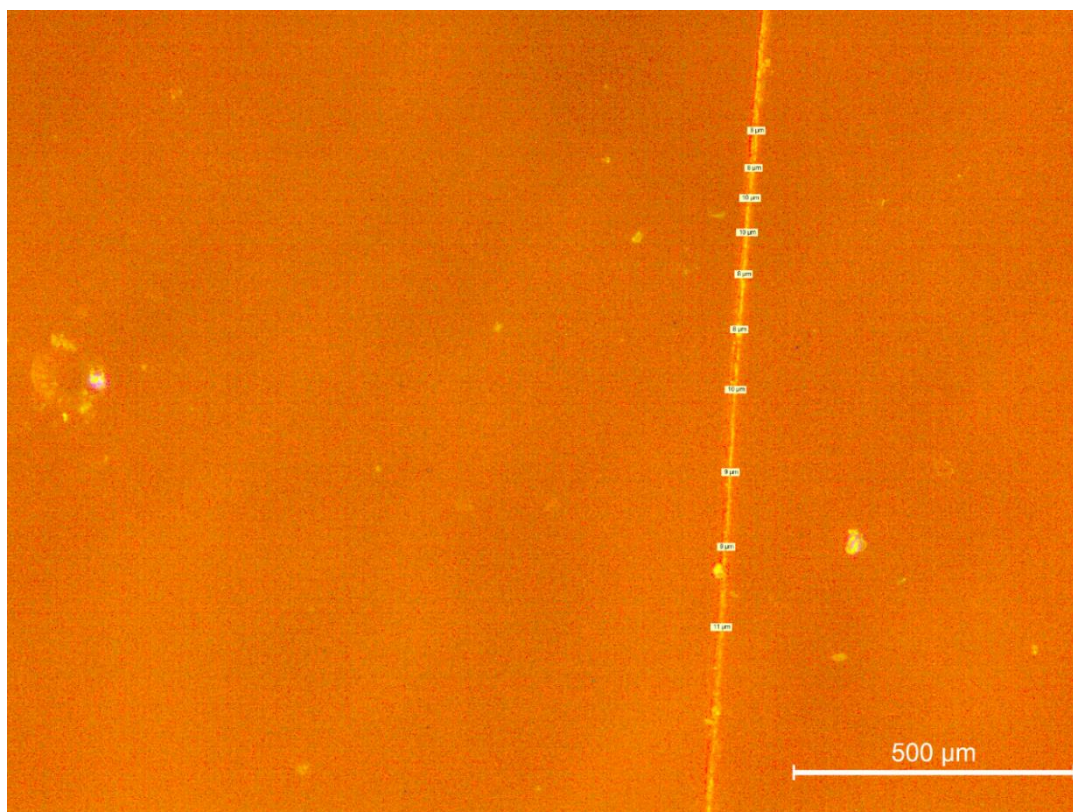


À l'aide des gants résistants à la chaleur, nous plaçons le morceau de matériau précédemment analysé sur un support métallique et attendons que le four du laboratoire monte à 160°. Nous avons choisi cette température pour être au-dessus de la Tg du matériau, qui est la transition en température lorsque le matériau passe de rigide à mou.

Une fois que le four atteint 160°, nous mettons le matériau au four pendant 1 heure.



- ÉCHANTILLON 2 APRÈS LE CHAUFFAGE :



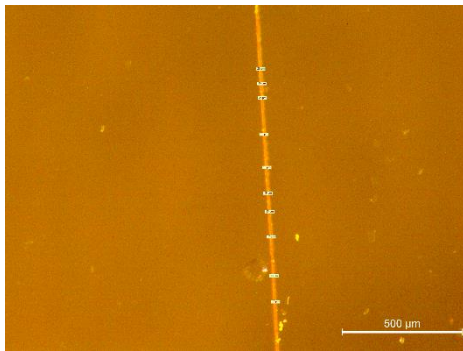
Au bout d'une heure, nous retirons le matériau du four, le laissons refroidir pendant une minute à température ambiante et puis le remettons sous le microscope avec le même grossissement, pour analyser à nouveau la fissure. Au premier coup d'œil, nous pouvons déjà voir que la fissure est plus étroite et plus fine, et en fait, les nouvelles mesures du programme informatique le confirment.

Measurement #	Image Name	Tool	Line	Length (μm)	Width (μm)	Height (μm)	Angle (°)	X1	Y1	X2	Y2
1	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	8	8	8	0	0	1 796	289	1 806	289
2	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	8	8	8	0	0	1 789	378	1 799	378
3	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	10	10	10	0	0	1 778	451	1 792	451
4	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	10	10	10	0	0	1 771	534	1 785	534
5	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	8	8	8	0	0	1 764	634	1 775	634
6	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	8	8	8	3	-18	1 754	765	1 764	768
7	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	10	10	10	3	14	1 744	913	1 758	909
8	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	9	8	8	5	34	1 733	1 113	1 744	1 106
9	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	8	8	8	0	0	1 723	1 289	1 733	1 289
10	Photo Paula 1 après 160°C 1h.jpg	VectorLine	11	10	10	5	-27	1 709	1 478	1 723	1 485

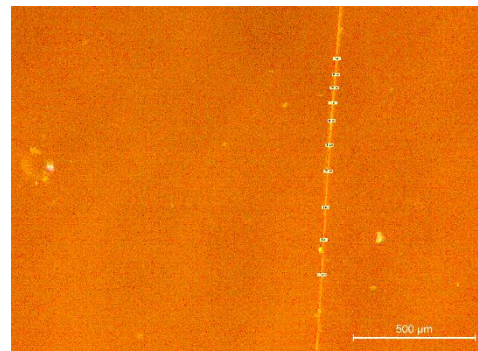
Évidemment, cette fois-ci, nous avons également mesuré 10 fois l'épaisseur de la fissure et la moyenne obtenue est de 9 μm.



- **RÉSULTATS DE L'ÉCHANTILLON 2 (SANS Pression) :**



Avant



Après

	A	B	C	D
1		Avant	Après	
2		28	8	
3		15	8	
4		21	10	
5		15	10	
6		19	8	
7		19	8	
8		23	10	
9		15	9	
10		18	8	
11		16	11	
12	Moyenne	18,9	9	
13				
14	%	52,380952		
15				
16				

Afin de connaître le résultat final, nous avons utilisé un tableau Excel pour effectuer les calculs. Nous avons mis les 10 mesures obtenues avant et après, chacune avec leurs moyennes et ensuite nous avons calculé le pourcentage d'auto-réparation.

On peut donc dire qu'en laissant le matériau dans le four à 160° pendant 1 heure, la fissure a été réduite d'un peu plus de la moitié, c'est-à-dire qu'elle s'est autoréparée à 52% par microscope. En outre, nous pouvons également supposer que si nous avons laissé le matériau dans le four pendant une période plus longue, la fissure se serait probablement autoréparée avec un pourcentage plus élevé et aurait presque atteint l'auto-réparation totale.

$$\% = \frac{(Moyenne\ avant - Moyenne\ après)}{Moyenne\ avant} * 100$$

$$52,381 = \frac{(18,9 - 9)}{18,9} * 100$$

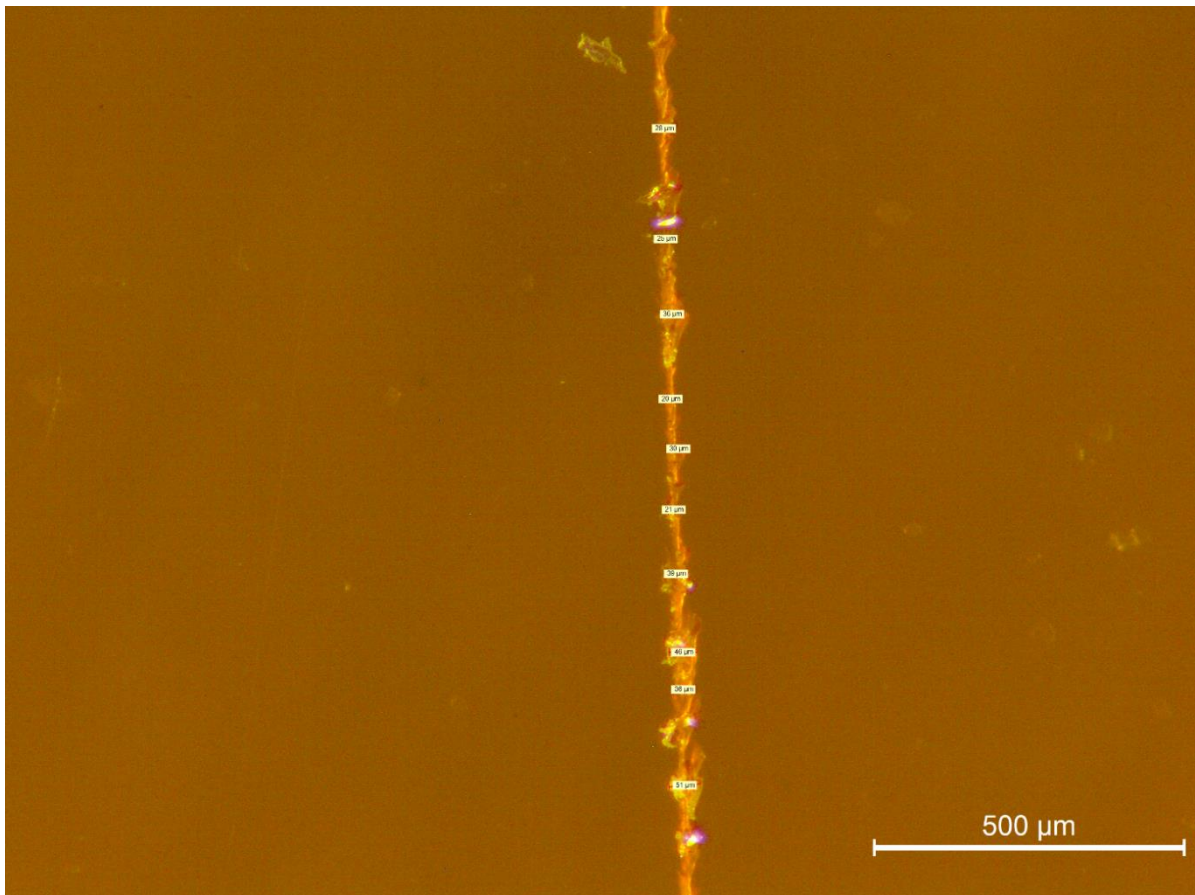


Formule de calcul du pourcentage d'autoréparation par microscope

## ÉCHANTILLON 1 (AVEC PRESSION) :

Après avoir effectué le premier test, commençons par analyser au microscope la fissure de l'échantillon 1 avant de la chauffer et de la presser.

- ECHANTILLON 1 AVANT LE CHAUFFAGE ET LA PRESSION :

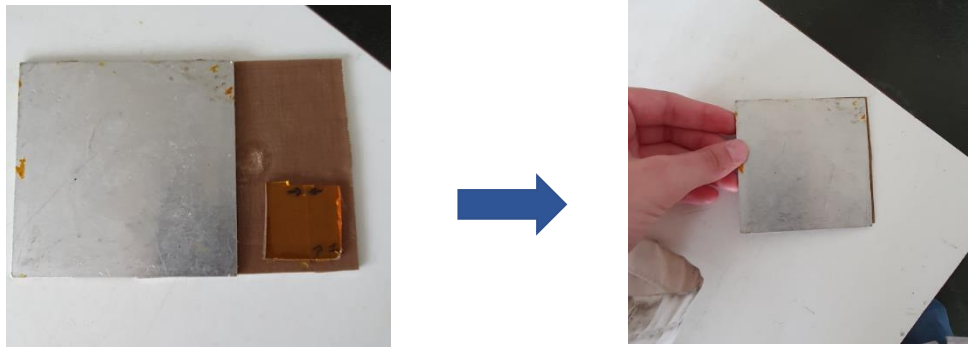


Nous effectuons le même processus au microscope pour mesurer dix fois l'épaisseur de la fissure avant d'appliquer la chaleur et la pression.

Les images ont été prise par le microscope Leica DMS 1000. Ce microscope permet un grossissement jusqu'à 6x.

Measurement #	Image Name	Tool	Line Length ( $\mu\text{m}$ )	Width ( $\mu\text{m}$ )	Height ( $\mu\text{m}$ )	Angle ( $^\circ$ )	X1	Y1	X2	Y2
1	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	20	20	0	0	1 433 854	1 461 854		
2	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	30	30	3	5	1 444 965	1 485 961		
3	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	25	25	0	0	1 420 506	1 454 506		
4	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	36	35	3	4	1 426 672	1 475 668		
5	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	39	38	8	11	1 433 1 240	1 485 1 230		
6	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	46	46	0	0	1 444 1 406	1 506 1 406		
7	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	36	35	3	4	1 451 1 489	1 499 1 485		
8	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	51	51	5	6	1 444 1 699	1 513 1 692		
9	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	21	20	5	14	1 440 1 099	1 468 1 092		
10	Photo Paula 1.jpg	VectorLine	28	28	7	14	1 414 270	1 452 261		

Ce sont les 10 résultats obtenus pour l'épaisseur de la fissure de l'échantillon 1. La moyenne de toutes les valeurs est de 33,2  $\mu\text{m}$ .



Une fois que nous avons analysé la fissure, nous plaçons le morceau de matériau entre deux plaques métalliques afin que la pression soit appliquée correctement et que le matériau ne colle pas à la machine.



Cette machine permet d'appliquer une pression à une température souhaitée. Tout d'abord, nous plaçons le matériau entre deux plaques métalliques à l'intérieur de la machine et, petit à petit, nous déplaçons le levier situé en dessous pour fermer les deux presses. Un premier essai a été réalisé à une pression d'une tonne métrique. De plus, nous n'avons pas directement pressé l'échantillon, nous l'avons d'abord mis en contact sans pression pour chauffer l'échantillon.

Ensuite, nous devons vérifier que la température est à 160°, puis nous fermons la plaque de verre protectrice et enfin nous n'avons plus qu'à attendre 1 heure pour pouvoir observer le résultat.



#### • ÉCHANTILLON 1 APRÈS LE CHAUFFAGE ET LA PRESSION :

Au bout d'une heure, nous sommes allés ouvrir la machine et lorsque les deux presses se sont séparées, nous avons obtenu un résultat inattendu : le matériau s'était complètement déformé et nous avons donc pu en déduire que ce matériau n'est pas assez résistant pour être soumis à une si forte pression.



Et voici le résultat : la fissure avait disparu mais la forme était complètement déformée. C'est pourquoi nous ne l'avons pas analysé au microscope. Nous pouvons donc considérer qu'il s'agissait d'un test raté, mais grâce à cela, nous avons compris que ce matériau ne peut pas résister à une telle pression.



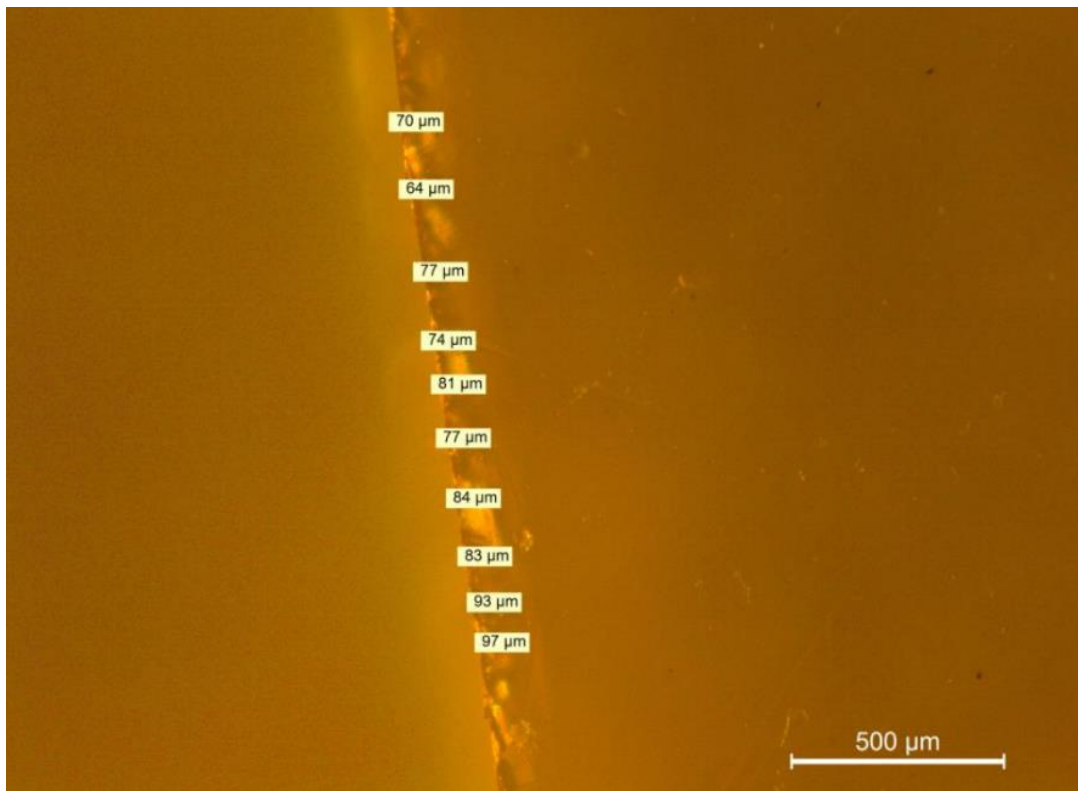
- **ÉCHANTILLON 3 (AVEC MOINS DE PRESSION) :**



Après avoir observé le résultat inattendu de l'échantillon précédent, nous avons décidé d'essayer le même processus en appliquant de la chaleur et une plus faible pression afin de ne pas déformer le matériau. Nous avons donc refait la fissure avec la lame de resoir et cette fois la fissure était plus profonde.

Ensuite, nous plaçons l'échantillon sous le microscope pour analyser la nouvelle fissure.

- **ÉCHANTILLON 3 AVANT LE CHAUFFAGE ET LA PETITE PRESSION :**



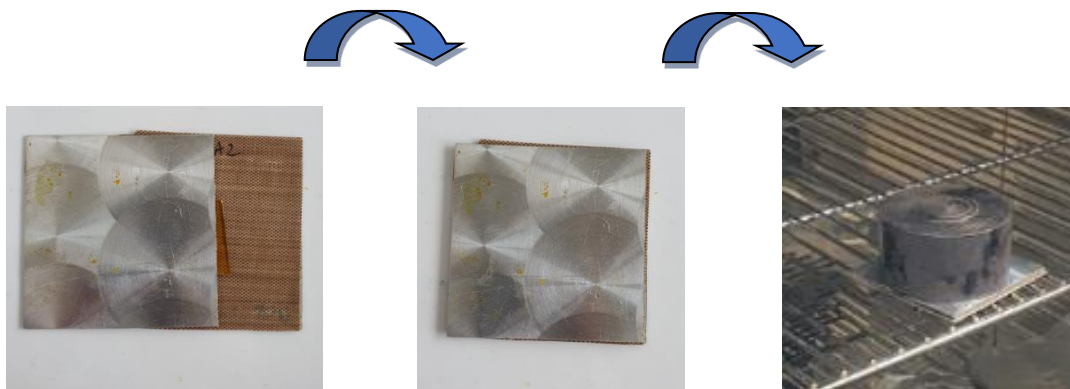
Cette fois, nous effectuerons à nouveau les 10 mesures au microscope avant de soumettre le produit à la chaleur et à la pression.

De plus, cette fois-ci, nous pouvons voir que la fissure est plus large tout en étant plus profonde que les précédentes.

Measurement #	Image Name	Tool	Line Length ( $\mu\text{m}$ )	Width ( $\mu\text{m}$ )	Height ( $\mu\text{m}$ )	Angle ( $^\circ$ )	X1	Y1	X2	Y2
1	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	77	77	7	-5	1 006 651	1 085 658		
2	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	74	73	7	5	1 027 823	1 102 816		
3	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	81	80	10	-7	1 047 920	1 130 930		
4	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	77	77	7	-5	1 061 1 051	1 140 1 058		
5	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	84	83	7	-5	1 082 1 196	1 168 1 202		
6	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	83	83	3	2	1 109 1 340	1 196 1 337		
7	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	93	93	3	2	1 127 1 451	1 223 1 447		
8	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	70	70	3	3	951 296	1 023 292		
9	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	64	63	10	9	978 461	1 044 451		
10	Photo Paula 3.jpg	VectorLine	97	97	10	6	1 144 1 551	1 244 1 540		

En effet, les valeurs des dix mesures de l'échantillon 3 sont significativement plus élevées que dans les deux autres cas. La moyenne de celles-ci est de 80  $\mu\text{m}$ .

- **ÉCHANTILLON 3 PENDANT LE CHAUFFAGE ET LA PETITE PRESSON :**

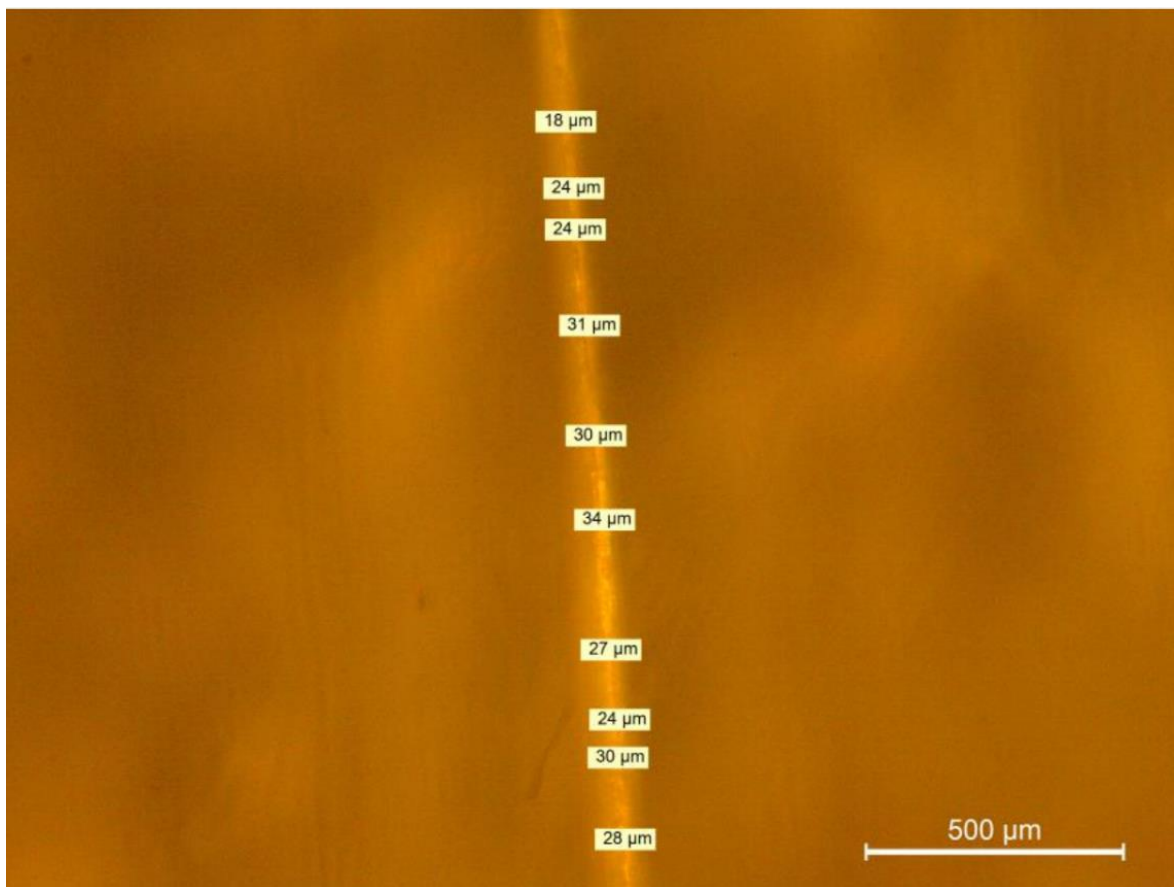


Cette fois, nous avons également placé le matériau à l'intérieur de deux plaques afin que la pression puisse être appliquée correctement. Ensuite, nous mettons un poids sur le matériau entre les plaques pour qu'il y ait un peu de pression, mais elle est bien inférieure à celle produite par la machine utilisée dans l'autre test avec l'échantillon 1.



Ensuite, nous mettons le matériau avec le poids sur le dessus dans le four déjà utilisé pour l'échantillon 2 et nous attendons que la machine atteigne 160°. Ensuite, comme nous l'avons fait précédemment, nous devons laisser le matériau dans le four pendant 1 heure pour obtenir le résultat.

- **ÉCHANTILLON 3 APRÈS LE CHAUFFAGE ET LA PETITE PRESSION :**



Voici les résultats de l'épaisseur de la fissure après avoir été chauffée et pressée avec un objet lourd. En un coup d'œil, on peut déjà constater que la fissure a pu se réduire en une heure.



Measurement #	Image Name	Tool	Line Length (µm)	Width (µm)	Height (µm)	Angle (°)	X1	Y1	X2	Y2
1	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	24	24	0	0	1 240 389	1 268 389		
2	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	24	24	0	0	1 244 479	1 271 479		
3	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	31	30	3	6	1 271 689	1 306 685		
4	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	30	30	0	0	1 285 927	1 320 927		
5	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	34	33	6	10	1 302 1 113	1 340 1 106		
6	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	27	27	0	0	1 320 1 392	1 351 1 392		
7	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	24	24	0	0	1 340 1 544	1 368 1 544		
8	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	18	18	0	0	1 227 244	1 247 244		
9	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	30	30	0	0	1 333 1 626	1 368 1 626		
10	Photo Paula 3 après self-healing.jpg	VectorLine	28	27	3	6	1 351 1 806	1 382 1 802		

Une fois que nous avons mesuré la fissure 10 fois comme toutes les autres analyses, nous pouvons voir ici les résultats que nous avons acquis. La moyenne de ces 10 mesures est de 27 µm.

- **RÉSULTATS DE L'ÉCHANTILLON 3 (AVEC UNE PETITE PRESSION) :**

Cette fois, nous avons également réalisé un Excel avec toutes les valeurs obtenues et leurs moyennes avant et après que le matériau soit soumis à la chaleur et à la pression.

Tout d'abord, nous avons pu vérifier que le matériau ne se déforme pas lorsqu'il est soumis à une petite pression à 160° pendant 1 heure, ce qui n'est pas le cas de l'échantillon 1 qui a été soumis à une pression trop importante.

	A	B	C
1		Avant	Après
2		77	24
3		74	24
4		81	31
5		77	30
6		84	34
7		83	27
8		93	24
9		70	18
10		64	30
11		97	28
12	Moyenne	80	27
13			
14	%	66,25	
15			
16			



Nous avons également utilisé la formule de la dernière fois pour calculer le pourcentage d'autoréparation en utilisant la méthode du microscope. Ainsi, le pourcentage d'autoréparation que nous avons calculé est de 66,25%.

Nous pouvons constater que lorsque le matériau est soumis à une petite pression en plus de la chaleur, la fissure se répare d'elle-même plus rapidement et plus facilement. Si l'on compare le pourcentage de l'échantillon 2 (sans pression) avec celui de l'échantillon 3 (avec une petite pression), on voit que celui qui a été soumis à cette certaine pression a un pourcentage plus élevé (66,25%) que celui qui n'a subi aucune pression (52,38%), en tenant compte également du fait que les deux échantillons ont été dans le four à 160° pendant 1 heure.

En guise de conclusion finale, nous pourrions supposer que si nous avons laissé les échantillons dans le four à 160° pendant un temps plus long, ce pourcentage d'autoréparation aurait été plus élevé et aurait même pu atteindre une autoréparation complète à un certain point où toutes les valeurs de la fissure seraient égales à 0 et donc la fissure aurait disparu.

Nous pouvons ajouter que les tests que nous avons réalisés l'ont été avec des matériaux vitrimères et qu'ils permettent donc de démontrer qu'ils s'autoréparent en raison des caractéristiques de ces matériaux.

Nous avons donc procédé à une analyse d'un seul matériau avec des échantillons qui fonctionnent, car nous n'avons pas le temps de procéder à une autre analyse avec un autre matériau (par exemple un thermodur) dont nous savons, par exemple, que l'autoréparation ne fonctionne pas.

Ce qu'ils font souvent dans les laboratoires et qu'il peut être intéressant de le réaliser, c'est de comparer un échantillon dont on sait que l'autoréparation fonctionne (matériau vitrimère) avec un autre dont on sait qu'elle ne fonctionne pas et puis de démontrer que cela est dû aux caractéristiques des matériaux vitrimères. Car au sein du vitrimère, il y a des liaisons qui s'échangent en permanence.

## PROCÉDURE TEST 2 (DMA) :

Une fois que nous avons terminé le premier test montrant l'auto-réparation par la chaleur, nous avons effectué un autre test, cette fois en utilisant la machine DMA (Analyse Mécanique Dynamique).

En appliquant différents facteurs, dont la température, la force, la fréquence et la déformation, l'analyseur mécanique dynamique (DMA) peut nous donner des informations sur les matériaux, telles que la résistance, la viscosité ou l'élasticité. Nous pouvons alors obtenir des facteurs caractéristiques utiles comme le delta de Tan, le module de stockage ( $E'$ ), le module de perte ( $E''$ ), le module de Young ( $E$ ) et le module de cisaillement ( $G$ ).

Mais dans notre cas, nous nous intéresserons aux valeurs de la température et du module de stockage. Nous effectuerons le processus deux fois, la première fois avec un morceau de la planche intact et la seconde fois avec la planche une fois qu'elle s'est auto-réparée. De cette façon, nous pourrions déterminer si les valeurs obtenues sont similaires dans les deux cas et vérifier ainsi si l'auto-réparation par la chaleur a réussi.

L'analyse mécanique dynamique (DMA) a été réalisée sur un analyseur DMA Q800 TA Instruments, en appliquant un mode de tension avec une amplitude de  $2\mu\text{m}$  à une fréquence de 1Hz, avec une vitesse de chauffage de  $3^\circ\text{C}/\text{min}$ .

## PRÉPARATION DU MATÉRIAU I:



Tout d'abord, nous prenons le matériel pour pouvoir effectuer le test. Le matériau utilisé est différent de celui utilisé dans le test précédent, qui est plus dur et moins souple. Ce nouveau matériau appartient à la même famille chimique. Après les tests microscopes, nous n'avons plus assez de quantité de polymère pour faire ce test. Nous avons donc pris un un échantillon déjà prêt. La première chose à faire est de découper un petit rectangle à partir de la plaque du matériau. Ce rectangle doit être comme celui que nous avons comme modèle parce que ce sont les dimensions que la machine accepte et ce sont : 1 millimètre d'épaisseur, 0,8 centimètre de largeur et 2,05 centimètres de longueur.

Pour pouvoir découper ce petit rectangle que nous avons marqué au feutre, il faut d'abord le chauffer un peu avec le pistolet à air chaud, car le matériau est trop dur et il faut le ramollir pour pouvoir le découper avec de grands ciseaux.



Une fois le rectangle de matériau découpé, nous prenons un morceau de papier de verre pour affiner les bords et limer tous les côtés du matériau afin que la forme soit encore plus fidèle au modèle.

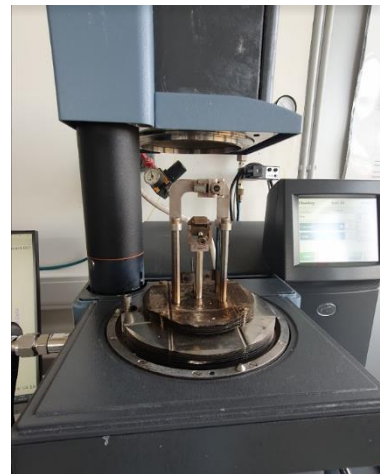
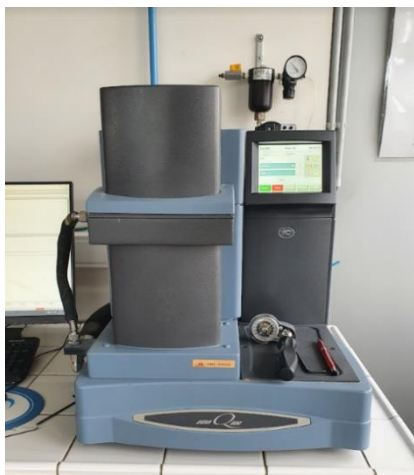
## UTILISATION DE LA MACHINE DMA I :



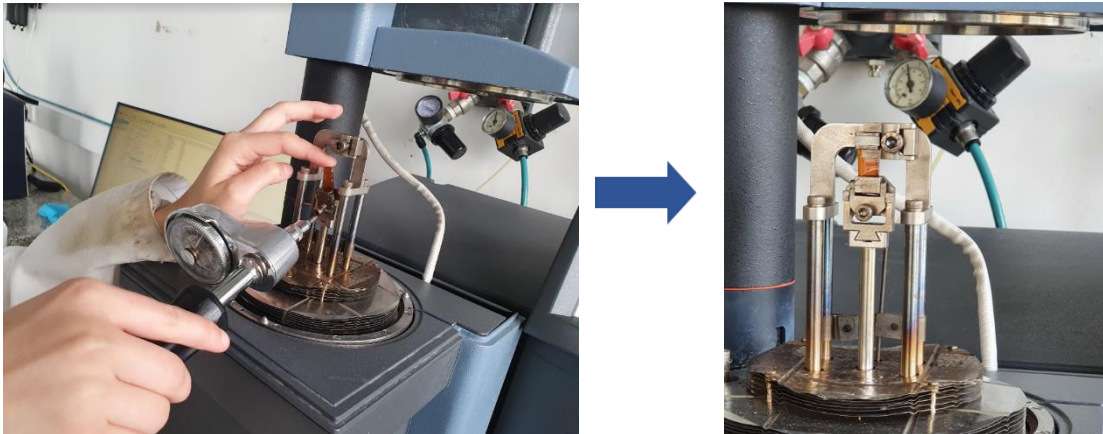
Avant de mettre la pièce dans la machine pour l'analyse, il est nécessaire de mesurer l'épaisseur et la largeur de la pièce avec un instrument de mesure appelé pied à coulisse. Les deux mesures doivent être effectuées trois fois, puis la moyenne doit être calculée afin que le résultat final soit plus précis.

Ensuite, nous notons les valeurs obtenues pour l'épaisseur et la largeur et la mesure de la longueur est calculée par la machine.

Les résultats des mesures que nous avons obtenus doivent être très proches des mesures du modèle pour qu'il s'adapte une fois placé à l'intérieur de la machine (épaisseur de 1mm, largeur de 0,8 cm et longueur de 2,05 cm).



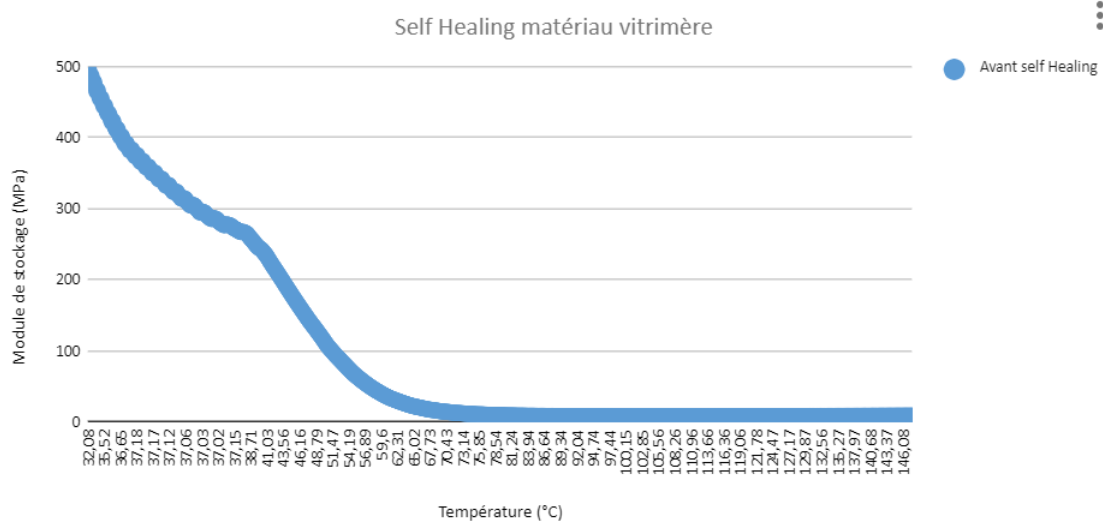
Ici, nous pouvons voir à quoi ressemble la machine DMA à l'extérieur et à l'intérieur, où est placé le rectangle de matériau préalablement coupé. Lorsque la machine est fermée et démarrée, elle a une certaine température qui augmente peu à peu.



Pour placer le matériau à l'intérieur de la machine, il faut la réajuster à l'aide d'une série d'instruments qui servent à visser et dévisser les clous, ce qui permet de bien positionner le matériau. Il faut d'abord visser les pinces (qui maintiennent le matériau) du bas et puis celles du haut de la machine en utilisant des vis différentes. La vis que nous utilisons en premier a un manomètre inclus. Une pression de 60 newtons est appliquée pour que le matériau ne soit ni trop serré ni trop lâche.

Et dans cette deuxième image, nous pouvons voir comment le matériau doit être positionné à l'intérieur de la machine. Une fois que cela est fait, nous pouvons fermer et démarrer la machine. Pour pouvoir voir le résultat final sous forme de graphique, il faudra attendre environ 50 minutes.

## PREMIERS RÉSULTATS :



Après avoir attendu 50 minutes, voici les premiers résultats où nous avons examiné la température et le module de stockage.

Au début, nous avons commencé avec une température de 32,08° et un module de stockage de 496,77 MPa (mégapascal), qui équivaut à  $(10)^6$  Pa. Nous disposons d'une liste de 912 valeurs différentes de température et de module de stockage tout au long de ces 50 minutes. Et les valeurs finales sont une température de 147,43° et un module de stockage de 9,07 MPa. Nous pouvons donc déterminer que lorsque la température augmente, le module de stockage diminue. Le module de stockage peut être relié au caractère solide d'un polymère et lorsqu'il est élevé, plus il est rigide. C'est pour cette raison que quand la température augmente, le module de stockage diminue et le matériau devient donc plus souple et mou.

Maintenant, ce que nous allons faire, c'est décomposer le reste du matériau que nous avons déjà utilisé et le réassembler avec de la chaleur et nous referons l'analyse comme nous l'avons fait auparavant. De cette manière, nous pourrions observer si le matériau s'est autoréparé par la chaleur après avoir été coupé et s'il possède les mêmes propriétés mécaniques.

## PRÉPARATION DU MATÉRIAU II:

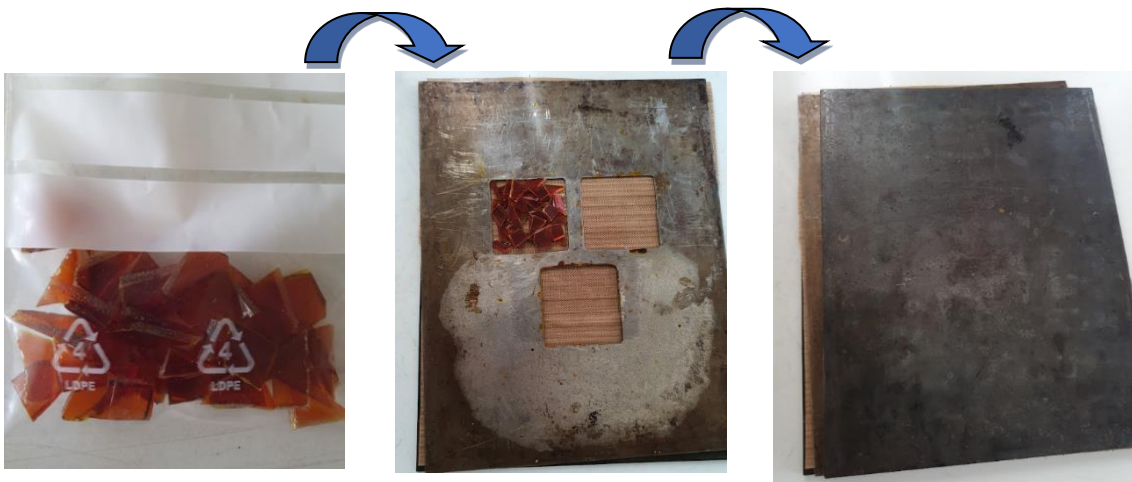


Pour continuer le test, nous devons prendre les restes du matériel que nous avons utilisé pour faire le rectangle et l'analyser. Et une fois que nous l'avons, nous devons le couper en petits morceaux.

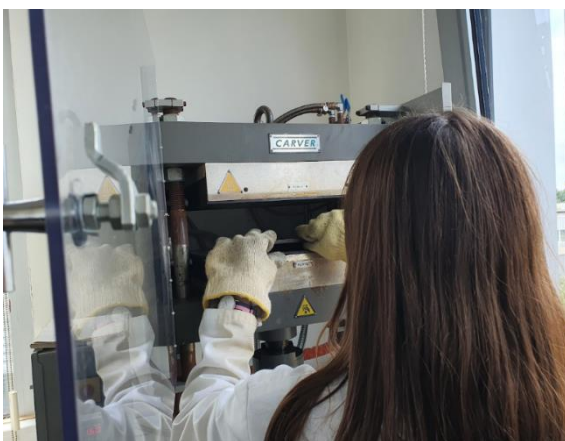


Pour pouvoir couper le matériau correctement et plus facilement, nous pouvons utiliser le pistolet à air chaud, car le matériau est un peu dur et grâce à la chaleur que nous lui donnons, il se ramollit et il est alors beaucoup plus facile de le couper avec des ciseaux. Néanmoins, ce matériau se refroidit très vite et nous devons donc le chauffer au pistolet à air chaud plus souvent.

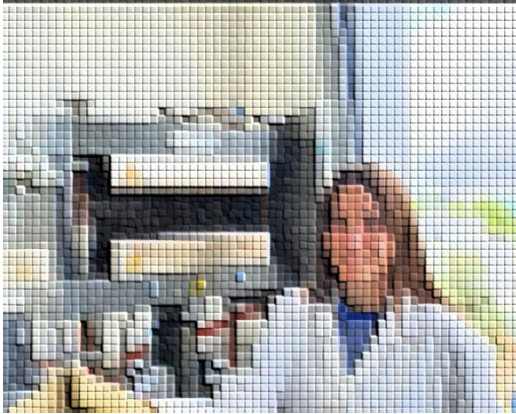




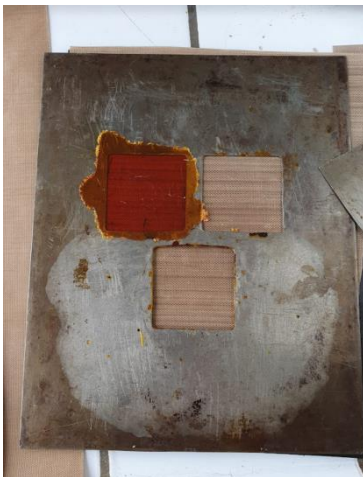
Tout d'abord, nous devons prendre le moule pour donner au matériau la forme d'une plaque carrée. Lors de la réparation, il peut y avoir des défauts. C'est pour cela que nous réalisons une plaque de 5\*5cm, comme cela il y aura forcément une partie de cette plaque sans défaut que on pourra donc l'analyser. Nous mettons tous les fragments du matériau que nous avons découpé en morceaux dans l'un des 3 moules.



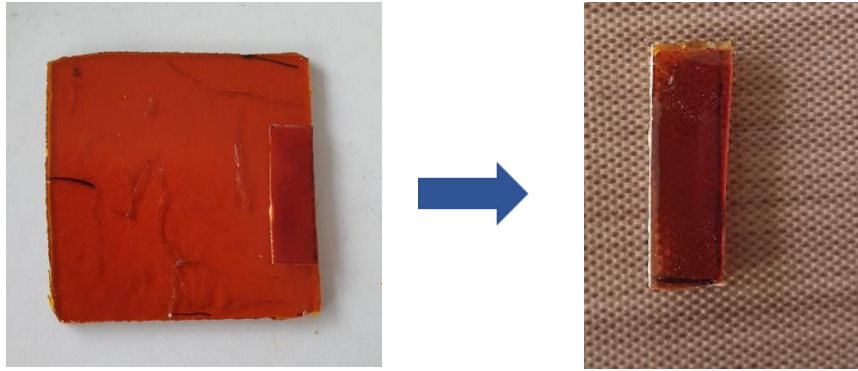
Ensuite, nous prenons une plaque métallique de la même taille que le moule où nous avons placé les morceaux de matériau découpé et nous la mettons au-dessus du moule afin de pouvoir appliquer la pression correctement.



Ensuite, nous ouvrons la barrière de protection en verre de la machine et plaçons notre moule à l'intérieur à l'aide des gants résistants à la chaleur. Une fois placé, nous devons faire bouger le levier de la machine pour que les presses se ferment et cette fois nous devons le faire jusqu'à ce que le nanomètre indique 3 tonnes métriques, c'est-à-dire entre 2 et 4. Enfin, nous attendons que la machine soit à 160° et ensuite nous devons attendre une heure pour voir le résultat.

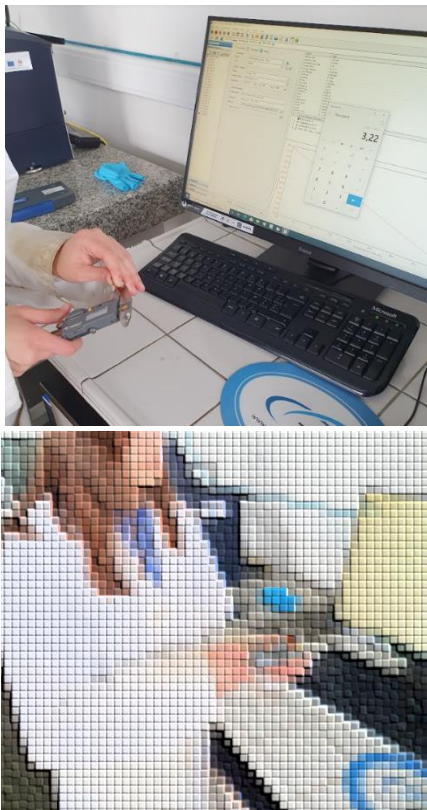


Tout d'abord, il faut laisser le moule refroidir pendant quelques minutes à température ambiante et puis on doit retirer la plaque métallique du dessus. Nous voyons immédiatement que tous les morceaux que nous avons découpés se sont rassemblés pour former une plaque carrée, qui était la forme du moule. Ensuite, à l'aide d'un cutter, nous coupons les bords du matériau en excès et finalement nous obtenons une plaque de matériau comme celle que nous avons juste au début du test.

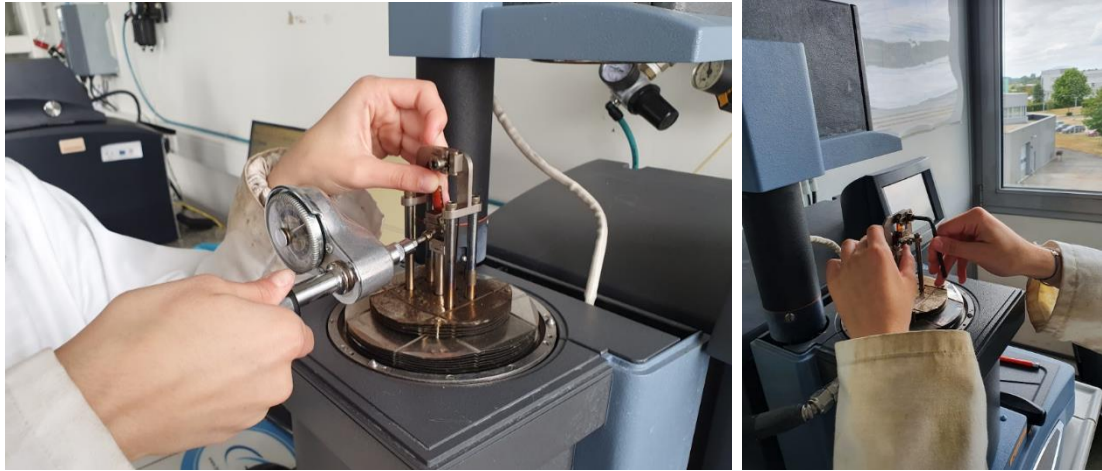


Nous pouvons ici examiner de plus près le résultat de la plaque de matériau. On peut voir qu'il n'est pas tout à fait lisse, mais c'est parce que la plaque de métal qui le recouvre avait quelques impuretés et n'était pas tout à fait homogène et uniforme. Cela dit, nous devons découper à nouveau un rectangle de mêmes dimensions que précédemment pour analyser cette fois-ci le matériau après sa découpe et son recollement.

#### UTILISATION DE LA MACHINE DMA II :

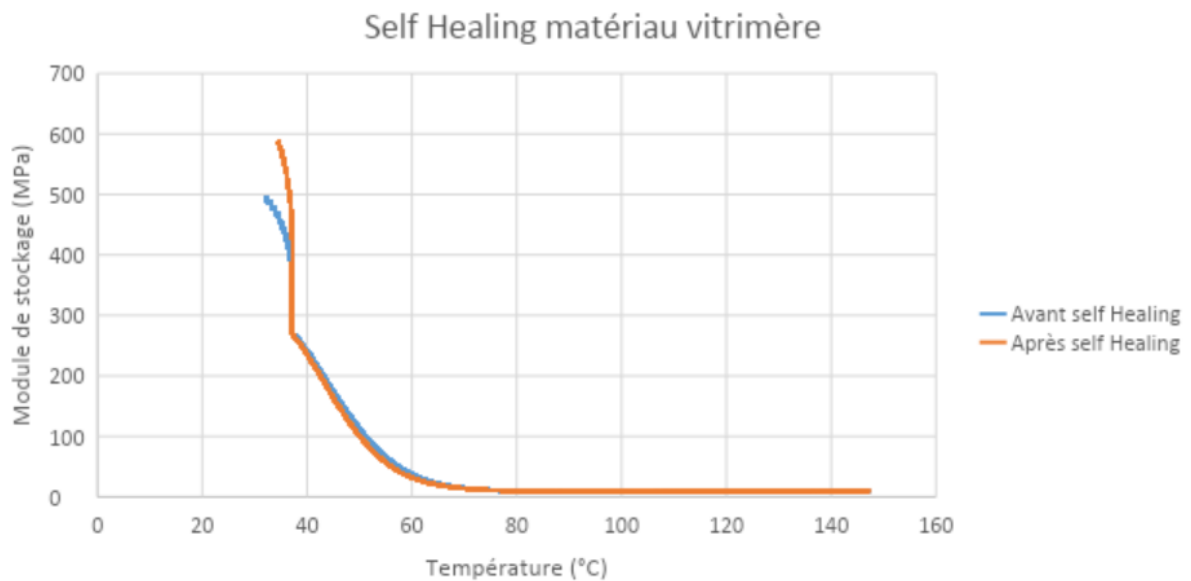


Une fois que nous avons découpé le rectangle de matériau, comme nous l'avons fait précédemment, nous devons mesurer avec le pied à coulisse trois fois l'épaisseur et trois fois la largeur. Ensuite, nous faisons la moyenne des trois valeurs et nous l'introduisons dans l'ordinateur qui est lié à la machine DMA. Ensuite, la machine elle-même, calcule la mesure de la longueur.



Cette fois, nous devons également répéter le processus de placement du rectangle de matériau à l'intérieur de la machine DMA. D'abord nous devons fixer la partie inférieure du rectangle avec le tournevis et nous devons visser jusqu'à ce que le manomètre qui est inclus atteigne 60 newtons, le même que l'autre fois, parce que pour que le résultat soit plus précis, nous devons essayer de faire le processus le plus semblable possible au précédent. Enfin, avec un autre type de vis, nous devons fixer la partie supérieure et enfin fermer la machine, l'allumer et attendre environ 50 minutes pour voir le résultat.

## DERNIERS RÉSULTATS :



Une fois les 50 minutes écoulées, nous pouvons dévisser les vis de la machine pour enlever le matériau, éteindre la machine et ensuite analyser les seconds résultats.

Tout d'abord, nous examinerons les résultats montrés par la courbe rouge et enfin nous ferons une conclusion finale en analysant les deux courbes en même temps.

On reprend les valeurs obtenues de la machine et on va les mettre sur Excel. Comme précédemment, nous allons considérer deux facteurs : la température et le module de stockage. Comme nous l'avons déjà mentionné, nous pouvons associer le module de stockage à la dureté de l'échantillon. Par conséquent, plus la valeur du module de stockage est élevée, plus l'échantillon sera dur.

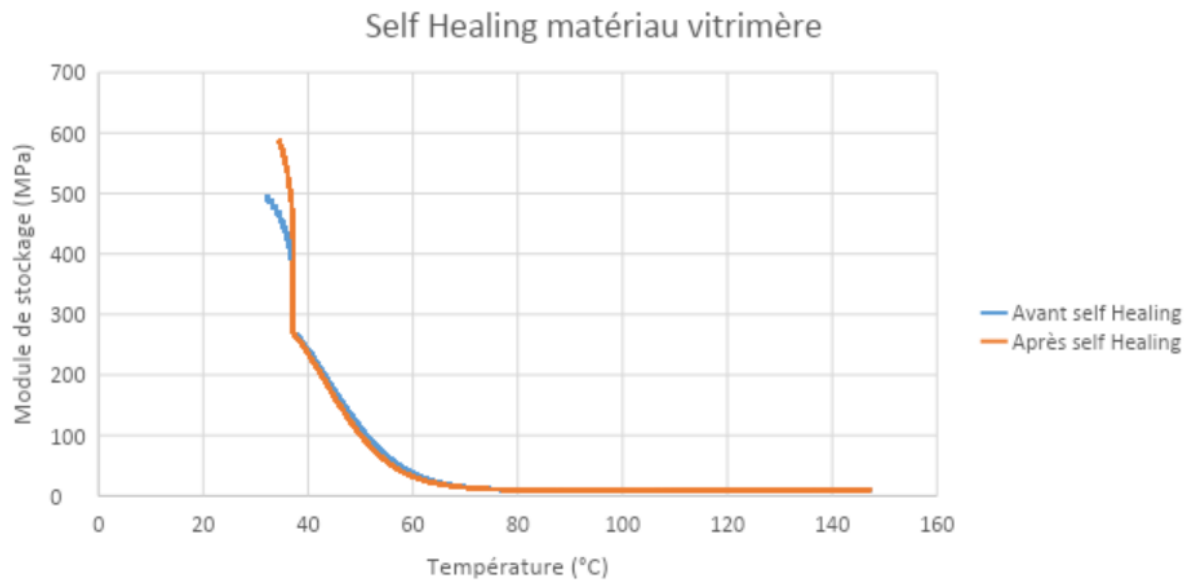
Au départ du test, nous partons d'une température de 34 degrés et d'un module de stockage de 587,334 MPa. Cette fois, nous avons également une très longue liste de valeurs (912) qui sont les valeurs obtenues pendant les 50 minutes. Et comme résultats finals nous obtenons que la température ait atteint 147,46 degrés et un module de stockage de 10,058 MPa.

Il existe également un autre facteur important à prendre en compte, qui est le tangent delta.

Le maximum du tangent delta te permet de dire où est la température de transition vitreuse ( $T_g$  "glass temperature") dont le matériau passe de rigide à mou. Quand la température commence à monter on peut voir que le matériau commence à changer. Au même temps que la température augmente on peut voir que la dureté de notre matériau (module de stockage) diminue et par conséquent, la température arrive à un maximum (le point d'inflexion de la courbe) et ensuite elle devient constante. On appelle  $T_g$  au maximum, cela où le matériau passe de rigide à mou. En plus, nous pouvons observer que la  $T_g$  des deux échantillons n'est pas exactement la même valeur mais nous pouvons tout de même affirmer qu'il s'agit de valeurs vraiment très proches.

L'explication de la rigidité du matériau est la suivante : le matériau devient de moins en moins rigide, et cela c'est assez logique puisque la température de l'échantillon monte. D'abord il va absorber la chaleur et donc les chaînes du matériau vont commencer à bouger. C'est donc cela qui rend le matériau de moins en moins rigide et donc de plus en plus mou. Nous pouvons observer qu'au début, si nous augmentons la température, le matériau reste toujours rigide, mais si nous lui donnons de plus en plus de la chaleur, le matériau commence à devenir mou car en fait nous apportons de l'énergie qui permet aux chaînes de se déplacer.

## ANALYSE DES DEUX ÉCHANTILLONS :



Tout d'abord, nous pouvons observer que dans le premier cas, la machine est initialement à 32 degrés et dans le second cas, elle est à 34 degrés. Cela est probablement dû au fait que nous l'avons déjà utilisé auparavant et qu'il était donc plus chaud. Par conséquent, pour effectuer l'analyse, nous partirons de 34 degrés dans les deux cas, ce qui signifie que la valeur du module de stockage du premier cas varie également, puisqu'à 32 degrés il avait un module de stockage de 496,776 et à 34 degrés un module de stockage de 466,797.

À première vue, nous pouvons constater que les deux courbes sont très similaires. Au début, nous voyons une différence entre la courbe bleue et la courbe rouge et si nous regardons les valeurs, lorsque les deux échantillons sont à 34 degrés, l'échantillon 1 a un module de stockage de 466.797 et l'échantillon 2 a un module de stockage de 587.334. Nous trouvons donc une différence de plus de 100 entre les deux valeurs, mais il faut garder à l'esprit que c'est une valeur qui varie énormément. Cette différence peut avoir été causée par l'opérateur puisque le premier échantillon Louis et moi avons fait la préparation car il a dû m'expliquer et me montrer comment le faire, et la deuxième fois j'ai tout fait moi-même. Il est probable que les mesures des deux échantillons n'étaient pas exactement les mêmes ou que nous avons peut-être exercé plus de force dans l'un des cas en introduisant le matériau et en le vissant pour le fixer dans la machine.

Cependant, par la suite, nous avons trouvé presque la même courbe et en fait, les deux se superposent ce qui prouve qu'il s'agit bien du même échantillon dans les deux cas.

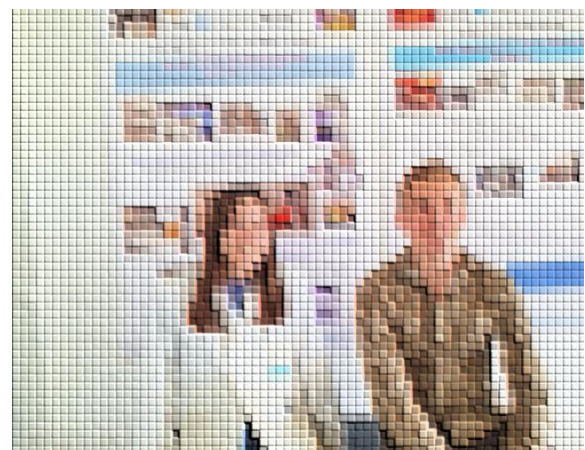
En définitive, nous pouvons conclure qu'au départ, il y a une différence entre les échantillons qui peut être attribuée à l'opérateur (valeurs différentes lors de la mesure des dimensions, fermeture de manière différente dans la machine) mais de toute façon, nous constatons que l'échantillon est vraiment très similaire. Donc le matériau s'est parfaitement réparé car il possède les mêmes propriétés mécaniques.

	Avant healing	Après healing
Module de stockage	466,797	587,334
	466,827	585,223
	459,767	577,346
	455,178	573,357
	456,146	570,929
	...	...
	9,00856	10,0899
	8,99137	10,1101
	8,99994	10,1055
	9,04313	10,0775
	9,07018	10,0588



Excel avec les valeurs initiales et finales du module de stockage avant autoréparation et après autoréparation.

Photo de Louis Van Renterghem et de moi, après avoir terminé les 2 tests.





## 6. CONCLUSION :

Mes conclusions après l'achèvement de ce travail peuvent être divisées en trois parties :

### 1. Le rôle des matériaux autoréparables :

a) Ils sont essentiels pour l'économie circulaire, car le fait qu'un matériau puisse se réparer signifie que le produit peut être réutilisé, sans qu'il soit nécessaire de le transformer en un produit sans valeur et sans usage. C'est pourquoi, Ils ralentissent le changement climatique et sont bénéfiques pour l'environnement car ils essaient de recycler et d'empêcher la production de tellement de déchets.

b) Ils sont un engagement contre l'obsolescence, surtout l'obsolescence programmée, bien qu'il semblerait que cela puisse changer dans les années à venir en raison du changement climatique. Par exemple, l'union européenne va créer de nouvelles règles pour mettre fin à l'obsolescence programmée des téléphones portables et réduire leur impact environnemental. Par conséquent, il se peut que cette problématique des matériaux autoréparables soit réactivée et que l'on tire parti des propriétés qu'ils offrent.

c) Ils sont très importants dans certains domaines tels que la médecine et le génie biomédical (pour la construction de prothèses), les énergies renouvelables comme l'énergie éolienne ou dans la construction de bâtiments, de routes, de revêtements, etc.

d) Ils ne présentent aucun intérêt pour les entreprises, car elles ont moins de production, moins de bénéfices et par conséquent moins de revenus. C'est pourquoi de nombreuses industries préfèrent ne pas les utiliser et génèrent donc à la fois plus de déchets et plus de pollution.

e) En effectuant ce travail, je me suis rendu compte qu'il y a peu de recherches sur le sujet, et peu d'intérêt général. Il y a plus de développement de matériaux autoréparables dans les pays d'Asie de l'Est comme la Chine, le Japon et la Corée. Ce sujet est actuellement plutôt stagné en Europe, car de nombreux chercheurs se

sont concentrés sur l'aspect sanitaire, principalement à cause de la Covid19. En somme, malgré leur importance, peu de gens connaissent l'existence des matériaux autoréparables, mis à part les professionnels du domaine.

## **2. Comment j'ai surmonté les difficultés ?**

a) J'ai dû surmonter certaines difficultés comme le manque d'informations et de connaissances sur le sujet en Catalogne, car je ne trouvais rien. C'est pourquoi j'ai décidé d'aller effectuer des recherches plus loin : en Espagne, où j'ai pris contact avec l'université d'Alicante, et en Belgique, à l'université de Mons, en profitant de l'été que j'y ai passé. Je suis arrivé à la conclusion que la Catalogne n'est pas très avancée dans les domaines universitaire et commercial, contrairement à d'autres régions d'Espagne ou d'Europe. L'Université de Mons, quant à elle, est pionnière dans l'étude de la science des matériaux et de ses applications.

b) Une autre difficulté que j'ai rencontrée était liée à la capacité de démontrer expérimentalement comment l'autoréparation se produit. Je suis arrivé à la conclusion que pour un élève du lycée, il était difficile d'avoir accès à un laboratoire. Mais presque à la moitié du travail, j'ai eu l'occasion de le faire, grâce à l'un des contacts que j'avais trouvés.

## **3. J'ai pu atteindre tous mes objectifs ?**

En conclusion, j'ai rempli la plupart de mes objectifs fixés au départ : j'ai pu connaître en profondeur différents aspects de ces matériaux spectaculaires, j'ai pu découvrir pourquoi ils sont si peu utilisés dans les entreprises et j'ai pu faire un stage à l'Université de Mons pour réaliser deux tests montrant l'autoréparation du matériau dans différents processus.

J'ai également atteint mon objectif linguistique puisque, en plus du séjour en Belgique, j'ai pu apprendre beaucoup de nouveau vocabulaire en français sur ce domaine scientifique des matériaux. En plus j'ai pu améliorer ma capacité de compréhension et d'écriture pour bien rédiger le travail et aussi mon niveau de français à l'oral, à la fois en suivant les cours que je faisais tous les jours et en communiquant avec les gens de l'Université de Mons, lorsque j'ai eu l'occasion d'y aller.

## 7. LES SOURCES D'INFORMATION

*Material*. 2022. Wikipedia, la enciclopedia libre. 6 avril 2022.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Material>

*Material*. 2022. Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure. 6 avril 2022.

<https://ca.wikipedia.org/wiki/Material>

*Smart materials, descubre los materiales con los que moldearemos el futuro*. Iberdrola. 2022. 3 mai 2022.

<https://www.iberdrola.com/innovacion/materiales-inteligentes-aplicaciones-ejemplos>

*Materiales inteligentes*. 2006-2022. Inteligentes.org. 5 mai 2022.

<https://www.inteligentes.org/blog/about/inteligentes/>

*¿Qué se considera I + D + i en España?* 2022. Ayming. 6 mai 2022

<https://www.ayming.es/insig/noticias/que-considera-idi-espana-2021/>

*¿Qué es el grafeno?* 2022. Graphenano nanotechnologies. 6 mai 2022

<https://www.graphenano.com/que-es-el-grafeno/>

*¿Qué es el grafeno? Características y aplicaciones del grafeno*. 2020. Atria Innovation. 6 mai 2022.

<https://www.atriainnovation.com/grafeno-caracteristicas-aplicaciones/>

*Shilk qué es y cómo se produce*. 2020. Ingenieriaquimica.net. 7 mai 2022.

<https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/452-shrilk-que-es-y-como-se-produce>

*Materiales inteligentes. Qué son, tipos y aplicaciones*. Futuro electrónico. 8 mai 2022.

<https://futuroelectronico.com/materiales-inteligentes/>

*Materiales inteligentes*. 2021. Atria Innovation. 8 mai 2022.

<https://www.atriainnovation.com/materiales-inteligentes-ventajas-usos/>

*Iberdrola: Líderes mundiales en renovables*. 2022. Iberdrola. 10 mai 2022.

<https://www.iberdrola.com/innovacion/materiales-inteligentes-aplicaciones-ejemplos>

*El creador español de Shrilk, el plástico del futuro se va a Singapur*. Guerrero, D. (26-06-2015). El Mundo. 10 mai 2022

<https://www.elmundo.es/economia/2015/06/23/55885aace2704e910b8b4580.html>

*Shrilk: un material tan fuerte como el aluminio que imita la cutícula de los insectos*. Ciencia y tecnología. Universidad de Harvard. (14-12-2011). 10 mai 2022

<http://www.cubadebate.cu/noticias/2011/12/14/shrilk-un-material-tan-fuerte-como-el-aluminio-que-imita-la-cuticula-de-los-insectos/>

*Espumas metálicas. El futuro de los materiales de construcción*. Patologías + Rehabilitación + Construcción. Web de información y formación para profesionales y estudiantes. Sanjuan, C. 12 mai 2022

<https://www.patologiasconstruccion.net/2012/09/espumas-metalicas/>

*Comprender todo el potencial de las espumas metálicas*. CORDIS resultados de investigaciones de la UE. 2018. 12 mai 2022

<https://cordis.europa.eu/article/id/238336-understanding-the-fullpotential-of-metallic-foam/es>

*¿Qué es el Estatenno?* Venegas, L. (29-1-2022). Nanova. 12 mai 2022

<https://nanova.org/que-es-el-estaneno/>

*Por primera vez se fabrica el estateno*. Villatoro, F. (3-08-2015). Blogs Naukas. 12 mai 2022

<https://francis.naukas.com/2015/08/03/por-primera-vez-se-fabrica-el-estaneno/>

*Estateno*. Ibertrónica. 2022. 12 mai 2022

<https://ibertronica.es/blog/actualidad/estaneno/>

*Qué nos cuentan los materiales autorreparables*. Ariza, R. Sociemat. Sociedad española de materiales. 14 mai 2022.

<https://sociemat.es/materiales-autorreparables/>

*Materiales autorreparables: Qué son y qué tipos hay*. 13-03-2018. Termiser. 14 mai 2022.

<https://www.termiser.com/materiales-autorreparables-que-son-tipos-hay/>

*Robots con capacidades de autorreparación, de la ficción a la realidad*. 25-08-2017. CORDIS. Resultados de investigaciones de la UE. 14 mai 2022

[Robots con capacidades de autorreparación, de la ficción a la realidad | News | CORDIS | European Commission \(europa.eu\)](#)

*Regeneracion*. (5-05-2022) NIH. National Institute of General Medical Sciences. 17 mai 2022.

[Regeneración \(nih.gov\)](#)

*El primer material autorreparable*. Bautista, J. (7-11-2016). CCM Benchmark. 17 mai 2022.

[El primer material autorreparable - CCM](#)

*Los materiales que se reparan a sí mismos ya son una realidad*. Rialto, L. (2018). El Mundo. 15 mai 2022.

[Los materiales que se reparan a sí mismos ya son una realidad | El Mundo | Expansión](#)

*Materiales Self-Healing o Autorreparables*. (22-06-21). ATRIA innovation. 18 mai 2022.

[Materiales Self-healing o Autorreparables | ATRIA Innovation](#)

*El móvil del futuro arreglará sus propios arañazos como arte de magia.* Chacón, P. (21-10-2014). Eldiario.es. 22 mai 2022.

[El móvil del futuro arreglará sus propios arañazos como por arte de magia \(eldiario.es\)](https://www.eldiario.es)

*Hormigón Autorreparable. ¿qué es y cómo funciona?* (2022). Inarquia. 22 mai 2022

[Hormigón Autorreparable: ¿qué es y cómo funciona? | Inarquia](https://www.inarquia.com)

*Economía circular: definición, importancia y beneficios.* (2-12-2015). Noticias. Parlamento Europeo. 22 mai 2022.

[Economía circular: definición, importancia y beneficios | Noticias | Parlamento Europeo \(europa.eu\)](https://www.europa.eu)

*Qué es la economía circular y por qué es importante.* (2022). Repsol 3 juin 2022

[Qué es la economía circular y por qué es importante | Repsol](https://www.repsol.com)

*Advanced materials Development.* 2021. NEI corporation. 5 juin 2022.

<https://www.neicorporation.com/>

*El ingenioso material que repara los arañazos del coche con sólo dejarlo 30 minutos bajo el sol.* Sanz, M. (15-08-22). El Español. 25 août 2022.

[https://www.lespanol.com/omicron/tecnologia/20220815/ingenioso-material-repara-aranazos-coche-dejarlo-minutos/694180813\\_0.html](https://www.lespanol.com/omicron/tecnologia/20220815/ingenioso-material-repara-aranazos-coche-dejarlo-minutos/694180813_0.html)

*La ingeniera que enseña a nuestro cuerpo a autorrepararse: “Hemos regenerado piel, cartílagos y vasos sanguíneos, pero todavía tenemos que hacer más”.* Rubio, I. (12-07-2022). El País. 25 août 2022.

<https://elpais.com/salud-y-bienestar/2022-07-12/la-ingeniera-que-ensena-a-nuestro-cuerpo-a-autorrepararse-hemos-regenerado-piel-cartilagos-y-vasos-sanguineos-pero-todavia-tenemos-que-hacer-mas.html>

*Este material utilizado en robótica es capaz de regenerarse solo.* Priego, L. (23-02-22). Business insider. 30 août 2022.

<https://www.businessinsider.es/material-utilizado-robotica-capaz-regenerarse-solo-1017001>

*Obsolescencia.* 2022. Wikipedia. La enciclopedia libre. 3 septembre 2022

<https://es.wikipedia.org/wiki/Obsolescencia>

*Términos del diccionario empresarial.* *Obsolescencia.* 2022. Sage advice. 3 septembre 2022

<https://www.sage.com/es-es/blog/diccionario-empresarial/obsolescencia/>

*Obsolescencia.* Coll, F. 2022. Economipedia. 3 septembre 2022

<https://economipedia.com/definiciones/obsolescencia.html>

En plus de toutes les informations provenant de divers sites web, une grande partie des informations obtenues pour la partie théorique a été extraite d'entretiens avec José Miguel Martín Martínez (professeur à l'Université d'Alicante, Espagne) et Jean-Marie Raquez (docteur universitaire et professeur à l'Université de Mons, Belgique). (Vous les trouverez toutes deux dans les annexes).

## 8. ANNEXES :

### 8.1 VISITE DU LABORATOIRE DE L'UNIVERSITÉ DE MONS :

Heureusement, j'ai eu l'occasion de me rendre à Mons, en Belgique, et d'interviewer le professeur Jean-Marie Raquez, spécialiste des matériaux et des composites, et de lui poser quelques questions. En outre, Raquez m'a offert une visite guidée des laboratoires de matériaux réalisée par deux étudiants de l'université en science des matériaux. J'ai pu voir et apprendre le fonctionnement de toutes les machines utilisées pour les essais et les pratiques.



Certaines de ces machines du laboratoire sont :



1) Cette machine est utilisée pour préserver l'atmosphère car de nombreux matériaux sont sensibles aux petites impuretés, notamment l'eau et l'oxygène. En utilisant ces gants noirs, vous pouvez travailler dans cette machine et être sûr de ne pas endommager les substances.



2) Cette machine sert à contrôler tous les paramètres comme la température, la pression ou la force qui doit exercer le matériel. Elle est fréquemment utilisée par les entreprises dans le processus de polymérisation.



3) Il s'agit des machines avec des moules pour introduire les matériaux et voir s'ils peuvent être remodelés grâce à la pression exercée par ces moules et à une certaine température, car ils doivent être chauffés.



4) Propriétés mécaniques : cette machine est utilisée pour mesurer la capacité d'un matériau à s'étirer et pour observer sa flexibilité, s'il se casse lorsqu'il est allongé, sa dureté, etc. Le matériau à étudier est placé entre les attaches et puis, tiré lentement pour allonger le matériau.



## 8.2 ENTRETIEN AVEC JOSÉ MIGUEL MARTÍN MARTÍNEZ

(à partir de la version originale en espagnol) 9/06/22



**Chercheur et professeur de chimie inorganique à l'université d'Alicante.** Image extraite d'Alicante Press

### 1. ¿Por qué cree que los materiales autorreparables actualmente aún no se conocen demasiado?

Yo creo que existen dos razones fundamentales. La primera es porque no hay unas aplicaciones definidas que le puedan interesar a la industria, quiero decir, desde un punto de vista científico es un reto interesante sobre todo para la ciencia de los materiales el saber si realmente estamos en una situación donde podemos ser capaces de controlar su funcionamiento, entonces realmente yo siempre lo compara con el hecho de que una vez que morimos pudiésemos volver a la vida. Es esencialmente esto. Hay una segunda razón y es que, aunque parezca curioso, en la situación actual de la tecnología muchas empresas no lo consideran. Pongamos, por ejemplo, en una pantalla de tablet u ordenador o móvil, si realmente se lograra la autoreparación, de hecho, ya hay bastantes investigaciones en eso, supondría bajar la producción y las ventas de los nuevos teléfonos, entonces aquí hay dos partes: una es la parte, empezando por el final, que es la industrial, donde hay empresas que les parece un tema muy interesante, pero les bajarían sus ventas. Y luego la segunda, yo creo que a nivel de divulgación. Es decir, ahora casi todo el mundo está volcado en el tema médico (ingeniería biomédica), debido al covid o a lo que a la sociedad le toca más que es tema de la salud, ahí los materiales autorreparables no parece que tengan una relevancia tan grande como por ejemplo lo tendrían en los asfaltos. Una de las tecnologías que actualmente ya se están aplicando a nivel industrial es en la ingeniería civil en asfaltos de carreteras. Aunque no es realmente el sistema de autoreparación más deseable desde el punto de vista de los materiales, pero sí que se está

consiguiendo, encapsulando materias primas frente a roturas y generar unas reacciones químicas que regeneran el material.

## **2. Si los materiales autorreparables parecen ser tan beneficiosos para un futuro y para la economía circular, ¿por qué hay muchas empresas que aún no los utilizan?**

Por razones fundamentalmente económicas. Adicionalmente hay otro factor, que yo creo que también es importante, y es que uno de los aspectos que no se conoce suficientemente es como se produce la autoreparación de los materiales, hay una parte de conocimiento, pero esto excluye a los materiales que nosotros desarrollamos, es decir, nosotros verificamos que se produce esta autoreparación, sabemos en qué condiciones se favorece y en las que no, pero sin embargo el mecanismo por el cual se produce no es conocido. Aquí se juntan las dos cosas y no olvidemos que la economía circular hace una apuesta por materiales que no cambien su naturaleza química, entonces casi todos los sistemas de autoreparación que se conocen en materiales suponen cambios químicos en el material y esto también limita sus aplicaciones.

## **3. ¿Qué beneficios nos aporta la economía circular?**

Bueno yo creo que fundamentalmente el tema entre comillas del reciclado, pero hay una cosa importante, cuando hablamos de economía circular hay dos conceptos a tener en cuenta: una sería el concepto legal o el concepto político-legal que define que es una economía circular que es un sistema verde, desde este punto de vista a un material que le alarguemos su vida y que no requiera, por ejemplo, que se pueda autoreparar contribuye positivamente a la energía central, pero que pasará cuando este material acabe su vida útil, como lo vamos a reciclar? Si realmente en su uso se va a autoreparar también cuando se esté intentando reciclarse se va a autoreparar, así ahí tendremos un desbalance.

#### **4. ¿Todos los materiales son capaces de autorrepararse o tienen que cumplir algunas propiedades específicas para que se les pueda aplicar esta característica de autorreparación?**

Ahí hay dos grupos de materiales que son los dos mecanismos más sencillos de autoreparación. Unos que son los que se llaman los mecanismos extrínsecos y otros que son los mecanismos intrínsecos. Los materiales extrínsecos significan que, mediante una fuente externa, el material se puede autoreparar, por ejemplo, si tomamos cualquier material lo cortamos o le hacemos una raya y luego lo tratamos con calor, lo ponemos a temperaturas diferentes 60, 70, 80 o 90 grados durante un tiempo al final se podría autoreparar. Los materiales intrínsecos son los que se autoreparan *per se*, sin que haya un cambio o una fuente externa y ahí sí que hay muy pocos materiales así. Porque para que eso se produzca tienen que cumplirse en mi opinión 3 características: primero ser un material polimérico, ser un polímero. El segundo tener una estructura suficientemente móvil para permitir que las cadenas del polímero se puedan mover. Y la tercera, es que a la vez este material tenga unas propiedades mecánicas suficientemente grandes como para que el material tenga resistencia en su uso. Entonces, imagino que una de las preguntas que me vas a hacer después, pero ahora mismo a nivel científico el gran reto que hay es conseguir mucha movilidad de cadenas, se supone que el material tiene que ser blando para que las cadenas se puedan mover, pero a la vez que tengan una buena resistencia mecánica, con lo cual significa que las cadenas no se puedan mover, entonces digamos este sería un poco el tema. ¿Por qué un polímero? Porque para que se produzca la autoreparación tiene que cumplirse que el material tenga unas propiedades viscoelásticas, este concepto es un concepto que a mis estudiantes de máster empleamos bastantes horas en explicarlo, pero fundamentalmente digamos que los materiales viscoelásticos por esencia son los polímeros. Hay muchos materiales poliméricos incluyendo por ejemplo muchos de los materiales que tenemos en la cocina, por ejemplo: las proteínas, el mismo ADN, el almidón, las legumbres, el arroz... todo esto son materiales poliméricos. Estos materiales tienen una característica única, que no tienen otros materiales y es que cuando uno ve a los materiales y los clasifica, tienes los materiales sólidos, como una roca y los materiales líquidos, el agua. La roca es un material que no tiene la característica de líquido y al agua no tiene ninguna característica sólida. Sin embargo, los polímeros tienen las dos

características juntas, entonces combinando la parte sólida y la parte líquida, en la ciencia de los materiales a la parte sólida se la llama elástica y la parte líquida se la llama parte viscosa. Combinando estas dos propiedades de forma adecuada se puede conseguir la autoreparación.

**5. Algunas empresas automovilísticas, aeronáuticas, de telefonía... anuncian que ya están utilizando o utilizarán en un futuro inmediato este tipo de materiales, pero en el ámbito de las energías renovables, especialmente las eólicas, no es que se hable mucho de este tema. ¿Cuál es su opinión al respecto? ¿Dispone de alguna información?**

En el mundo de la energía renovable, yo creo que sí que la autoreparación es una propiedad deseable y me consta que las empresas son líderes en este campo, sobre todo en el campo de los aerogeneradores que están intentando implantar estos materiales. El problema de implantar materiales autorreparables aquí reside de nuevo en que la autoreparación requiere muchas veces que el material tenga esta movilidad de cadenas. es decir, cuando rompemos, por ejemplo, yo a mis alumnos para que visualicen un polímero les digo lo mismo, un polímero es como un plato de espagueti, sin ningún tipo de aditivo lo que son los espaguetis cocidos, entonces si los corto por la mitad y los vuelvo a poner en el plato están separados, sin embargo, si los vuelvo a hervir ese espagueti con la presencia del calor se vuelven a juntar y cada vez estarán más rígidos incluso antes que en su estado original. Cuando yo comparo o vuelvo a cortar y a recocinar, la autoreparación se va perdiendo. Entonces ahí digamos como tres cosas que son las que limitan la implantación de la tecnología. Primero, la autoreparación o la multireparación o la autoreparación en varias etapas, es decir, que el material se fisure, se autorepare, conforme va pasando el número de reparaciones, la capacidad que tiene de autorepararse es menor. Segundo, las condiciones ambientales, los aerogeneradores están en sitios en donde hay cambios bruscos de temperatura, de humedad, de viento, entonces todo esto afecta a las propiedades del material. Todavía no se ha encontrado hoy en día un material que tenga la resistencia suficiente frente a estos agentes y que además mantenga su autoreparación. Y luego la tercera, que yo creo que es un tema del coste. Un aerogenerador, por ejemplo, de

los que ahora se están implantando en el mar, cada pala de un aerogenerador tiene 80 metros, entonces conseguir que esta pala se construya con un polímero autoreparable, requiere una inversión brutal, y en este momento es un producto digamos sofisticado. Pero estoy seguro de que sí que es una de las áreas, en general de la ingeniería civil, en la que la autoreparación tiene un futuro a medio plazo bastante bueno.

**6. En la naturaleza los ejemplos de autoreparación que encontramos en animales y plantas son múltiples, por el hecho de que partimos de células vivas, así como también la piel humana. ¿Cree que la gran dificultad de este tipo de materiales es por tanto conseguir la autorreparación a partir de un elemento “no vivo”?**

Yo creo que es importante distinguir. En la naturaleza más que autoreparación, yo hablaría de una autoregeneración. La diferencia está en que, en el caso de un corte en la piel o en el caso de algunos animales, como son las estrellas de mar o los lagartos, que sueltan la cola y se vuelve a regenerar, en realidad lo que se produce es una regeneración del material. Esto significa que, no es que el material se corte y luego se vuelva a unir, esto no sucede en la naturaleza. El brazo que se rompe de la estrella de mar no se autorepara, no se pueden unir estas uniones proteicas. En las plantas sí que hay autoreparación. En los injertos, por ejemplo, cuando se hace ingeniería de los alimentos lo que se hace es por ejemplo, hacer una naranja que tenga un sabor menos fuerte, entonces al árbol le cortas un esqueje donde el árbol esté creciendo le pones una rama de otra especie, por ejemplo de un melocotonero, y entonces curiosamente hay un tema genético en el que no entramos, pero sí que se produce la unión de esa rama con el tronco del árbol, entonces ahí sí que hay una autoreparación, porque realmente hemos cortado, hemos unido y en el punto de unión es donde realmente se produce la autoreparación. Entonces en la naturaleza se produce una regeneración y el mecanismo por el que esto se produce es el mismo que el de la regeneración de las células, hay un proceso digamos genético en el que realmente hay unas recombinaciones de ADN. En estos materiales inertes, esto no es factible, al final entramos en la metafísica de si un material inerte tiene vida y realmente no tiene vida en el sentido que no es capaz de nacer, reproducirse y morir. Un material

inerte cuando hablamos de autoreparación en realidad se podría parecer un poco a lo que se produce en el corte de la piel, pero repito que al final en el corte de una piel lo que hay son unas reacciones químicas donde realmente se regeneran los tejidos porque se crea tejido nuevo. En un material autoreparable no se crea tejido nuevo.

## **7. ¿Podría hablar un poco del tema de las patentes en este ámbito?**

En el año 2012, yo hice una búsqueda a través de Google para ver cuantas patentes nombraban la palabra autoreparación, en inglés es self-healing, y aparecían 130.000 patentes. A partir del 2012 uno puede pensar que el número de patentes hubiese aumentado de forma sustancial y sin embargo no ha sido así. Ahora, en la actualidad, hay más de 200.000, pero esto demuestra que en diez años no se ha llegado ni a duplicar este número de patentes. La razón fundamental es porque desde un punto de vista técnico, proteger un tipo de “materiales” para unas aplicaciones, cuando la industria en general ahora no ve muy claro si el balance de perder ventas al alargar la vida de los productos, frente al darle una vida más larga por temas de economía circular, de contaminación o de residuos, la industria no lo tiene muy claro. De momento lo que prima es la venta de un mayor nombre de productos nuevos. Por otra parte y que yo creo que es la más seria, es por qué los mecanismos que se utilizan para desarrollar estos materiales, hablo de los mecanismos intrínsecos, de los mecanismos internos, prácticamente están definidos o son los mismos que hace 10 años, es decir, no hay una innovación en esto, rotamos sobre las mismas reacciones, las reacciones tipo covalente o no covalente, todo esto se planteó a inicios del año 2010 y realmente lo que yo he estado viendo hasta ahora en la literatura científica rondan al entorno de estas reacciones con algunas modificaciones, cambiando los reactivos, las temperaturas. Entonces yo creo que realmente esto es otra cosa que lo limita. Y la última, es que ahora mismo, hasta donde yo conozco, no hay materiales que se autoreparen a temperatura ambiente en condiciones, digamos de uso normal, de una forma suficientemente rápida y de una forma repetitiva. Porque realmente estos mecanismos de los que estoy hablando, requieren calentar el material por encima de los 60 grados. Esto si pensamos en una tubería en el desierto, pues no habría ningún problema, allí las temperaturas pueden alcanzar los 60 grados y la autoreparación es rápida. Pero en un uso normal y sobre todo también pensando en

bajas temperaturas en sitios muy fríos, realmente es un reto el desarrollar estos materiales. Por eso yo creo que se ha paralizado un poco el tema de las patentes.

**8. Esta es una pregunta más personal ¿En qué consistió el proyecto al cual participó sobre la creación de un material polimérico capaz de autorrepararse?**

Bueno, en realidad, yo no tuve un proyecto, la historia del material fue como pasa muchas veces en temas de investigación, más casual. Es cierto que antes de esta época de Covid, yo viajaba bastante, entonces solía asistir a conferencias de mi ámbito, el de los adhesivos y uniones de materiales, entonces en estas siete u ocho conferencias que yo me hacía al año, pues sí que me llamó la atención que había algunas comunicaciones tendentes que hablaban del tema de la autoreparación, y la verdad es un tema que me parecía fascinante, interesante. Pero en mi laboratorio realmente desde hace muchos años nuestra investigación está muy dirigida hacia la sociedad, entonces trabajamos con proyectos externos, privados. Lo que pasa es que empezamos en un proyecto con una empresa japonesa que nos pidió que desarrolláramos un recubrimiento interior para tuberías de petróleo de las que llevaban petróleo por el desierto. Entonces empezamos a trabajar con unos materiales poliméricos y cuando fuimos viendo las propiedades mecánicas, nos dimos cuenta de que el material polimérico pues cuando lo estirábamos o si lo rompíamos para ver cuanto aguantaba, pues cuando lo guardabamos en la bolsa y al día siguiente o a los dos días lo mirabamos, pues se había vuelto a unir. A partir de ahí, unido un poco a lo que había visto en las conferencias con esto. Entonces ese fue un poco el origen. Curiosamente sí que quiero comentarte que, durante cuatro o cinco años, hasta el 2020, no hemos podido trabajar con estos materiales, porque al haberse gestado el proyecto con una empresa, no podíamos divulgar nada ni investigar nada en cinco años. Entonces ahora sí que lo hemos retomado y tengo en marcha una tesis doctoral que ya está algo avanzada y el objetivo es fundamentalmente entender porque, porque yo realmente sigo sin saber porque el material se autorepara y en qué condiciones. Pero realmente fue un tema más de casualidad, no es que me interesara mucho el tema de los materiales autoreparables y entonces diseñara el material, fue a la inversa. Me encontré con esto y luego uní un poco la inquietud que yo tenía porque me interesaba a nivel científico con este hallazgo.



**9. ¿La Universidad de Alicante actualmente está trabajando en proyectos con materiales autorreparables? ¿En qué ámbitos?**

Bueno vamos a ver, esta es quizás la pregunta más difícil de todas las que me vas a hacer. Yo te voy a responder con franqueza. En mi universidad realmente el tema de los materiales autoreparables, les importa poco. Entra dentro de lo que son las políticas de nuestro entorno. Entonces cuando surgió el tema del material, hubo muchísimas empresas que vinieron, yo de hecho mi laboratorio es pequeño y para mí fue una paralización de mi actividad durante tres o cuatro meses porque me pasaba el día recibiendo a personas. Entonces se me ocurrió que me ofreciera mi universidad la creación de un centro dedicado exclusivamente a desarrollar aplicaciones del material. Entonces en aquel momento el equipo, no el equipo rectoral, el rector particularmente tenía un interés especial en que esto no saliera de la universidad, en que no se conociera por razones políticas. Y entonces aquello intentaron derivarlo hacía crear una empresa de la universidad, la creamos, pero fue un desastre, salió mal, y bueno la situación actual es que yo personalmente estoy trabajando en este material, en esta tecnología porqué sigo creando en ella. Mi vida profesional está a punto de terminar, entonces lo último que quiero hacer es a ver si soy capaz de entender por qué se produce esta autoreparación. Y también te voy a indicar que actualmente hay un consorcio en China que, si quiere desarrollar aplicaciones de este material, entonces soy consciente de que hacer esto es perder toda la tecnología en Europa y en España, pero si realmente no somos capaces de desarrollar aplicaciones ni darle una utilidad al material pues al final es algo que yo he balanceado. Pero fíjate, que este es un temo que yo lo estoy moviendo a nivel personal no con mi universidad.

**10. ¿En otros países están más avanzados o se utilizan más este tipo de materiales, en comparación con España?**

No. Vamos a ver, cuando hablamos de uso, a nivel industrial, yo creo que estamos igual en todos los países. Lo que si es cierto es que, a nivel de investigación y desarrollo, sin duda hay dos países que son los que más están haciendo, por lo menos, más publicaciones, el primero con diferencia es China. China ocupa más del 60 % de las publicaciones mundiales en este campo y el segundo curiosamente es Japón. Japón es también un país que está desarrollando o que tiene bastantes publicaciones en este campo. Europa se ha quedado bastante rezagada y Estados Unidos también.

**11. Finalmente, ¿Qué opinión tiene en general sobre estos materiales? ¿Cree que se está avanzando en este ámbito o aún hay mucho camino por recorrer?**

Queda mucho por recorrer. Como decía antes para poder desarrollar un material lo primero que uno tiene que hacer es comprender y entender este tipo de materiales, entonces realmente el planteamiento es cuando hay un corte de un material y uno ve lo que se une, pues esto está ahí, pero si uno no es capaz de saber porque se une, difícilmente puede mejorarlo, innovarlo, puede aplicarlo. Entonces yo creo que ahí hay un campo muy grande. La segunda cosa es que hay una confusión muchas veces entre lo que se llama la autoreparación y otra cosa que nosotros llamamos la pegajosidad, digamos el tack. Cojamos el tema del caucho, por ejemplo. Yo cojo una goma de caucho, en principio no es un material autoreparable, pero si corto con una cuchilla una goma elástica por la mitad y luego las dejo juntas, si espero unos días el material se ha unido. Entonces uno piensa que es un material autoreparable pero sin embargo esto no es autoreparación, por qué lo que sucede realmente es que en el caucho se produce o existe un fenómeno que se llama la pegajosidad, que no es más que si tuviéramos dos gusanos que se van acercando y como son iguales, se tratan de regenerar. Creo que una gran parte de lo que se está llamando autoreparación en realidad es pegajosidad, y entonces, vuelvo al principio, los principios que rigen la autoreparación no son suficientemente conocidos, en cambio los que gobiernan la pegajosidad sí que se descubrieron hace unos años, fue el objeto de un premio Nobel en el año 1995, y sí que son conocidos, pero son completamente distintos. Hay un

gran camino y sobre todo hay un área que nos puede favorecer mucho y es que, en los últimos dos años, me ha llamado la atención que no me preguntes por él, porque es que resulta que donde ahora se está teniendo relevancia es en el campo de la medicina, en los implantes médicos. Ahí de hecho yo tengo una conferencia invitada en Rumanía, de biomateriales y voy a presentar un poco una visión general ante los materiales autoreparables pero en el campo de los biomateriales, porque realmente ahí es curioso, pero de nuevo los chinos hacen unas publicaciones impresionantes sobre el tema, de corazones artificiales, de válvulas de corazón, de cartílagos... Y aquí es donde se está aplicando materiales autoreparables y ya están mostrando resultados clínicos. Ahí es un campo que se va a desarrollar muy rápido, pero al final nos vamos a encontrar con lo mismo, si no somos capaces de saber los mecanismos de por qué se autorepara un material difícilmente vamos a poder innovar.

**12. Hay distintos métodos de autoreparación, uno que es a través de cápsulas y el otro por fuerzas estáticas. ¿Cuál crees que es mejor de aplicar?**

A ver, el tema de las cápsulas es una tecnología que se utiliza en los asfaltos. Por ejemplo, en la zona de Girona, es una zona de mucho tráfico por este acceso a Francia, y de muchos cambios de temperatura, en invierno mucho frío y en verano mucho calor. Casi todos los asfaltos ya tienen estas cápsulas de unos materiales poliméricos que cuando el asfalto se daña, se rompe, y tienes dos productos químicos que reaccionan entre sí y regeneran (autoreparan) el material. Entonces en este sentido pensamos en cambiar esto y en vez de cápsulas pues utilizar fuerzas electroestáticas pues ahí no lo podrías usar, tendrías que electrificar la carretera. Por el contrario, uno de los desarrollos que nosotros hicimos, fue que desarrollamos un “zip” muy delgado para poner encima de las pantallas de los dispositivos móviles. De hecho, esto fue un trabajo de una chica de fin de máster, y el objetivo era ver por qué estos materiales pueden ser transparentes, llegamos a ver que se autopegaban, se podían poner y quitar, podías pasar el dedo por encima y funcionaba bien. El tema era si el móvil o la tablet se caía, el impacto de la pantalla lo recibía este material. ¿Cuál era el mecanismo? Pues no lo se. Yo sí sé las propiedades, las formulaciones que van bien y las que no van bien, pero realmente el mecanismo por el que esto funcionaba así yo no lo pude determinar. Realmente no creo que haya un mecanismo

que sea mejor que otro, el mecanismo tiene que ser en función de cuál sea la aplicación u objetivo. Si estamos pensando en temas biomédicos, hay dos cosas importantes: una primera que todo lo que hagas tiene que funcionar muy bien a 37 grados de temperatura corporal, con lo cual ya estamos en un campo distinto, cualquier material o mecanismo que elijas tiene que ser capaz de autorepararse a esta temperatura. Hemos encontrado cosas muy curiosas, materiales que no se reparan a temperatura ambiente, pero los subes a 37 grados y se autorepara, otros materiales que a temperatura ambiente no se autoreparan, los bajas la temperatura a 0 grados y se autoreparan. Al final sí que tenemos como una fenomenología de unos datos experimentales, pero nos falta todavía entender que es lo que pasa y realmente en este sentido yo creo que no se puede decir que haya nada mejor ni nada peor, hay cosas más adecuadas que otras en función de cuál es tu objetivo y tu aplicación.

**13. Para terminar, quería hacerle una pregunta más personal. El trabajo que tenemos que hacer debe tener una parte práctica y le quería preguntar: ¿Cuál cree que podría ser una buena parte práctica teniendo en cuenta los conocimientos de una alumna de bachillerato?**

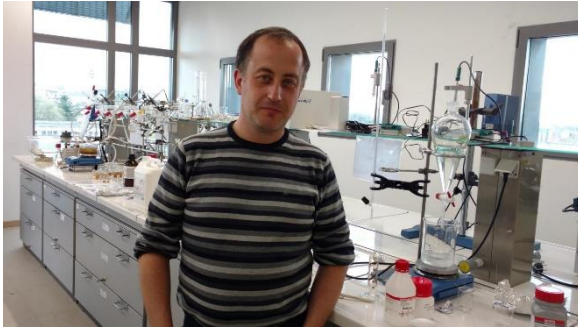
Vamos a ver yo si tuviera que elegir, pero me contradigo con lo que he dicho antes. Pero si uno tiene que hacer un trabajo práctico, yo cogería el tema del caucho, lo que comentaba antes, cogería una goma ancha, cortaría un trozo con una cuchilla de afeitar para que el corte sea fino y lo mantendría junto durante un tiempo y estos es un tema, ya que el caucho es un material polimérico, pero repito no es muy académico porque realmente no sería una autoreparación en el sentido de como yo lo veo. Pero es interesante. La segunda cosa es que en el mismo experimento podrías hacer algo que también es fácil y es que en un trozo de esta goma con una cuchilla hacer un corte superficial muy poco profundo y si vas mirando verás como el corte desaparece. Por razones, que aún estoy atado con la empresa japonesa y no me deja sacar material, si no yo te mandaba un trozo de mi material para que lo probaras. Tenemos un video en internet donde se ve el tema de la autoreparación. Luego también estaría el tema del injerto. Porque ahí sí que hay autoreparación. Unes la planta con celulosa, que también es un polímero.

“Mucho éxito y espero que en tu vida profesional si haces una ingeniería de materiales, seguro que vas a hacerlo muy bien y trata siempre de mantener el entusiasmo por las cosas nuevas, porque yo creo que es una cosa que nos hace falta. Ahora mismo en España hay pocos investigadores vocacionales, entonces me parece que tu si vas a ser una investigadora vocacional y ojalá que sepas encontrar un camino y demás, no te desanimas y harás lo que quieras.”

JOSÉ MIGUEL MARTÍN MARTÍNEZ

## 8.3 ENTRETIEN AVEC JEAN-MARIE RAQUEZ

(De la version originale française) 6/07/2022



**Professeur de l'Université de Mons et spécialiste des matériaux et des composites**

Image extraire de Sudinfo.la province

**1. Vous êtes titulaire d'un doctorat en science des polymères de l'Université de Mons. Quel rapport avez-vous avec les matériaux auto-réparateurs ?**

En fait, dans le laboratoire on travaille dans tout ce qui est matériaux respectés de l'environnement dans "The green matters". Alors, on a, en fait, développé beaucoup de solutions qui étaient des solutions pour le packaging, pour l'emballage et on a évalué vers des matériaux plus avancés, comme des matériaux autoréparants. C'est pour cette raison que on a fait ça d'autant plus que on a développé ce système sur base de chimie respectueuse.

**2. Pourquoi pensez-vous que les matériaux autoréparables sont encore peu connus ?**

Ils sont connus mais il y a de difficultés pour induire ou pour réaliser l'autoréparation donc en fait la plupart se base sur des effets de température et certain ne sont pas préparés de manière spontanée donc il faut un stimulus comme j'ai dit basée sur la température ou sur la lumière et donc c'est pour cette raison-là qu'on ne les voit pas trop sur le marché. Mais il y a des solutions qui existent. Il y a 2 types de matériaux autoréparants, il y a ce qu'on appelle les intrinsèques et les extrinsèques. Les intrinsèques se basent sur la chimie qui est réversible, avec des fonctions réversibles et comme j'ai dit ils sont basés sur des stimulus. Et les extrinsèques ce sont des systèmes, par exemple tu as une résine dans laquelle on va mettre des capsules de

monomères et si tu as une fracture ça va libérer en fait le monomère et autour de la résine il y a un catalyseur pour figer et pour polymériser. Mais le problème est qu'il ne peut être utilisé qu'une seule fois, c'est-à-dire, quand tu as cassé les capsules, elles se vident et cela ne peut pas être répété. C'est pour cela qu'il y a des avantages et inconvénients.

### **3. Si les matériaux autoréparables semblent si bénéfiques pour l'avenir et l'économie circulaire, pourquoi de nombreuses entreprises ne les utilisent-elles toujours pas ?**

Il faut voir le modèle économique et qu'est-ce que ça peut rapporter. Donc lorsque tu développes une solution bah il y a le développement de la solution en termes de recherche, puis aussi les procédés qu'il faut mettre en œuvre pour réaliser cela à grande échelle entre le laboratoire au travail [...]

Et donc, économiquement il faudra voir si cela est intéressant, puis il y a aussi un autre paramètre c'est que les entreprises veulent vendre des produits, donc si le produit s'autorépare, ça veut dire que la durabilité va être très important, donc ils ne pourront pas vendre beaucoup de produits. C'est pour cela qu'il faut voir le marché dans lequel ils s'adressent.

### **4. Quels sont les inconvénients de ces matériaux ?**

Donc comme j'ai évoqué, le fait où il y a encore des défis technologiques ça se répare spontanément de manière répétée, etc.

### **5. Quelle est la complexité de la création de ces matériaux ?**

Alors quelle est la complexité il y a certains systèmes où la chimie est relativement facile à mettre en place, d'autres sont plus complexes, c'est du cas par cas, ça dépend en fait, on a développé par exemple des systèmes basés sur des réactions de diels alder ce sont des entités thermoréversibles on l'a mis en place par exclusion en fait. Donc ça c'est possible de le faire et on continue, etc., ça dépend du système que l'on regarde.

**6. Tous les matériaux sont-ils capables de s'autoréparer ou doivent-ils remplir certaines propriétés spécifiques pour pouvoir appliquer cette caractéristique d'autoréparation ?**

Tous les matériaux peuvent se réparer, mais c'est du cas par cas. Donc quand tu as à faire à des matériaux de types thermoplastiques ils sont flexibles là il faut mettre en œuvre de la chimie réversible, pour quoi ? parce qu'il faut de la mobilité pour que ça ne le soit pas. Dans le cas de résine beaucoup plus rigide comme des thermodur, des résines époxy là c'est plutôt de l'extrinsèque c'est qu'il faut mettre en place parce que c'est tellement peu mobile mettre la chimie réversible ça ne marchera pas donc c'est du cas par cas il y a des choses qui peuvent se faire, des choses qui ne peuvent pas se faire, mais potentiellement oui. C'est tout.

**7. Certaines entreprises de l'automobile, de l'aéronautique et de la téléphonie ont annoncé qu'elles utilisaient déjà ou allaient utiliser ce type de matériau dans un avenir proche, mais dans le domaine des énergies renouvelables, et notamment de l'énergie éolienne, on ne parle pas beaucoup de ce sujet. Quelle est votre opinion sur ce sujet ? Avez-vous des informations ?**

Je ne sais pas trop qu'elles sont les informations qui sont disponibles mais les éoliennes, l'industrie éolienne, est relativement récente donc ils sont seulement en train de réfléchir à recycler les turbines d'éoliennes maintenant avec des solutions qui date de 15 à 20 ans, donc à ce stade, à cette époque-là ce n'était pas il n'y avait pas la question d'auto-réparation, etc. Dans les cas de turbine il y a peut-être plus de la aussi. Ça tu dois savoir, ce n'est pas spécialement réparer les matériaux quiconque mais c'est de faire la maintenance la plus optimisée, c'est à dire que pour éviter d'aller tous les ans ou tous les six mois pour vérifier ça c'est avoir des systèmes de fibre optique pour capter, pour déterminer qu'un certain moment il faut que j'aille réparer la pièce. Donc, ça revient moins cher en termes de maintenance. C'est plutôt ce défi-là qui se présente dans ce type d'industrie, en fait.



**8. Pourriez-vous nous parler un peu de la question des brevets dans ce domaine ?**

Il y a des brevets, bien entendu, mais maintenant il y a ce qu'on appelle l'état de l'art scientifique, il y a des choses qui sont développées dans les brevets on peut trouver les informations mais c'est de l'art technique, de l'information scientifique. Tu peux aussi regarder les informations des articles de revues. C'est vrai qu'ils ne vont pas te donner la technologie comme ça pour des raisons de secret industriel mais si le brevet est publié tu peux aller chercher l'information il n'y a pas de problème parce que c'est public.

**9. Les matériaux autoréparables sont-ils considérés comme des types de matériaux intelligents ou comme des exemples de matériaux intelligents ?**

Alors, c'est toujours le problème de savoir si c'est intelligent ou pas, c'est plutôt adaptatif le terme correct. Intelligent c'est quand même être capable de sensé a un environnement et de répondre à ça. Eux sens pas, il n'y a pas de senseur, il y a de couture il voit qu'elle fragilité de manière spontanée ou selon de chimie vont se réparer, d'adaptation fait à l'environnement.

**10. Avez-vous participé ou participez-vous à un projet qui prend en compte ce type de matériaux ?**

Oui on a fait des projets là-dessus en fait. Des projets de type nationaux ou européen en fait. Certains en réussir mais il faut de temps qu'ils soient implémentés ... on a un projet avec airbus aussi, voilà. Mais après il faut voir s'il y a des solutions industrialisables ou pas.

**11. Pensez-vous que la Belgique mise sur ce type de matériaux ou y a-t-il d'autres pays qui les prennent davantage en compte ?**

La Belgique est un secteur de recherche important en commerce plastique, mais il y a un autre secteur. Airbus est en France par exemple, ce n'est pas commercialisé en Belgique. Il y a des groupes en Espagne aussi.

**12. Enfin, quelle est votre opinion générale sur ces matériaux, pensez-vous que des progrès sont réalisés dans ce domaine ou y a-t-il encore beaucoup de chemin à parcourir ?**

Donc qu'il y a des choses comme j'ai évoqué maintenant il y a une nouvelle tendance qui est de plus en plus... ce sont les vitrimères. Je ne sais pas si tu as entendu le terme. Les vitrimères c'est un matériau qui se comporte soit comme un thermoset soit comme un thermoplastique et l'idée c'est d'avoir les avantages du thermoset en tant que rigidité et les avantages thermoplastique en tant de recyclage et de processabilité. Et comment on fait le lien entre les deux, c'est basé sûr... en fait à des réactions de changes qui sont à température. Réalisé donc à basse température le système est un réseau il se comporte comme un thermoset avec ses avantages et on augmente la température et on peut permettre l'échange et avoir un thermoplastique et cetera. Donc ça c'est plutôt la tendance ce qui est à l'heure actuelle en matériaux autoréparable.