

## RÜEGG Kasimir (2020): Harnessing bacterial-fungal interactions for the development of a biodegradable printed circuit board

Déjà pour les anciennes civilisations, les métaux et leurs méthodes d'extraction jouaient un rôle économique important. Avec les avancées technologiques et les modèles économiques favorisant l'obsolescence des objets des dernières décennies, l'extraction de métaux est montée en flèche, entraînant d'importants problèmes incluant l'exhaustion des ressources et une production incontrôlée de déchets ayant des conséquences sévères pour l'environnement et la santé humaine. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (*e-waste* en anglais) constituent le flux de déchets avec la croissance la plus rapide à l'échelle mondiale. Actuellement, la plupart de ces déchets est déposée en décharges, retirant ainsi d'importants volumes de métaux des circuits économiques. Avec l'épuisement des ressources aisément extractibles, l'extraction primaire s'effectue sur des minerais de qualité inférieure qui sont exploités avec des gains économiques inférieures et à coup écologique plus élevé. Avec l'exhaustion des ressources en vue, une sensibilisation environnementale accrue et une demande en métaux en hausse constante, l'extraction à partir de sources métalliques secondaires gagne de l'importance, par exemple via le recyclage des *e-waste*. Les circuits imprimés (en anglais *printed circuit boards* ou PCBs ; utilisés dans les ordinateurs, les téléphones portables et plein d'autres appareils technologiques) constituent une composante abondante des *e-waste*, qui de plus est particulièrement lucrative en termes de recyclage grâce à sa haute teneur en métaux. Actuellement, les *e-waste* sont recyclés au travers de processus de pyrométallurgie (incinération de la matrice), d'hydrométallurgie (dissolution de la matrice) et de bio-métallurgie. Dans les processus bio-métallurgiques, des organismes, allant de la plante au microorganisme, permettent la récupération de métaux avec une haute spécificité, une basse consommation énergétique et une génération minimale de déchets. Grâce à leur potentiel inhérent d'interagir avec les métaux présents dans leur environnement, les microbes jouent un rôle important dans les cycles biogéochimiques de la plupart des métaux. Pour cette raison, leur utilisation pour la bio-récupération de métaux semble intuitive. Pourtant, dans la plupart des environnements terrestres, la dispersion et l'activité des bactéries est fortement limitée en raison de la non-saturation en eau. Dans le sol par exemple, la plupart des bactéries est confinée aux films d'eau présents de manière discontinue. Il a été constaté qu'en présence de champignons filamenteux, certaines bactéries mobiles pouvaient se déplacer le long du mycélium du champignon en nageant dans la fine couche d'eau entourant les hyphes. Par cette interaction bactéries-champignons, nommée autoroute fongique (en anglais *fungus highway interaction* ou FHI), les bactéries peuvent se déplacer à travers les espaces vides non-saturés de la matrice du sol et ainsi accéder à de nouvelles ressources. Ainsi, une telle interaction entre bactéries et champignons est probablement essentielle pour que les cycles biogéochimiques fonctionnent de manière effective.

En plus d'un recyclage plus développé, de nouvelles techniques de recyclage et de nouveaux designs de produits sont développés en vue de proposer des méthodes plus vertes et durables. Les avancées récentes dans l'électronique imprimée ont permis l'émergence de technologies à base de cellulose. Cette étude vise à évaluer la biodégradabilité de PCBs à base de cellulose avec des impressions en argent et en cuivre, développés à l'EPFL Microcity Neuchâtel.

Pour ce faire, les PCBs ont été inoculés par des souches bactériennes et fongiques inoculés séparément ou en couples bactéries-champignons. Les tests ont été exécutés dans des boîtes de Petri contenant différents milieux agar-eau (WA). De plus, des boues de station d'épuration digérées (DSS), un déchet riche en nutriments obtenu lors du traitement des eaux usées, ont été évaluées comme substrat de substitut aux milieux de culture.

Les tests de biodégradation consistaient en trois étapes expérimentales. Dans l'expérience 1, le substrat du PCB à base de cellulose a été inoculé pour évaluer sa viabilité comme source de carbone. Pour les co-inoculations, la souche bactérienne a été inoculée sans contact avec le substrat afin de provoquer l'établissement de FHI. Dans l'expérience 2, les PCBs en argent et cuivre ont été inoculés avec le but d'investiguer la colonisation microbienne et les interactions microbes-métaux dégradant les circuits. Des analyses de microscopie électronique à balayage (SEM), microscopie électronique en transmission (TEM), et microscopie électronique en transmission avec préparation à la sonde ionique focalisée (FIB-TEM) ont été réalisées. Dans l'expérience 3, la résistance électrique des circuits a été évaluée comme proxy pour la dégradation du circuit, comme cette première est supposée croître de façon continue pendant la dégradation du circuit. Pour ce faire, les PCBs ont été branchés et la résistance a été mesurée à plusieurs points dans le temps.

Les résultats ont montré que le substrat à base de cellulose a été utilisé comme source de carbone et que des FHI ont été établies pour de multiples couples bactéries-champignons, ce qui permettait la souche bactérienne d'atteindre le substrat de PCB sur certaines boîtes. Les PCBs en argent et cuivre ont été colonisés à densité mycélienne variable. Des bio-précipités contenant des métaux ont été observés sur le mycélium de plusieurs souches fongiques, indiquant la mobilisation, le transfert et l'immobilisation (bio-précipitation) des métaux. Les résultats obtenus pour la résistance électrique comme proxy pour la dégradation du circuit étaient peu concluants, nécessitant des recherches plus approfondies. Globalement, l'étude a abouti sur des résultats encourageant la poursuite du développement de PCBs biodégradables et l'exécution d'autres tests de biodégradation.

**Mots-clés** : bio-récupération de métaux ; déchets d'équipements électriques et électroniques ; couples bactéries- champignons ; autoroute fongique ; urban mining