

Un chef-d'oeuvre de médecine: le moulage anatomique par corrosion

Par le Lycée Julliot de la Morandière à Granville



Résumé

Notre projet "Un chef d'oeuvre de médecine : le moulage anatomique par corrosion" consiste, en utilisant la méthode de moulage anatomique par corrosion, à mieux comprendre la structure des poumons, pour déterminer comment ils remplissent leur rôle: la respiration. Nous souhaitons que cette technique puisse être accessible aux établissements secondaires afin de reproduire fidèlement la structure des poumons.

Nous avons exploré différentes méthodes de corrosion, testant divers agents tels que les enzymes des pastilles de lave-vaisselle, la soude, la soude avec de l'éthanol et la potasse avec de l'éthanol. Parallèlement,




nous avons étudié les résines pour leur résistance aux agents corrosifs, dans le but de sélectionner la plus adaptée à notre expérimentation.



En parallèle, nous sommes en train de développer un programme Arduino pour automatiser la mesure de température et de pH de la solution corrosive et celle de la masse du poumon, afin de mieux comprendre les variations qui se produisent lors du processus de corrosion.

Lien de la vidéo:

https://www.youtube.com/watch?si=imDLQ3w3AQNRXqOd&v=E99zi_8ENbg&feature=youtu.be

L'équipe

	<ul style="list-style-type: none"> - Elève en Terminale, spécialités physique-chimie et SVT - Expérimentatrice - Coordination générale du projet - Communication interne et externe
<p>Noémie Gourden</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Elève en Terminale, spécialités physique-chimie et SVT - Expérimentatrice - Programmation des capteurs et des actionneurs pour l'automatisation des mesures et des manipulations - Gestion des échanges et de la communication avec les étudiants impliqués dans le projet
	<ul style="list-style-type: none"> - Elève en Terminale, spécialités physique-chimie et SVT - Expérimentatrice - Programmation des capteurs et des actionneurs pour l'automatisation des mesures et des manipulations - Gestion des échanges et de la communication avec les étudiants impliqués dans le projet
<p>Eléonore Clément</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Elève en Terminale, spécialités physique-chimie et mathématiques - Expérimentateur - Recherche et sélection du matériel nécessaire à l'automatisation du système expérimental - Collecte des données expérimentales
	<ul style="list-style-type: none"> - Elève en Terminale, spécialités physique-chimie et mathématiques - Expérimentateur - Recherche et sélection du matériel nécessaire à l'automatisation du système expérimental - Collecte des données expérimentales
<p>Enzo Kouakou--Belloir</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Elève en Terminale, spécialités physique-chimie et mathématiques - Expérimentateur
	<ul style="list-style-type: none"> - Elève en Terminale, spécialités physique-chimie et mathématiques - Expérimentateur

	<ul style="list-style-type: none"> - Recherche et sélection des enzymes appropriées pour le processus de corrosion des poumons - Communication avec les entreprises spécialisées pour obtenir des informations sur les produits disponibles
<p>Arsène Leclerc</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Supervision générale du projet et validation de sa faisabilité dans le cadre des objectifs pédagogiques et scientifiques - Guidance et conseil tout au long du processus, en offrant une expertise dans le domaine de la recherche et de l'éducation - Soutien dans la résolution des problèmes rencontrés et dans la prise de décisions
	
<p>Mr Gires</p>	

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers le comité du Concours C'Génial pour son soutien financier qui a rendu ce projet possible.

Nous adressons également nos remerciements à Thierry Boisgard, du Musée d'histoire naturelle de Nantes, pour nous avoir prodigué ses conseils éclairés tout au long de notre démarche.

Nos sincères remerciements vont également à Thomas Bessonnet, du laboratoire Capacités SAS, pour son expertise concernant l'utilisation des enzymes dans notre expérience.

Nous tenons également à remercier Marie Clément-Charon d'avoir pris le temps de relire notre compte-rendu afin d'obtenir un point de vue extérieur

Enfin, nous remercions Léopold Clément (doctorant, normalien et agrégé d'ingénierie informatique) et Théodore Clément (étudiant en informatique) pour leur précieuse assistance dans la programmation et la mise en œuvre du code nécessaire à la réalisation de ce projet.

Leur engagement et leur soutien ont grandement contribué à la réussite de ce projet.

Table des matières

Introduction.....	6
Problématique.....	6
Partie 1: Contexte théorique.....	6
1.1 Anatomie des poumons : La structure et des fonctions des poumons.....	6
1.2 Historique du moulage anatomique : Évolution des techniques de moulage anatomique et leur utilité dans le domaine médical et éducatif.....	7
Partie 2: Méthodologie.....	7
2.1 Sélection des méthodes de corrosion.....	7
2.1.1 Tests avec différents agents corrosifs.....	7
2.1.2 Tests sur des échantillons de poumons.....	8
2.1.3 Comparaison avec des méthodes antérieures.....	9
2.2 Choix de la résine.....;	11
2.3 Automatisation des prises de mesures pour optimiser le protocole expérimental.....	14
Partie 3: Corrosion des poumons.....	17
3.1 Préparation des bains.....	17
3.2 Préparation des poumons.....	17
3.3 Préparation de la résine et injection.....	18
3.4 Corrosion et prise de mesures.....	18
Partie 4: Protocole expérimental final.....	20
4.1 Matériel nécessaire.....	20
4.2 Étapes du protocole.....	20
Conclusion.....	21
Photos des corrosions.....	23

Introduction

Les poumons, chefs d'orchestre du système respiratoire, ont depuis toujours fasciné les chercheurs, les médecins et les curieux par leur complexité anatomique et leur importance vitale. Comprendre la structure interne des poumons revêt une importance cruciale pour diagnostiquer et traiter un large éventail de maladies respiratoires, ainsi que pour former les professionnels de santé de demain.

Dans cette optique, notre projet, intitulé "Un chef-d'œuvre de médecine: le moulage anatomique par corrosion", vise à explorer une technique accessible aux établissements du secondaire pour représenter fidèlement la structure interne des poumons en combinant des méthodes traditionnelles de moulage en résine avec des procédés de corrosion ciblée.

Problématique

Dans le cadre de notre projet "Un chef d'œuvre de médecine: le moulage anatomique par corrosion", nous avons été confrontés à une problématique complexe mais passionnante. En effet, l'élaboration de modèles anatomiques précis et fidèles des poumons représente un défi majeur dans le domaine de l'enseignement. Très peu de méthodes peuvent le réaliser : elles sont souvent très coûteuses et difficiles d'accès, comme par le scanner (tomodensitométrie (TDM) thoracique. Cette technique d'imagerie médicale utilise des rayons X pour produire des images détaillées des structures internes des poumons sous forme de coupes transversales. En combinant ces coupes transversales, la tomodensitométrie permet de construire une image tridimensionnelle des poumons, offrant ainsi une visualisation précise des structures anatomiques et des éventuelles anomalies. Or cette méthode est hors de portée des établissements du secondaire pour visualiser la structure interne des poumons. Face à cette problématique, notre objectif était de développer une technique accessible, permettant de produire des modèles anatomiques de haute qualité, tout en simplifiant le processus pour le rendre réalisable dans les établissements du secondaire. Ainsi, notre travail a été guidé par la question suivante : **Comment créer des modèles anatomiques de poumons par corrosion, alliant efficacité, précision et accessibilité pour l'éducation anatomique ?**

Partie 1: Contexte théorique

1.1 Anatomie des poumons : La structure et les fonctions des poumons

Les poumons, organes vitaux du système respiratoire, sont d'une complexité anatomique remarquable. Comprendre leur structure est essentiel pour saisir leur fonctionnement et leur importance dans le maintien de la vie. Les poumons sont composés de plusieurs structures anatomiques clés, notamment les bronches, les bronchioles, les alvéoles et les vaisseaux sanguins. Les bronches, qui se ramifient à partir de la trachée, transportent l'air vers les poumons, tandis que les alvéoles sont responsables de l'échange gazeux entre l'air et le sang.

La fonction principale des poumons est la respiration, qui comprend l'inhalation d'oxygène et l'expiration de dioxyde de carbone. Ce processus permet d'oxygéner le sang et d'éliminer les déchets gazeux du corps. De plus, les poumons jouent un rôle crucial dans la régulation du pH sanguin en contrôlant la concentration de dioxyde de carbone dans le sang.

La structure fractale des poumons, caractérisée par des ramifications à plusieurs niveaux, permet une augmentation significative de la surface d'échange. Cette disposition en fractales crée une grande surface interne, favorisant l'absorption efficace de l'oxygène par les alvéoles et la libération du dioxyde de carbone. Cette surface d'échange étendue est essentielle pour garantir une respiration efficace et une oxygénation adéquate du sang.

1.2 Historique du moulage anatomique : Évolution des techniques de moulage anatomique et leur utilité dans le domaine médical et éducatif

Depuis des siècles, les chercheurs et les anatomistes ont cherché des moyens de représenter fidèlement les structures du corps humain. L'histoire du moulage anatomique remonte à l'Antiquité, lorsque les premiers anatomistes ont utilisé des matériaux tels que la cire et le plâtre pour créer des modèles anatomiques. Au fil du temps, ces techniques se sont développées et ont évolué pour inclure des matériaux plus sophistiqués et des méthodes de fabrication plus précises.

Au cours des derniers siècles, le moulage anatomique est devenu une pratique courante dans le domaine médical et éducatif. Les modèles anatomiques sont utilisés dans les écoles de médecine pour l'enseignement et dans les musées et les expositions pour l'information du grand public. Ils ont également joué un rôle important dans la recherche médicale, en permettant aux chercheurs d'étudier les structures anatomiques avec une grande précision et en facilitant la communication des découvertes scientifiques.

Partie 2: La méthodologie

Dans cette section, nous détaillerons les méthodes utilisées pour réaliser les moulages anatomiques par corrosion des poumons, ainsi que les procédures expérimentales mises en place pour atteindre nos objectifs. Nous avons utilisé comme base l'article scientifique:

https://journals.viamedica.pl/fovia_morphologica/article/view/FM.a2021.0119/64725

2.1 Sélection des méthodes de corrosion

Notre objectif était de faire disparaître de façon efficace l'organe pour n'en conserver que le moulage. Pour cela, nous avons mené une recherche approfondie afin d'identifier les éléments chimiques capables de "digérer" les poumons tout en préservant la résine du moulage. Nous avons également cherché une résine suffisamment résistante pour supporter le processus de corrosion sans se détériorer. Dans le processus de sélection des méthodes de corrosion appropriées pour notre étude, il est essentiel de définir le **pouvoir corrosif** des agents utilisés. Celui-ci peut être défini comme l'aptitude à provoquer une hydrolyse non spécifique par les ions hydroxydes de la fonction ester (présente dans les glucides et la résine polyester) et de la fonction amide (présente dans les protéines). Cette définition nous permet de mieux comprendre les réactions chimiques impliquées dans le processus de corrosion et nous guide dans le choix des agents corrosifs les plus adaptés à notre objectif de moulage anatomique par corrosion des poumons.

2.1.1 Tests avec différents agents corrosifs

Nous avons effectué des tests avec plusieurs agents corrosifs pour déterminer ceux qui étaient les plus efficaces pour provoquer la corrosion des poumons. Ces agents comprenaient des enzymes, de la soude, de la soude couplée à de l'alcool et de la potasse couplée à de l'alcool.

a) Les enzymes

Nous avons choisi d'explorer l'utilisation des enzymes comme agents corrosifs pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les enzymes sont des catalyseurs biologiques qui agissent de manière sélective sur les substrats spécifiques, ce qui en fait des candidats potentiels pour réaliser la digestion des tissus pulmonaires tout en préservant la résine du moulage. Leur capacité à cibler des liaisons spécifiques dans les protéines et les tissus organiques peut permettre une corrosion efficace et précise des poumons. Pour la mise en application de notre protocole nous avons décidé d'utiliser des pastilles pour lave-vaisselles riches en protéases et en amylases.

Pour avoir plus d'informations, nous nous sommes tournés vers des professionnels de la question, tout particulièrement **Thomas Bessonnet** du **laboratoire Capacités SAS**.

Les enzymes ont chacune un pH optimal d'activité, et il est crucial de maintenir ce pH pour assurer leur efficacité. Comme mentionné par Thomas Bessonnet, il est important de tamponner le milieu pour maximiser la vitesse de corrosion, car les enzymes peuvent être sensibles aux variations de pH, qui pourraient les dénaturer. En ajustant le pH du milieu à la valeur optimale d'activité de l'enzyme utilisée, nous pouvons garantir des conditions idéales

pour la corrosion tout en préservant l'intégrité enzymatique. C'est pour cela que nous avons voulu mesurer le pH de nos bains, afin de déterminer s'il était utile de les changer pour garder une activité optimale des enzymes.

Cependant, il convient de noter que la variabilité liée aux enzymes selon les marques peut influencer les performances de corrosion. Les enzymes provenant d'organismes différents peuvent avoir des pH et des températures optimaux d'activité différents. De plus, des modifications réalisées sur les enzymes, telles que des encapsulations ou des enrobages, peuvent également influencer leur activité et leur résistance aux conditions environnementales.

b) La soude et la soude couplée à l'éthanol

Nous avons également choisi d'explorer l'utilisation de la soude (hydroxyde de sodium) comme agent corrosif, ainsi que sa combinaison avec de l'éthanol, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la soude est un agent corrosif puissant capable de dégrader efficacement les tissus organiques. Son action alcaline peut dissoudre les protéines et les graisses, ce qui en fait une option attrayante pour la corrosion des poumons. De plus, la soude est couramment disponible et peu coûteuse ce qui fait d'elle une option pratique pour les expériences de laboratoire.

En ajoutant de l'éthanol à la solution de soude, nous avons cherché à maximiser l'efficacité de la corrosion. L'éthanol peut agir comme un solvant pour faciliter la dissolution des tissus pulmonaires et accélérer le processus de corrosion. De plus, la combinaison de la soude et de l'éthanol peut également améliorer la pénétration de la solution dans les tissus, ce qui peut permettre une corrosion plus complète et uniforme des poumons.

c) La potasse couplée à l'éthanol

Nous avons également décidé d'explorer l'utilisation de la potasse (hydroxyde de potassium) comme agent corrosif, combinée à de l'éthanol, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la potasse est un agent corrosif similaire à la soude, mais avec une action potentiellement plus agressive. Comme la soude, la potasse est capable de dégrader efficacement les tissus organiques, ce qui en fait une option intéressante pour la corrosion des poumons.

En ajoutant de l'éthanol à la solution de potasse, nous avons cherché à améliorer encore l'efficacité de la corrosion : l'éthanol peut agir comme un solvant pour faciliter la dissolution des tissus pulmonaires et accélérer le processus de corrosion. De plus, la combinaison de la potasse et de l'alcool peut potentiellement augmenter la vitesse de corrosion en favorisant la pénétration de la solution dans les tissus.

En testant la potasse couplée à l'éthanol, nous avons cherché à comparer son efficacité à celle de la soude et de la soude couplée à l'alcool pour la corrosion des poumons. Nous espérons déterminer si la potasse associée à de l'éthanol offrirait des résultats de corrosion similaires ou meilleurs que ceux obtenus avec la soude ou les enzymes. En évaluant ces différentes approches, nous avons pu explorer les avantages et les limitations de chaque méthode et identifier les meilleures pratiques pour la réalisation de moulages anatomiques des poumons.

2.1.2 Tests sur des échantillons de poumons

Nous avons réalisé nos expériences de corrosion sur de petits échantillons de poumons pour évaluer l'efficacité de chaque méthode. Ces échantillons nous ont permis de déterminer quelle méthode de corrosion fonctionnait le mieux pour éliminer les tissus pulmonaires.

Pour déterminer l'efficacité de nos méthodes nous avons réalisé des pesées et nous avons obtenu les résultats suivants.

Tableaux des résultats des tests des agents corrosifs sur morceaux de poumons de masse proche:

Avant la mise en bain (21/12/24 à 13h30):

	Potasse + ethanol	Soude + ethanol	Soude	Enzymes (30°C)
Echantillon 1	6.45g	9.33g	5.06g	8.72g
Echantillon 2	9.75g	6.68g	6.23g	9.06g
Echantillon 3	8.65g	6.65g	6.44g	7.45g
Echantillon 4	10.65g	10.46g	10.64g	10.42g



Découpage des échantillons de poumons

Au bout d'une journée (22/12/24 à 13h30)

	Potasse (à 30%) + éthanol	Soude + éthanol	Soude	Enzymes (30°C)
Echantillon 1	résidu non pesable	8.45g	5.53g	10.47g
Echantillon 2	1,08g	6.04g	6.33g	10.03g

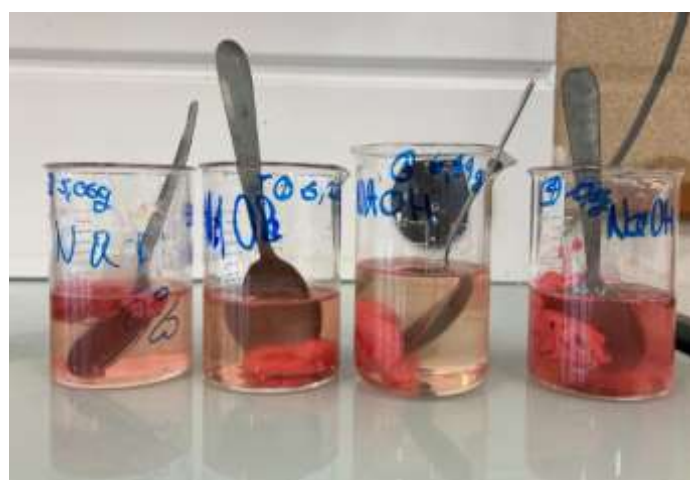
Echantillon 3	résidu non pesable	5.75g	6.58g	8.25g
Echantillon 4	1,54g	9.76g	11.04g	11.49g



Résultat des échantillons dans la potasse couplée à l'éthanol au bout de 24 heures



Résultat des échantillons dans la soude couplée à l'éthanol au bout de 24 heures



Résultat des échantillons dans la soude au bout de 24 heures



Résultat des échantillons dans les enzymes au bout de 24 heures

Lors de notre expérience nous avons pu observer que la potasse couplée à l'éthanol se révèle très efficace et d'action rapide, ce qui nous a amené à nous interroger sur le choix de la résine adaptée à des agents corrosifs très puissants. En parallèle, nous avons observé une baisse de la masse des échantillons testés avec la soude couplée à l'alcool, mais en proportion nettement moins importante. De plus, nous avons observé un tout autre phénomène: l'augmentation de la masse des échantillons dans la soude et dans les enzymes. Cela peut l'expliquer par le fait que les échantillons se soient imbibés de la solution corrosive. Face à ces résultats nous avons décidé de poursuivre les tests avec la potasse couplée à l'éthanol ainsi qu'avec les enzymes. En effet, nous conservons cette option car, lors de corrosions déjà réalisées en 2022, on a pu observer, malgré tout, de bons résultats.

2.1.3 Comparaison avec des méthodes antérieures

Bien que nos résultats sur les échantillons récents n'aient pas été aussi concluants qu'espéré, nous avons pris en compte l'efficacité observée lors de nos expériences antérieures (voir photos ci-dessous). C'est pourquoi nous avons choisi de conserver l'option des enzymes, en dépit de résultats mitigés sur les échantillons actuels.

En effet, les enzymes offrent plusieurs avantages, notamment leur accessibilité et de moindres risques associés à leur manipulation par rapport à des agents corrosifs plus agressifs comme la soude ou la potasse. Leur action spécifique sur les tissus organiques et leur capacité à opérer à des pH et des températures spécifiques en font une option attrayante pour la corrosion des poumons.

Corrosions antérieures



2.2 Choix de la résine

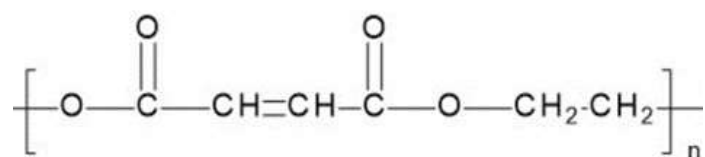
Dans notre étude visant à réaliser des moulages anatomiques des poumons par corrosion, le choix de la résine est une étape cruciale pour garantir la qualité et la durabilité des modèles obtenus. Nous avons examiné deux types de résines couramment utilisées dans le domaine de la fabrication de moulages : les résines polyester et les résines époxy. Chacune de ces résines présente des caractéristiques distinctes en termes de processus de polymérisation, de propriétés physiques et de résistance chimique, ce qui nécessite une analyse approfondie pour déterminer la plus adaptée à notre projet. Nous nous sommes également référencé au site de l'inrs pour les fiches des données de sécurité sur les polymérisation

(https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES_polymere_53 et https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES_polymere_48)

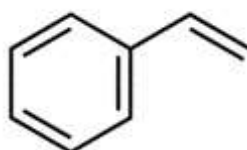
Polymérisation des résines polyester (ou des gelcoats)

Les résines polyester sont des pré-polymères résultant de la polycondensation d'un diacide insaturé ou de son anhydride sur un diol. Ce polyester insaturé est ensuite mis en solution dans un monomère, généralement le styrène, qui sert à la fois de diluant et de réticulant (à hauteur de 20 à 40 %).

Prépolymère de polyester

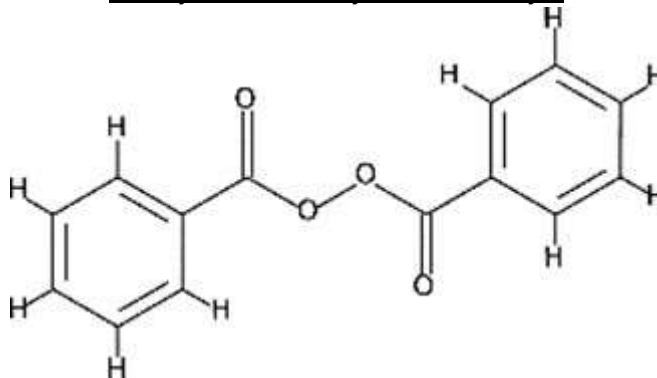


Styrène



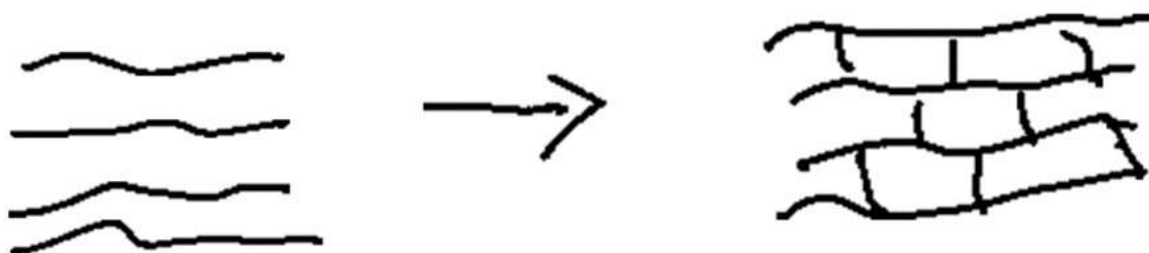
Le mélange prépolymère-styrène devient visqueux. L'ajout du catalyseur peroxyde de benzoyle (à hauteur de 2 %) déclenche une réaction de polyaddition entre les chaînes de prépolymère et le styrène. La réticulation qui en résulte provoque le durcissement en quelques minutes, selon la température.

Catalyseur : Peroxyde de benzoyle



Des liaisons se forment entre les chaînes de prépolymère polyester. Le styrène, avec sa double liaison, peut participer à la réaction de polyaddition, contribuant ainsi au durcissement.

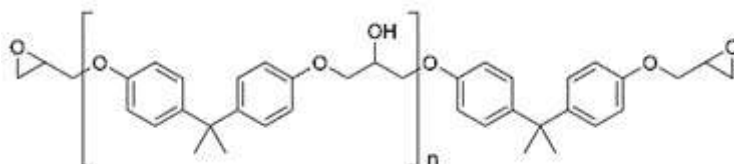
Schéma du principe de la réaction de réticulation



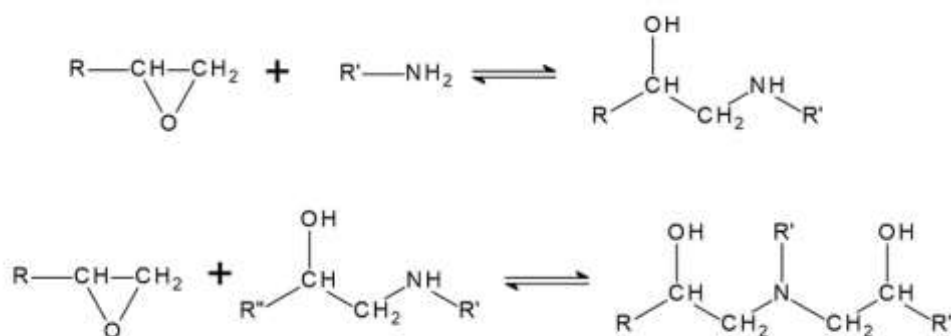
Polymérisation de la résine époxy

La résine époxy est une résine bicomposante qui nécessite une réaction entre deux composants principaux : le prépolymère et le durcisseur.

- Le prépolymère contient des groupements époxyde. Il se présente souvent sous la forme d'un liquide visqueux ou d'un solide à basse température.



- Le durcisseur est responsable de la réticulation du polymère. Il contient des groupements amine (-NH₂) ou hydroxyle (-OH). Lorsqu'il est mélangé avec le prépolymère, une réaction chimique se produit entre les groupements époxydes du prépolymère et les groupements amine ou hydroxyle du durcisseur. Cette réaction de réticulation forme un réseau tridimensionnel de liaisons chimiques qui conduit au durcissement complet du matériau.



La polymérisation de la résine époxy est un processus exothermique, c'est-à-dire que la réaction dégage de la chaleur. Selon la formulation spécifique de la résine époxy et les conditions environnementales, le temps de durcissement peut durer de quelques minutes à plusieurs heures.

Polyester ou Epoxy ?

Les deux types de polymères sont adaptés à la réalisation de moulages et présentent chacun leurs propres avantages.

Le gelcoat, composé de polyester chargé de pigment blanc et de paraffine, est spécialement conçu pour être utilisé comme couche de finition dans les moulages. Cette couche de gelcoat confère au moulage une surface lisse et esthétique tout en le rendant étanche et résistant aux UV.

	Polyester	Epoxy
Couleur	Incolore ou blanc (gelcoat)	Incolore

Possibilité d'ajouter des pigments (4%)	Oui	Oui
Possibilité d'ajouter de la paraffine (4%)	Oui	Oui
Possibilité d'ajouter de la fibre de verre coupée	Oui	Oui
Hydrolyse	Visible dans la soude et la potasse concentrée. Limitée en présence de paraffine. (gelcoat nautique paraffiné).	Peu sensible dans la soude et la potasse concentrée. Non visible en présence de paraffine.
Sensibilité aux UV	Faible	Forte (jaunissement)
Résistance mécanique	Forte, augmentée par une charge en fibres coupées.	Très forte, augmentée par une charge en fibres coupées.
Prix pour 1 kilo	20 euros	50 euros

2.3 Automatisation des prises de mesures pour optimiser le protocole expérimental

Dans le cadre de notre projet de moulage anatomique par corrosion des poumons, nous avons cherché à optimiser notre protocole expérimental en automatisant les prises de mesures. L'automatisation nous permet non seulement de gagner du temps, mais aussi d'assurer une précision et une fiabilité accrues des données obtenues. Pour cela, nous avons développé un système intégrant un capteur de masse, une carte Arduino et un mécanisme de montée et descente des poumons pour les peser.

L'objectif de cette automatisation est de surveiller en temps réel plusieurs paramètres essentiels, tels que la masse des poumons, le pH et la température des solutions de corrosion. En mesurant ces variables de manière continue, nous pouvons mieux contrôler les conditions expérimentales et ajuster notre protocole en conséquence pour obtenir des résultats plus précis et reproductibles.

Bien que le système complet ne soit pas encore entièrement opérationnel pour nos dernières expérimentations, nous avons réalisé des progrès significatifs dans son développement. Nous disposons actuellement du câblage nécessaire ainsi que du code pour la carte Arduino (à parfaire), ce qui constitue une étape importante vers la finalisation de notre système automatisé de prises de mesures.

Branchements et code Arduino

Branchement capteur de masse:

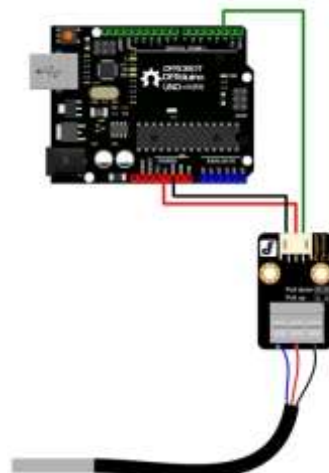
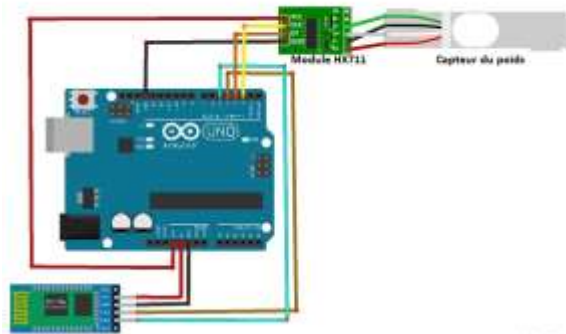
Branchement capteur de température:

Montage

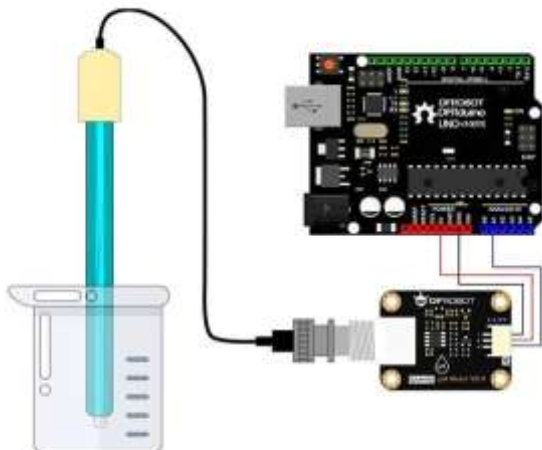
- On connecte la broche VCC au module HT11 et la broche GND au module HT11
- On connecte la broche DOUT du module HT11 à la broche DOUT du module
- On connecte la broche DT du module HT11 à la broche DT du module
- On connecte la broche TRIG du module HT11 à la broche TRIG du module
- On connecte la broche E+ du module HT11 au module HT11 et la broche E- du module HT11 au module HT11
- On connecte la broche A- du module HT11 au module HT11 et la broche A+ du module HT11 au module HT11
- On connecte la broche B- du module HT11 au module HT11 et la broche B+ du module HT11 au module HT11
- On connecte la broche C- du module HT11 au module HT11 et la broche C+ du module HT11 au module HT11

Pour le module HC-05 on connecte :

- la broche VCC à la broche 5V du module HT11
- la broche GND à la broche GND du module HT11
- la broche TX à la broche TX du module HT11
- la broche RX à la broche RX du module HT11



Branchement de la sonde pH



Code Arduino:

```

#include "HX711.h"
#include <OneWire.h>

#define LOADCELL_OUT_PIN 3
#define LOADCELL_SCK_PIN 4
#define DS18B20_Pin 1 //DS18B20 Signal pin on digital 2
#define AB_PIN A0

//Temperature chip i/o
OneWire ds(DS18B20_Pin); // on digital pin 2

HX711 scale;
float calibration_factor = 235; //~7000 cette variable à régler selon le capteur de poids

void setup() { Serial.begin(9600);
  scale.begin(LOADCELL_OUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
  scale.set_scale();
  scale.tare();
}

void loop() {
  scale.set_scale(calibration_factor); //Ajouter au facteur de calibration
  long poids = scale.get_units();
  float temperature = getTemp();
  float pH = getpH();

  String strTemperature = String(temperature, 3);
  String strpoids = String(poids, 3);
  String strpH = String(pH, 3);

  String out = String(strTemperature+" "+strpoids+" "+strpH);
  Serial.println(out);
}

float getpH() {
  float hr;

```

```

int buf[8], temp;
for(int i=0;i<8;i++)
{
  buf[i]=analogRead(A0);
  delay(10);
}
for(int i=0;i<8;i++)
{
  for(int j=i+1;j<8;j++)
  {
    if(buf[i]>buf[j])
    {
      temp=buf[i];
      buf[i]=buf[j];
      buf[j]=temp;
    }
  }
}
unsigned long int avgValue = 0;
for(int i=0;i<7;i++) // Moyenne des 4 valeurs de milieu
  avgValue+=buf[i];
float pHValue=(float)avgValue*5.0/1024/4; //conversion depuis analogique en mV
pHValue=3.0*pHValue; //conversion depuis mV en pH
return pHValue;

float getTemp() {
  //returns the temperature from one DS18B20 in DEG Celsius

  byte data[12];
  byte addr[8];

  if ( !ds.search(addr) ) {
    //no more sensors on chain, reset search
    ds.reset_search();
    return -1000;
  }

```

```

if ( OneWire::is1w1c(addr, 0) != addr[0] ) {
  Serial.println("CRC is not valid!");
  return -1000;
}

if ( addr[0] != 0x10 || addr[1] != 0x28 ) {
  Serial.println("Device is not recognized");
  return -1000;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44, 1); // start conversion, with parasite power on at the end

byte present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x48); // Read scratchpad

for (int i = 0; i < 9; i++) { // we need 9 bytes
  data[i] = ds.read();
}

ds.reset_search();

byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

float tempRaw = (MSB << 8) | LSB; //using the 2's complement
float TemperatureSum = tempRaw / 16;

return TemperatureSum;

```

Dans les prochaines étapes de notre projet, nous prévoyons d'achever le montage du système et de le mettre en œuvre lors de nos expérimentations ultérieures. Cette automatisation nous permettra de collecter des données précieuses pour évaluer l'efficacité de différentes techniques de corrosion et optimiser notre méthode de moulage anatomique des poumons.

3. Corrosion de poumons

3.1 Préparation des bains

Nous avons mis en place deux types de bains : un bain à base de potasse et un autre contenant un mélange d'enzymes.

Bain de potasse couplée à l'éthanol :

Pour préparer le bain de potasse, nous avons réalisé une solution de potasse à 30%. Plus précisément, nous avons ajouté 751 grammes de potasse à 2 litres d'eau. A cette solution, nous avons ajouté 100 mL d'éthanol.

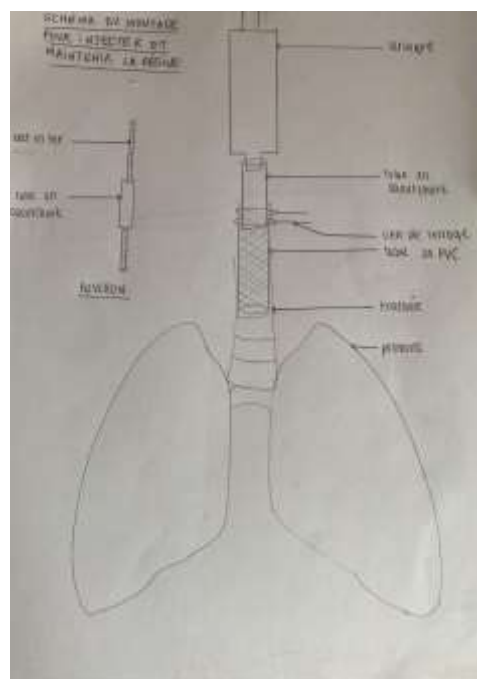
Bain d'enzymes:

Concernant le bain d'enzymes, nous avons utilisé 18 pastilles d'enzymes pour une solution de 24 litres d'eau. Ces pastilles ont été dissoutes dans de l'eau préalablement chauffée à 60°C, conformément aux recommandations fournies par le site du fabricant des pastilles. Cette température permet d'optimiser l'activité enzymatique, favorisant ainsi le processus de corrosion ciblée des tissus organiques.

3.2 Préparation des poumons

Nous avons utilisé un tuyau en PVC que nous avons inséré dans la trachée des poumons. Ce tuyau sert de conduit principal pour l'injection de la résine. À l'extrémité de ce tuyau, nous avons fixé un tube en caoutchouc qui relie le tuyau PVC à une seringue. Cela nous permet d'injecter la résine de manière contrôlée et précise. Pour empêcher la résine de s'écouler après son injection, nous avons ajouté un bouchon à l'extrémité du tuyau en PVC. Ce bouchon est équipé d'un petit bout de tuyau en caoutchouc plus fin, assurant ainsi un ajustement étanche et sécurisé à l'intérieur des poumons.

Enfin, pour garantir la stabilité et la forme des poumons pendant le durcissement de la résine, nous y avons inséré une barre de fer. Elle agit comme un support interne, maintenant les poumons dans la position désirée jusqu'à ce que la résine soit complètement durcie. De plus, nous avons ajouté des liens de serrage pour assurer la stabilité et l'immobilité du système.



3.3 Préparation de la résine et injection

Nous avons mélangé 267 grammes de résine époxy avec 160 grammes de durcisseur. Cette proportion est cruciale pour assurer la polymérisation correcte de la résine et garantir la solidité du moulage final.

Pour renforcer la résine et lui conférer une résistance mécanique accrue, nous avons ajouté de la fibre de verre coupée. Cette fibre de verre, découpée en petits morceaux, est incorporée au mélange de résine époxy et de durcisseur avant l'injection dans les poumons. Nous avons également inclus une petite quantité de paraffine, ne dépassant pas 10 % du mélange total. La paraffine contribue à améliorer l'imperméabilité de la résine, la rendant ainsi plus résistante à l'eau et aux agents corrosifs. Pour un aspect esthétique nous avons également choisi d'ajouter une coloration en poudre en veillant bien à ce qu'elle ne dépasse pas les 4% de la solution.

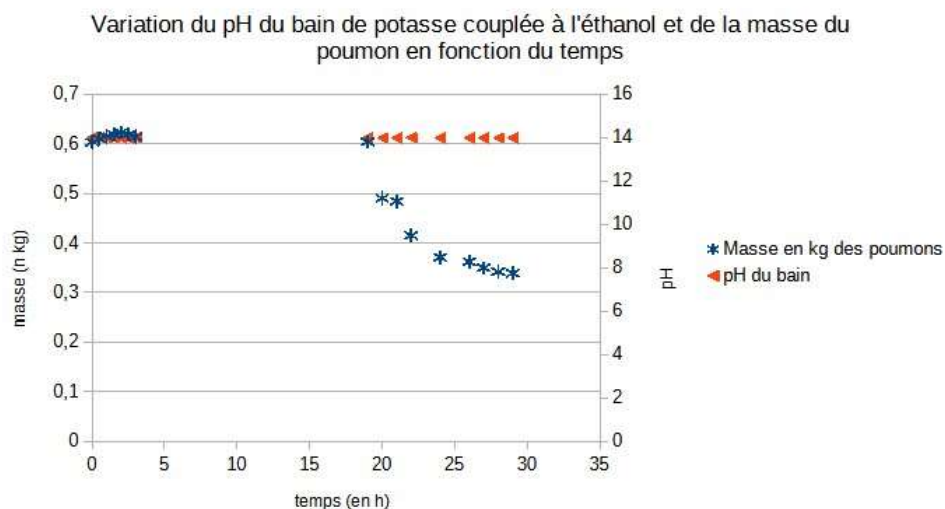
L'injection de la résine dans les poumons constitue une étape délicate et cruciale de notre processus de moulage anatomique. Nous avons adopté une approche minutieuse et contrôlée pour garantir que la résine remplisse adéquatement les poumons tout en évitant d'endommager les tissus fragiles.

Pour chaque poumon, nous avons utilisé l'équivalent de deux seringues et demie de 60 ml de résine, soit un total de 150 ml de résine pour chaque poumon. Nous avons pris des précautions lors de l'injection de la résine dans les poumons, en tenant compte des conseils de **Thierry Boisgard du Musée d'histoire naturelle** de Nantes. M. Boisgard nous a recommandé d'adopter une approche minutieuse et délicate pour éviter d'endommager les tissus pulmonaires fragiles et pour garantir un remplissage optimal des bronchioles. Nous avons ainsi veillé à contrôler étroitement la pression d'injection de la résine, en évitant toute surpression qui aurait pu compromettre l'intégrité des tissus. De plus, nous avons été attentifs à la répartition uniforme de la résine dans les bronchioles, en ajustant soigneusement la technique d'injection pour atteindre toutes les parties du réseau bronchique.

3.4 Corrosion et prise de mesures

Une fois les poumons préparés et la résine injectée et durcie, nous avons initié le processus de corrosion ciblée pour éliminer les tissus organiques et révéler la structure interne des poumons. Nous avons exposé les poumons aux solutions corrosives préalablement préparées, en veillant à contrôler attentivement les conditions environnementales pour optimiser le processus de corrosion. En effet le bain d'enzymes était maintenu à une température de 60°C pour optimiser le fonctionnement de celles-ci.

Pendant la durée de la corrosion, nous avons effectué des prises de mesures régulières pour surveiller l'avancement du processus. Au début de notre expérience, nous avons observé une augmentation de la masse des deux poumons, ce phénomène étant dû à l'absorption du bain corrosif dans lequel ils trempaient. Cependant, un changement significatif s'est produit lorsque nous avons décidé de rincer le poumon immergé dans la potasse sous un léger jet d'eau à chaque prise de mesure (à partir du lendemain de la mise en bain à 9h). Cette action a entraîné une nette diminution de la masse du poumon traité à la potasse, en comparaison avec celui traité à l'enzyme.

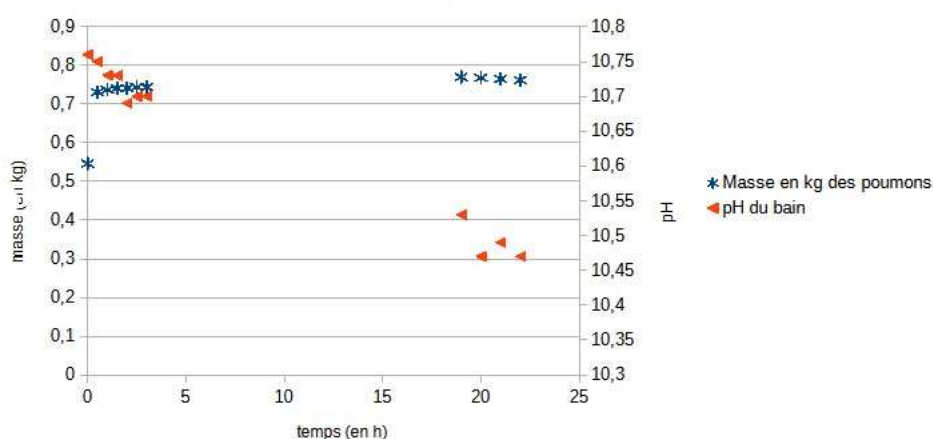


Résultat actuel des poumons immergés dans la potasse couplée à l'éthanol



Dans le cas du poumon immergé dans les enzymes, nous avons constaté une augmentation régulière de sa masse au fil du temps, indiquant une absorption continue du bain corrosif. Contrairement au poumon immergé dans la potasse, le pH de la solution corrosive a diminué légèrement, mais l'aspect du poumon n'a pas montré de signes de changement significatif. De plus, malgré le rinçage effectué à chaque mesure, aucun effet notable n'a été observé sur la masse du poumon traité aux enzymes. Étant donné que les enzymes utilisées étaient basiques, nous avons décidé de changer pour des enzymes acides (provenant d'un déboucheur formule spéciale cheveux) dans l'espoir de stimuler le processus de corrosion ainsi que la température du bain (40°C). Cependant, jusqu'à présent, ce changement n'a pas donné de résultats concluants. Nous avons pris conscience que la réaction entre les enzymes et les tissus pulmonaires est un processus complexe et parfois aléatoire, nécessitant peut-être plus de temps pour observer des effets significatifs. Il est intéressant de noter que lors de précédentes expériences en 2022, l'utilisation d'enzymes avait produit des résultats satisfaisants. Cependant, il est important de reconnaître que le processus de corrosion peut être influencé par de nombreux facteurs et peut parfois présenter une variabilité imprévisible. Ainsi, nous devons rester patients et persévérants dans notre recherche de la méthode la plus efficace pour obtenir des modèles anatomiques de haute qualité.

Variation du pH du bain d'enzymes et de la masse du poumon en fonction du temps



4. Protocole expérimental final

4.1 Matériel nécessaire

- Seringue de 60 mL (2 euros)
- 200 grammes de résine (polyester : 4 euros, époxy : 10 euros)
- Hydroxyde de potassium (30 euros pour 1 kg) ou soude (5 euros pour 1 kg)
- Pastilles de lave-vaisselle (10 euros)
- Déboucheur formule spéciale cheveux (5 euros pour 2L)
- Fournitures diverses (gants, sacs plastique, bouts de tuyau rigide et souple, vis inox) : coût variable - Éthanol (1 euro)
- Glacière de récupération (3 euros) pour le bain marie isolé thermiquement
- Thermoplongeur programmable pour la cuisson au bain marie sous-vide (50 euros)

4.2 Étapes du protocole

1) Préparation des poumons :

- Nettoyez les poumons et retirez les tissus environnants (coeur...)
- Insérez délicatement un tuyau rigide dans la trachée
- Utilisez un tuyau souple pour étanchéifier l'injection de la résine
- Fixez une vis inox dans un tube en caoutchouc plus étroit (qui sert de bouchon) pour faciliter la manipulation du moulage

2) Préparation de la résine :

- Choisissez entre résine polyester ou époxy en fonction de vos besoins
- Préparez la résine conformément aux instructions du fabricant

3) Injection de la résine :

- Utilisez une seringue de 60 mL pour injecter la résine dans les poumons
- Assurez-vous d'enlever le pas de vis pour faciliter l'injection

4) Préparation des bains corrosifs :

a) bain aux enzymes :

- Dissolvez les pastilles de lave-vaisselle dans de l'eau tiède pour former une solution corrosive
- Contrôlez la température à l'aide du thermomètre pour maintenir une température optimale (selon les recommandations du fabricant des enzymes)

b) bain à la potasse et à l'éthanol :

- Préparez une solution en mélangeant de la potasse à 30% avec de l'éthanol dans un récipient approprié:
- Le protocole de dilution de la solution de potasse : on place 700 g de potasse dans une fiole jaugée de 2 L, on ajoute 100 mL d'éthanol et on complète au trait de jauge avec de l'eau distillée.

Remarque : L'usage de l'hydroxyde de sodium solide est interdit aux mineurs, celui de l'hydrogène de potassium est aussi à déconseiller. La manipulation doit se faire sous la hotte pour éviter de respirer les poussières corrosives.

5) corrosion des poumons :

- Plongez les poumons dans les bains corrosifs respectifs
- Utilisez une glacière de récupération comme bain-marie pour maintenir la température constante pour les enzymes
 - Programmez le thermoplongeur pour une cuisson au bain-marie sous vide selon les besoins pour les enzymes
- Utilisez un récipient résistant pour le bain de potasse

6) surveillance et prise de mesures :

- Surveillez régulièrement l'avancement de la corrosion.
- Effectuez des prises de mesures pour suivre la perte de masse des poumons.

7) rinçage et séchage des poumons :

- Après la corrosion, retirez les poumons du bain et rincez-les sous un filet d'eau
- Séchez soigneusement les poumons avant l'observation finale

Ce protocole permet une expérience de moulage anatomique par corrosion fiable et reproductible, offrant ainsi une approche pratique et instructive pour l'étude de l'anatomie des poumons dans les établissements du secondaire.

Conclusion

La réalisation de ce projet de moulage anatomique par corrosion a été une expérience enrichissante et instructive. Nous avons pu explorer différentes techniques et méthodes pour produire des modèles anatomiques de poumons de haute qualité. Grâce à nos expérimentations avec les bains corrosifs à base d'enzymes et de potasse couplée à l'éthanol, nous avons obtenu des résultats prometteurs.

Notre étude a démontré que la potasse, bien que plus compliquée à manipuler en raison de sa corrosivité et de ses risques associés, s'est avérée efficace pour la corrosion des poumons. Elle a permis d'obtenir des modèles anatomiques détaillés et fidèles à la structure réelle des poumons. Cependant, sa manipulation requiert une attention particulière et des mesures de sécurité strictes pour éviter tout incident.

En revanche, les enzymes se sont révélées moins concluantes dans notre expérience, ne produisant pas les résultats escomptés malgré nos tentatives d'ajustement des paramètres et des conditions de corrosion. Cela souligne l'importance de choisir le bon agent corrosif en fonction des objectifs spécifiques de chaque projet et des contraintes de sécurité.

En développant des techniques accessibles et efficaces pour la création de modèles anatomiques, nous contribuons à faciliter l'apprentissage et la compréhension de l'anatomie.

Photos agrandies des moulages anatomiques des poumons par corrosion

