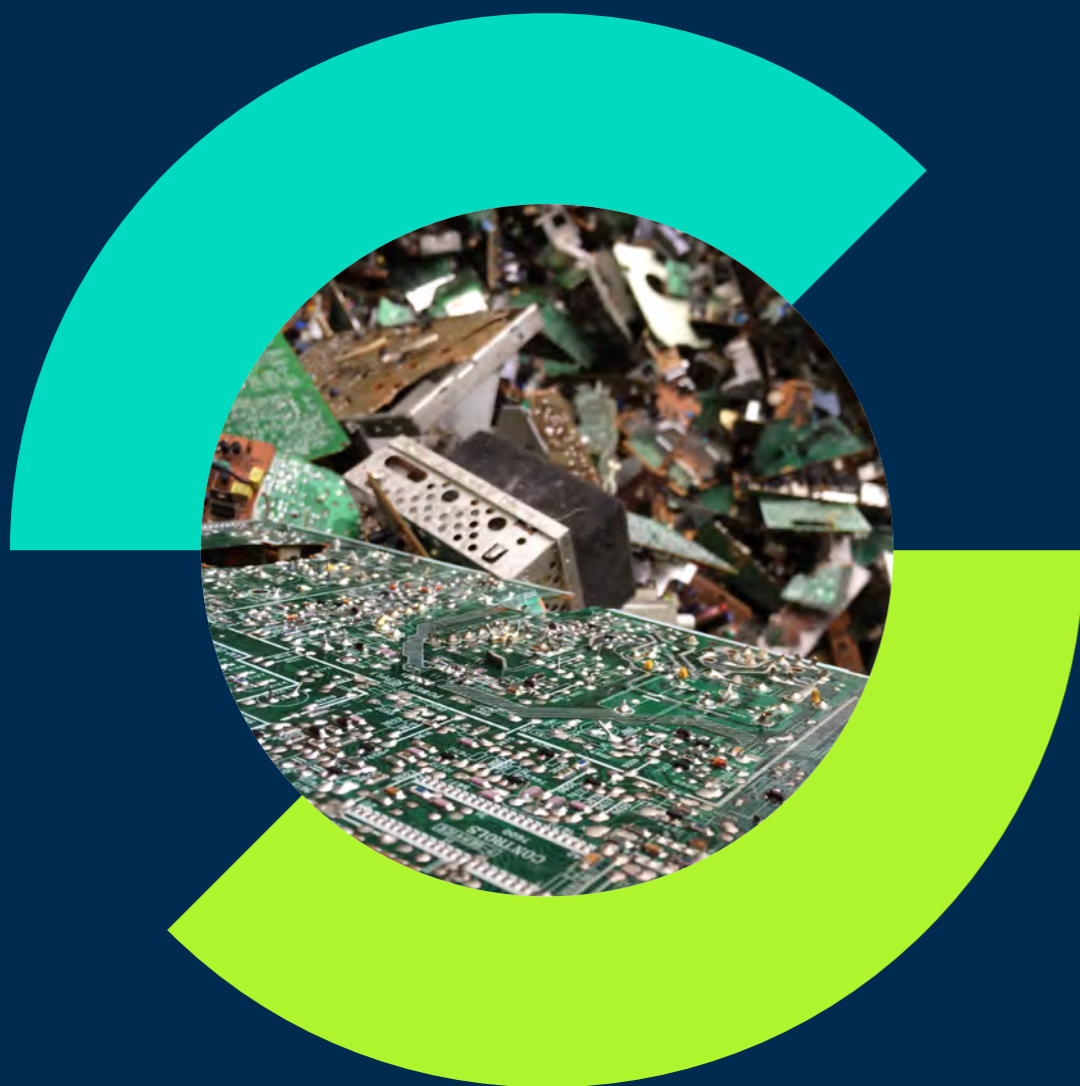




**CHAIRE**  
**mines**  
**URBAINES**

**Guide des travaux  
de recherche de la  
Chaire Mines urbaines**



# Sommaire

<b>Édito</b> .....	<b>04</b>
Dépendance, souveraineté, réemploi... Par où commencer ?	04
<b>Introduction</b> .....	<b>06</b>
ecosystem et la Chaire Mines urbaines : qui sommes-nous ?	06
2024 : le lancement d'une nouvelle saison de recherche	10
<b>Travaux de recherche de la Chaire : miscellanées</b> .....	<b>13</b>
Transformation d'écosystem en entreprise à mission	14
Publication d'un guide de l'économie circulaire transdisciplinaire	16
De l'éco-conception aux éco-innovations circulaires	18
Proposition d'une démarche d'éco-conception des équipements électriques et électroniques centrée sur l'intégration de plastiques recyclés issus de DEEE	20
Nanostructuration de mélanges de PC/ABS appliquée au recyclage des polymères issus des DEEE	22
Dégradabilité des plastiques de DEEE en vue de leur tri post-broyage	24
Caractérisation des déchets d'équipements électriques et électroniques	26
Inventaire des technologies de recyclage des métaux critiques à travers le monde	28
Conception d'un guide des technologies de tri des matières plastiques issues des DEEE	30
Récupération du tantale issu des DEEE	32
Recyclage des LED	34
Récupération de l'antimoine et du brome	36
<b>Vous avez un rôle à jouer !</b> .....	<b>38</b>

## ÉDITO

# Dépendance, souveraineté, performance environnementale... Par où commencer ?

Au vu des événements géopolitiques de ces dernières années, de la crise du COVID, et du risque de pénurie de certains métaux, il apparaît clairement que les pays d'Europe (et d'autres nations) ainsi que leurs entreprises et industries, doivent réfléchir et mettre en place des actions pour mieux sécuriser leur approvisionnement en matériaux. Notamment en ce qui concerne ces fameux métaux critiques, absolument nécessaires pour rester dans la course technologique.

Avec le **Critical Raw Material Act**, adopté par le Parlement européen le 12 décembre 2023, l'Union européenne propose des axes pour reconstruire sa souveraineté en matières premières : l'extraction de métaux en Europe doit permettre de produire 10 % des besoins annuels du territoire, d'en transformer 40 % et d'en recycler 25 %. La France, suite au rapport Varin, s'organise et se muscle sur le sujet à travers différentes structures comme l'OFREMI<sup>1</sup> et la DIAMMS<sup>2</sup>.

Mais par où faut-il commencer lorsque l'on n'a la main ni sur les ressources minières ni sur des procédés de transformation des métaux critiques et stratégiques qui ont tant évolué et se sont concentrés partout sur la planète ?

Comme en recherche, il faut repartir de la base. Nous devons réapprendre à connaître nos produits et nos déchets pour mieux comprendre nos besoins en termes de composition, de quantité de matériaux et pouvoir en évaluer les risques et opportunités. Pour s'améliorer, il est nécessaire de quantifier.

Afin de mettre en place un reporting robuste sur la durabilité de nos entreprises (réglementation CSRD) et pour répondre aux défis de la décarbonation, il faut être capable d'évaluer l'impact environnemental de nos choix. Ce qui nécessite également de nombreuses données pour bien comprendre les cycles de vie des produits de demain. Pour faire les bons choix et limiter les risques d'approvisionnement, il faut revisiter le contenu de nos produits, ne pas hésiter à se concentrer sur leurs fonctionnalités premières et innover pour limiter leurs impacts environnementaux.

Chez ecosystem, nous avons un rôle important à jouer dans cette transformation. D'un côté, nous collectons et recyclons près de 700 000 tonnes de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ménagers. Un gisement de matériaux critiques que nous apprenons quotidiennement à connaître et à mieux exploiter.

De l'autre, à travers notre engagement dans la Chaire Mines urbaines, nous collaborons avec des chercheurs qui se passionnent de plus en plus pour nos problématiques et qui s'attaquent aux verrous technologiques très concrets de la filière DEEE. Le spectre est large : faciliter des nouveaux process qui vont permettre de prolonger la durée de vie des équipements électriques et électroniques (réparation, réemploi), mieux trier et dépolluer les déchets, identifier les matériaux critiques et stratégiques que contiennent nos déchets, concevoir des procédés industrialisables pour les extraire, aider à la réincorporation de matériaux issus du recyclage, accompagner l'éco-conception....

Mais surtout, nous misons sur la concertation pour avancer. Car une approche nationale seule serait trop limitée, une concertation européenne a minima s'impose. Notre ambition, c'est d'être une porte ouverte pour les industriels, les chercheurs, les élus et les professionnels du recyclage et d'ouvrir une démarche avec nos homologues à l'étranger.

C'est pour cette raison que nous avons rassemblé dans ce livret douze projets portés par des étudiants, doctorants et professeurs de la Chaire. Afin de partager leurs avancées avec le reste de la filière, pour que chacun puisse s'approprier ces enjeux et comprendre la complexité et les défis industriels qui sont devant nous.

Si la souveraineté en métaux critiques n'est pas pour demain, nous sommes au bon endroit pour apporter notre contribution et tracer le chemin qui y mènera !



**XAVIER LANTOINETTE**  
Directeur de la Performance  
environnementale, de la Qualité  
et des Projets

<sup>1</sup> Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles, créé en 2022

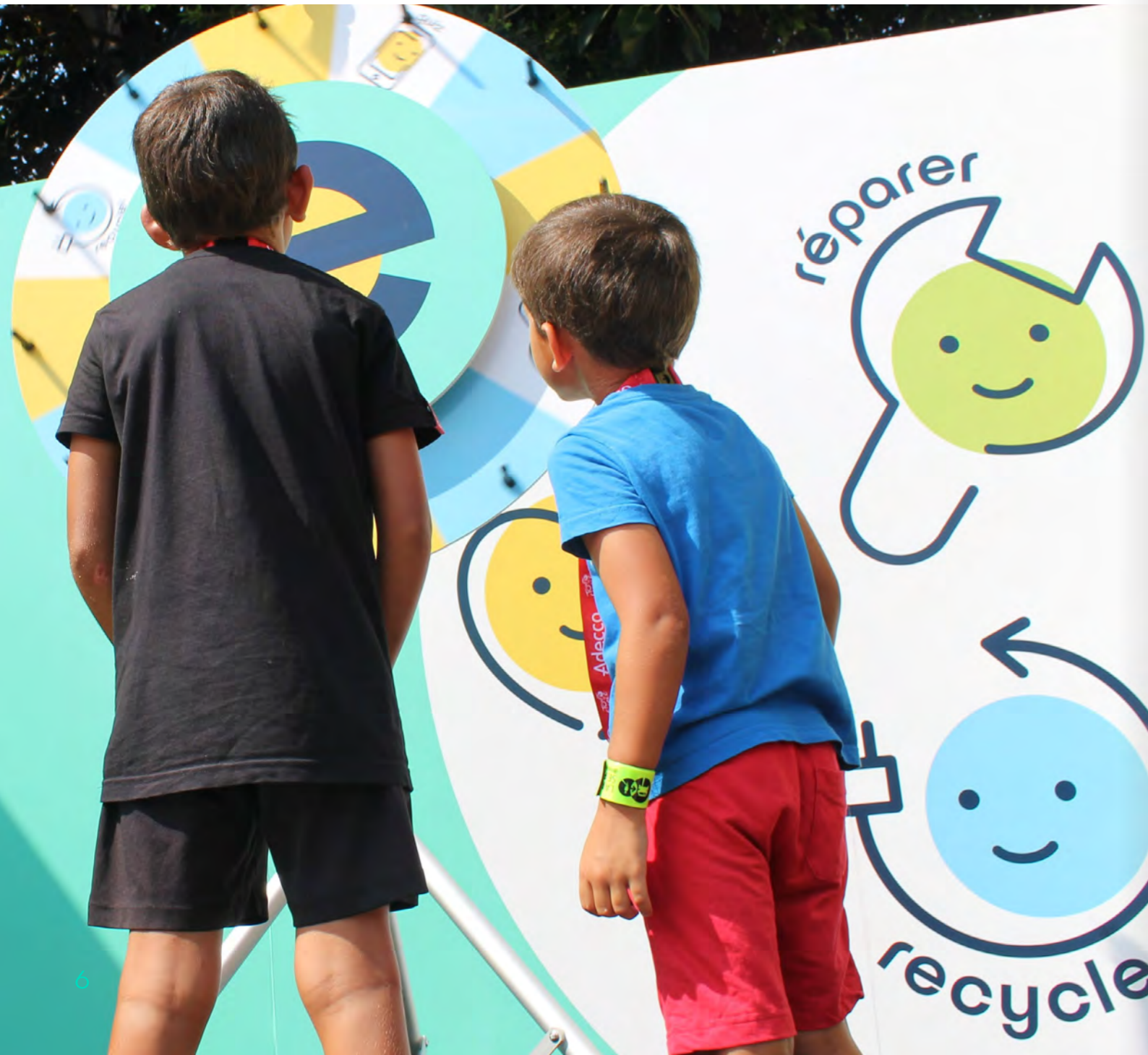
<sup>2</sup> Délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques, créée en 2022



## ecosystem

ecosystem est un éco-organisme, c'est-à-dire une entreprise à but non lucratif agréée par les pouvoirs publics. Il assure une mission d'intérêt général : prolonger la vie des équipements électriques et électroniques en fédérant l'ensemble des acteurs de la filière autour de la réparation, du réemploi

et du recyclage des DEEE. Créé en 2006, ecosystem est financé grâce à l'éco-participation collectée et reversée par ses adhérents, les producteurs des équipements électriques et électroniques.



## ECOSYSTEM EN CHIFFRES<sup>1</sup> :



PRÈS DE

**700 000**

TONNES DE DEEE MÉNAGERS ET PROFESSIONNELS COLLECTÉES CHAQUE ANNÉE



**148**

COLLABORATEURS



**518 000**

TONNES D'EQ. CO<sub>2</sub> ÉVITÉES

<sup>1</sup> à fin 2022





## Qui sommes-nous ?

Il y a 10 ans, ecosystem faisait le constat que les DEEE n'étaient pas de simples déchets, mais aussi des ressources. Riches en métaux, en plastiques et en verre, ils constituent de véritables mines urbaines.

Des gisements abondants répartis sur tout le territoire, qu'il faut apprendre à exploiter de manière efficace malgré leur composition complexe et variée et la présence de substances réglementées qui complexifient leur traitement.

C'est de ce constat et de la volonté de développer une économie circulaire pour ces équipements, plus respectueuse de l'environnement, qu'est née la Chaire Mines urbaines. Une chaire de recherche et d'enseignement fondée par ecosystem en partenariat avec trois grandes écoles : l'ENSAM (Arts et Métiers), Chimie ParisTech - PSL et Mines Paris - PSL.

## La Chaire Mines urbaines

La Chaire est dédiée à l'exploitation des mines urbaines que constitue le stock des équipements électriques et électroniques en cours d'utilisation et en fin de vie. Elle s'intéresse à la physique et la chimie des déchets, à leur collecte et traitement,

mais aussi aux aspects techniques et sociologiques de leur intégration dans une économie circulaire. Créée en 2014, elle est financée par son mécène ecosystem pour mettre en oeuvre des travaux de recherche et développement.

## LA CHAIRE MINES URBAINES EN CHIFFRES DEPUIS 2014 :



12

THÈSES DE RECHERCHE



11

POST-DOCTORATS



28

STAGES



2

BREVETS DÉPOSÉS



## Un guide pour explorer 10 ans et 2 saisons de recherche...

Ce guide rassemble une sélection de douze projets de recherche réalisés ces dernières années par les chercheurs de la Chaire Mines urbaines. Il donne une vue d'ensemble, bien que non exhaustive, du travail effectué durant ces deux premières saisons de cinq années, à travers trois axes de recherche prioritaires.

### 1. Le recyclage des métaux stratégiques

- Développement de procédés d'extraction de métaux critiques
- Recensement de toutes les technologies d'extraction connues

### 2. Le recyclage des plastiques

- Méthodes de tri des plastiques issus de DEEE
- Étude de la compatibilité des polymères et composites en mélange
- Connaissances des mécanismes de dégradation des polymères

### 3. L'économie circulaire

- Étude des critères incitatifs et des freins à l'utilisation des matériaux recyclés
- Nouveaux modèles économiques pour les entreprises autour de l'économie circulaire



## ... et marquer l'ouverture d'une troisième saison !

À partir de 2024, une troisième saison s'ouvre pour la Chaire Mines urbaines. À cette occasion, une nouvelle thématique autour de la deuxième vie des matières issues des appareils électriques et électroniques vient enrichir ses axes de recherches.

### 4. La deuxième vie des matières

- Démantèlement et robotisation
- Réutilisation et boucles circulaires
- L'intelligence artificielle pour transformer les modes d'analyse et de tri des déchets...

Fabricants, distributeurs, recycleurs, élus, ces sujets vous intéressent ? Découvrez dans ces pages la synthèse d'une douzaine de projets menés par nos chercheurs. N'hésitez pas à nous contacter (les modalités pour nous contacter sont indiquées en page 47 à la fin de ce book.) pour nous présenter vos problématiques et nourrir nos axes de recherches.





**Travaux de recherche de  
la Chaire : miscellanées**

# Transformation d'écosystème en entreprise à mission

**HANNA CISARUK**  
Mines Paris - PSL – Stage



## L'enjeu

**La protection des valeurs et de la mission d'écosystème dans le temps**

En 2019, la loi PACTE définit la qualité d'entreprise à mission. Ce projet de loi est d'ailleurs issu de travaux de chercheurs de l'école des Mines de Paris.

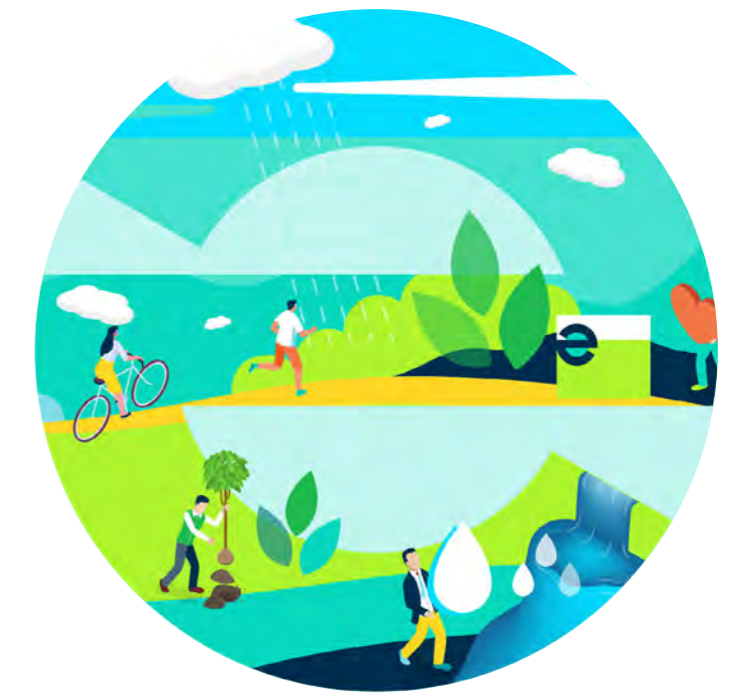
Alors, pourquoi transformer écosystème en entreprise à mission ? L'intérêt principal de ce statut est qu'il protège la mission profonde de l'entreprise. écosystème est un organisme agréé par l'État, dont l'agrément est renouvelé tous les six ans par les pouvoirs publics. En inscrivant ses engagements et sa mission dans ses statuts, nous maintenons une continuité au-delà des contingences de la vie politique.

## La recherche et les résultats

**Comment écrire ces engagements ?**

L'objectif est de déterminer une mission pérenne et personnelle, sans indicateur chiffré ni objectif court terme, tout en restant précis et en évitant l'écueil du slogan de communication. Cinq engagements ont ainsi été définis :

- **1. Lutter contre l'épuisement des ressources fossiles et minérales**, en développant la collecte et en contribuant au développement de nouveaux procédés industriels pour produire des matières recyclées de qualité conformes aux exigences d'une nouvelle fabrication
- **2. Protéger l'environnement et la santé de tous** en éliminant les substances polluantes ou dangereuses, et en réduisant l'empreinte environnementale de notre activité opérationnelle



- **3. Contribuer à allonger la durée de vie des appareils** par la prévention, en particulier la réparation et le réemploi, et en incitant les producteurs à une éco-conception orientée vers la durabilité
- **4. Contribuer au développement d'emplois et de compétences nouvelles dans les métiers de la filière**, et accompagner les efforts d'insertion professionnelle de l'économie sociale et solidaire
- **5. Accélérer les changements de comportement des citoyens** - dans leur vie privée ou leur sphère d'action professionnelle - en faveur de pratiques de consommation, de production et de gestion plus éco-responsables

## La suite

**Un guide pour aider les structures à mener leur transformation**

Au-delà de la transformation d'écosystème, il s'agissait aussi d'explorer la qualité d'entreprise à mission via des audits au sein d'autres structures. Quel est l'intérêt de ce statut ? Comment devient-on une entreprise à mission ? Quelles sont les obligations associées ? Comment engage-t-on les parties prenantes dans un processus de transformation ?

Ce travail a vocation à servir de guide et de retour d'expérience pour les autres structures, afin de les aider à définir leur mission.



## Publication d'un guide de l'économie circulaire transdisciplinaire

**FRANCK AGGERI, HELEN MICHEAUX, RÉMI BEULQUE**  
Mines Paris – PSL –  
Enseignant et post-doctorants



### L'enjeu

**Quelles sont les clés pour mettre en place un projet d'économie circulaire ?**

Que sait-on de l'économie circulaire ? D'où vient-elle ? Comment la définir ? De la fondation Ellen MacArthur à la Commission européenne, de nombreux acteurs du public, du privé, de l'économie sociale et solidaire, des entrepreneurs et des associations se sont appropriés cette notion. Ils ne sont pour autant pas parvenus à un consensus sur une définition, ni sur la marche à suivre pour mettre en place une économie circulaire.

### La recherche

**« D'une circularité faible à une circularité forte »**

**Aujourd'hui, la plupart des entreprises ont adopté un modèle de circularité faible.** Elles conservent le modèle existant et intègrent uniquement à la marge la circularité. Cette logique n'est pas soutenable à long terme car bien souvent insuffisante.

**Second point, la circularité infinie n'est pas réaliste pour plusieurs raisons.** D'une part, il est impossible de récupérer et valoriser 100 % des déchets, encore moins sans dépense finale importante d'énergie. D'autre part, dans une économie en croissance, le volume d'hier même recyclé à 100 % ne couvre pas les besoins d'aujourd'hui.

**Que nous reste-t-il ? Influencer sur la demande pour aller vers une circularité forte,** c'est-à-dire axer la circularité sur l'éco-conception et la durabilité des produits ou des infrastructures. La croissance ne repose plus sur la production de nouveaux biens, mais sur l'intensification de leur usage et la vente de services annexes comme par exemple un service après-vente, un service de réparation en cas de panne, etc..



### LA RÉPARATION, UNE APPLICATION DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE MISE EN ŒUVRE PAR LA LOI AGEC

### Les résultats

**Un « Que sais-je » qui s'adresse à quiconque souhaite mettre en place une démarche d'économie circulaire, tous secteurs confondus**

Le résultat de ces recherches prend la forme d'un livret de 120 pages de la collection « Que sais-je », un format hybride entre le livre de recherche et le manuel pratique. Il est disponible en librairie pour toutes les personnes intéressées par la démarche, quel que soit leur secteur d'activité.

### La suite

**La formation pour transformer et accélérer le changement**

Pour accélérer le changement, nous avons également développé des formations qui reprennent les axes de réflexion et les conclusions du livre :

- dans le cadre d'un Master spécialisé aux Mines Paris sur l'Ingénierie et la gestion de l'environnement
- via un cursus de formation continue sur l'économie circulaire pour les professionnels de toutes les filières (banque, assurances, immobilier, industrie...) associant des enseignants de l'école des Mines de Paris et de l'université de Paris Dauphine, le certificat « Economie Circulaire » Mines Paris – PSL Executive education

# De l'éco-conception aux éco-innovations circulaires

**CHLOÉ STEUX**  
Mines Paris PSL – Doctorat



## L'enjeu

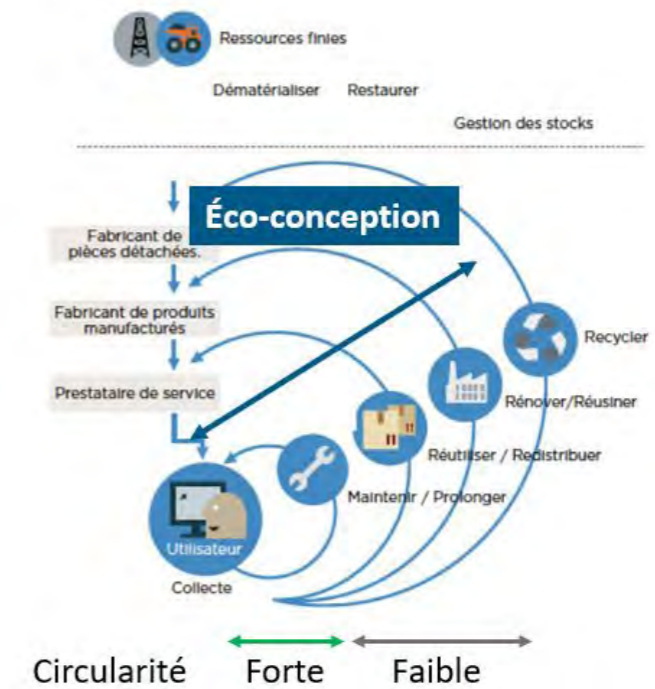
**Pourquoi l'adoption de l'éco-conception tarde tant ?**

L'éco-conception est largement prônée depuis les années 1990, avec une première vague de réglementations ou d'études analysant ses potentiels avantages économiques pour les entreprises. Dans le secteur des équipements électriques et électroniques, la directive Ecodesign, par exemple, fixe des prérequis en matière d'écoconception pour certaines familles d'équipements électriques et électroniques. Pour autant, l'adoption de l'écoconception n'est pas encore un automatisme dans les entreprises. Pourquoi ?

## La recherche

**Qu'en disent les acteurs de la filière ?**

Pour mieux comprendre les difficultés d'adoption de l'éco-conception, nous avons mené près de cinquante entretiens auprès de producteurs et de distributeurs, d'ONG ou d'associations de consommateurs, mais aussi de l'ADEME et de plusieurs éco-organismes. Nous avons également observé chez un distributeur le développement d'une gamme de produits éco-conçus, et organisé des ateliers autour de la réparabilité et de la durabilité avec les adhérents d'écosystem.



## Les résultats

**Trois approches successives de l'éco-conception en trente ans**

Trois approches successives de l'éco-conception ont été identifiées :

- Des années 1990 jusqu'au début des années 2000, une approche techno-centrée domine. Elle repose sur des outils très poussés d'analyse du cycle de vie. Cette démarche robuste restait cependant confinée à la R&D et aux équipes d'ingénieurs
- Dans les années 2000 et 2010, l'éco-conception est davantage portée par des acteurs de la Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE) et du marketing. Divers sujets et promesses se mêlent, et se heurtent à l'écueil du greenwashing
- Ces dernières années, un cadre hybride émerge avec des outils et des méthodes plus faciles à appréhender pour les professionnels. Ils sont également déclinés sur des supports de communication simples, pour que les collaborateurs et les utilisateurs puissent s'approprier cette démarche

## La suite

**Est-on sur la bonne voie pour une adoption massive ?**

Des outils faciles à mettre en place continuent d'être développés : de la simple checklist au logiciel d'analyse de cycle de vie simplifié, utilisables par toutes les équipes impliquées dans le développement d'un produit.

À l'échelle nationale, des initiatives intéressantes sont en cours, comme l'indice de réparabilité en France, devant donner lieu à un indice de durabilité obligatoire sur certains équipements électriques et électroniques. Il peut être vu par les fabricants comme une manière de guider l'éco-conception pour améliorer la réparabilité des équipements, en même temps qu'une aide à la consommation responsable pour le client.



# Proposition d'une démarche d'éco-conception des équipements électriques et électroniques centrée sur l'intégration de plastiques recyclés issus de DEEE

NICOLAS NEVE  
ENSAM – Thèse



## L'enjeu

Pourquoi les plastiques issus de DEEE ne peuvent pas tous être recyclés ?

Si tous les fabricants d'équipements électriques et électroniques décidaient demain d'intégrer davantage de plastiques recyclés dans leurs produits, ils ne le pourraient pas. Comparativement à d'autres filières de traitement des déchets, le stock de plastiques issus des DEEE est relativement faible, et leur recyclage est complexe car :

- certains plastiques de DEEE contiennent des substances freinant leur régénération (retardateurs de flammes bromés, par exemple)
- chaque régénérateur de plastique peut proposer sa propre formule chimique des plastiques, amenant à des propriétés des plastiques recyclés qui peuvent varier d'un régénérateur à un autre
- entre plastique recyclé et matière vierge, la valeur économique du plastique ne justifie pas toujours des investissements dans le développement de ces procédés

Le but ultime de ce projet était donc d'identifier des lignes directrices d'éco-conception, afin que le plastique introduit en entrée de chaîne soit compatible avec un processus de recyclage plus optimal par la suite.

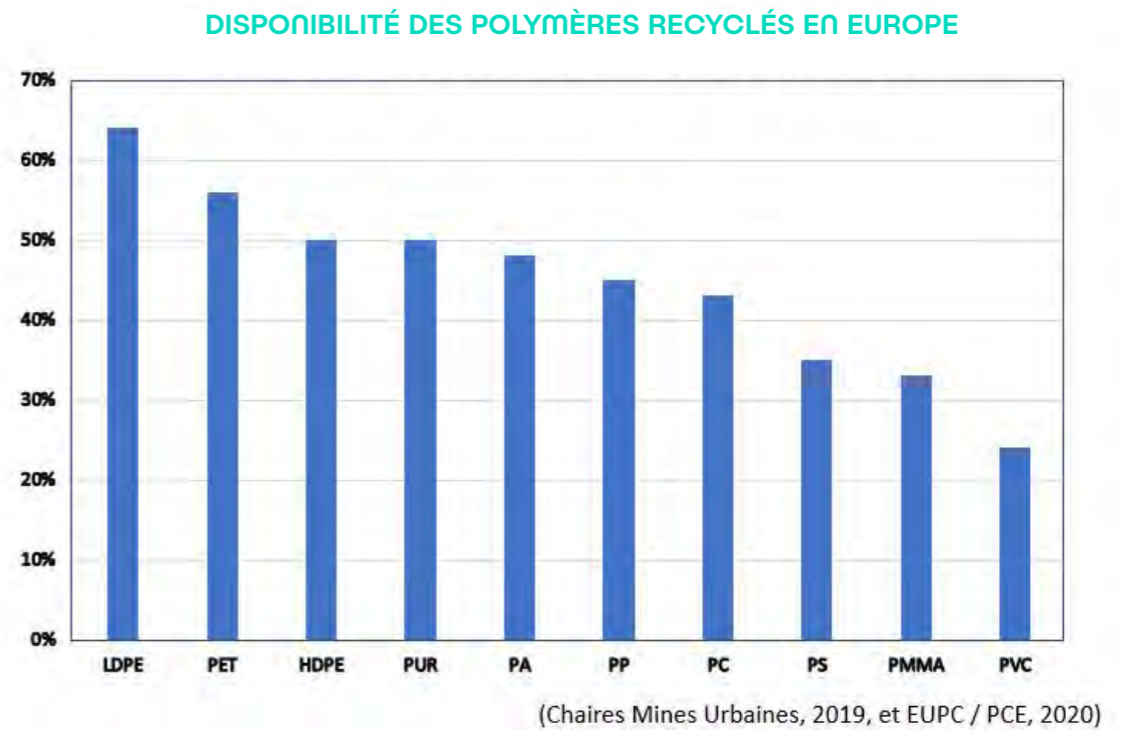
## La recherche et les résultats

Quelle méthode d'éco-conception peut-on recommander aux fabricants ?

Nous avons pu définir une méthode d'éco-conception qui repose sur trois lignes directrices :

- un choix des matériaux qui se base sur les meilleures techniques de recyclage disponibles
- une architecture adaptée au démantèlement en fin de vie qui prend en compte les liaisons entre les pièces et les différents matériaux (privilégiant le vissage au collage par exemple)
- un produit pensé pour être traité par les meilleures pratiques de recyclage industrielles d'aujourd'hui

Ces lignes directrices sont déclinées dans une matrice qui a pour vocation d'être utilisée par les concepteurs, même sans expertise des composés plastiques.

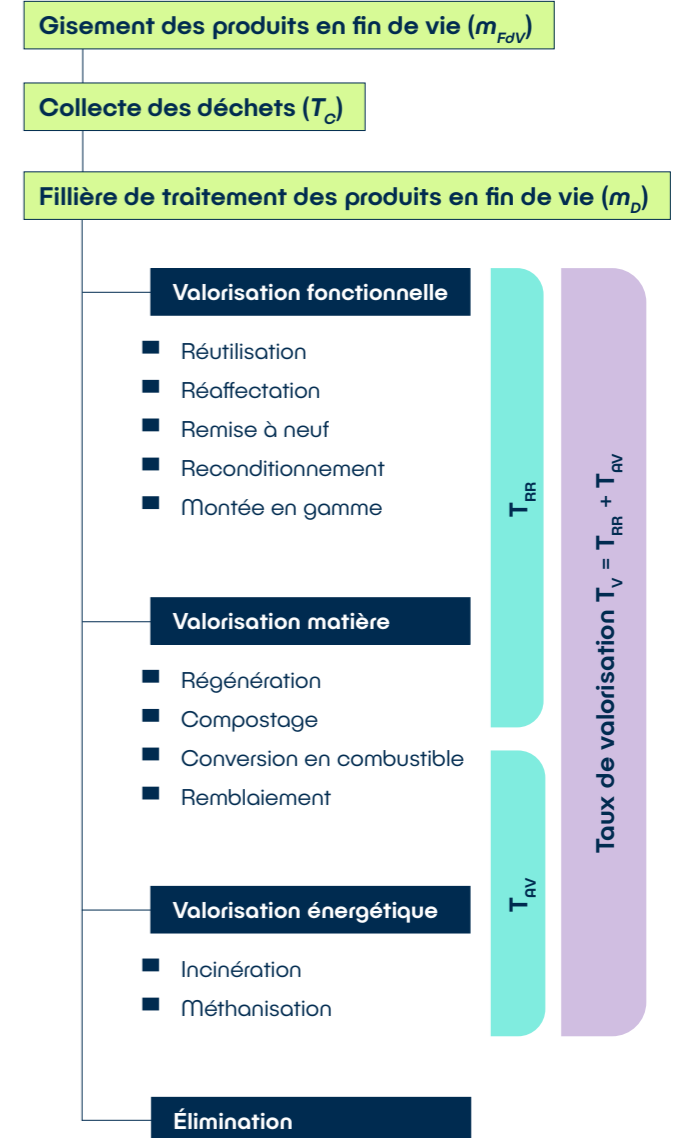


## La suite

La promotion de matières plastiques recyclées largement sous-cotée

Un sondage et une investigation plus avancée auprès des fabricants mettent en évidence une moindre connaissance des caractéristiques physico-chimiques des plastiques recyclés comparativement aux caractéristiques des plastiques vierges.

Nous avons donc créé des fiches techniques types spécialement conçues pour ces matériaux et leurs propriétés. L'idée est de fournir aux fabricants une grille de sélection de leurs plastiques recyclés, compilant les paramètres techniques indispensables à connaître pour le producteur de l'équipement. Cette grille doit aider les fabricants à se poser les bonnes questions sur sa matière lorsqu'il démarre un projet d'intégration de plastiques recyclés !



# Nanostructuration de mélanges de PC/ABS appliquée au recyclage des polymères issus des DEEE

**XAVIER MACKRÉ**  
ENSAM – Thèse



## L'enjeu

**Peut-on améliorer les propriétés des plastiques recyclés pour les rendre plus compétitifs ?**

Les plastiques vieillissent avec le temps. Leurs propriétés, comme la capacité à s'étirer ou la résistance aux chocs, peuvent s'altérer et les rendre impropres au recyclage.

L'idée de ce projet était de combiner un plastique vieilli et dégradé en laboratoire, à un autre plastique pour identifier l'impact de ce mélange sur son comportement. Cette combinaison est réalisée par coextrusion multinanocouches<sup>1</sup>.

## La recherche

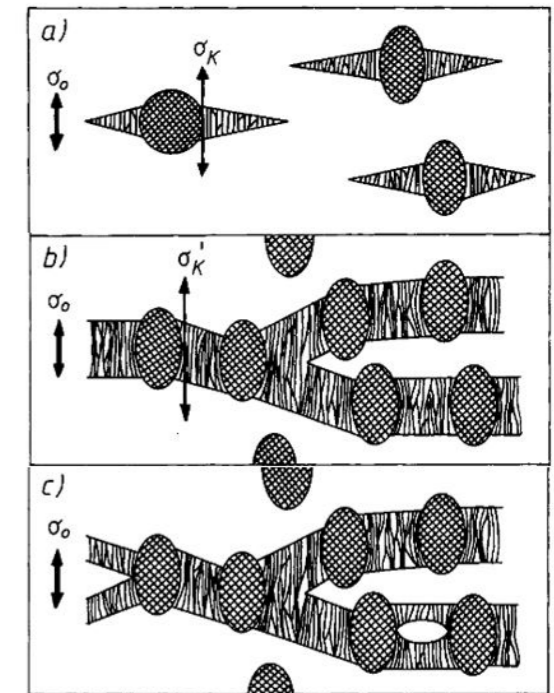
**Pourquoi associe-t-on l'ABS et le PC ?**

Pour ce projet, nous avons choisi d'associer deux types de plastiques, l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) au polycarbonate (PC).

- **L'ABS est très présent dans les DEEE. Il constitue 25 à 35 % du volume des DEEE. Il est par exemple utilisé pour la coque des ordinateurs ou le cadre des télévisions**
- **Le polycarbonate est moins présent (4 à 5 % de la masse moyenne des DEEE) mais il offre des caractéristiques avantageuses une fois combiné au styrène-acrylonitrile (SAN), un plastique proche de l'ABS**

Nous avons donc testé les propriétés mécaniques du couple PC/ABS en utilisant des plastiques vierges. Puis nous avons réalisé ces mêmes tests en utilisant un ABS vieilli en laboratoire pour simuler la qualité d'un plastique issu du recyclage de déchets.

## MÉCANISMES D'ENDOMMAGEMENT DE L'ABS ET DES COUCHES D'ABS



## Les résultats

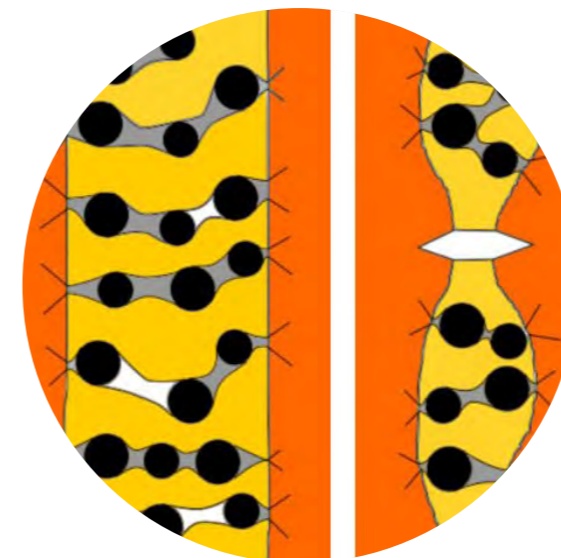
**La dégradation de l'ABS n'a pas d'impact sur la qualité du plastique final**

Le comportement du mélange PC/ABS est similaire, que l'on utilise un ABS vierge ou vieilli. Associé au PC, l'ABS issu des déchets pourrait donc potentiellement être utilisé pour créer un plastique de qualité, sans en altérer les propriétés.

## La suite

**Pas d'industrialisation envisageable sans rationnel économique**

Si ces conclusions sont encourageantes, elles ne justifient pas pour autant l'industrialisation d'un tel procédé. En effet, l'ABS vieilli n'apporte pas de propriétés supplémentaires. Il reste donc à déterminer s'il est intéressant d'un point de vue économique, environnemental et énergétique de récupérer l'ABS issu des DEEE plutôt que d'utiliser un ABS vierge.



<sup>1</sup> La coextrusion est un procédé largement utilisé dans l'industrie qui consiste à combiner avantageusement les propriétés de plusieurs polymères en les associant sous forme de couches superposées



# Dégradabilité des plastiques de DEEE en vue de leur tri post-broyage

**CLÉMENT FREYMOND**

ENSAM – Post-doctorat / Interview réalisée auprès de Bruno Fayolle, enseignant-chercheur à l'ENSAM – Expert polymères et encadrant de Clément Freymond



## L'enjeu

**Comment savoir si un plastique est trop dégradé pour être recyclé ?**

L'objectif de ce projet était de déterminer un critère, le plus simple possible, pour évaluer le degré de dégradation des plastiques dans le flux des DEEE arrivant au recyclage.

Après le broyage, les opérateurs du recyclage ont besoin de savoir rapidement si un plastique peut être réutilisé et donc envoyé vers la filière de recyclage, ou bien si ses propriétés sont trop altérées pour envisager une seconde vie.

## La recherche et les résultats

**La fluidité du plastique comme critère ultime**

Pour ce travail, ecosystem a fourni différents plastiques issus de ses stocks de déchets. Les missions de recherches ont alors suivi plusieurs étapes.

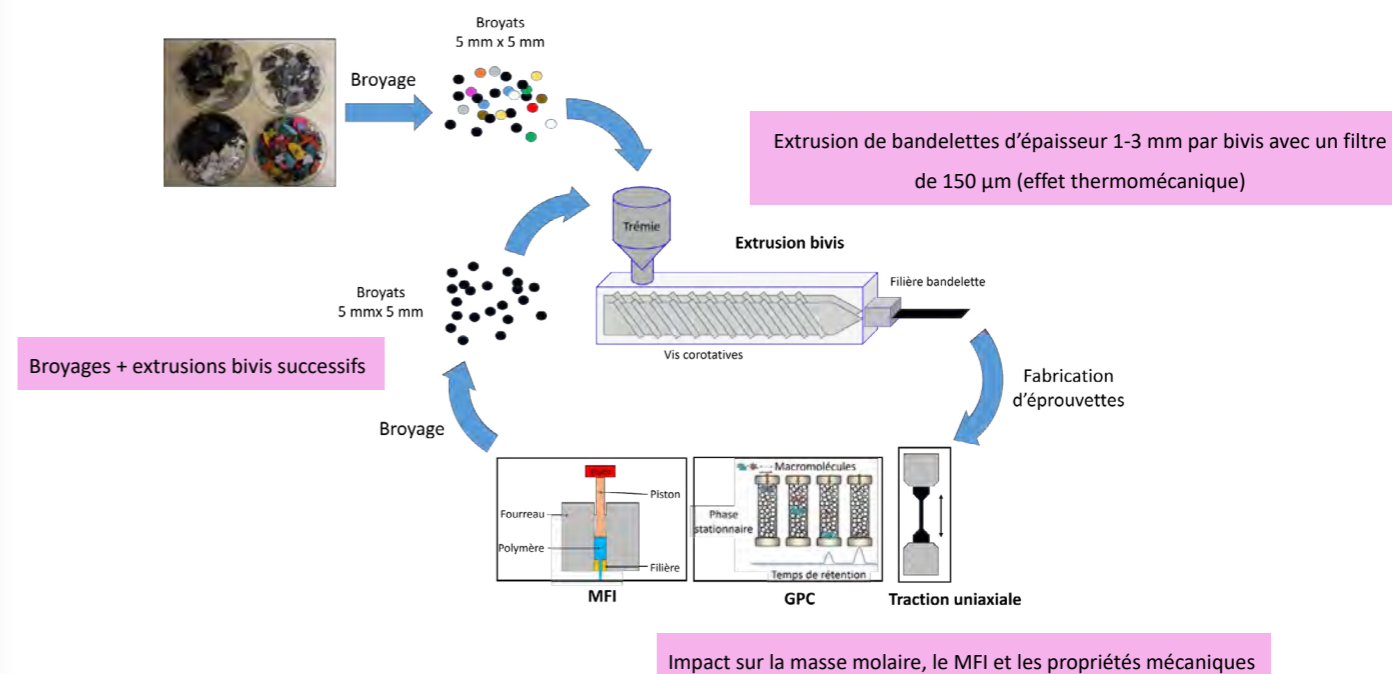
- L'identification des plastiques présents dans les lots de déchets
- La compréhension du niveau de dégradation de ces plastiques, en comparaison de plastiques vierges
- La définition d'un unique critère pour déterminer ce degré de dégradation

Chaque plastique a été chauffé pour mesurer sa fluidité et l'indicateur associé, son Melt Flow Index (MFI). Plus un plastique est dégradé, plus sa fluidité augmente. Les MFI mesurés ont ensuite été comparés avec ceux de la matière vierge.

Une valeur critique a pu être déterminée au-delà de laquelle les propriétés d'un matériau sont trop détériorées pour envisager la réintégration dans un produit neuf.

## DÉGRADATION DES MÉLANGES

Dégradation des mélanges par extrusions bivis multiples pour identifier les critères de fin de vie →  $M'_c$



## La suite

**Des publications et un guide à l'usage des recycleurs**

Ces travaux ont donné lieu à deux publications scientifiques. Ils ont aussi été exploités dans le cadre d'un guide pour les recycleurs développé par un autre chercheur de la Chaire, Nicolas Neve. Le MFI seuil de chaque plastique y est communiqué.

A l'avenir, les opérateurs du recyclage pourront eux-mêmes mesurer la dégradation de leurs déchets plastiques, et prendre la bonne décision quant à leur recyclage.



# Caractérisation des déchets d'équipements électriques et électroniques

**ALEXIS BARTHET**  
Mines Paris - PSL – Doctorat



## L'enjeu

**Quel est le bon prix de vente pour un lot de cartes électroniques ?**

Ce travail vise à mieux connaître les cartes électroniques afin d'établir des prix de vente justes entre les différents acteurs de la chaîne. Aujourd'hui, la valeur d'un lot est déterminée par des analyses "simples". Une mesure plus fine contribuerait donc à améliorer la confiance et la rigueur au sein de la filière.

Dans un second temps, cette évaluation des déchets permettrait aussi de mieux connaître les matériaux présents dans un lot et de choisir le traitement optimal pour les valoriser.

## La recherche

**Comment les acteurs de la filière peuvent-ils évaluer précisément la teneur et la qualité d'un lot ?**

Les techniques d'échantillonnage actuelles permettent déjà d'estimer la teneur en métal d'un lot de cartes électroniques par exemple, mais pas de quantifier l'incertitude autour de cette valeur prédite. L'objectif de la thèse était donc d'évaluer cette « marge d'erreur ».

Ces travaux se sont appuyés sur deux cas d'étude : les cartes électroniques et les téléphones portables broyés. Pour cela près de 5 000 fragments contenus dans deux lots distincts ont vu leurs caractéristiques granulométriques mesurées (masse, densité, volume, longueur, largeur, image photographique), suivies de près de 3 000 mesures de teneur pour obtenir les caractéristiques chimiques.

## EXTRAIT DE LA BASE DE DONNÉES CRÉÉE



## Les résultats

**Un modèle pour connaître la « marge d'erreur » sur la composition estimée en matériaux d'un lot**

Les informations collectées ont permis de calculer l'erreur fondamentale d'échantillonnage à l'aide de deux modèles initialement développés pour des applications minières par le chercheur Pierre Gy. L'erreur totale mesurée correspondant à l'erreur fondamentale prédite avec les données recueillies, cette dernière domine bien les autres types d'erreur, nous avons ainsi pu vérifier que le modèle était exploitable pour les DEEE.

## La suite

**Une formule alternative qui fonctionne pour tous les DEEE ?**

Comme dit précédemment les mesures ont été uniquement réalisées sur des cartes électroniques et des téléphones portables broyés. L'objectif final sera de proposer une formule simplifiée applicable à l'ensemble des DEEE.

Un travail de passerelle devra ensuite être fait pour passer de la recherche fondamentale aux besoins métiers des industriels du recyclage et des éco-organismes.



**COLLECTE DE DONNÉES : TAMISAGE**



# Inventaire des technologies de recyclage des métaux critiques à travers le monde

## MAXIME BALVA

Chimie ParisTech – Post-doctorat / Interview réalisée auprès de Vincent Semetey, enseignant Chercheur à Chimie ParisTech, responsable de la Chaire Mines urbaines, encadrant de Maxime Balva



### L'enjeu

**Quelles sont les technologies à potentiel pour recycler des métaux critiques ?**

Chaque année les chercheurs du monde entier développent de nouvelles technologies d'extraction, de récupération et de recyclage pour ces matériaux. Plusieurs sont d'ailleurs présentées dans ce book ! L'objectif de cette recherche était donc de créer un référentiel présentant toutes ces technologies : un panorama mondial du recyclage des métaux critiques, qui donnerait à voir les technologies les plus investiguées et celles à fort potentiel.

### La recherche

**Où se trouvent ces technologies et comment les identifie-t-on ?**

Nous avons pu accéder à l'ensemble des technologies ayant déjà fait l'objet de publications scientifiques. Pour les travaux encore non publiés, nous nous sommes renseignés auprès des agences de financement.

Le panorama est alors quasi-exhaustif : seules quelques technologies développées en interne par des industriels et non publiées restent sous le radar.

### Les résultats

**Un référentiel pédagogique pour l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et des idées neuves pour la Chaire**

En 2022, notre inventaire a été remis à l'ADEME (co-financeur de cette recherche avec ecosystem) en mettant l'accent sur les technologies à potentiel sous un format pédagogique (contactez la Chaire pour y accéder. Les modalités de contact sont expliquées page 47).

L'intérêt pour la Chaire était aussi d'avoir une analyse critique pour identifier les technologies à mettre en avant dans le cadre de ses propres recherches et les technologies de performance plus limitée, notamment sur le plan environnemental.

### La suite

**Favoriser l'émulation entre scientifiques, avant de se tourner vers les industriels**

**Côté scientifique :** Les analyses tirées de cet inventaire et réalisées par la Chaire seront publiées dans des revues scientifiques. Elles permettront aux chercheurs de prendre de la hauteur sur leurs propres travaux.

**Côté industriel :** À court terme, on pourrait imaginer une version adaptée de l'inventaire pour les industriels par un guide très simple ou une cartographie des technologies par exemple.



# Conception d'un guide des technologies de tri des matières plastiques issues des DEEE

**DAMIEN BERNARD**  
ENSAM – Stage Master



## L'enjeu

**Pourquoi ce guide des technologies est-il utile ? Et à qui ?**

L'enjeu pour la filière est double : tendre vers un traitement efficace des DEEE contenant des plastiques et potentiellement dangereux, tout en générant d'importants volumes de « matières secondaires » qui pourront être utilisées dans de nouveaux produits.

L'idée était donc de concevoir un guide technique facile d'utilisation, afin qu'il devienne un outil d'aide à la décision destiné aux opérateurs de tri et de recyclage des plastiques.

## La recherche

**Comment peut-on identifier et répertorier ces technologies de tri ?**

Dans un premier temps, nous avons compilé un maximum d'informations via la littérature scientifique existante (articles, revues, thèses...) pour dresser un état de l'art de ce qui existe déjà et ce qui est en cours de recherche. Au total, 28 technologies ont été identifiées et étudiées.

Ce travail nous a permis de constituer une large base de données pour évaluer ces technologies au travers de 10 critères, comme les avantages et inconvénients de chaque technologie de tri, ses performances, etc.

## Les résultats

**Un outil exploitable et déjà disponible en ligne**

Nous avons ensuite pu filtrer ces résultats en gardant en tête l'objectif principal qui était d'offrir **une aide à la prise de décision aux opérateurs du recyclage**. Une fois passé ce filtre, on obtient un guide simplifié à destination des professionnels de la filière. Ce guide est désormais disponible **en téléchargement libre sur le site d'écosystem, rubrique professionnels**.

## La suite

**De nouvelles technologies s'intègrent constamment à cet outil**

Il y a constamment de nouvelles technologies en phase de recherche et la littérature scientifique ne couvre pas l'intégralité des informations pour chaque technologie.

Par exemple, la flottaison qui est une simple technologie reposant sur les différences de densité (tri densimétrique) est aujourd'hui beaucoup plus répandue que la LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy). Une technologie plus récente mais avec un fort potentiel.

Il faut donc continuer à faire vivre cet outil d'évaluation en y incorporant les dernières avancées scientifiques !





# Récupération du tantale issu des DEEE

## THOMAS DEGABRIEL

Chimie ParisTech - Post-doctorat / Interview réalisée auprès de Grégory Lefèvre, chercheur au CNRS et encadrant de Thomas Degabriel



### L'enjeu

**Le tantale, des conditions d'extraction extrêmement problématiques**

Le tantale est utilisé dans les condensateurs haute performance, et dans les superalliages pour les équipements exposés à des températures extrêmes. On le retrouve donc dans les équipements électriques et électroniques.

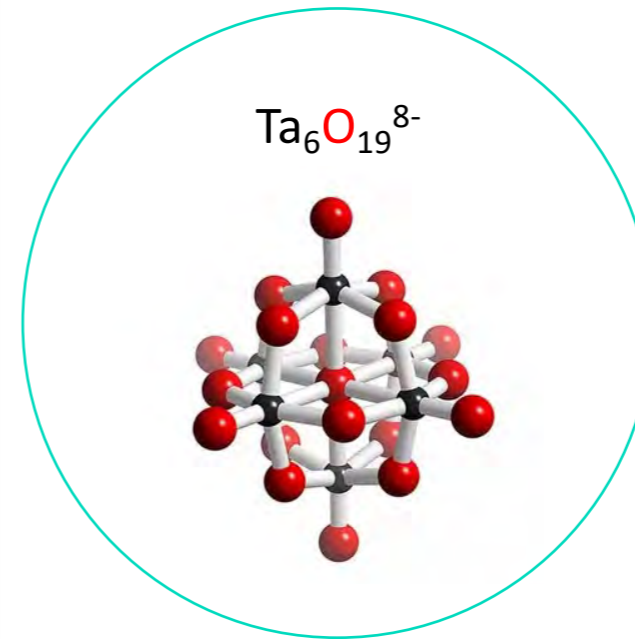
La première région productrice de tantale se situe en Afrique dans la région des Grands Lacs, entre la République démocratique du Congo et le Rwanda. Ses conditions d'extraction sont régulièrement dénoncées, notamment au niveau des conditions de travail, impliquant aussi des enfants. Ainsi, il est nécessaire d'étudier des sources d'approvisionnement alternatives.

### La recherche

**Le développement de procédés d'extraction sous contraintes pour limiter leur impact sur l'environnement et sur la santé**

Les procédés industriels pour l'extraction du tantale en tant que ressource primaire ont été conçus par l'industrie minière voici plusieurs décennies, dans un contexte environnemental totalement différent, et sont extrêmement impactants.

Nous avons pris le parti de développer de nouveaux procédés d'extraction du tantale contenu dans les DEEE en posant au préalable des contraintes en termes d'acidité, de pression et de températures pour réduire leur impact. Nous sommes donc partis d'une feuille quasiment blanche car il existait très peu de recherches sur ce thème.



STRUCTURE DU TANTALE DISSOUS APRÈS ATTAQUE DE L'OXYDE DE TANTALE

### Les résultats

**Un superalliage exploitable pour l'aéronautique**

La première étape, en partenariat avec le spécialiste du recyclage des déchets électroniques TND, nous a permis d'améliorer notre connaissance du gisement. En parallèle, nous avons travaillé sur le composé pur (l'oxyde de tantale) dont nous avons étudié la réactivité, et sur sa forme chimique après dissolution pour proposer une nouvelle approche pour l'extraire sélectivement en utilisant des réactifs non toxiques.

Nous avons ensuite continué nos travaux dans le cadre d'un projet ambitieux associant l'ONERA, le centre français de recherche aérospatiale. L'objectif ? Extraire le tantale des DEEE, le purifier et le soumettre à un traitement plasma afin de pouvoir l'utiliser dans l'élaboration d'un superalliage exploitable pour l'aéronautique.

### La suite

**Minimiser aussi l'impact environnemental de l'extraction primaire ?**

La suite, à court terme, est la poursuite de ce projet avec TND et l'ONERA, avec pour ambition de développer un procédé industrialisable capable de fournir le secteur aéronautique en tantale issu des DEEE.

À plus long terme, nous réfléchissons à la manière dont ce procédé testé sur les DEEE pourrait être appliqué à des minerais purs ou en mélange avec ces déchets. Il permettrait d'extraire le tantale, en tant que ressource primaire, avec un impact environnemental réduit par rapport aux procédés actuels.

# Recyclage des LED

**MOHEDDINE WEHBIE**  
Chimie ParisTech – Post-doctorat



## L'enjeu

**Récupérer les métaux précieux et critiques contenus dans les LED**

Moins consommatrice, sans mercure et plus durable, la technologie LED remplace progressivement les autres technologies d'éclairage.

Les lampes LED représentent des tonnages faibles et leur composition s'apparente aux autres déchets électriques appelés petits appareils en mélange (PAM). Dans ce contexte, la part infime de métaux précieux et critiques qui se trouvent exclusivement dans le composant électronique (puce LED) est difficilement valorisée : or, argent, cuivre, nickel ou luminophores<sup>1</sup>. Ces derniers, notamment, sont produits hors d'Europe et dopés avec des terres rares comme le cérium ou l'europium.

## La recherche

**Développer une méthode analytique pour identifier les métaux présents dans les puces LED et proposer un procédé de recyclage**

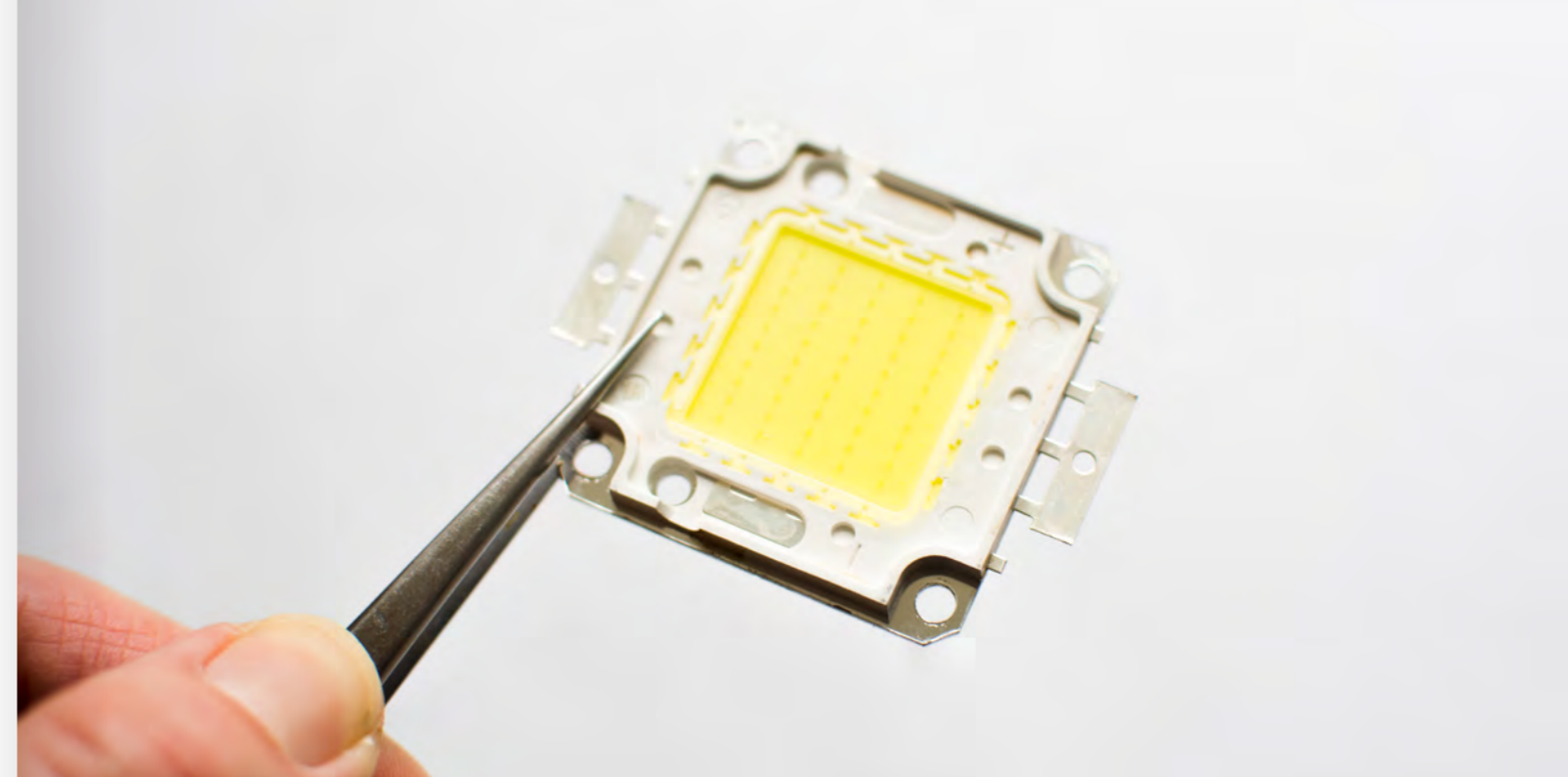
La première phase du projet s'est concentrée autour de la caractérisation des gisements de lampes LED, et de l'analyse des matériaux présents dans les puces LED qui varient suivant leur puissance, marque et génération.

La deuxième phase de la recherche a consisté à développer un procédé de recyclage visant à récupérer les métaux que les puces LED contiennent. Au cours de cette étape, nous avons rapidement réalisé qu'il était plus efficace de récupérer le luminophore pour le réutiliser plutôt que d'extraire les terres rares qui le composent. Nous avons alors mis au point un procédé chimique innovant qui permet de dépolymériser<sup>2</sup> le plastique contenant le luminophore, facilitant ainsi sa libération. Les corps métalliques ont ensuite été lixivés<sup>3</sup> et les métaux solubilisés ont été récupérés séquentiellement.

<sup>1</sup> Matériaux de type YAG (grenat d'yttrium et d'aluminium) dopés aux terres rares. Ils transforment la lumière bleue produite par la diode présente dans la LED en lumière du jour.

<sup>2</sup> Transformation d'un polymère en un composé chimique plus simple.

<sup>3</sup> Passage d'un liquide à travers une poudre pour en extraire les produits solubles.



## Les résultats

**Un brevet et une société en développement**

Aujourd'hui, le brevet pour ce procédé de récupération du luminophore a été déposé. Notre projet continue, et nous travaillons sur le passage à plus grande échelle, en développant des partenariats avec les acteurs de traitement et de recyclage de DEEE.

## La suite

**Quelle solution mécanique pour extraire les puces LED ?**

Dans le cadre de ces partenariats, nous cherchons à déterminer des procédés mécaniques pour isoler les puces LED dans la filière de recyclage. Notre procédé chimique ne peut intervenir qu'après ce tri, une fois la puce LED à disposition.



# Récupération de l'antimoine et du brome

**MORVAN GAUDIN**  
Chimie ParisTech – Doctorat



## L'enjeu

**La récupération de l'antimoine et du brome dans les DEEE**

Dans un plastique, l'ajout de molécules contenant du brome, associées à d'autres molécules contenant l'antimoine, permet l'atteinte d'excellentes propriétés de résistance à la prise au feu pour la matière plastique. On retrouve donc naturellement ces molécules dans les plastiques potentiellement exposés à de fortes chaleurs, ceux qui composent nos batteries électriques, nos écrans d'ordinateurs et nos gaines de câbles par exemple.

Il y a deux enjeux autour de la récupération des éléments de ces molécules. Pour l'antimoine, c'est la criticité de l'approvisionnement, cet élément étant très majoritairement produit en Russie, en Chine et au Kazakhstan. Pour le brome, il y a une problématique sanitaire et environnementale car les molécules qui le contiennent peuvent être classées parmi les Polluants Organiques Persistants (POP). Par ailleurs, l'incinération de plastiques contenant des retardateurs de flammes bromés va produire des dioxines qui nécessitent une captation sous contrôle.

## La recherche

**Comment extraire quand on ne peut pas chauffer un plastique ?**

En amont de ces travaux de recherche, nous nous sommes fixé deux contraintes.

- 1. Nous avons pris le parti de travailler avec des technologies déjà connues des industriels, pour faciliter une éventuelle industrialisation de nos procédés
- 2. Nous nous sommes tournés vers des procédés d'extraction qui limitent l'impact pour la santé et l'environnement, en évitant de chauffer les plastiques

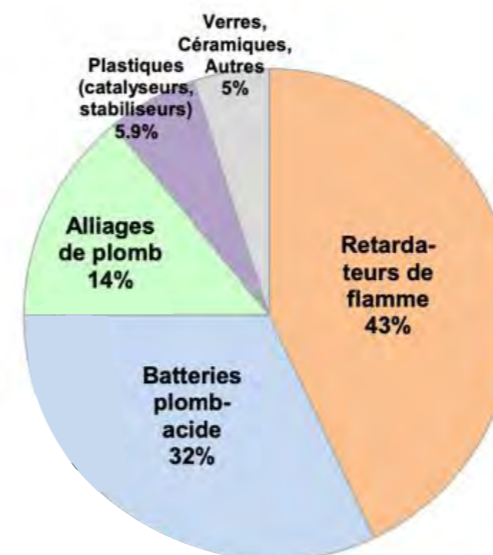
Nous ne pouvons pas non plus extraire le brome et l'antimoine par broyage, car la maille de libération impliquerait des moyens trop coûteux. Nous avons donc travaillé sur la solubilisation, avec une extraction liquide, pour séparer les molécules suivant leurs propriétés physico-chimiques.



## Les résultats

**Une preuve de concept sur les DEEE**

Après trois ans de thèse, nous parvenons à identifier, quantifier et extraire jusqu'à 98 % du brome et de l'antimoine dans les plastiques les plus courants de nos DEEE.



**RÉPARTITION DES USAGES DE L'ANTIMOINE EN EUROPE SUR 2012-2016**

## La suite

**Passer d'un kilogramme à une tonne de plastique ?**

Pour les prochaines étapes, l'objectif est de passer d'une preuve de concept sur les DEEE à un procédé industrialisable, et répliquable pour d'autres secteurs industriels avec de gros volumes de production (la construction, l'ameublement, l'automobile...).

On peut imaginer que notre procédé sera répliquable d'ici quelques années dans l'industrie. Techniquement, cela est possible. Il s'agit davantage d'une question de moyens et d'organisation que de technologie, qui implique que les trieurs intègrent le métier de chimiste. Des discussions sont en cours avec des industriels du secteur.







**ecosystem**  
recycler c'est protéger

CONTACTEZ-NOUS :  