



INSA



In Mold Electronics sur biopolymère pour un procédé de fabrication plastronique plus respectueux de l'environnement

C. GOUMENT^{1,2}, T. GERGES¹, V. GILMUS¹, M. ARLI², H. LAKHDAR², P. LOMBARD¹, B. ALLARD¹, J.Y. CHARMEAU², M. CABRERA¹

¹Univ Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère, UMR 5005, 69621 Villeurbanne, France

²Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, IMP, UMR 5223, 01100 Bellignat, France

Contacts:

caroline.goument@insa-lyon.fr

michel.cabrera@insa-lyon.fr

jean-yves.charmeau@insa-lyon.fr



Salon Mécaplastronique 30.11.2022

Travail de thèse
à l'INSA Lyon

Partenaires



Plateforme Plastronique 3D (AMPERE), Villeurbanne
Site de plasturgie (IMP), Bellignat-Oyonnax



Mise en forme et caractérisation des polymères,
étude des encres de sérigraphie sur polymère



Développement et
caractérisation d'antennes



Plastronique 3D



Financement de la region AURA

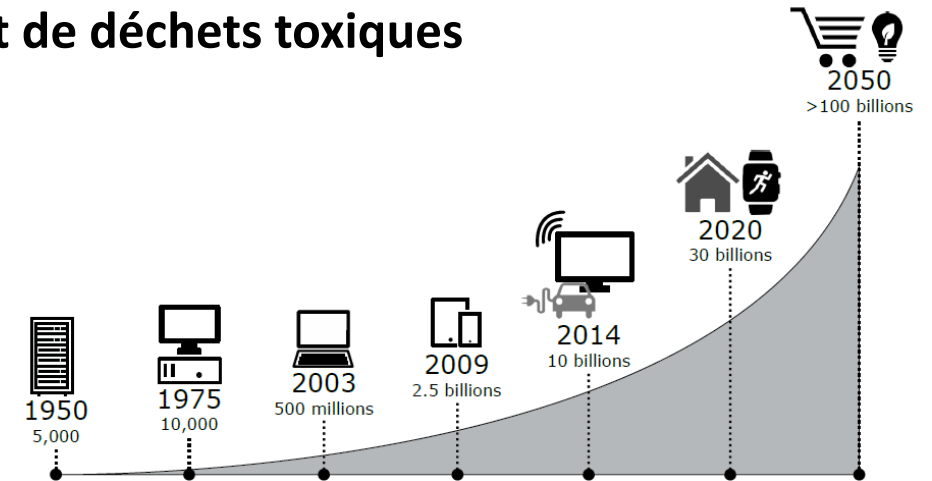
1. Contexte et objectifs du projet BIOANTENNA
2. Les matériaux polymères et la technologie IME
3. Verrous scientifiques
4. Résultats expérimentaux
 - Caractérisation des matériaux
 - Thermoformage
 - Surmoulage par injection
5. Conclusion

- Révolution de l' IoT (Internet des Objets) vers une interaction directe des objets entre eux via un réseau internet
 - 30 milliards d' IoT dans le monde en 2020¹
- **Pourquoi des antennes plastroniques IoT pour le stockage et la récupération d'énergie ?**



2019, France: 1,5 milliards de piles \approx **32 500 t de déchets toxiques**

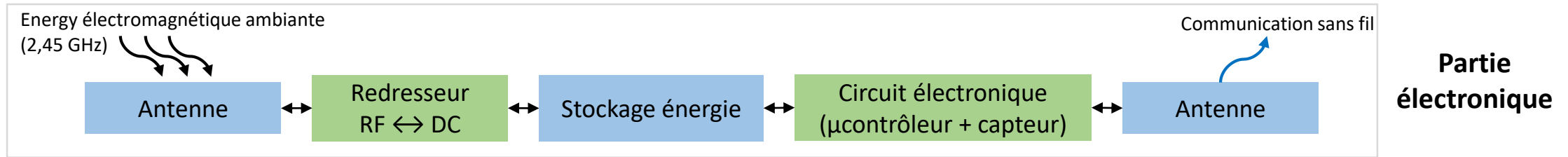
Moins de **50%** collectées
35% recyclées
30% jetées dans les ordures ménagères
 → Augmentation de la pollution environnementale



[1] Agence de la transition écologique (ADEME), *Piles et Accumulateurs – Rapport annuel 2020– Données 2019*

[2] Maurizio CAPRA et al., *Edge Computing: A Survey On the Hardware Requirements in the Internet of Things World*, Department of Electrical, Electronics and Telecommunication Engineering, Politecnico di Torino, 10129 Torino TO, Italy

- Remplacer les piles par un dispositif de stockage de l'énergie intégré à l'objet plastronique 3D

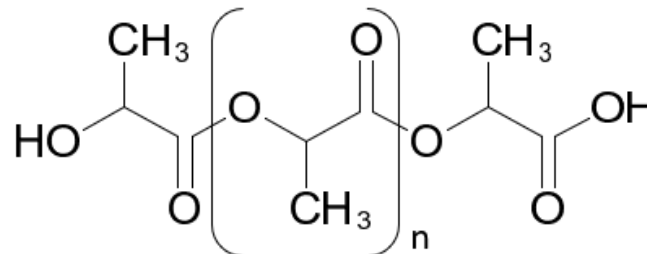


In Mold Electronics (IME) sur Acide Polylactique (PLA)

Travail de thèse ici

- Utiliser des polymères plus durables et un procédé de production de masse bas coût
 - Pourquoi le PLA ?

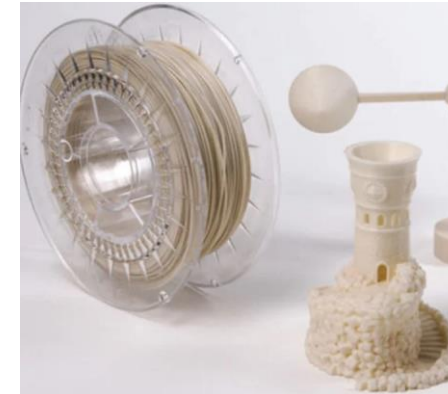
- Biosourcé (amidon de maïs) et biodégradable (compost industriel)
- Très haute rigidité
- Bonne réactivité chimique



- Deux polymères thermoplastiques :
 - **Acide Polylactique (PLA)**, alternative durable pour l'environnement
 - **PolyCarbonate (PC)**, matériau référence en IME

- PLA déjà utilisé en :
 - Extrusion
 - Impression 3D filaire
 - Moulage par injection

→ Choix intéressant pour l'IME



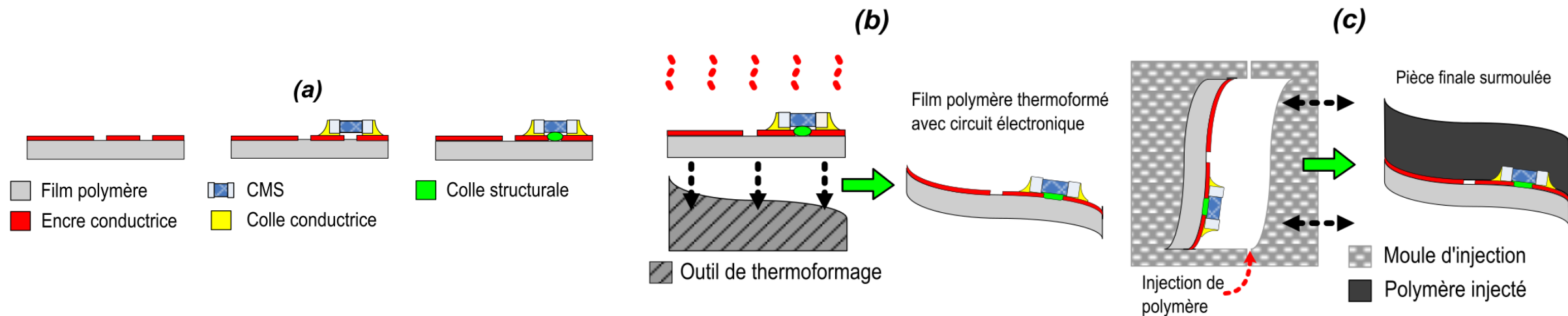
- Objectif principal: déterminer la compatibilité du PLA à chaque étape du procédé IME

Sources images : <https://www.3dnatives.com/asa-impression-3d-26082020/>
<https://french.alibaba.com/product-detail/high-quality-stretch-PLA-wrapping-film>

<https://french.alibaba.com/product-detail/100-biodegradable-compostable-plastic-pla-resin>

La technologie plastronique d'intérêt l'In Mold Electronics (IME)

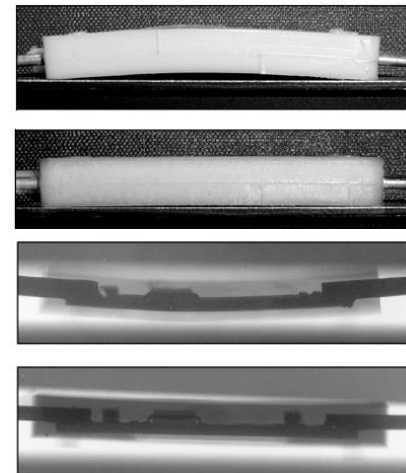
- Permet de donner une forme 3D à un dispositif pour mieux intégrer les fonctions électroniques souhaitées dans l'objet plastronique
- Etapes principales du procédé : sérigraphie, thermoformage et surmoulage par injection



- Procédé en développement avancé pour le PC amorphe
- N'a pas été étudié pour le PLA semi-cristallin

- Compatibilité des encres avec le PLA
 - ✓ Adhésion ?
 - ✓ Faible Tg du PLA → recuit après sérigraphie ?
- Adhésion « polymère/encre+CMS » en thermoformage ?
- Adhésion « polymère/polymère » et « circuit/polymère » après surmoulage ?
- Thermoformabilité du PLA avec encre et CMS collés (fissures, décollement de l'encre) ?
- Surmoulage par injection : retrait thermique provoquant des déformations, délavage de l'encre ou cisaillement des CMS ?

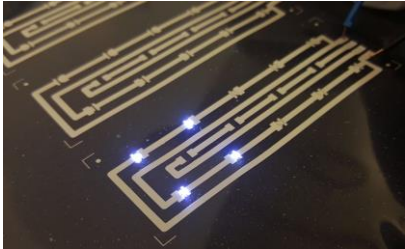
Exemple de déformation après surmoulage³



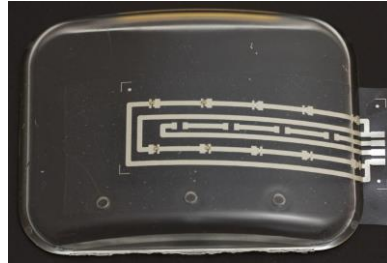
[3] N. J. Teh et al., "Statistical optimisation of thermoplastic injection moulding process for the encapsulation of electronic subassembly," *J. Electron. Manuf.*, Sep. 2000

- Travaux indépendants publiés depuis le lancement du projet:

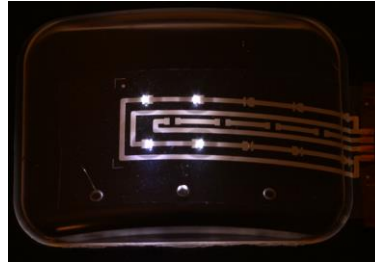
- Välimäki et al. (sept. 2020)



LED foil prepared on PLA film



LED foil prepared on PLA substrate overmoulded with PLA



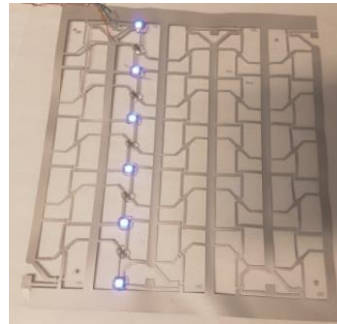
PLA amorphe (Luminy LX175, Total Corbion, épaisseur film : 60-70 μm)

Sérigraphie et surmoulage
Pas de thermoformage

- Luoma et al. (2021)



(a)



(b)

Sheet-to-sheet screen printed silver on (a) unannealed stereocomplex PLA film dried at 100°C (left) and 80°C (right) and (b) annealed stereocomplex PLA film dried at 80°C.

PLLA Luminy LX175 et PDLA Luminy D120, Total Corbion (Epaisseur film : 80 μm à 125 μm)

Gros travaux sur la préparation des films PLA

Uniquement sérigraphie

Pas de thermoformage ou de surmoulage

- Prontera et al. (2022), *Fabrication and biocompatibility analysis of flexible organic LED on poly(lactic acid) substrates: toward the development of greener bio-electronic devices*

Caractérisation initiale des matériaux

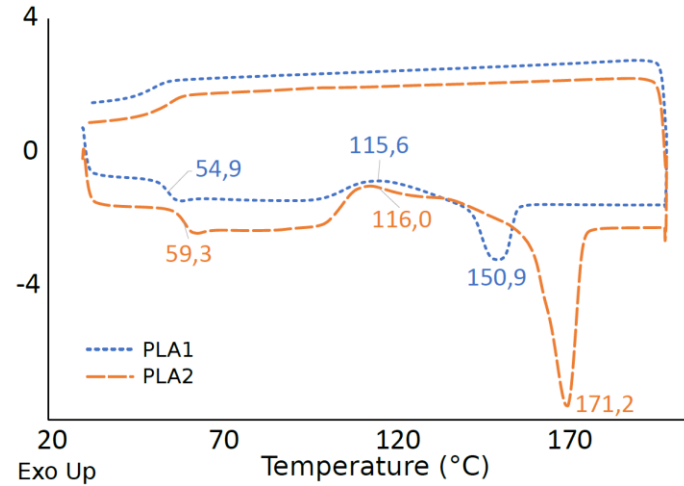
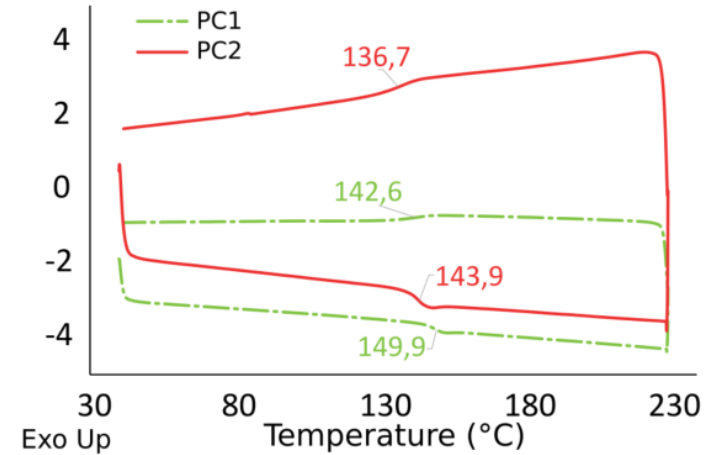
Propriétés thermiques et mécaniques

PC1: *film DE 1-1 (Covestro)*

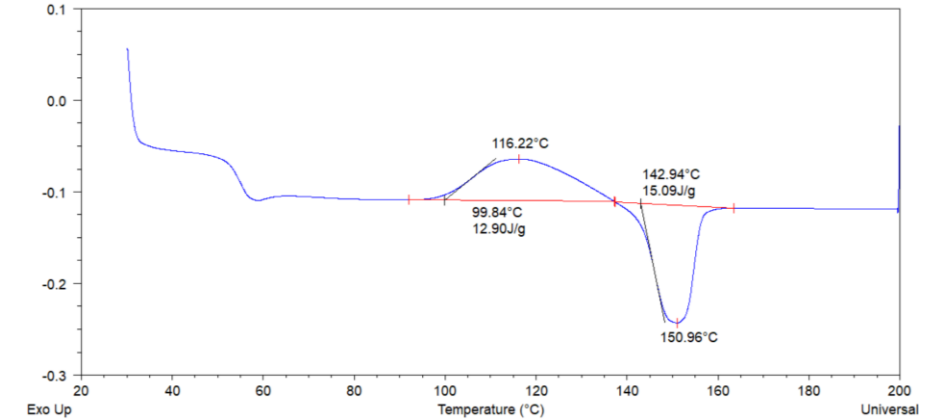
PC2: *grade 2405 (Covestro)*

PLA1: *grade 2003D (NatureWorks)*

PLA2: *grade 3251D (NatureWorks)*



Courbes DSC des grades de PC (gauche) et de PLA (droite)



$$\chi_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{\Delta H_m^\infty} \times 100$$

	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	χ_c (%)
PLA1	12,90	15,09	2,35
PLA2	30,43	35,00	4,91

- PC amorphe : Tg vers 145°C
- PLA semi-cristallin: Tg faible (vers 55-60°C) comparée au PC
 - Cristallisation froide (115°C)
 - Tf plus élevée pour PLA2 que pour PLA1 (170°C vs. 150°C)

- PLA1 moins cristallin que PLA2
- Cristallinité suffisamment faible pour considérer les deux PLA plus amorphes que cristallins
- Pas d'effet de cristallinité attendu pendant l'IME

- Essais de traction → ISO 527-3 :1995

	Module d'Young (MPa)	Résistance à la rupture (N/mm ²)	Elongation à la rupture (%)
PC1	2132	65	129
PLA1 (⊥)	3006	53	3
PLA1 (//)	2971	59	4

- Module d'Young très élevé pour le PLA compare au PC → indication de fragilité
- Elongation à la rupture très faible pour le PLA → films PLA moins étirable
 - L'orientation de l'extrusion influe sur la fragilité du PLA

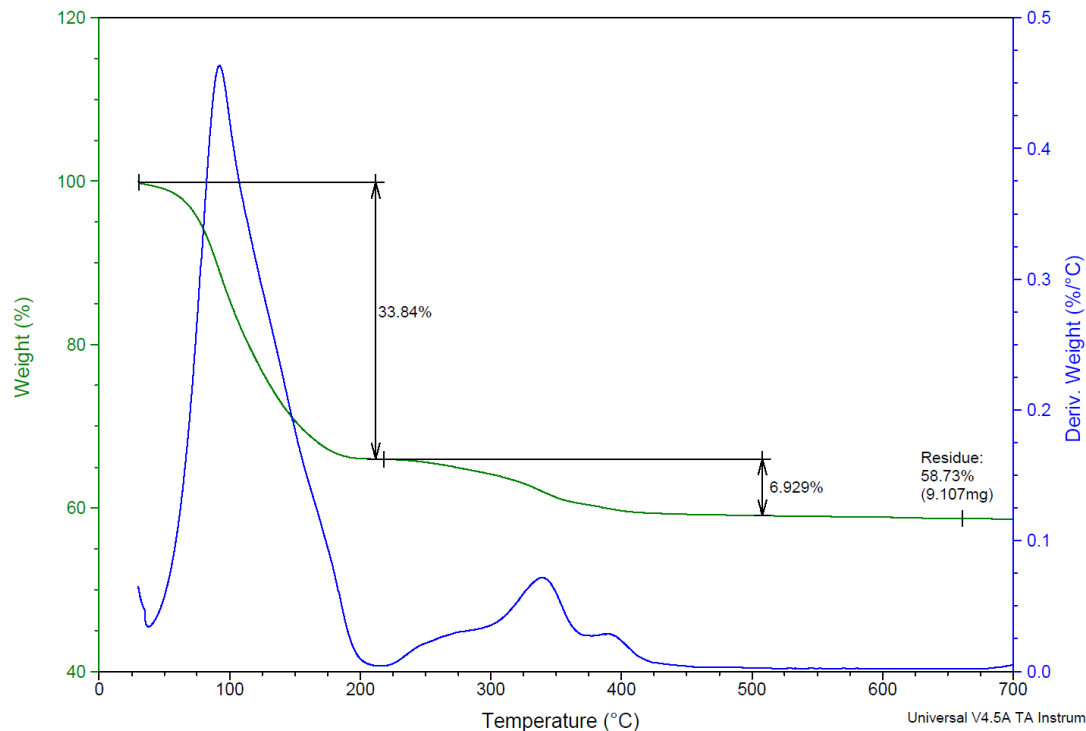
- Essais de Choc Charpy

Charpy sur PC2 Pendule 15J	Résistance aux chocs (kJ/m ²)
Entaille 2 mm	8,9
Entaille 2,5 mm	8,4

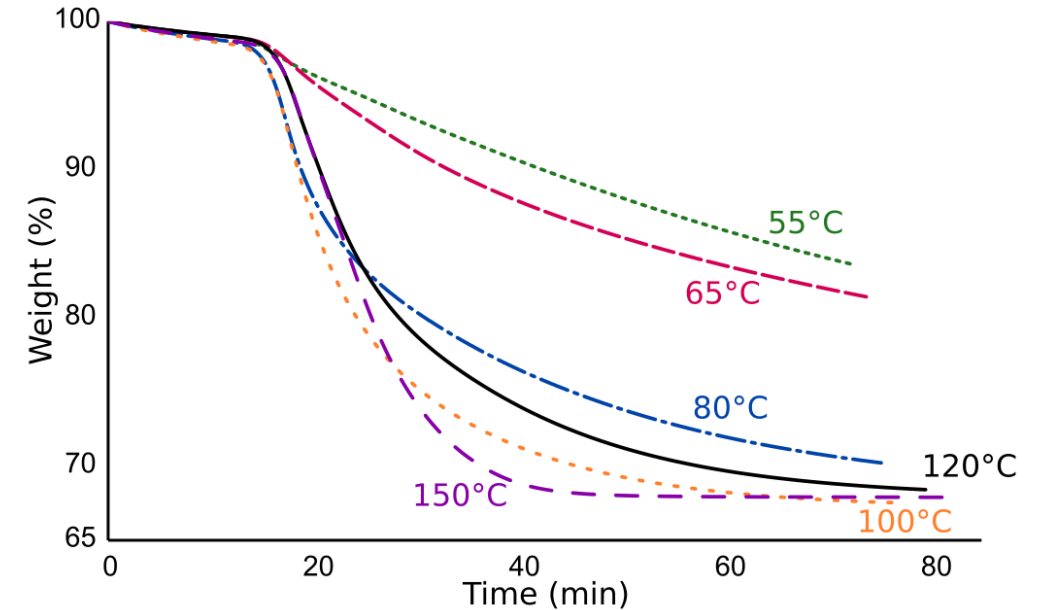
Charpy Pendule 1J		Résistance aux chocs (kJ/m ²)
PLA1	Sans entaille	15,6
	Entaille (2mm)	1,7
PLA2	Sans entaille	13,7
	Entaille (2mm)	1,7

- Confirmation fragilité PLA et excellente ductilité PC
- Mais objets IME en PLA ont une bonne résistance !

- Encre conductrice ME603 de DuPont:
 - 3 ou 4 composés chimiques (courbe bleue)
 - Résidu 58%mas. = particules d'argent (courbe verte)



Etude thermique de l'encre conductrice ME603



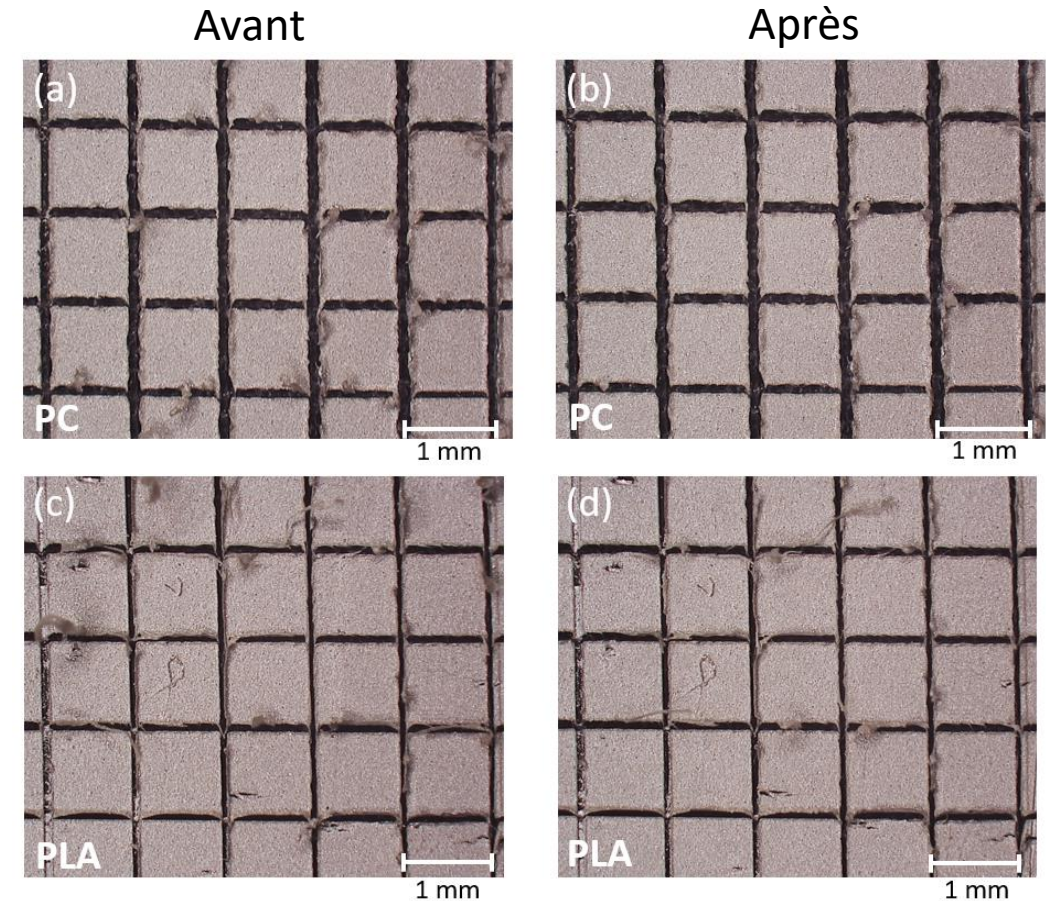
Etude isotherme du séchage de la ME603 pour adapter aux substrats PLA

- Sur substrat PLA : séchage à plus faible température pendant un temps plus long
 - Choix : 55°C pendant 2h30

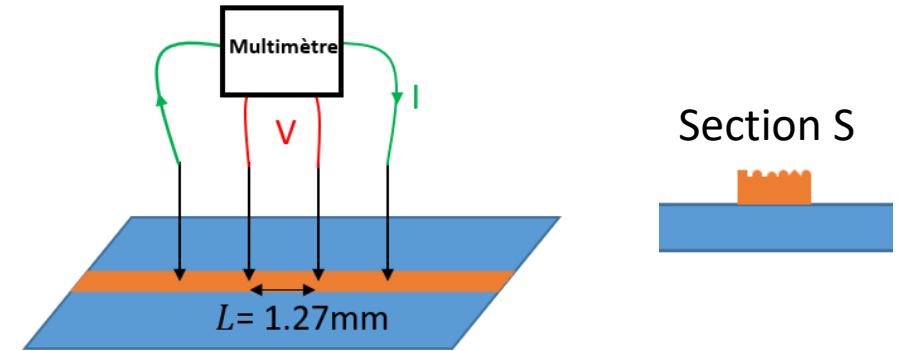
Le procédé IME

Travail expérimental

- Encre conductrice ME603, DuPont (argent)
- Séchage sur PC : 120°C – 20 min
- Séchage sur PLA : 55°C – 2h30
- Test normalisé ISO 2409
 - Couteau 6 lames
 - Ruban adhésif
- Très bonne adhésion
 - Catégorie 0 de la classification
 - Les coins de découpe sont propres
 - Aucun carré de la matrice n'est décollé



- Mesure de résistance
 - Méthode 4 pointes
 - Section S de ligne conductrice avec sonde confocale
 - Propriétés électriques ME603

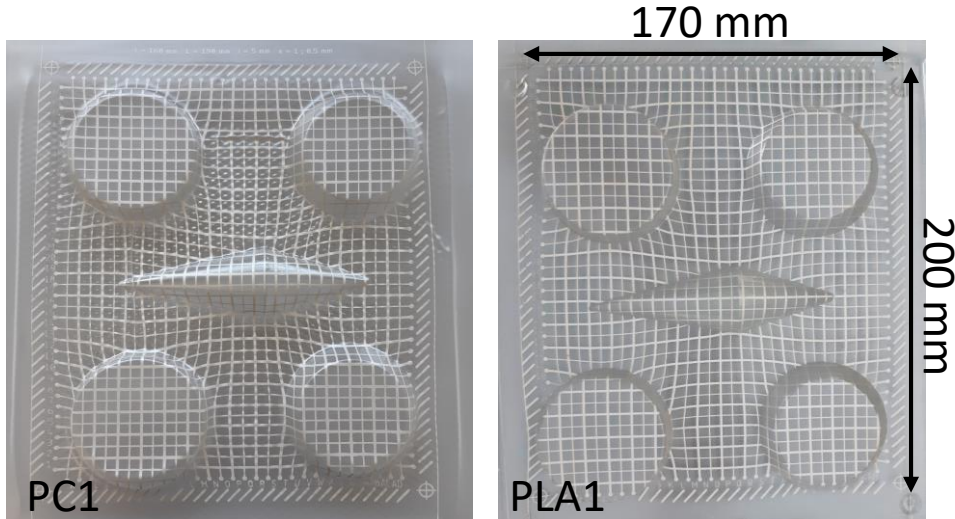


	ME603 sur PC1 (120°C – 20 min)	ME603 sur PLA1 (55°C – 2h30)	Argent
Résistivité ($\mu\Omega.cm$)	31 – 54	250 – 300	1,59

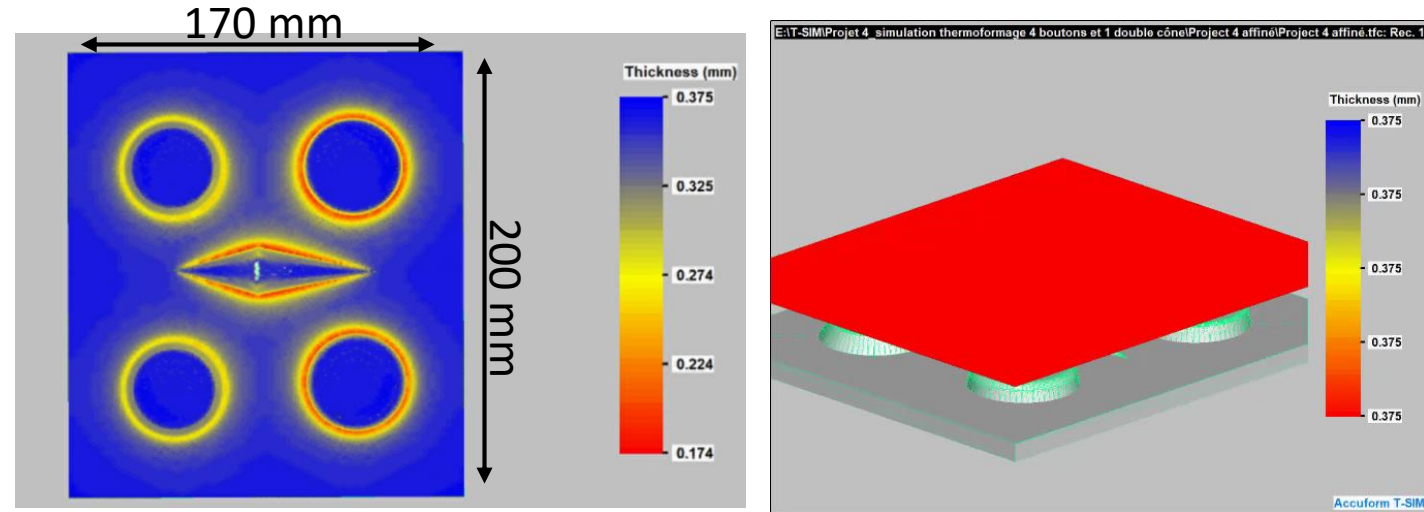
$$\rho = \frac{S.R}{L}$$

- Résistivité ME603 séché à 55°C sur PLA plus élevée que séchage à 120°C sur PC
 - Température séchage plus basse sur PLA → perte de conductivité
 - Suffisant pour fonctionnement d'un circuit électronique simple
 - Recuit photonique pour atteindre des résultats similaires au PC avec le PLA ?

- Moules de 10 mm de haut :
 - cylindrique
 - Rayon de congé : 0,5 mm ou 1 mm
 - Angle de dépouille : 10° ou 30°
- Moule double cône de 15 mm de haut



- Simulation:



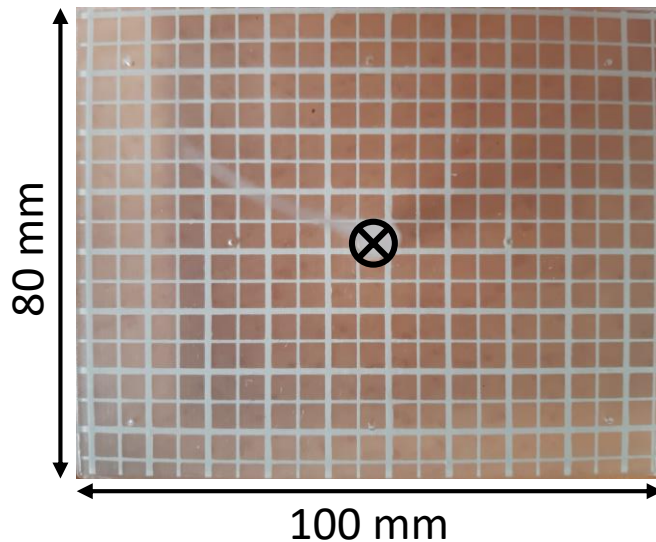
Simulation de thermoformage avec film PC de 375 μm d'épaisseur (logiciel T-SIM)

Effet paramètres géométriques sur étirement film

- Perte d'épaisseur jusqu'à 174 μm
- Expérimental
 - Film PLA bien thermoformé : ni fissures ni trous
 - Encre légèrement craquelée au niveau des zones de plus grand étirement (\rightarrow angle de dépouille plus faible)

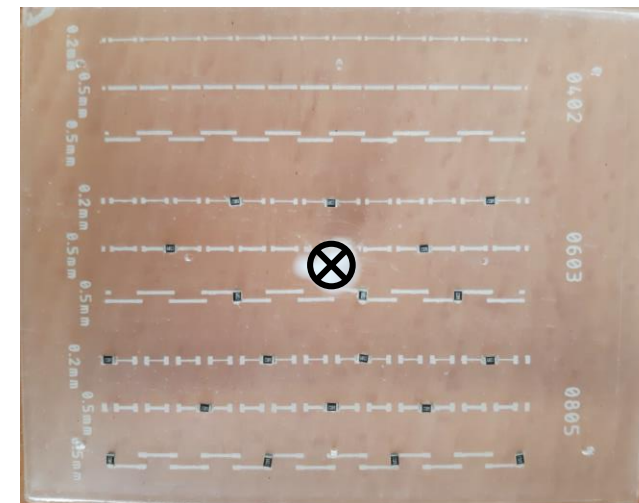
- Injection réalisée à l'IMP Oyonnax (INSA Lyon)
 - Moule d'injection : plaque de 2-3 mm d'épaisseur, injection centrale
 - Température de polymère fondu : 195°C
- Films PLA1 sérigraphiés et surmoulés avec PLA2
 - Moule injection à température ambiante
 - Vitesse de vis : 60 mm/s

Grille de ME603



Point
d'injection
⊗
central

ME603 avec CMS



➤ Aucun délavage de l'encre conductrice

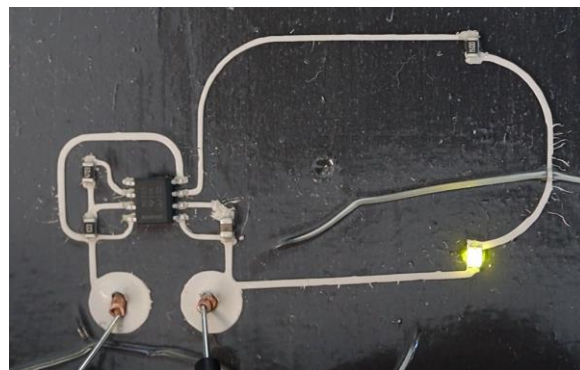
➤ Pas de délavage, les CMS restent parfaitement en place dans le moule plaque

PLA		PC	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénient
Biosourcé et biodégradable	Faible résistance aux chocs	Très bonne résistance aux chocs	Pendant le surmoulage, délavage possible de l'encre conductrice et des CMS sur le substrat
Très haute rigidité	Fragile	Excellente stabilité thermique jusqu'à 140°C	
Bonne réactivité chimique (-OH fin de chaîne)	Faible résistance des films à la température (s'affaisse rapidement)		
Suffisant thermomécaniquement	Délavage en cours d'étude*		

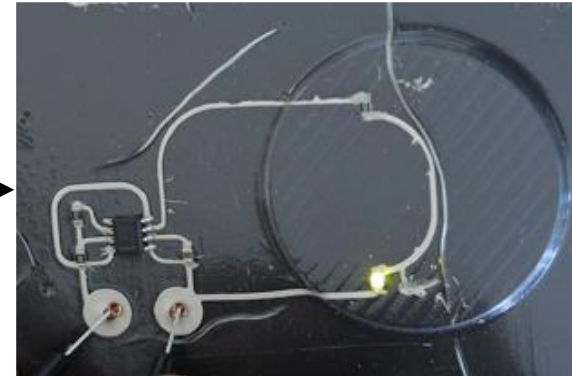
*Potentiellement moins problématique que sur PC car température d'injection plus basse pour PLA...

Preuve de concept

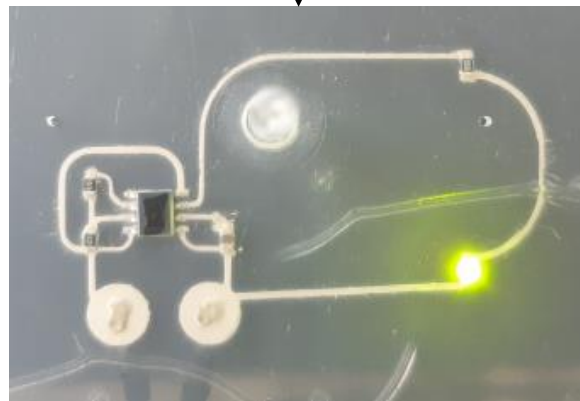
- Circuit électronique simple sur PLA, ME603 séchée à 55°C – LED clignotante



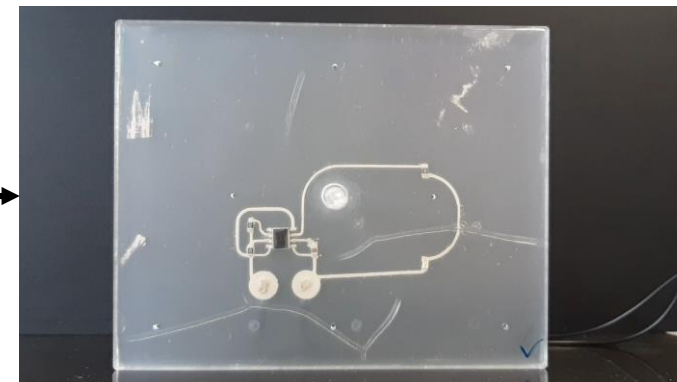
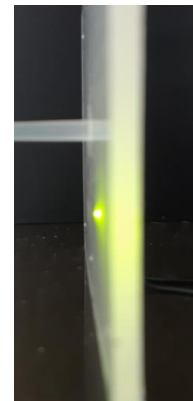
Thermoformage



Surmoulage
par injection



Moule plaque 100 x 80 x 2.5 mm, injection centrale



- Circuit électronique encapsulé

- **Article** “In Mold Electronics on Poly(lactic acid) – towards a more sustainable mass production of plasmonic devices”, C.Goument et al. accepté avec révisions dans *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*
- Points d’optimisation
 - Forme 3D plus complexe : développement d’un moule de thermoformage et d’un moule d’injection adaptés en cours
- Intégration des fonctions électroniques
 - Amélioration des performances de l’encre avec le recuit photonique ?
 - Remplacement des colles conductrices par des pâtes à braser (soudure photonique) ?
- Perspectives
 - Amélioration des propriétés mécaniques et/ou thermiques du PLA
 - Démantèlement des dispositifs IME en PLA

Merci pour votre attention !

Avez-vous des questions ?



Caroline GOUMENT

caroline.goument@insa-lyon.fr