



Recyclage des pièces en PLA imprimées en 3D pour des applications médicales

Emna Helal¹, Gabriel Matheus Pinto¹, Seyed-Ali Delbari¹, Julien Dravigné², Stéphane Bedwani³, Nicole Demarquette¹, Lucas Hof¹

¹ Département de Génie Mécanique, École de Technologie Supérieure,

² Département de Physique, Université de Montréal

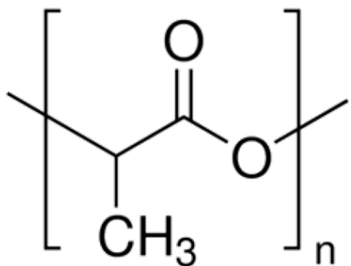
³ Département de Radio-Oncologie, Centre Hospitalier de l'Université de Montréal

PLA dans les applications médicales

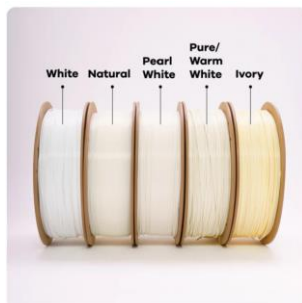
Usage des plastiques dans les applications médicales

- 15 Mt/année de plastiques à usage unique à l'échelle mondiale
- Environ 20 à 25 % des déchets hospitaliers sont en plastique

Acide polylactique (PLA): une alternative plus écologique



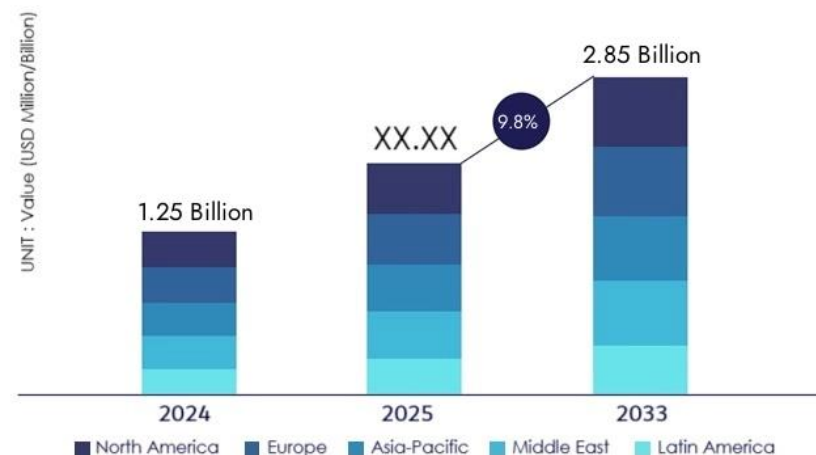
Granulés de PLA



Filaments de PLA

- **Biocompatible**
- **Biosourcé** (à partir de la fermentation d'amidon)
- **Impression 3D facile**
- **Biodégradable** (en compostage industriel à une température supérieure à 60 °C, humidité élevée...)

Global Polylactic Acid (PLA) for Medical Market Size and Scope

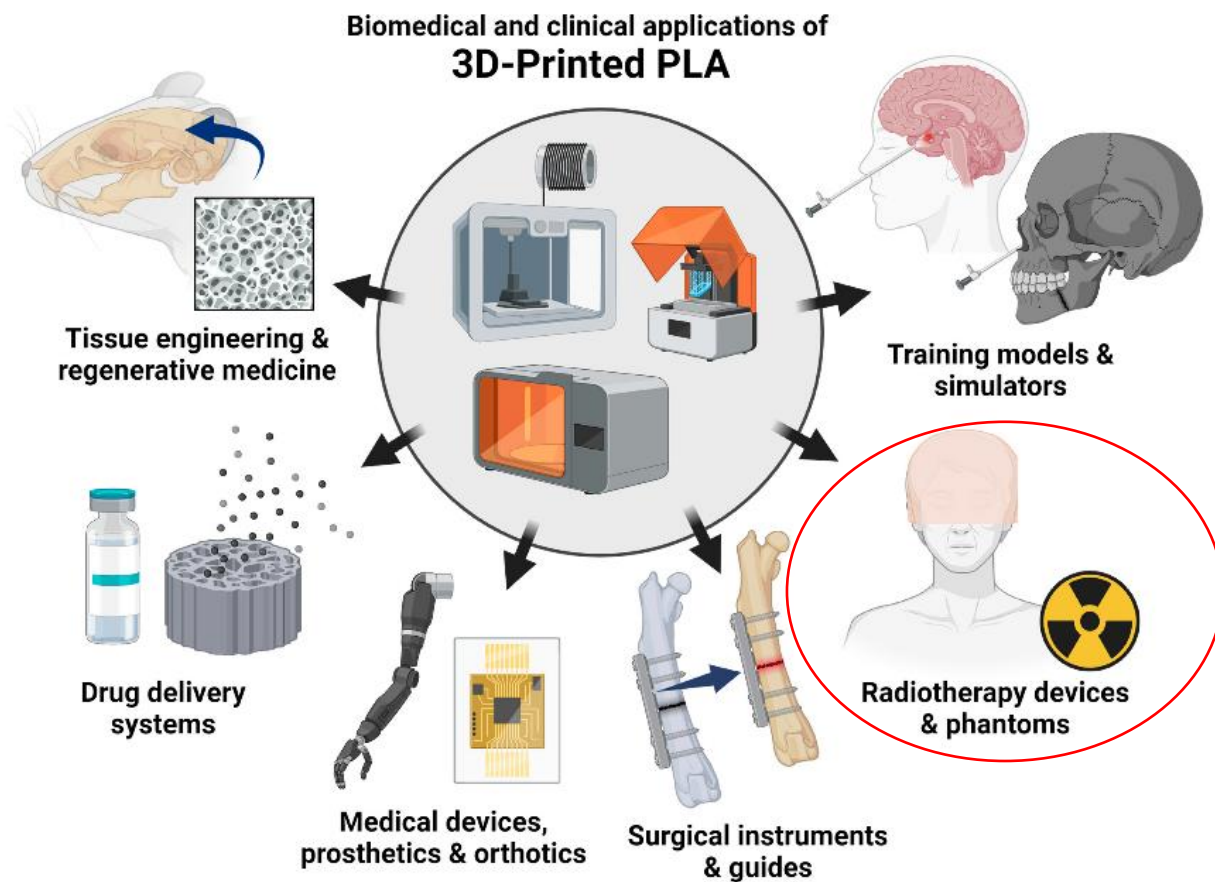


Source : www.verifiedmarketreports.com

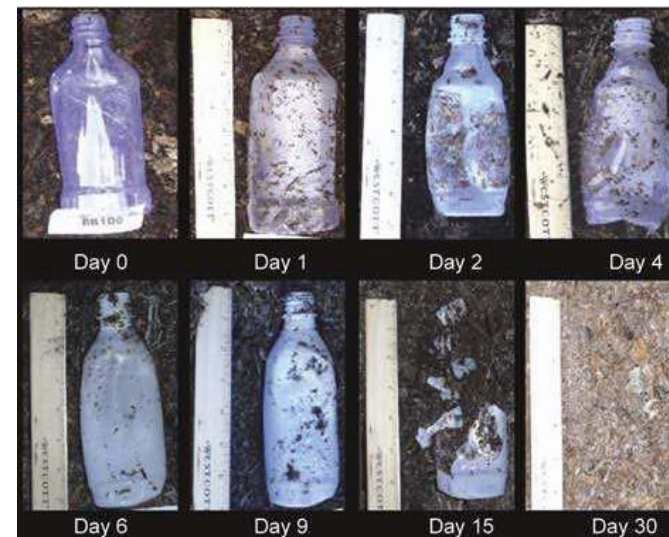
<https://www.verifiedmarketreports.com/product/polylactic-acid-pla-for-medical-market/>

Prévision de la taille du marché mondial du PLA médical

PLA dans les applications médicales



Barcena, A.J.R., *Bioengineering* 2024, 11.



Source: Hamad et al., 2015

Biodégradation du PLA en conditions de compostage industriel (quelques semaines à quelques mois)

- **Réduction des déchets à long terme**
- **Limites** : inefficace à court terme et face à la consommation élevée du PLA à usage unique

➔ **Le recyclage reste une option pertinente**

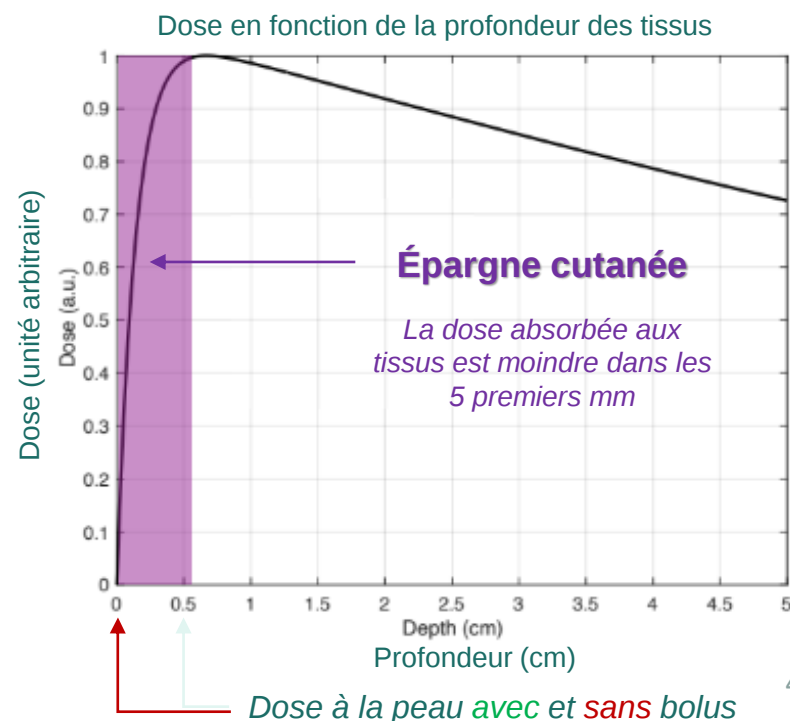
Impression 3D en radio-oncologie

Bolus personnalisé

- Un *bolus* est une pièce en plastique qui s'ajoute à la surface de la peau
- Il sert à compenser l'*effet d'épargne cutanée*
- Il est modélisé à partir des images médicales, puis imprimé 3D
- Il peut recevoir jusqu'à 60 Gy de radiation pour la totalité du traitement

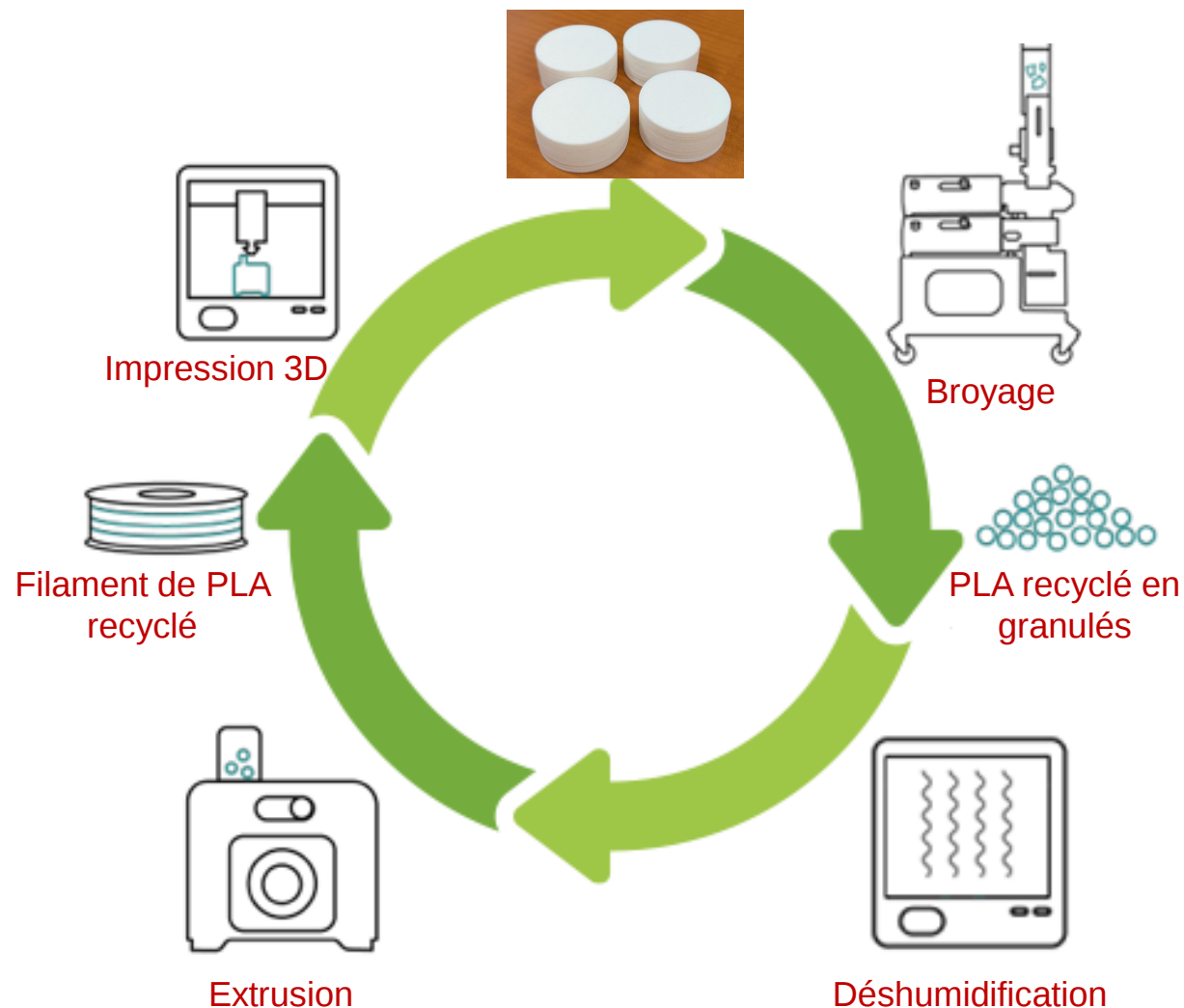


Exemple d'un bolus
déposé sur le visage



Processus du recyclage mécanique

Échantillons imprimés en acide polylactique (PLA)



Caractérisations



Source: www.mcii.uni-bayreuth.de



Source: www.filmtestingequipment.com

Évaluation de la
dégradation par
spectroscopie
infrarouge (FTIR)

Étudier les composés
chimiques présents
dans les échantillons

Évaluation de la
processabilité par
mesure d'indice de
fluidité (MFI)

Étudier les
caractéristiques
d'écoulement des
polymères fondus

Choisir le bon PLA

Sensibilité à l'humidité

- PLA 1 et PLA 2 présentent un caractère relativement hydrophile.

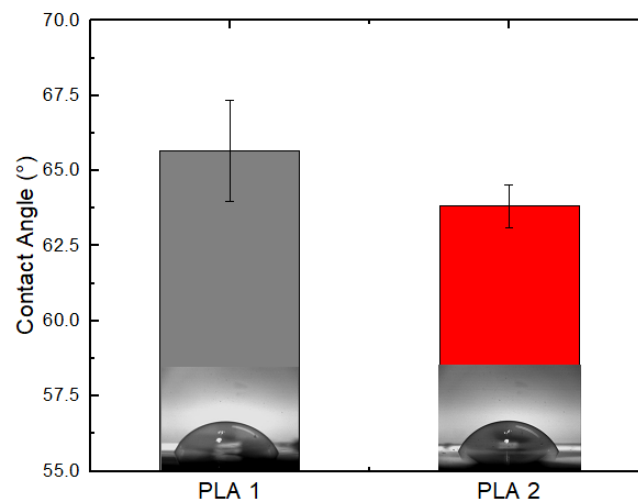
Présence d'additifs/contaminants

- Un résidu à la fin du TGA indique la **présence d'additifs** dans le PLA 1.

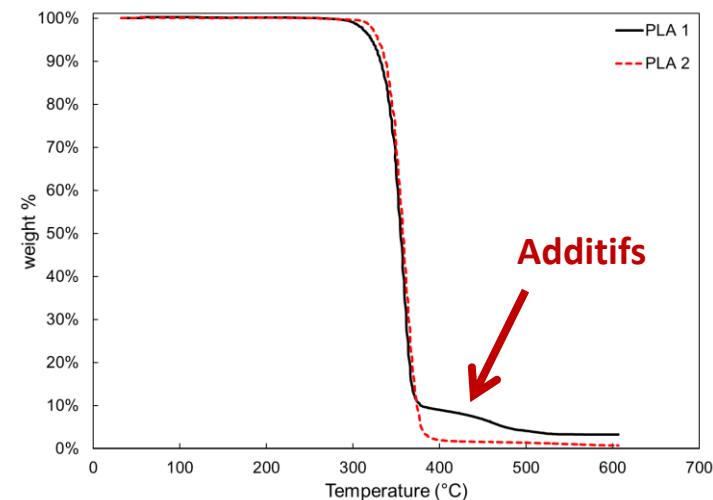
Processabilité

- Le MFI plus élevé et la viscosité plus faible du PLA 1 indiquent un poids moléculaire inférieur, ce qui complique le recyclage de ce matériau.

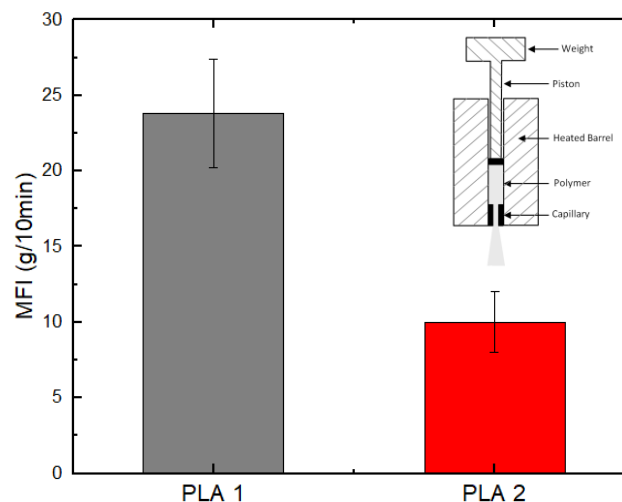
➔ PLA 2 a été retenu pour le reste de l'étude



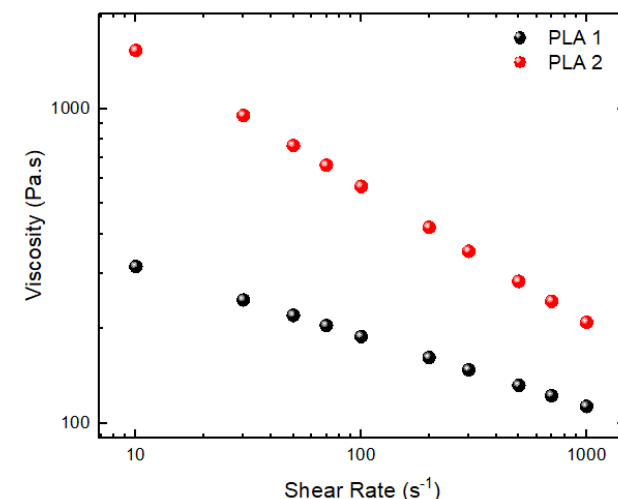
Angle de contact



Analyse thermogravimétrique (TGA)



Indice de fluidité



Rhéologie capillaire

Analyse chimique (FTIR) et MFI du PLA recyclé

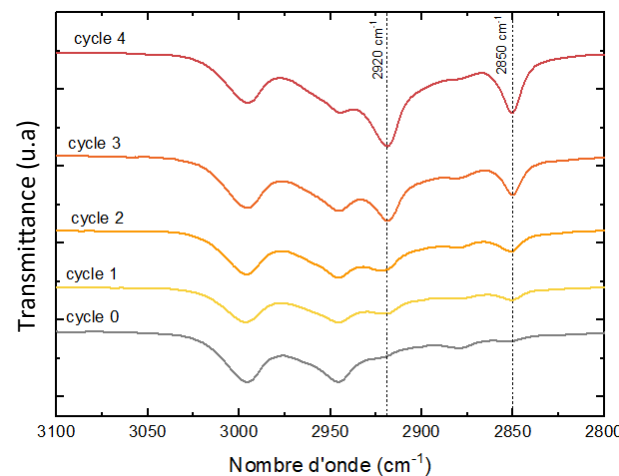
Résultats FTIR

- L'augmentation de l'intensité de pics caractéristiques indique la **dégradation progressive** au cours des cycles de recyclage.
- L'**irradiation** crée des états excités dans le matériel, ce qui **accélère la dégradation du PLA** pendant les cycles de recyclage.

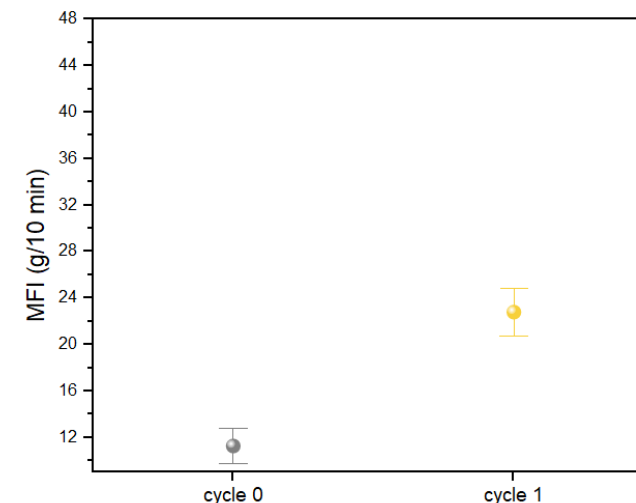
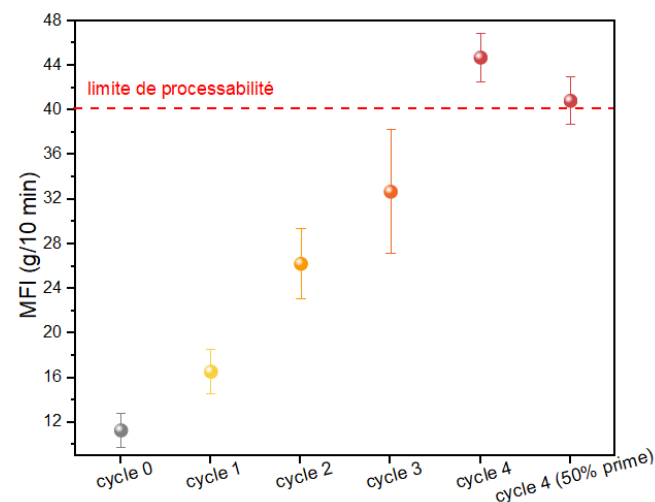
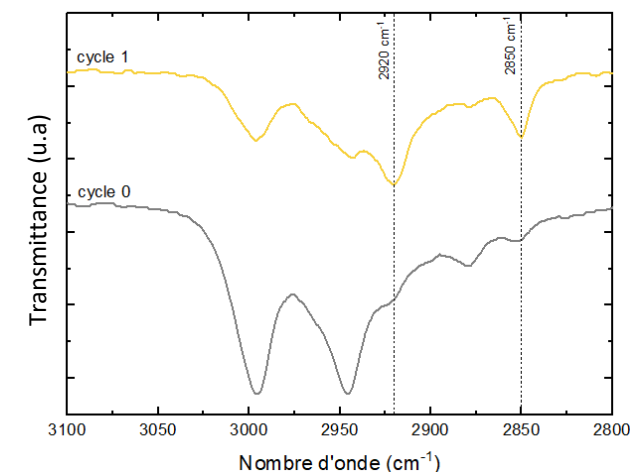
Résultats MFI

- L'augmentation de MFI est également associée à la **dégradation** et à une **processabilité plus difficile**.

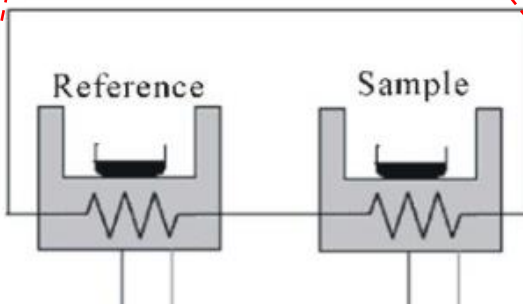
Non Irradié



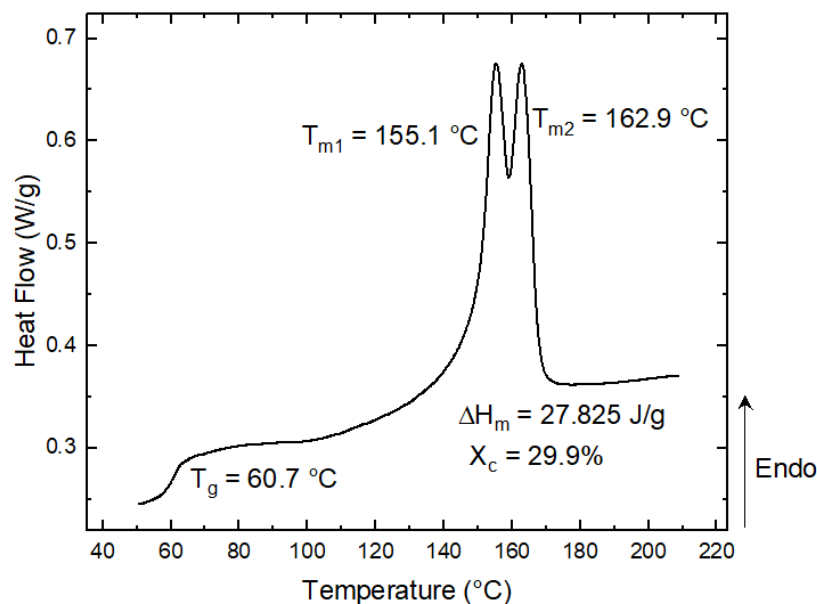
Irradié



Étude thermique du PLA recyclé non irradié



Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)



T_g – Température de transition vitreuse

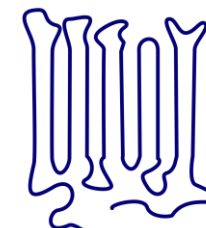
T_m – Température de fusion

ΔH_m – Enthalpie de fusion

X_c – Taux de cristallinité



Amorphous



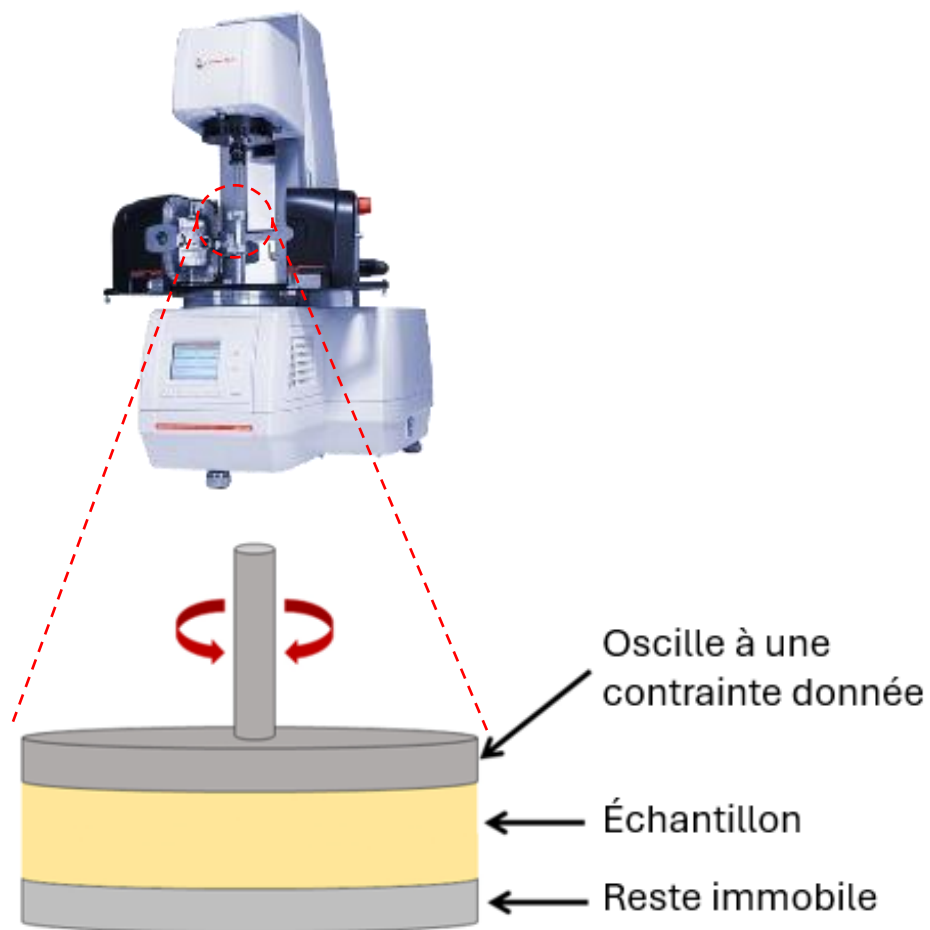
Semicrystalline

- PLA est semi-cristallin
- La fraction amorphe est plus susceptible à la dégradation.

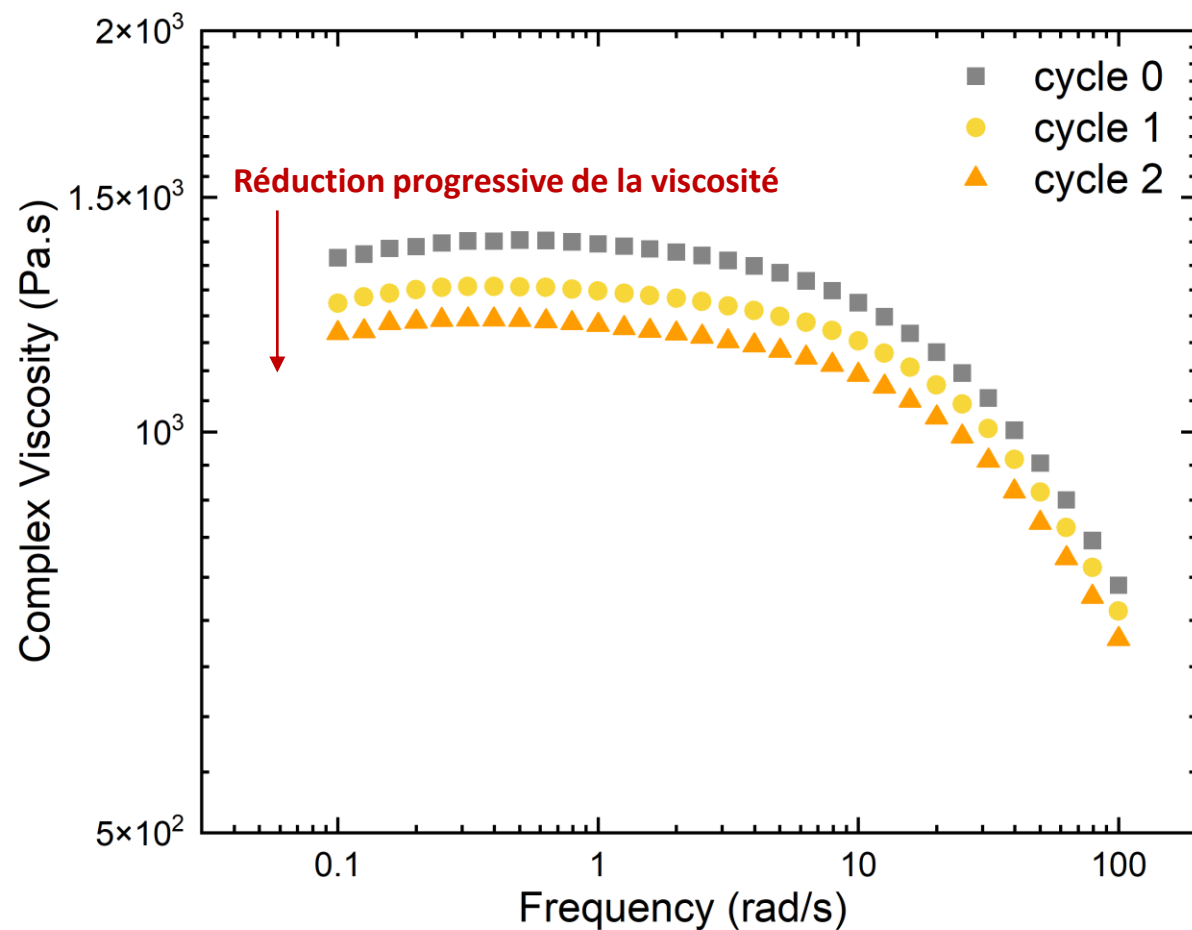
# de cycles de recyclage	Cristallinité (%)
0	30
1	33
2	33

- L'augmentation du taux de cristallinité est corrélée avec la dégradation et la réduction du poids moléculaire du PLA au cours du recyclage (réarrangement des chaînes moléculaires).

Étude rhéologique du PLA recyclé non irradié



Essais de cisaillement en oscillation à petite amplitude (SAOS)



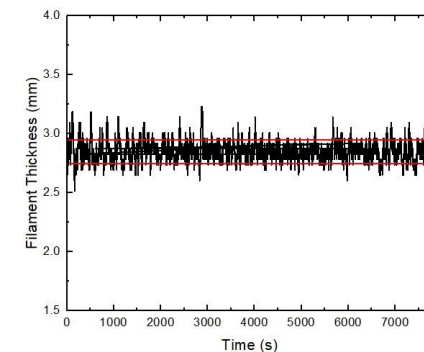
Impression 3D du PLA recyclé non irradié

Défis liés à l'impression 3D de PLA recyclé

- **Dégradation du PLA et baisse de viscosité** au recyclage → ajustements requis en extrusion et impression
- **Problèmes rencontrés :**
 - Fluctuations du diamètre du filament extrudé
 - Arrêts fréquents d'impression
 - Blocages de la buse
- **Solutions proposées :**
 - Réduction des sources de contamination lors du déchiquetage
 - Ajustement des paramètres d'extrusion (profil de température, vitesse des vis)
 - Augmentation du diamètre du filament
 - Ajustement des paramètres d'impression
 - Utilisation d'une buse de plus grand diamètre



Extrudeuse de
filaments 3devo



Contrôle du diameter
du filament extrudé



Aspect Visuel des échantillons de
PLA imprimés au cours du troisième
cycle de recyclage





Conclusions et prochaines étapes

- Le **choix du grade de PLA** (propriétés rhéologiques, additifs...) influence sa **recyclabilité**
- Le **PLA non irradié** est recyclable jusqu'à **4 fois sans ajout de PLA vierge**, avec ajustement des paramètres d'extrusion et d'impression
- Le **PLA irradié** est plus vulnérable à la dégradation au cours du recyclage
- **Dégradation du PLA**: baisse de viscosité et hausse de cristallinité, liées à la **réduction du poids moléculaire**

Travaux en cours

- Évaluation de la **recyclabilité du PLA irradié**
- Étude comparative des **mécanismes de dégradation (irradié vs non irradié)**
- Analyse des **propriétés mécaniques et radiologiques** du PLA recyclé imprimé



Réseau de recherche
en économie circulaire
du Québec

**Fonds
de recherche**
Québec



Laboratoire de
Fabrication
Intelligente &
Circulaire

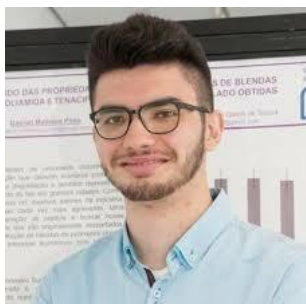
LF!C

Laboratory of
Intelligent &
Circular
Manufacturing



CRCHUM
CENTRE DE RECHERCHE
Centre hospitalier
de l'Université de Montréal

Merci pour votre attention!



Gabriel M. Pinto



Seyed Ali Delbari



Julien Dravigné



**Stéphane
Bedwani**



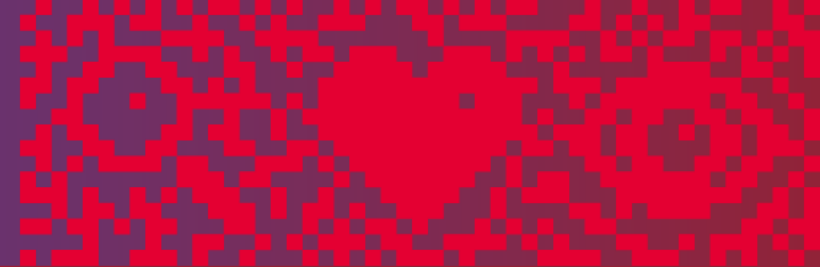
Emna Helal



Lucas Hof



**Nicole R.
Demarquette**



Grands partenaires



Partenaire des activités scientifiques

