



# Conception Intégrant le Recyclage des CARtes électroniques par BIO-lixiviation

*Retour d'expérience sur le projet CIRCABIO en cours,  
financement MITI CNRS / IRD*

***Pascal XAVIER***

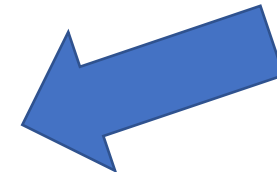
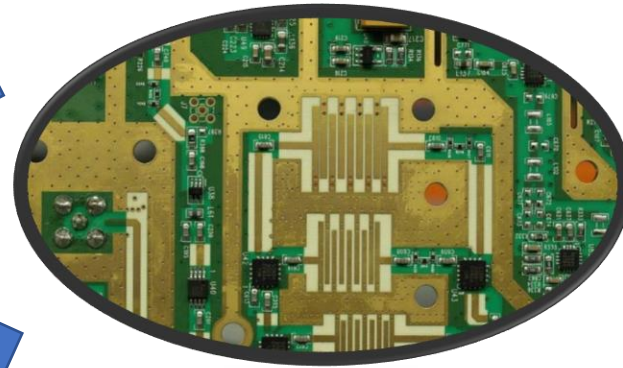
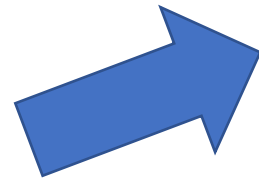
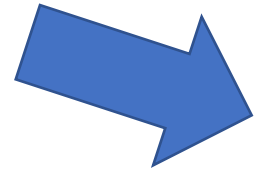
***Professeur d'Université à l'IMEP-LaHC***

GRENNERAT Vincent (doct.), Davide Bucci, LIANG Haokai/Phelma2A (IMEP-LaHC), JEANNIN Pierre-Olivier (G2Elab), LAROCHE Elia (post doc), SPADINI Lorenzo, MARTINS Jean, JULLIEN Clémence/stage M1 (IGE)

# Contexte général

Epuisement des ressources  
et explosion du volume de déchets

Maintien de notre niveau de vie



Dérèglement climatique dû aux GES

**Electronique durable**

# Contexte propre à l'électronique

- 53,6 Mt de DEEE générés en 2019 (+ 4% / an)
- DEEE = une ressource (« mines urbaines »)
- **Cuivre, le plus critique des métaux (CM)**  
d'après mining.com
- La **filière Européenne de traitement** se met en place : **85% des MC doivent être récupérés** (directive européenne)
- **Limites du recyclage actuel**
  - Récupération MCs énergivore et polluante
  - Certains éléments ne sont pas recyclables (résines époxy, boîtiers...)



*Mine de Chuquibambilla (Chili)*



DEEE



ecosystem  
recycler c'est protéger

suez

Morphosis  
Déchets Électriques et Electroniques

EcoLogic

envie  
Nos valeurs redonnent de la valeur



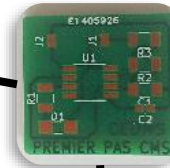
# Objectifs spécifiques du projet CIRCABIO

- Développer une **méthode innovante à intégrer à l'ACV**
  - Corrélation écoconception et récupération des CM en fin de vie (**circularité**)
  - Éviter une dégradation des performances associée
- Fabriquer un **dispositif électronique simple utilisé en recherche** (thermomètre)
  - **Matériaux recyclables ou biosourcés**
  - **Choix de conception** qui favorisent la récupération des CM tels que le cuivre
- Paramètres étudiés
  - Nature des matériaux du circuit imprimé
  - Géométrie des pistes
  - Etat de surface des matériaux avant ou après vieillissement accéléré
- Récupération des métaux grâce à la mise au point d'un **procédé** en fin de vie
  - Moins d'énergie
  - Moins de produits chimiques

# Procédés de récupération



**Cartes électroniques**



**Pyrométallurgie**



**Bio-hydrométallurgie  
= biolixiviation ?**



**Hydrométallurgie**



- Efficacité
- Conso. d'énergie
- Coût
- Pollution de l'air & CO2

- Coût
- Conso. d'énergie
- Produits chim. régénérés
- Durée de traitement

**- Or**  
**- Reste en alliage**

- Conso. d'énergie
- Pollution de l'air & CO2
- Coût
- Conso. de produits chimiques

- Avantages
- Inconvénients

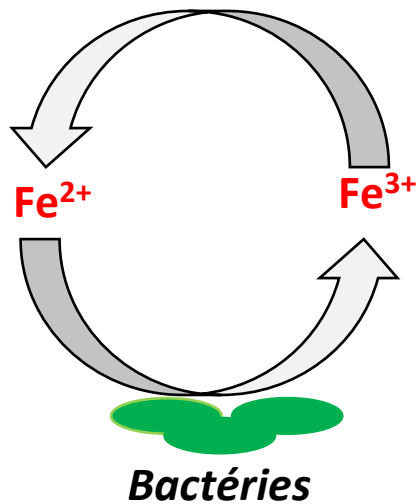


# Bio-hydrométallurgie →

## Couplage Microbiologique et Chimique

Solubilisation des métaux entretenue par des microorganismes

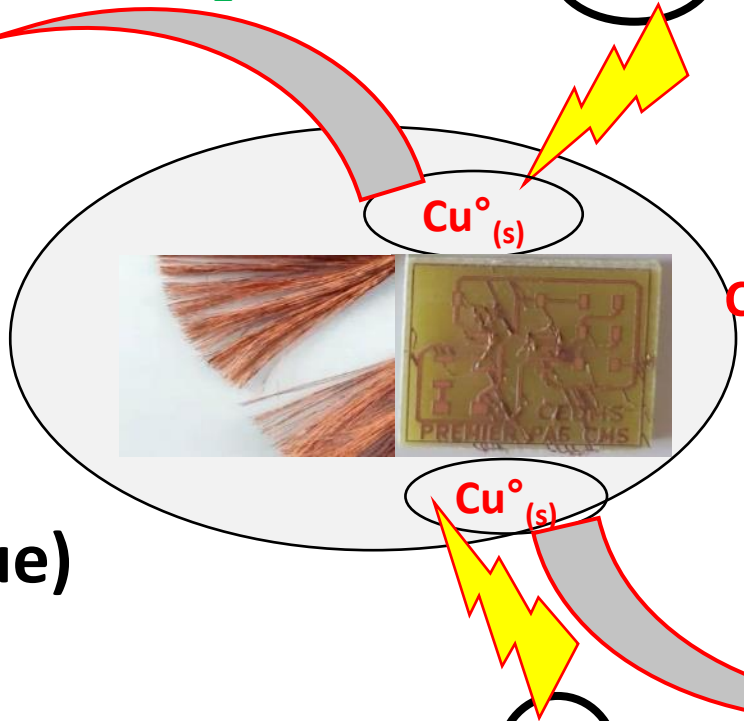
(*Acidithiobacillus ferroxydans*)



(attaque par le Fer ferrique)



(*Acidithiobacillus thiooxydans*)



(attaque acide)



Quantité réduite de produits chimiques grâce à la régénération par les bactéries

# Optimisation du procédé

→ *Evaluation de la capacité de biolixiviation du cuivre d'une carte électronique simple par des bactéries acidophiles*

## Approche :

1. Détermination des paramètres initiaux : toxicité du cuivre et concentration en Fe(III)
2. Implémentation et application du procédé de biolixiviation du cuivre (bioréacteur simple) : sur quel levier de conception jouer ?

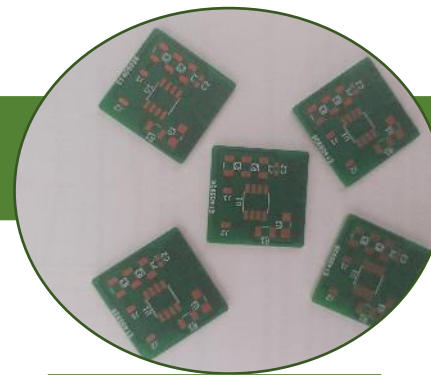
## Objets d'étude :



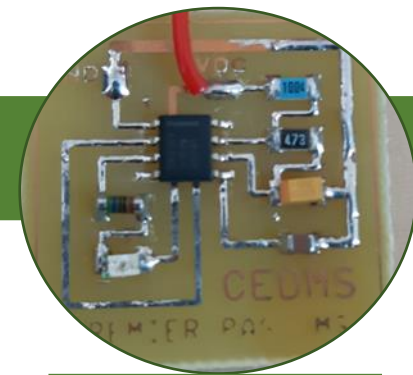
*Fils de cuivre*



*Cartes nues*



*Cartes vernies*



*Cartes brasées*

# Conditions expérimentales optimisées



**Etuve avec agitation permanente (150 tpm)**

**pH = 1,8**



**Fe(III) = 4 g/l**

**Cu = 75 mg/l  
= 1,2 mmol/l**

**Température  
ambiante**



# Expériences menées



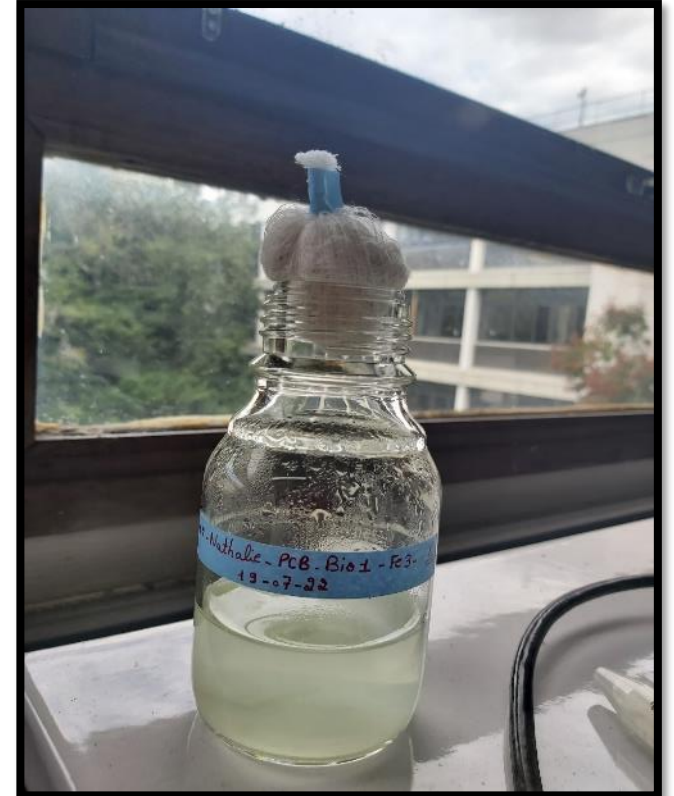
**Réacteur abiotique**  
(= *contrôle stérile*)



**Réacteur Biotique**  
(= *bactéries en mélange*)

• *Ajout de Fe(II)*

• *Ajout de Fe(III)*



**Total = 2 x 4 x 3 (triplicats)**  
**= 24 réacteurs**

# Expériences menées

## *Suivi des expériences*

- **Aux jours 0, 1, 3, 10 and 30**
- **Paramètres suivis :**
  - **O<sub>2</sub> et pH**
  - **Fer soluble (Fe<sup>2+</sup> et Fer total)**
  - **Sulfate soluble**
  - **Cuivre soluble**
  - **Concentrations en bactéries**



**ICP-AES**

*= Inductively coupled plasma - Atomic emission spectrometry*



**DR1900 Hach<sup>®</sup>**




*Spectrophotomètre portable*



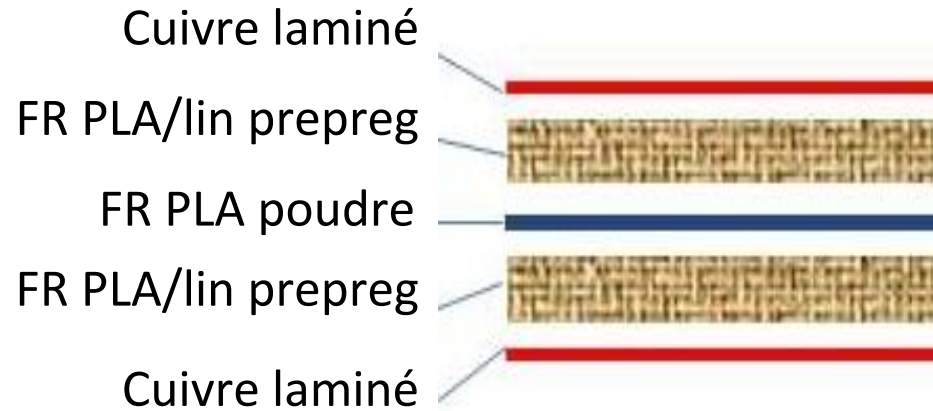
**Accuri C6+**

*Cytomètre de flux (BD<sup>®</sup>)*

## Résultats intermédiaires (bioréacteur simple)

- Production d'acide / oxydation du sulfate par les microorganismes 
- Accélération de la dissolution du cuivre / oxydation par le Fe(III) 
- Dissolution rapide de 100% du cuivre ( $\leq 10$  jours)   
Etat de l'art (BRGM) : 96% du cuivre en 2 jours avec des cartes existantes  
(bioréacteur double pour éviter la toxicité du cuivre, bactéries différentes)
- Si la surface effective des pistes de cuivre augmente, le procédé semble être plus efficace

# Nouveau substrat biosourcé PLA/fibres de lin



1,6mm

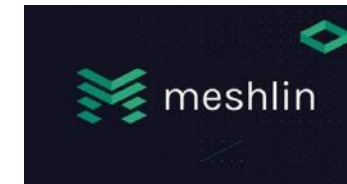
*Coupe du substrat (1<sup>ère</sup> génération)*

35µm Cuivre double face (BME-ETT, Attila Géczy, Hongrie)

## Caractéristiques:

Biosourcé

Biodégradable



Température de transition vitreuse (Tg) : 60 - 80°C

Constante diélectrique plus petite que celle du FR4  
(comme celles de nombreux matériaux biosourcés)

Diffusivité thermique deux fois plus petite que celle du FR4

IEEE EPTC 2022 <https://doi.org/10.1109/EPTC56328.2022.10013255>



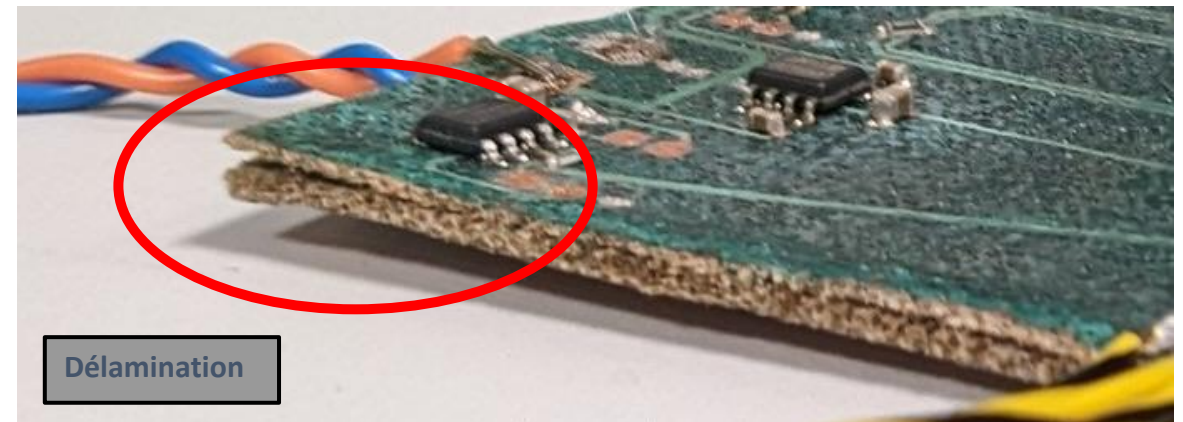
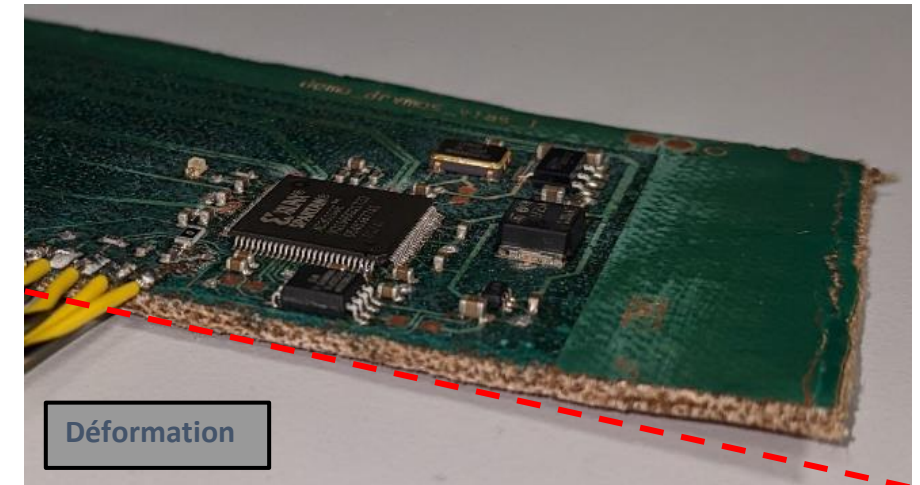
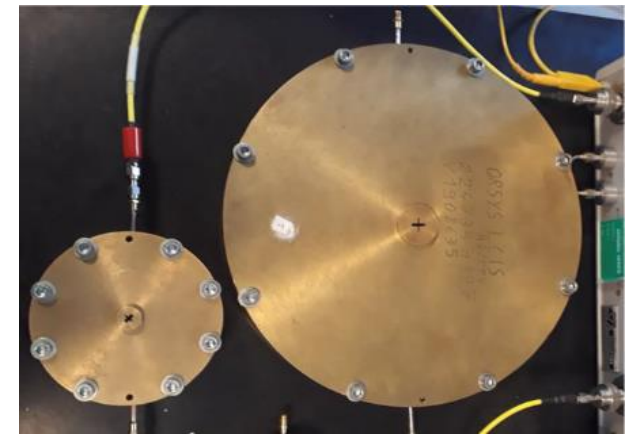
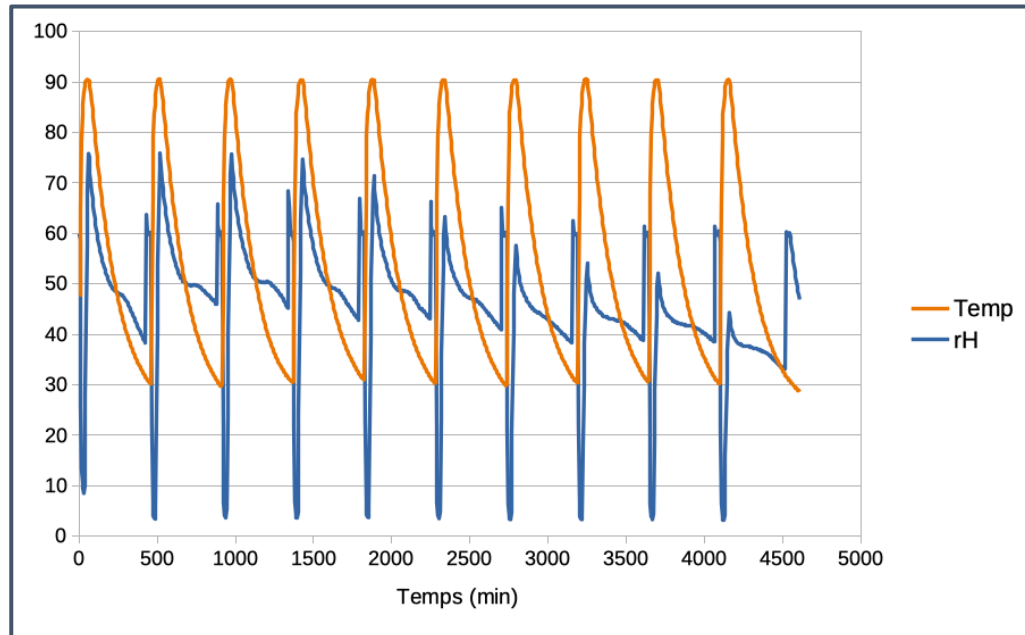
# Caractérisation du substrat biosourcé PLA/lin

Caractérisation RF en cavités résonantes ou en ligne de transmission

Lot #	Fréquence (MHz)	$\epsilon_r$	$\tan(\delta)$
1	930	$2,49 \pm 0,17$	$0,05 \pm 0,01$
1	2480	$2,31 \pm 0,16$	$0,04 \pm 0,01$
2	1200-9470	$2,18 \pm 0,16$	NC
FR4		4,55	0,02

## Faible variation de ces propriétés avec l'humidité

Test de vieillissement : 10 cycles  $T^\circ$  / rH en chambre climatique





# Procédé de fabrication carte pour PLA/fibres de lin

## Gravure soustractive au Laser (LPKF)

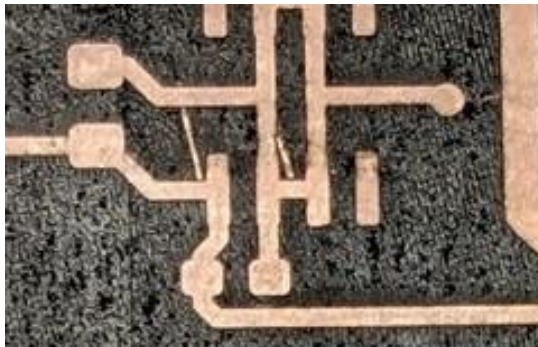
**Avantages :** résolution, gravure sèche, récupération du cuivre potentiellement immédiate

*Délamination des lamelles de cuivre avec des chocs thermiques*

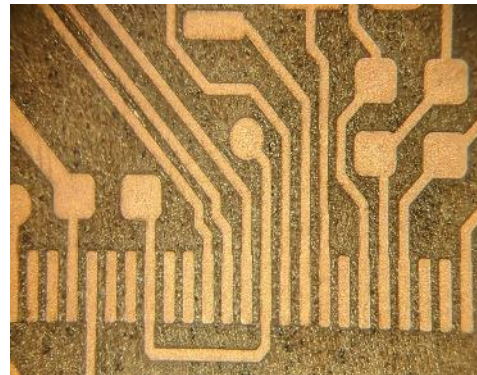


## Adaptations du procédé pour le substrat PLA/lin :

- Vitesse du Laser pour éviter des fusions locales
- Puissance du Laser
- Nombre de passages (répétitions)



*Lamelles résiduelles entre pistes*

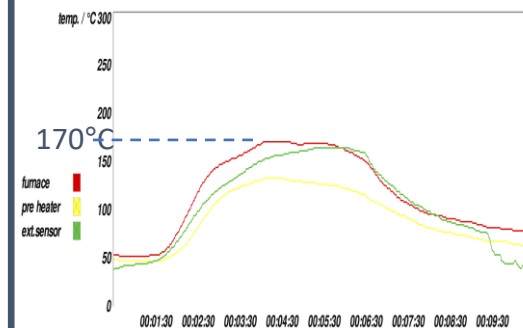


*Résultat après adaptation*

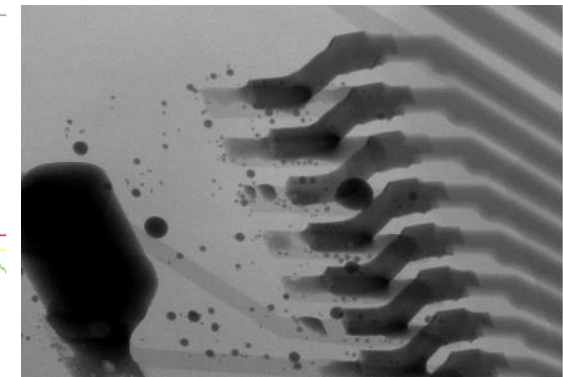
## Composants Montés en Surface plutôt que traversants

## Brasage en phase vapeur (VPS)

- Vernis épargne
- HT 170 Galden (point d'ébullition 170°C)
- Crème Bi57.6/Sn42/Ag0.4 (138°C)
- Profil de refusion: 4 min au-dessus de 150°C
- Quelques reprises manuelles nécessaires



*Profil de refusion VPS*



*Image aux rayons X : résidus de soudure et défauts*

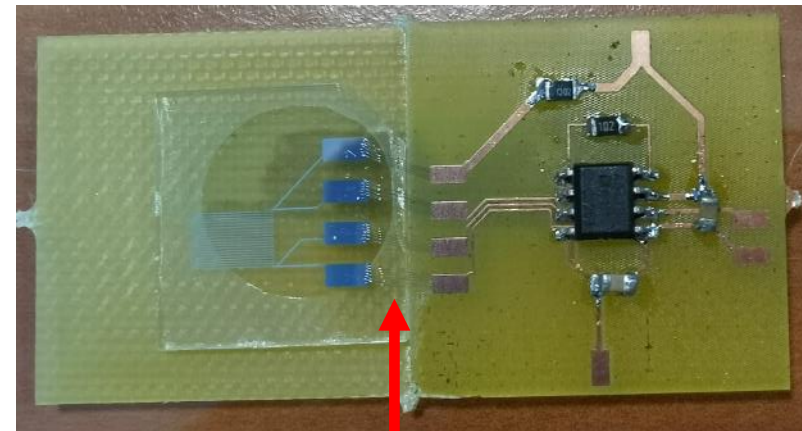
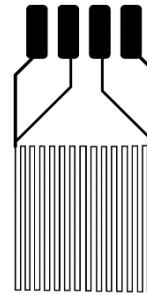
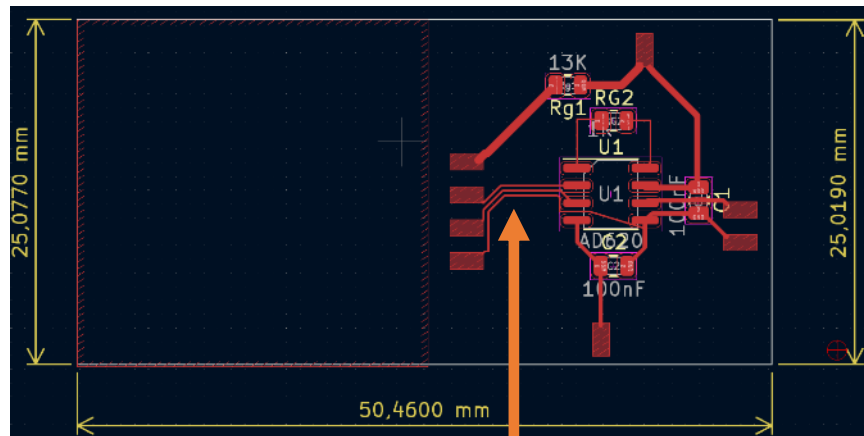
# Thermomètre intégré et circuit de mesure

**Thermomètre Alu (ou inox)** déposé par pulvérisation sur verre (application capteur biochimique)

**Circuit de mesure** avec amplificateur en CMS et sortie analogique

**Quantité de cuivre adaptée à la CMI** (27 mg pour 500 mL)

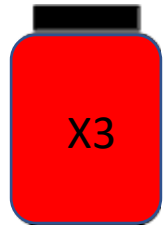
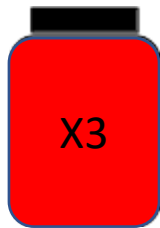
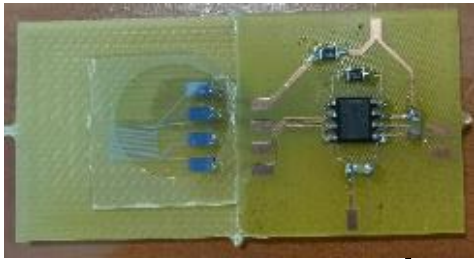
**Fabrication sur deux substrats différents** : FR4 et PLA/Lin



Différentes largeurs et densités de pistes pour tester les aspects « surface effective »

Liaisons capteur thermomètre Alu / verre – carte de mesure par bondings

# Travaux en cours



**Réacteur abiotique**  
(= *contrôle stérile*)

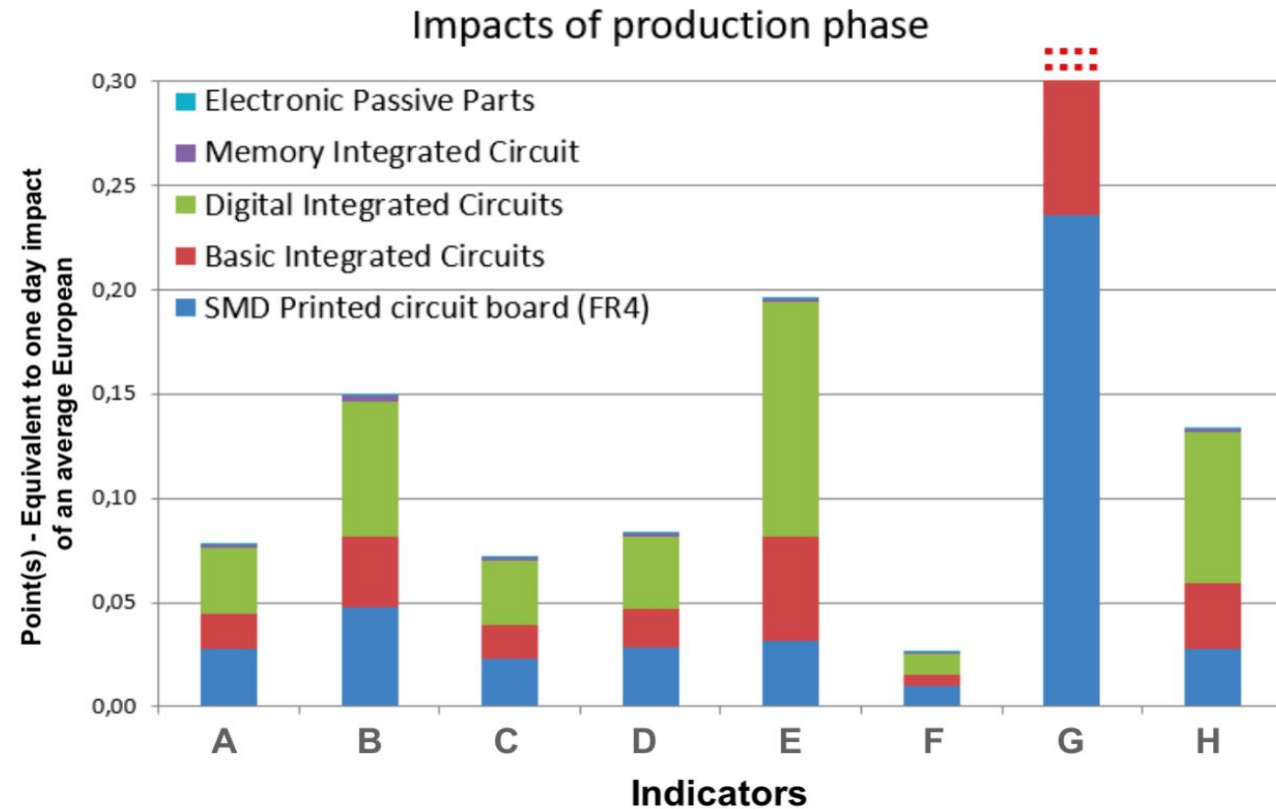


**Réacteur Biotique**  
(= *bactéries en mélange*)

• *Substrat FR4*

• *Substrat PLA/Lin*

**Total = 4 x 3 (triplicats) = 12 réacteurs**



A.) Energy Consumption; B.) Resources Consumption; C.) Greenhouse gases GWP 100 mod; D.) Acidification; E.) Eutrophication (air water soil); F.) Photochemical pollution; G.) Aquatic ecotoxicity; H.) Human toxicity;

**Empreinte écologique d'un circuit imprimé FR4 = 15% à 40% des phases de production et de fin de vie**

**Analyse de cycle de vie (OpenLCA)**



# Conclusions

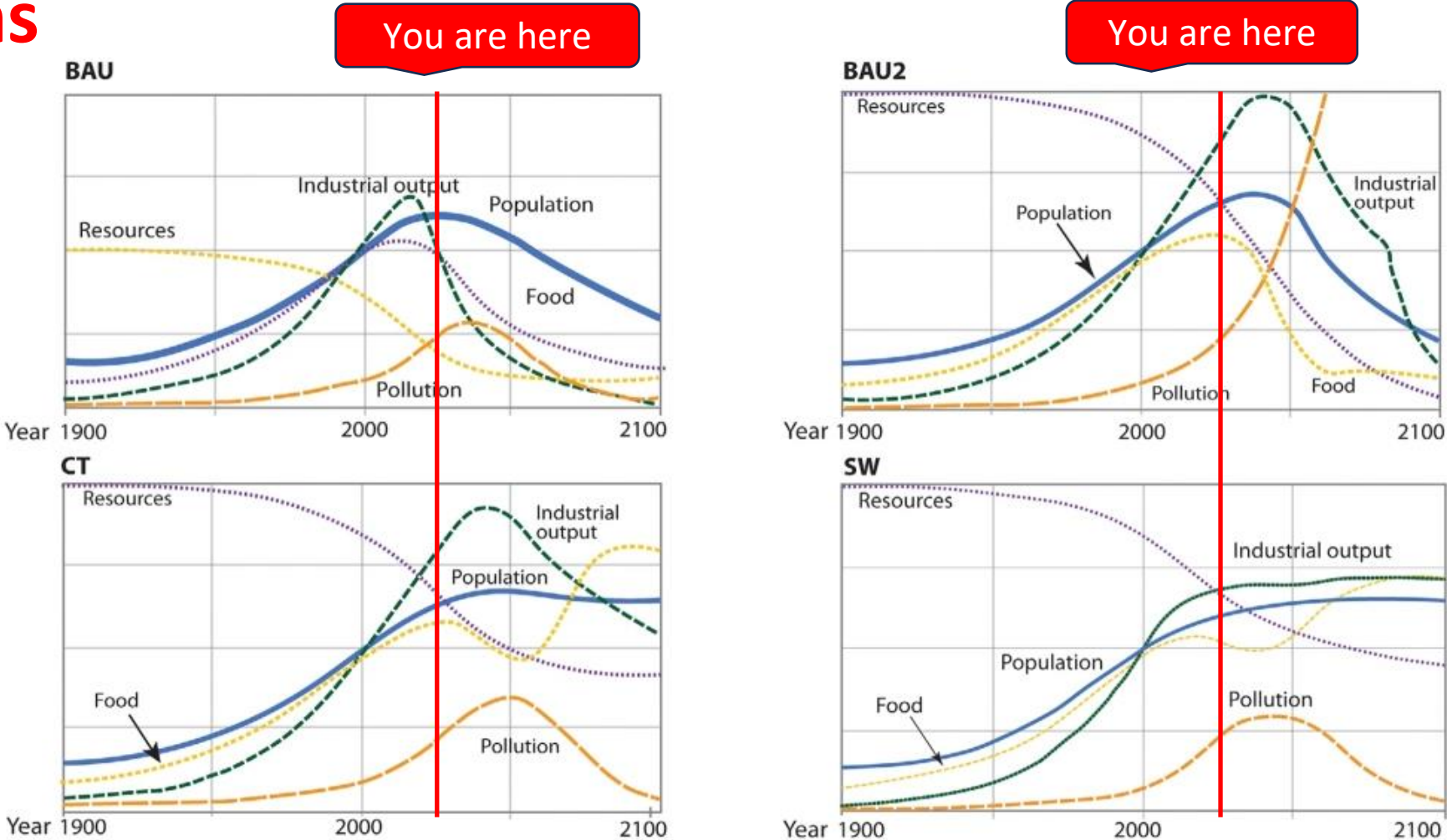


FIGURE 1 The BAU, BAU2, CT, and SW scenarios. Adapted from *Limits to Growth: The 30-Year Update* (p. 169, 173, 219, 245), by Meadows, D. H., Meadows, D. L., and Randers, J., 2004, Chelsea Green Publishing Co. Copyright 2004 by Dennis Meadows. Adapted with permission

- Nous sommes **dans le mur**
- Les chercheurs se doivent d'apporter des **réponses pratiques** à défaut de « **solutions** » ... **CIRCABIO peut y contribuer...**

