



TRI DES PLASTIQUES ISSUS DES DEEE*

Quelle technologie choisir ?
28 fiches techniques
détaillées

ecosystem
recycler c'est protéger

en partenariat avec

 **Arts et Métiers**
Sciences et Technologies

**Chaire
Mines Urbaines**

SOMMAIRE

Glossaire	4
Introduction	5
Qui sommes-nous?	5
Pourquoi ce guide?	7
Comment ce guide a-t-il été conçu?	7
À qui s'adresse ce guide et que peut-il vous apporter?	8
Fiches de technologies	9
Index des fiches	9
Modèle de fiche décrypté	10
Fiches 1 à 28	11
Autres ressources utiles	39
Contacts	40





GLOSSAIRE

Définitions des mots signalés par * dans le document et des abréviations :

- **ABS** : Acrylonitrile Butadiène Styène.
- **ADEME** : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.
- **Adhérent ecosystem** : toute société établie en France qui met sur le marché français des équipements électriques et électroniques, lampes ou petits appareils extincteurs (société qui fabrique en France, importe, distribue sous sa propre marque et/ou vend à distance à des utilisateurs français).
- **DEEE** : Déchet d'Équipement Électrique et Électronique.
- **EEE** : Équipement Électrique et Électronique.
- **Filière** : la filière à Responsabilité Élargie des Producteurs de DEEE est un dispositif d'organisation de la prévention et de la gestion des déchets d'EEE, qui regroupe les activités liées à la collecte, au traitement et à la valorisation des déchets (il existe 12 filières comme celle-ci en France).
- **Flux de DEEE** : groupe de déchets dont la répartition est établie par les éco-organismes (un flux est lié aux consignes de tri données à la collecte et à la logistique associée à ce groupe de déchets).
- **FT-NIR** : Proche Infrarouge (Near InfraRed) à transformée de Fourier.
- **HDPE** : Polyéthylène haute densité.
- **HIPS** : Polystyrène à haut impact.
- **LDPE** : Polyéthylène basse densité.
- **PA** : Polyamide.
- **PBT** : Polytéraphalate de butylène.
- **PC** : Polycarbonate.
- **PE** : Polyéthylène.
- **PET** : Polytéraphalate d'éthylène.
- **Plastique bromé** : plastique contenant des « agents ignifuges bromés » aussi appelés « retardateurs de flamme bromés » (RFB).
- **PMMA** : Polyméthacrylate de méthyle.
- **POM** : Polyoxyméthylène.
- **PP** : Polypropylène.
- **PS** : Polystyrène.
- **PVC** : Polychlorure de vinyle.
- **Directive RoHS** (*Restriction of Hazardous Substances*) : Directive européenne qui vise à limiter l'utilisation de 10 substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (Directive 2017/2102/UE du 15 novembre 2017).
- **XRF** : Rayons X par fluorescence.
- **XRT** : Rayons X par transmission.



INTRODUCTION

ecosystem est un éco-organisme, c'est-à-dire une entreprise d'intérêt général à but non lucratif, agréée par les pouvoirs publics et financée grâce à l'éco-participation que nous reversent nos producteurs adhérents*.

Nous œuvrons à l'allongement de la durée de vie des Équipements Électriques et Électroniques (EEE) ménagers en soutenant la réparation et le réemploi. Nous assurons leur dépollution et leur recyclage quand ils sont devenus des déchets, ainsi que celui des EEE professionnels, des lampes et des petits extincteurs usagés. Nous fonctionnons sous le statut d'entreprise à mission avec comme raison d'être la protection de l'environnement, des ressources naturelles et de la santé.

Nous aidons également nos producteurs adhérents dans leur démarche d'éco-conception et d'approche responsable de la production, avec l'ambition à terme de pouvoir les accompagner pour allonger la durée de vie des EEE et améliorer leur réparabilité. Lorsqu'ils arrivent en fin de vie, notre rôle est d'organiser la collecte et d'orienter les différents flux* de DEEE vers les procédés de traitement adaptés. **L'objectif pour ecosystem est d'accompagner l'optimisation des procédés de tri** pour mettre à disposition des industriels des matières plastiques de qualité, exemptes de substances problématiques.



Chaire
Mines Urbaines

Pour accompagner tous ces projets d'amélioration et d'optimisation de la filière*, ecosystem a créé en 2014 la Chaire Mines Urbaines, une chaire de recherche en partenariat avec 3 écoles de la Fondation ParisTech: Mines Paris, Arts et métiers et Chimie Paris.

Nous travaillons ensemble pour :

- Optimiser les filières du recyclage;
- Définir de nouveaux modèles de recyclage;
- Développer de nouvelles matières recyclées, plus spécifiquement les métaux stratégiques et les plastiques;
- Créer des modules de formation pour promouvoir le recyclage et informer sur la responsabilité des producteurs auprès d'étudiants et de professionnels.

Ce guide a été réalisé dans le cadre de cette collaboration par **Damien Bernard**, étudiant Master chimie verte et éco-innovations en 2022 au laboratoire de l'ENSAM, que nous remercions chaleureusement pour son travail de recherche, agrégation et restitution des données.

L'ÉCO-CONCEPTION POUR UN MEILLEUR RECYCLAGE



POURQUOI CE GUIDE ?

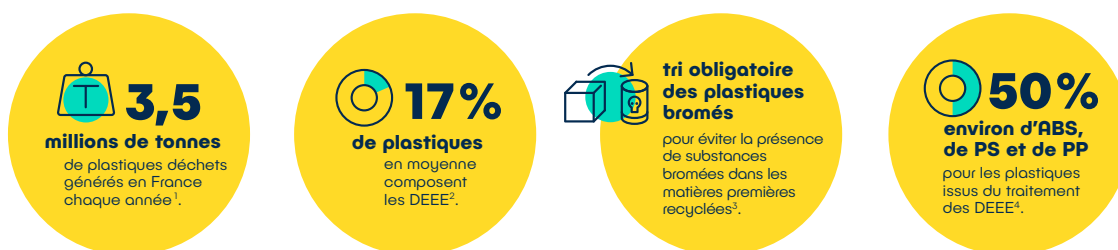


L'enjeu pour la filière est de disposer de solutions de tri adaptées aux spécificités de composition des plastiques de DEEE pour optimiser leur recyclage.

La forte hétérogénéité des plastiques, la proportion importante de plastiques sombres ainsi que la présence d'additifs règlementés (retardateurs de flamme bromés aujourd'hui interdits par exemple), impactent fortement les taux de recyclage des plastiques dans la filière DEEE, ne permettant pas d'atteindre un modèle efficient d'économie circulaire.

Pour répondre à ces enjeux de recyclage et après avoir constaté la difficulté à accéder à un état des lieux synthétique des différents procédés de tri des plastiques, nous avons souhaité élaborer un guide le plus exhaustif possible pour présenter les technologies de tri des plastiques issus des DEEE référencées à ce jour, et permettre leur comparaison.

Ce guide constitue un réel outil d'acquisition de connaissances et d'aide à la décision sur le sujet du tri des plastiques. Il recense 28 technologies, sous forme de fiches de format identique permettant de les comparer facilement (voir le modèle de fiche type en page 10). Le guide sera amené à évoluer au gré du développement de ces technologies.



Comment ce guide a-t-il été conçu ?

Ce guide est le résultat de 6 mois de travail, achevé en septembre 2022 :

- Une phase poussée de recherches bibliographiques, permettant de recenser puis d'agréger les données disponibles dans un tableau exhaustif.
- La réalisation d'un tableur de synthèse, ne gardant que les critères et données les plus pertinents.
- La création d'un modèle type de fiche « Technologie », décliné et complété pour chacune des 28 technologies identifiées.

¹Étude « Chaîne de valeur du recyclage des plastiques » ADEME, DGE, 2ACR - 2015.

²Données campagne de caractérisation **ecosystem** - 2021.

³Annexe VII de la Directive n° 2012/19/UE du 04/07/12 relative aux Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) ainsi que le Technical Specification TS 50625-3-1 qui accompagne la norme CEN 50625-1.

⁴Study on the Impacts of Brominated Flame Retardants on the Recycling of WEEE plastics in Europe. Sofies - 2020.



À QUI S'ADRESSE CE GUIDE ET QUE PEUT-IL VOUS APPORTER ?

> Vous travaillez dans un centre de tri ou de recyclage de déchets électriques et électroniques ou déchets plastiques ?

Ce guide vous offre une vision des technologies de tri des plastiques disponibles sur le marché, et met à votre disposition des critères comparatifs vous permettant d'identifier les technologies les plus adaptées selon vos besoins.

> Vous êtes un Producteur d'équipements électriques et électroniques (fabricant, importateur-revendeur, vendeur sous votre propre marque, vendeur à distance) ?

Ce guide vous permet de prendre connaissance des technologies disponibles permettant le tri des plastiques composant vos produits en fin de vie, et d'en évaluer la complexité. Vous pouvez ainsi prendre conscience des contraintes rencontrées afin d'en tenir compte lors de la conception de vos nouveaux produits, pour en faciliter le traitement et en améliorer le recyclage.

> Vous êtes intéressé par la problématique du tri des déchets plastiques ?

Ce guide vous offre une vision synthétique des technologies de tri des plastiques disponibles sur le marché.



INDEX

DES FICHES DE TECHNOLOGIE

Modèle de fiche décrypté	11
Fiches	12
1. Flottaison	12
2. Flottation sélective	13
3. Densité magnétique (MDS)	14
4. Hydrocyclone	15
5. Dissolution sélective	16
6. Solvolyse	17
7. Thermolyse (ou pyrolyse flash)	18
8. Fluide supercritique	19
9. Triboélectricité (ou tri électrostatique)	20
10. Induction pilotée (IND)	21
11. Analyse thermogravimétrique (ATG)	22
12. Calorimétrie différentielle (DSC)	23
13. Test à la brûlure	24
14. Spectrométrie FT-NIR	25
15. Spectrométrie MIR	26
16. Spectrométrie visible VIS	27
17. Combinaison Spectro NIR + VIS	28
18. Combinaison Spectro NIR + VIS + IND	29
19. Rayons X par fluorescence (XRF)	30
20. Rayons X par transmission (XRT)	31
21. Raman	32
22. Incorporation de traceurs dans les polymères	33
23. Ultrasons	34
24. LIBS	35
25. Reconnaissance de forme + IA	36
26. Spectroscopie Terahertz (THz)	37
27. Séparation aéraulique	38
28. Tables densimétriques	39

00 Nom du procédé de tri	
Famille	Famille de procédé (voie sèche, humide, optique...) et type de séparation
Type	Type d'analyse et de reconnaissance
Niveau de développement	Niveau de maturité de la technologie. Précision du TR: Technology Readiness Level ou niveau de maturité technologique
Description de la technologie	Présentation synthétique du procédé
Caractéristiques techniques	Rendement Degré de pureté du matériau ciblé en sortie de procédé
	Capacité Débit moyen du procédé
	Nature de l'entrant Cahier des charges requis pour la fraction entrant dans le procédé afin que le tri soit optimal
	Plastiques obtenus Typologie de plastiques qu'il est possible d'obtenir en sortie
Données environnementales	Impact environnemental du procédé
+ Forces	Avantages / Bénéfices de la technologie vis-à-vis du tri des plastiques de DEEE
- Faiblesses	Freins identifiés de la technologie vis-à-vis du tri des plastiques de DEEE

01 Flottaison

Famille	Voie humide, séparation densimétrique.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 9. Nouveaux Développement des milieux aqueux pour ne pas se limiter à l'eau pure et à sa limite de séparation à 1 g/cm ² de densité: NaCl, NaOH, MgSO ₄ , FeCl ₃ , etc. Développement des équipements de haute efficacité.	
Description de la technologie	Technique consistant à séparer les matériaux dans le bac de flottaison par différence de densité, dans un solvant de référence. Il est aussi possible de procéder par voie sèche, en utilisant des tables densimétriques: plaques vibrantes et inclinées, avec un système d'air par ventilateurs aspirant les matériaux les moins denses au centre et évacuant les plus denses aux extrémités de la plaque.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Le débit est compris entre 2,5 et 5 t/h pour les matières plastiques rigides. Entre 0,5 et 1 t/h pour les films.
	Nature de l'entrant	Différence de densité: > 0,2 g/cm ³ au minimum.
	Plastiques obtenus	Les fractions plastiques de densité < 1 sont récupérées en premier (PP, PE). Des racleurs récupèrent ces fractions flottantes. La fraction coulante passe dans un bain plus dense: tri des plastiques de densité comprise entre 1 et 1,1 (PS, ABS, PPtalc), puis entre 1,1 et 1,2, etc.
Données environnementales	Utilisation de réactifs chimiques minimisée (sels). Il faut malgré tout bien recycler le solvant et purifier.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Technique très simple et bien maîtrisée, séparant rapidement les résines de densités sensiblement différentes. • Permet de bien séparer les plastiques de densités différentes. • Bonne méthode pour contourner facilement les problèmes de plastiques sombres. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • N'est pas adaptée à une faible quantité d'échantillon. • Ne permet pas de séparer des résines plastiques de densités trop proches similaires ou égales (exemples: PET/PVC, PE/PP et ABS/PS). • L'addition de charges (talc, craie...) augmente la densité des plastiques, rendant la séparation densimétrique plus difficile. De même avec l'addition de noir de carbone. • Principalement limitée à des mélanges binaires. 	

02 Flottation sélective

Famille	Voie humide, séparation basée sur l'hydrophobicité.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 5-6. Nombreuses études. En développement pour les plastiques recyclés.	
Description de la technologie	Technique séparative qui repose sur les différences d'hydrophobicité/d'hydrophilie (on parle de « mouillabilité ») des matériaux. Par exemple, dans un mélange de deux polymères plastiques, on cherche à en rendre sélectivement un des deux hydrophiles pour pouvoir les séparer dans l'eau. Les plastiques vont alors se décanter à des vitesses différentes : on les récupère quasi-parfaitement homogènes, en sortie du bac de séparation. Pour jouer sur les propriétés d'hydrophobie, on introduit des bulles d'air dans la phase aqueuse : les particules hydrophobes seront entraînées à la surface du liquide avec les bulles.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Entre 90 % et 100 %.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Taille des particules >1 mm. Matériaux broyés. Surfaces propres. Taille des particules comprise entre 80 et 315 micromètres (thèse C. Le Guern). PET et PVC, PE et PP : plastiques de densité similaire.
	Plastiques obtenus	En majorité des plastiques de densité supérieure à l'eau : PS, PVC, PET, PC ou POM.
Données environnementales	Se déroule en phase aqueuse. La technique a donc l'avantage de s'intégrer aisément dans un cycle de plusieurs étapes de préparation, comme le broyage et le lavage en amont. Pas ou peu d'utilisation énergétique.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • En ajoutant une macromolécule organique (présence de cation bivalent, exemple Calcium) rendant spécifiquement un des polymères hydrophile, la séparation devient possible malgré des densités similaires (exemple PET, PVC). • Bonne méthode pour contourner les problèmes de plastiques sombres. • Technique de grande efficacité. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • N'est pas adaptée à une faible quantité d'échantillon. • Pré-tri obligatoire : ne convient pas aux mélanges hétérogènes. • En développement pour les plastiques recyclés. • Une étape de conditionnement est souvent nécessaire (pré-traitement chimique). 	

03 Densité magnétique (MDS)

Famille	Voie humide, séparation densimétrique.	
Type	Voie humide, Séparation densimétrique.	
Niveau de développement	TRL5-6. Technologie développée par la start-up UMINCORP et par l'université Eindhoven entre autres.	
Description de la technologie	Technique de séparation densimétrique fine utilisant la densité pour séparer les plastiques entre eux. Un liquide magnétique contenant de l'oxyde de fer est utilisé comme solvant. La densité de ce solvant peut être adaptée en utilisant différents champs magnétiques.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Polymères hétérogènes de densités différentes. Pas de donnée pour cette technique, mais sûrement proche de la valeur de la flottaison (différence de densité > 0,2 g/cm ³ au minimum).
	Plastiques obtenus	PE, PP, PVC, PET (polymères de densités différentes).
∅ Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Technique séparant rapidement et efficacement les résines de densités différentes. Permet de bien séparer les plastiques de densités différentes, en une seule étape. • Bonne méthode pour contourner facilement les problèmes de plastiques sombres. • La technique semble efficace pour la séparation du mélange PE/PP, malgré des densités similaires. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Les fractions hétérogènes de polymères présentant des densités trop similaires ne seront pas séparés. (Exception pour cette technique avec un mélange PP/PE, Serranti et al., 2015). 	

04 Hydrocyclone		
Famille	Voie humide, séparation densimétrique.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	Le déchet est emporté par un courant d'eau et rencontre un système de vortex (cyclone). Les matériaux de faible densité seront attirés au centre du cyclone. Ils finiront en haut du circuit, grâce à diaphragme. Les composés denses seront quant à eux à l'extérieur du cyclone et finiront en bas du montage.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Jusqu'à 99 % après plusieurs passages.
	Capacité	En fonction du dimensionnement de l'hydrocyclone, de la puissance de la pompe, etc. : le débit est compris entre 1,5 et 3,5 t/h, pour le PET/PVC. Entre 1,5 et 3,5 t/h pour le HDPE. Entre 0,8 et 1,8 t/h pour le LDPE.
	Nature de l'entrant	Taille de particule : >1 mm. Taille maximale : environ 8 mm. Résines de densités différentes.
	Plastiques obtenus	PE, PET, PP, PVC, HDPE, LDPE.
Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Haut taux de séparation (jusqu'à 99 % après plusieurs passages) des polymères de densité différente. • Meilleure séparabilité que la méthode densimétrique classique. • Obtention d'une pureté satisfaisante en répétant le passage du DEEE à l'hydrocyclone. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessité de répéter la technique plusieurs fois pour un même déchet. • Ne permet pas une bonne séparation des matériaux de densités similaires. 	

05 Dissolution sélective		
Famille	Voie humide, séparation par solvataion.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	Nombreuses études et développements industriels en cours (APK, Purecycle Technologies) voire en fonctionnement (PolyStyreneLOOP).	
Description de la technologie	Solubilisation des polymères dans différents solvants. La solubilisation de chaque polymère dépend en premier lieu de sa structure chimique et de sa masse molaire (donc des monomères analysés et de leur nombre de répétition dans le polymère).	
Caractéristiques techniques	Rendement	Taux de récupération du RFB : 70 %. Grand rendement d'ABS recyclé avec l'acétone comme solvant.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Résines de solubilités différentes. Résines composées de plusieurs monomères différents.
	Plastiques obtenus	PE, PP, PS, HIPS, ABS, ABS/PC, PMMA, PVC, PET, PBT, PC, PA.
∅ Données environnementales	Faible consommation énergétique. Utilise néanmoins certains solvants chimiques toxiques et/ou dangereux pour l'environnement, tels que le toluène, l'acide formique, le chloroéthylène. On inclue une étape de recyclage supplémentaire pour recycler le ou les solvant(s).	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Solution investiguée pour les flux de plastiques bromés. Extraction d'additifs : additifs interdits, colorants et encres, charges et fibres. • Simple à utiliser et peut séparer efficacement les polymères solubles des non solubles dans le solvant utilisé. • Convient à pratiquement toutes les résines thermoplastiques. • Convient aux plastiques en mélange. • Technique désodorisante. • Technique qui ne détruit pas la chaîne polymère. L'ABS se dissout bien dans l'acétone, contrairement au reste des matériaux. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Donne de meilleurs rendements que dans le cas de l'exemple du CO₂ (SC), mais ici, on recontamine probablement la résine avec les solvants utilisés. Ce qui n'est pas le cas lors de l'utilisation de CO₂ (SC), qui perd ses propriétés solvatrices lors du refroidissement et de la dépressurisation (retour en phase liquide). • Prend du temps (étape d'évaporation du solvant et de purification sûrement par recristallisation). • Ne permet pas de traiter les résines thermodurcissables. • Questionnement sur la conformité au contact alimentaire, et sur la totale élimination des substances. • Réduction de la masse du volume en vrac. 	

06 Solvolyse

Famille	Voie humide, séparation par solvolyse.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	Solvo = solvant, lyse = coupure. On coupe donc les liaisons des polymères (dépolymérisation) grâce à l'utilisation de solvants. Eau > HYDROlyse, Alcool > ALCOOlyse, Amine > AMINOlyse.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Flux entrants déjà purifiés en amont. Résines composées de plusieurs monomères différents.
	Plastiques obtenus	Solvolyse classique : PET, PBT, PC, PUR, PA. Hydrolyse acide : POM. Solvolyse supercritique : PE, PP, PS, HIPS, ABS, ABS/PC, PMMA, PVC.
Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • S'applique bien aux polymères : PET, PA, PC, PUR. • Adaptée aux polymères de polycondensation. • Permet d'obtenir des monomères de manière sélective. • Peu de questionnement sur la conformité au contact alimentaire. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Dépolymérisation chimique non adaptée aux flux de plastiques bromés. • Nécessite une grande pureté des flux entrants. • 2 étapes supplémentaires obligatoires : purification des monomères formés, repolymérisation des monomères formés. • Phase supercritique obligatoire pour le traitement des résines de poly-additions (polyoléfines, PS, et PMMA). • Principalement limitée aux polymères de condensation. 	

07 Thermolyse (ou pyrolyse flash)

Famille	Voie sèche, analyse par pyrolyse.	
Type	Analyse, destructif.	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	<p>Le déchet est rapidement calciné (pour ne pas le dégrader) en milieu inerte, c'est-à-dire privé d'oxygène (pour ne pas l'oxyder) via utilisation de gaz tels que le diazote ou l'argon. Température d'environ 500° C (jusqu'à 1 100° C au maximum).</p> <p>Pyrolyse, gazéification, cracking. Obtention abondante d'huile et un peu de gaz/solide. On parle de dépolymérisation thermique.</p>	
Caractéristiques techniques	Rendement	Rendement global de conversion du contenu énergétique des plastiques entrants : 86,7%. En massique : environ 87% d'huile. Environ 10% de solide (char). Environ 3% de gaz.
	Capacité	Application à très grande échelle possible : jusqu'à 100 000 t/an envisagées. Avec un fonctionnement continu de 8 000 h/an, on aurait alors 12,5 t/h.
	Nature de l'entrant	Tri amont préférable. Résines composées de plusieurs monomères différents. Polymères de polyaddition. Température du lit : 700°C.
	Plastiques obtenus	Pour un mélange de plastiques en entrée : récupération d'huiles de pyrolyse, pour les carburants (« plastic to fuel »). En sortie de process, pour mieux condenser et donc obtenir plus d'huile, un groupe refroidissant rapidement est utilisé. Pour des résines homogènes : PS et PMMA subissent une dépolymérisation sélective, ce qui permet l'obtention du styrène et du MMA.
Données environnementales	<p>Obtention de substituts pétroliers. Énergie fournie par une fraction du plastique. Grandes échelles possibles (jusqu'à 100 kt/an envisagées) : réduction des consommations énergétiques car moins de réacteurs différents. Permet de réduire de 93,3% les émissions de CO₂ par rapport à l'incinération des plastiques. Température plus faible et volume des fumées générées moins important par rapport à une incinération : avantages économiques et énergétiques. Mais questionnement important sur le bilan environnemental de la technique (2021). Montées à haute température (700°C) + groupe refroidissant en sortie = consommation d'énergie (conso. annuelle totale d'électricité : 2 880 MWh/an). Si obtention d'une huile de mauvaise qualité, nécessité d'effectuer des traitements additionnels (utilisant à nouveau de l'énergie et/ou des solvants purificateurs).</p>	
Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Technique simple, adaptée aux polymères de polyadditions : PS, PMMA, PE/PP. • Convient aux plastiques en mélange hautement hétérogènes. • Permet le traitement de résines thermodurcissables. • Peu de questionnement sur la conformité au contact alimentaire. • Excellente séparation des polymères (sauf PP/PE). 	
Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite de travailler en pyrolyse rapide : obligation de surveiller le procédé et d'utiliser des réacteurs spécifiques adaptés. • Meilleure qualité des produits si tri amont, mais cela rajoute une étape supplémentaire. En effet, même si le procédé convient aux plastiques en mélange, le rendement et la qualité de l'huile obtenue sont affectés par la présence d'impuretés. Si obtention d'une huile de mauvaise qualité, nécessité d'effectuer des traitements additionnels. • Mauvaise séparation des mélanges PP/PE. • Requiert de grands volumes pour être économiquement efficace. • Faible tolérance au PVC. 	

08 Fluide supercritique

Famille	Voie humide, séparation par solvatation.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	<p>Zhenming Xu et all. ont réalisé la décomposition d'HIPS par oxydation dans l'eau supercritique : décomposition du plastique tout en détruisant le retardeur de flamme bromé. Le brome et l'antimoine sont récupérés, et ne contaminent plus le plastique.</p> <p>Développement d'une méthode de dépolymérisation des retardateurs de flamme polymères (FRP) en utilisant une hydrolise à l'état subcritique (Matsushita Electric Works, Ltd., Japan).</p>	
Description de la technologie	<p>Utilisation de fluide en phase supercritique (4^e état de la matière atteint au-delà de la température et de la pression critiques. Exemple pour le CO₂: T_c = 31°C, P_c = 74 bars) obtenant des pouvoirs solvateurs, c'est-à-dire capable de dissoudre et de séparer des molécules.</p> <p>Possède des capacités de dépolymérisation rapides et sélectives.</p>	
Caractéristiques techniques	Rendement	Résine = PUR. Solvant = CO ₂ (SC). T = 60°C. P = 20,27 MPa. T = 5-10 min. Taux de récupération du RFB: < 50 %.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Information non disponible.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	<ul style="list-style-type: none"> • Remplacement des solvants organiques CMR et/ou nocifs par un solvant (en général CO₂ ou eau) non dangereux, en phase supercritique. • Taux d'extraction élevés, non toxique, non inflammable. • Mais, haute consommation énergétique (surtout le groupe refroidissant et la pompe pour la montée en pression). • Relativement coûteux. 	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent solvant pour la dépolymérisation ou la décomposition des polymères plastiques. • Dépolymérisation souvent rapide et sélective. • L'emploi de fluides à l'état supercritique sur des plastiques bromés permet essentiellement de dégrader les retardateurs de flammes bromés pour libérer totalement le brome et prévenir, voire dégrader les autres composés organiques bromés. • De plus, le traitement d'HIPS bromé dans l'eau à l'état supercritique (entre 380°C et 450°C et entre 21,5 et 31 MPa) en présence de soude permet d'obtenir une huile contenant moins de 1% de brome. 	
- Faiblesses	<p>Dans l'exemple cité, taux de récupération inférieur à 50%, donc matrice encore contaminée.</p>	

09 Triboélectricité (ou tri électrostatique)

Famille	Voie sèche, séparation par différence électrostatique.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 9.	
Description de la technologie	Utilise les différences de conductivité électrique des polymères. Les polymères sont chargés par friction en charge négative ou positive. Les particules chargées passent alors à travers un champ électrique, puis sont déviées vers une électrode respective : elles sont ainsi séparées.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Varie en fonction des paramètres expérimentaux (température, pression, intensité de charges).
	Capacité	3 à 5 t/h pour les plastiques mélangés.
	Nature de l'entrant	Petite taille de particules de polymères : > 1 mm. Matériau lavé et séché : particules propres. Particules distinctes de conductivité électrique différente. Fonctionne bien avec des types de matériaux distincts et des densités similaires. Plastiques mélangés possibles.
	Plastiques obtenus	PVC, PET, PP, PE, PS, ABS, PA, PC, PMMA (du chargé le plus négativement au plus positivement).
Données environnementales	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie de tri propre et économie d'énergie. N'utilise pas d'eau, voie sèche. • Pas d'ajout de réactifs chimiques. • Facilité d'entretien et de fonctionnement mais nécessite un séchage des plastiques en amont. 	
Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de séparer des mélanges conducteurs/conducteurs, conducteurs/isolants (cas des mélanges métaux/plastiques), ou enfin isolant/isolant (cas de mélange de plastiques). • Sépare efficacement les plastiques contenant des particules susceptibles d'être chargées négativement ou positivement après friction. • Petites tailles de particules acceptables. 	
Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Les additifs peuvent modifier les propriétés tribo-électriques. • Plusieurs conditions obligatoires : haute tension, taille homogène des particules, surfaces propres et sèches. • Certains mélanges binaires, comme le PE + PP, ont besoin d'un traitement supplémentaire en amont (par exemple une irradiation par un rayon à électrons) car la différence de potentiel électrostatique n'est pas assez significative. • Étape de pré-traitement : les matériaux doivent impérativement être secs. 	

10 Induction pilotée (IND)		
Famille	Voie sèche, séparation par magnétisme.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	Les déchets sont entraînés dans un champ magnétique (créé par des bobines). Le champ va alors se distordre au passage des déchets. Chaque distorsion est propre à chaque métal. Les distorsions sont lues par un capteur, puis transmises à l'unité de traitement avec un système d'électrovannes, permettant la séparation automatisée des différents métaux.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Taille minimale des particules: 0 à 10 mm. Taille maximale des particules: 100 à 150 mm. Particules propres.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Plutôt adapté à la séparation de métaux (ferreux/non ferreux dans les DEEE). • Technique plus sélective que le courant de Foucault, d'où son utilisation en aval. • Très haute pureté des plastiques et des cuivres rouges. 	
- Faiblesses	Peut séparer les inox des métaux non ferreux, mais pas des métaux ferreux.	

11 Analyse thermogravimétrique (ATG)	
Famille	Voie sèche, analyse par dégradation thermique.
Type	Analyse, destructif.
Niveau de développement	Information non disponible.
Description de la technologie	Étude de la perte de masse lors d'une élévation de la température, en fonction du temps. On obtient une courbe de dégradation thermique, propre à chaque résine : on peut alors comparer le spectre de l'analyte aux spectres références des différents polymères.
Caractéristiques techniques	Rendement Information non disponible.
	Capacité Information non disponible.
	Nature de l'entrant Information non disponible.
	Plastiques obtenus Information non disponible.
Données environnementales	Énergie de chauffe : on monte à des températures de l'ordre de 500 à 600 °C.
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Sépare correctement les polymères en fonction des courbes expérimentales. • Les pertes de masse interviennent à des températures différentes en raison de différences de groupes chimiques (exemple : cyanures (CN) pour l'ABS). • De plus, en fonction des polymères, on observe un nombre d'étapes de dégradation thermique (visible sur le spectre) différent.
- Faiblesses	Information non disponible.

12 Calorimétrie différentielle à scans (DSC)

Famille	Voie sèche, analyse par dégradation thermique.	
Type	Analyse, destructif.	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	Étude des échanges de chaleur de l'analyte, par rapport à un échantillon de référence. Les pics qui apparaissent sur la courbe spectrale traduisent un changement de phase (transition vitreuse, cristallisation froide, fusion). Ces propriétés sont propres à chaque polymère analysé et servent donc à analyser les polymères homogènes, mais aussi les mélanges de polymères. Le tableau des propriétés des polymères retrouvés dans les DEEE figure dans la référence (cf. tableau base de données), et permet de reconnaître les spectres des analytes.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Information non disponible.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Énergie de chauffe : on monte à des températures de l'ordre de 500 à 600 °C.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Permet d'identifier les matériaux additionnés aux résines : retardateurs de flamme, plastifiants, stabilisants... • Permet d'identifier les différentes résines ainsi que leurs composés grâce aux changements d'état propres à chaque polymère. • Permet aussi de déterminer le degré de dégradation (post-consommateur). • De plus, permet de déterminer la pureté du polymère (ou du mélange de polymères) analysé, en identifiant les matériaux additionnels (plastifiants, stabilisants, retardateurs de flamme..). 	
- Faiblesses	Information non disponible.	

13 Test à la brûlure	
Famille	Voie sèche, analyse par dégradation thermique.
Type	Analyse, destructif.
Niveau de développement	Information non disponible.
Description de la technologie	Brûlure d'un matériau type polymère, dégageant une flamme, une odeur et de la fumée caractéristiques. Étude du type de flamme et de fumée dégagée (couleurs et intensités), de l'odeur dégagée, et de la présence ou non de cendres. Puis comparaison avec les propriétés de référence des différents polymères plastiques retrouvés dans les DEEE.
Caractéristiques techniques	Rendement Information non disponible.
	Capacité Information non disponible.
	Nature de l'entrant Information non disponible.
	Plastiques obtenus Information non disponible.
Données environnementales	Information non disponible.
+ Forces	Permet l'identification des polymères plastiques en fonction des propriétés observées et mesurées.
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Difficultés pour analyser les mélanges de polymères. • La présence d'additifs présentant aussi des dégagements suite à la réaction à la brûlure, peut compliquer l'identification des résines.

14 Spectrométrie FT-NIR

Famille	Voie sèche, tri basé sur les propriétés spectroscopique (tri optique). Analyse par réflexion de la lumière.	
Type	Analyse, non destructif. Puis séparation automatisée (vannes et buses).	
Niveau de développement	TRL 9. Plusieurs fabricants proposent ce type de technologie. R&D très intense pour l'identification des polymères sombres/noirs.	
Description de la technologie	L'analyte est éclairé par des lampes halogènes et réfléchit une certaine quantité de la lumière. L'information est envoyée au spectromètre qui va traduire l'intensité de la lumière réfléchiée en différentes longueurs d'onde. L'ordinateur relié effectue alors des calculs et traite l'information jusqu'à l'obtention d'un spectre IR. Des buses ont pour rôle d'éjecter les différents matériaux en plusieurs catégories.	
Caractéristiques techniques	Rendement	87 % de polymères séparés en différents types (Mackenji 2012).
	Capacité	Entre 1 et 8 t/h.
	Nature de l'entrant	Corps entiers ou particules. Taille mini. : 10 mm. Taille maxi. : entre 20 et 150 mm. Particules propres et sèches.
	Plastiques obtenus	HDPE, PP, PET, PS, PVC, ELA, ABS, PA, PE, PUR. Flux mélangé de polymères (en particulier PVC, PVdC, et autres chlorés). ABS + PP + PE + PS, PP + PE + PS, ABS-concentrate, PP + PE, PE-concentrate...
Données environnementales	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune toxicité ni produit supplémentaire employé. • Faibles coûts énergétiques. • Étape de séchage supplémentaire en amont. • Le besoin d'air comprimé est important et coûteux 	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnaît les composés halogénés (le brome est un halogène). • Sur le spectre IR, apparition d'une forte bande entre 750 et 500 cm⁻¹ (liaison C-Br). • Détection bromure : 5 000 ppm (UNEP, 2017). Le seuil fixé par la norme RoHS est de 1 000 ppm. La FTIR seule n'est donc pas adéquate : d'où le couplage FTIR-XRF. • Technique bien connue et maîtrisée. • Trie efficacement les polymères transparents ou de couleur claire • Capable de trier dans un flux mélangé de polymères. • L'analyte entré sec, ressort sec : pas besoin de resécher. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Ne distingue pas les retardateurs de flamme bromés. (Ne fonctionne pas sur les métaux). • Ne reconnaît pas les résines sombres voire noires, en particulier en présence de noir de carbone. • Technique d'analyse de surface, donc problème de reconnaissance dans le cas d'un analyte recouvert de poussière, de terre..., ou dans le cas d'un mélange de polymères où l'on prend le risque de n'avoir qu'un seul polymère analysé en surface. • Étape de séchage de l'analyte en amont nécessaire. 	

15 Spectrométrie MIR		
Famille	Voie optique, analyse par dégagement de chaleur après bombardement lumineux.	
Type	Analyse, non destructif. Puis séparation automatisée (vannes et buses).	
Niveau de développement	TRL8-9 : quelques fabricants commencent à proposer des machines.	
Description de la technologie	L'analyte est éclairé à une longueur d'onde à peine supérieure que celle utilisée en NIR. Une caméra thermique détecte la température de l'analyte bombardé et envoie les informations à une unité de traitement. Les matériaux sont identifiés par différentiel de température avant/après le bombardement de photons. Des électrovannes permettent l'éjection des différents matériaux.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Capacité plus faible que les technologies NIR.
	Nature de l'entrant	Corps entiers ou taille des particules : > 10 mm. Particules propres.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	<ul style="list-style-type: none"> • Pré-étape de lavage supplémentaire. • Le besoin d'air comprimé est important et coûteux. 	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Tri des plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés. • Identification de charges dans les polymères (R&D). (Ademe 2012). • Remédie au problème d'identification des plastiques sombres/noirs. • Permet le tri des polymères en mélange, ainsi que le tri des polyamides. • Permet le tri des plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés. 	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite de travailler sur une surface propre, afin de ne pas fausser les mesures de température. • Technologies moins sensibles que dans le proche IR. 	

16 Spectrométrie visible VIS

Famille	Voie optique, analyse par réflexion de la lumière.	
Type	Analyse, non destructif. Puis séparation automatisée (vannes et buses).	
Niveau de développement	TRL 9 recherches : volonté d'améliorer le traitement du signal, afin de mieux séparer les matériaux en fonction de leur couleur.	
Description de la technologie	L'analyte est éclairé par des lampes halogènes et réfléchit une certaine quantité de la lumière. La lumière réfléchie est dirigée jusqu'à un capteur (caméra couleur couplée à un prisme, ou spectrocolorimètre analysant tout le domaine visible et plus précis que la caméra). L'unité de traitement reçoit les informations et commande les électrovannes, éjectant ainsi les matériaux par différentes catégories de couleurs.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	De 0,25 à 10 t/h.
	Nature de l'entrant	Corps entiers ou particules. Taille minimale : entre 1 et 10 mm. Taille maximale : entre 30 et 150 mm. Particules propres.
	Plastiques obtenus	PET, PEHD en particulier, PE, PP, PS, PVC... Tri du PVC dans un flux de PET.
Données environnementales	Le besoin d'air comprimé est important et coûteux	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Permet de trier les matières plastiques par couleur (exemple : tri du PET clair/azuré et coloré). • Permet de trier les métaux. • Bien adaptée au tri des matières plastiques par couleur (exemple : PET). 	
- Faiblesses	Limitée à la couleur.	

17 Combinaison Spectro NIR + VIS		
Famille	Voie optique, analyse par réflexion de la lumière.	
Type	Analyse, non destructif. Puis séparation automatisée (vannes et buses).	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	Cf. description des deux méthodes combinées. Combinaison largement utilisée en tri des déchets. Par exemple, pour le tri des bouteilles en PET cristal (« <i>bottle to bottle</i> ») et des polymères contenus dans les cartes électroniques broyées.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	De 1,5 à 10 t/h.
	Nature de l'entrant	Corps entiers ou taille des particules : > 10 mm. Particules propres. Combinaison largement utilisée en tri des déchets. Par exemple, pour le tri des bouteilles en PET cristal (« <i>bottle to bottle</i> ») et des polymères contenus dans les cartes électroniques broyées.
	Plastiques obtenus	Obtention de fractions PET, PVC et autres. Reconnaissance du PVC-RDF dans les ordures ménagères résiduelles. Valorisables dans les DIB. Mélanges de PE-HD, PE-LD, PP, PET, PS, PVC... HDPE, PET, PS, PP, PVC. ABS blanc, HISP blanc. Extraction du PET transparent et du PEHD naturel. Tri couleur du PET, PVC dans PET. Tri du PET, HDPE, LDPE, PP, PVC, PS, HIPS, ABS, PC. Tri du PET par couleur.
Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnaît les composés halogénés (le brome est un halogène). • Sur le spectre IR, apparition d'une forte bande entre 750 et 500 cm⁻¹ (liaison C-Br). • Avantages des deux méthodes séparées. • Avantage de trier les plastiques par couleur tout en éliminant les matériaux indésirables (en particulier les flux d'emballage). 	
- Faiblesses	Toujours le problème de détection des produits sombres et noirs.	

18

Combinaison spectrométrie NIR + VIS + IND

Famille	Voie sèche-optique.	
Type	Analyse et séparation automatisée.	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	Cf. description des trois méthodes combinées.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Capacité : en fonction de la densité du flux. Vitesse du convoyeur : jusqu'à 3 m/sec. Capacité : jusqu'à 7 t/h
	Nature de l'entrant	Particules propres.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
∅ Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnaît les composés halogénés (le brome est un halogène). • Sur le spectre IR, apparition d'une forte bande entre 750 et 500 cm⁻¹ (liaison C-Br). • Permet des tris simultanés, de plusieurs matériaux différents (métaux, plastiques, etc.). 	
- Faiblesses	Information non disponible.	

19 Rayons X par fluorescence (XRF)

Famille	Voie optique, analyse par réflexion de la lumière.	
Type	Analyse, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 8-9 : encore peu implanté par rapport à la technologie XRT (qui est moins sensible). Fait l'objet d'une R&D intense.	
Description de la technologie	Cube cathodique émettant des rayons X sur l'analyte. Les atomes de l'analyte entrent dans une phase d'excitation, émettant en retour un rayonnement. Ce rayonnement « secondaire » est ensuite analysé par un spectromètre. On a alors un spectre renseignant sur la composition atomique de l'analyte, et la concentration massique de chaque élément.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	« Redwave QXR et QXRM » (continu) : 2 à 4 t/h.
	Nature de l'entrant	Corps entiers ou taille des particules : > 10 mm. Taille minimale entre 2 et 15 mm. Taille maximale entre 60 et 120 mm. Particules propres.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Capable de détecter la matière à l'échelle atomique, c'est-à-dire de détecter les matériaux contenant des atomes lourds comme les plastiques bromés (en particulier les retardateurs de flamme). • De même pour la détection du chlore. • Détection bromure : entre 10 et 300 ppm. • Utile pour la séparation des conteneurs en PVC, facilement distinguables grâce à leur haute teneur en chlore. • Il existe des appareils portatifs, pesant moins de 2 kg, avec un temps de mesure inférieur à 2 secondes. • Très utile pour le PVC. • Technologie de précision. 	
- Faiblesses	Ne permet pas de différencier ces matériaux bromés (permet de détecter des retardateurs de flamme bromés dans les DEEE, mais pas de les différencier).	

20 Rayons X par transmission (XRT)

Famille	Voie optique, analyse par réflexion de la lumière.	
Type	Analyse, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 9. Développement de détecteurs multi-énergie, permettant d'identifier des atomes de masse atomique proche.	
Description de la technologie	Des rayons X sont envoyés sur l'analyte. Ces rayons sont de longueur d'onde comprise entre 0,03 et 10 nm. On obtient alors une image par transmission en noir et blanc qui, par traitement informatique, renseigne sur la composition de la matière.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	1 à 3 t/h.
	Nature de l'entrant	Taille minimale des particules : entre 7 et 18 mm. Taille maximale : entre 70 et 150 mm. Particules propres.
	Plastiques obtenus	Polymères contenant des additifs chlorés/bromés (DEEE), PVC.
Données environnementales	<ul style="list-style-type: none"> Faible consommation énergétique. Remplacement des capteurs photosensibles tous les 1 à 2 ans. 	
Forces	<ul style="list-style-type: none"> Capable de détecter la matière à l'échelle atomique, c'est-à-dire de détecter les matériaux contenant des atomes lourds bromés (en particulier les retardateurs de flamme). Utile pour la séparation des conteneurs en PVC, facilement distinguables grâce à leur haute teneur en chlorure. Bonne séparation des métaux des DEEE car masses atomiques différentes. 	
Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> Ne permet pas de différencier ces matériaux bromés (permet de détecter des retardateurs de flamme bromés dans les DEEE, mais pas de les différencier). Ne semble pas convenir à la séparation des polymères, car enchaînements de monomères majoritairement composés de carbone et d'hydrogène. 	

21 Raman

Famille	Voie optique, analyse par réflexion de la lumière.	
Type	Analyse, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 5-6. Technique encore en développement.	
Description de la technologie	Émission d'une lumière monochromatique (une seule couleur, donc à une longueur d'onde unique) grâce à une source laser dirigée jusqu'à l'analyte par fibre optique, puis analyse de la lumière diffusée. Les photons incidents sont détruits afin de créer des photons diffusés et des vibrations dans l'analyte. Ces vibrations sont caractéristiques pour chaque matériau analysé.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Taille minimale des particules : 4 mm. Taille maximale : 16 mm. Particules propres.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Capable de caractériser la composition moléculaire et la structure du matériau : théoriquement, la technique devrait être en mesure de détecter une structure bromée. • Technique non destructive : pas de dégradation ou de perte de matière. • Caractérise la composition moléculaire et la structure du matériau. • Reconnaît les oxydes métalliques. • Peut être utilisée en couplage de la technologie NIR. • Semble être efficace dans la séparation des corps sombres. 	
- Faiblesses	Ne reconnaît pas les métaux: technique à utiliser après traitement métallique dans une succession de techniques de tri.	

22 Incorporation de traceurs dans les polymères

Famille	Détection en développement, voie optique.	
Type	Analyse, non destructif.	
Niveau de développement	<p>R&D pour tester et comparer les différentes techniques de tri optique, chargées de détecter le traceur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fluorescence X : fiable. - Fluorescence UV : interférences entre traceur et colorants (en particuliers sombres) du polymère. Cela peut être résolu par amplification du signal du traceur, mais à quel prix ? - NIR : ne permet pas de détecter le traceur si présence de colorants sombres voire noirs. - Activation neutronique : bien fiable, bonne sensibilité d'analyse, temps d'analyse courts. - Détection magnétique : bonne technique car insensible à la majorité des additifs et technique bien développée. Mais grande quantité de traceur requise pour la puissance des aimants. 	
Description de la technologie	L'idée est d'ajouter et d'associer une molécule facilement reconnaissable à un polymère lors de sa fabrication. Lorsqu'il deviendra alors un déchet, la molécule sera détectée et identifiée avec le polymère par tri optique. Le choix des traceurs est multiple, tout comme le type de procédé optique utilisé pour reconnaître le traceur et son polymère.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Information non disponible.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Information non disponible.	
Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Plutôt utile dans une démarche d'écoconception. • Détection plus simple au moment du tri du déchet par tri optique. 	
Faiblesses	Information non disponible.	

23 Ultrasons

Famille	Détection en développement, analyse par réflexion sonore.	
Type	Analyse, non destructif.	
Niveau de développement	Information non disponible.	
Description de la technologie	Ondes sonores de hautes fréquences (20 kHz et plus). Des ondes ultrasonores sont émises et se propagent à la vitesse du son jusqu'à l'analyte. Une fois en contact, les ondes sont réfléchies sous forme d'écho jusqu'au capteur ultrasonore.	
Caractéristiques techniques	Rendement	RFB = TBBPA, HBCD, decaBDE. Résine = HIPS. Solvant = 2-propanol/méthanol 1:1 ou 2. Propanol/hexane 1:1. T = 65°C. P ambiante (1 bar). T = 1 h. → Taux de récupération du RFB = 10-50 %. RFB = BFR. Résine = PE. Solvant = acétonitril. T ambiante = 20°C. P ambiante = 1 bar. T = 20 min. → Taux de récupération du RFB = 65-94 %.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Information non disponible.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Information non disponible.	
Forces	<ul style="list-style-type: none"> • La combinaison du NIR et de la « spectroscopie ultrasonique » permet de déterminer la composition de mélanges PE/PS. • Semble convenir à la dépollution des retardateurs de flamme bromés (RFB). 	
Faiblesses	Informations très sensibles aux variations de pression/température : nécessité de travailler dans un milieu thermodynamiquement clos (isotherme / isobare).	

24 LIBS

Famille	Détection en développement, voie sèche-optique, analyse par dégradation laser et par rayonnement.	
Type	Analyse, en partie destructive.	
Niveau de développement	Développement et regain d'intérêt industriel depuis que le coût est plus abordable.	
Description de la technologie	Technique analytique chimique rapide. Un laser passe à travers une lentille de focalisation, concentrant le rayon lumineux en un point précis de l'analyte et créant un microplasma à sa surface. Le plasma aura des rayonnements spécifiques aux matériaux présents. Il est relié au spectromètre par une fibre optique, permettant l'analyse.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Avantage majeur de la technologie : procédé de détection non affecté par l'humidité, la couleur, ou les impuretés en surface. Il n'est donc pas obligatoire de traiter le gisement, mais cela réduit le temps d'analyse.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Étapes supplémentaires de pré-traitement non obligatoires.	
+ Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnaît les dérivés bromés. • Différencie les types d'additifs bromés (contrairement au XRT). • Détection bromure : 1500 ppm. • Utilisable sur un très grand éventail de matériaux (notamment les métaux et les plastiques, etc.). • Renvoie des informations très précises sur la nature du matériau et sa composition (degré de pureté d'un élément). • Inclue aussi une bonne détection des éléments légers (contrairement à la fluorescence X) tels que l'hydrogène et le carbone : bonne analyse des polymères. • Temps de mesure rapide. • Possible en pistolet. 	
- Faiblesses	Temps d'analyse et de traitement trop longs, mais réduction de ce temps si comparaison analytique avec base de données ou « bibliothèque de spectres », déchets pré-triés, prélavés, et granulométrie adéquate.	

25

Reconnaissance de forme + IA

Famille	Détection en développement, analyse par réflexion de la lumière.	
Type	Analyse et séparation automatisée.	
Niveau de développement	Stade d'innovation et de développement.	
Description de la technologie	Base de données et systèmes d'apprentissage permettant de reconnaître des motifs et des formes à partir des objets triés. L'analyse est éclairé par plusieurs lumières en continue, puis plusieurs caméras numériques ou analogiques (couleur ou noir et blanc) pour capter l'information, permettant au logiciel de traitement et d'interprétation (de l'image et de la forme) de commander le système d'éjection des matériaux. Analyse 2D ou aussi 3D possible. Technique très intéressante pour combler les difficultés de tri des produits de même couleur/matériaux.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Faibles débits de tri en continu (non chiffrés).
	Nature de l'entrant	Dimension supérieure à 5 mm minimum pour conserver l'analyse de forme.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Information non disponible.	
+ Forces	Technique très intéressante pour combler les difficultés de tri des produits de même couleur/matériaux.	
- Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> • Faible débit de tri en continu. • Grands volumes d'information à traiter. • Certaines formes difficiles à différencier, difficulté à stabiliser les critères de forme. • Impossible de trier les formes des matériaux en-dessous de 5 mm de dimension. 	

26

Spectroscopie Terahertz (THz)

Famille	Détection en développement, analyse par ondes hautes fréquences.	
Type	Analyse, non destructif.	
Niveau de développement	En développement, mais pas dans le domaine du tri des déchets. Développement des conditions expérimentales de la technologie. Premières utilisations dans le domaine médical et dans la sécurité.	
Description de la technologie	Spectroscopie à base d'ondes à très hautes fréquences (0,1 à 10 THz, mais économiquement limitées à 2 THz en pratique). Sources possibles : Laser à cascade quantique, Carcinotron, Photomélangé, Électronique (nano-transistors). Capteurs possibles : diode mélangeuse ultra miniaturisée (fréq. = 500 GHz), lasers (fréq. > 1000 GHz), bolomètre (électro-optique).	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Produit sec.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	Étape supplémentaire de séchage, entraînant potentiellement des coûts énergétiques.	
Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Capable d'analyser la structure moléculaire. • Celle-ci devrait donc théoriquement comprendre une détection bromée. • Fonctionne en réflexion et en transmission : aucun problème de détection en surface ou en profondeur. • Les plastiques, non conducteurs, sont transparents au THz. • Technique non destructive, rayonnement non ionisant : aucune dégradation de la matière. 	
Faiblesses	L'eau absorbe fortement les ondes THz. Il faut donc un produit anhydre pour l'analyse.	

27 Séparation aéroulique		
Famille	Voie sèche, séparation basée sur la densité et la masse.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 9. Bien maîtrisée.	
Description de la technologie	Le séparateur aéroulique est une machine permettant la séparation de flux de déchets solides, par différence massique. Pour cela, un puissant jet d'air est compris afin de propulser les déchets. Selon les masses des déchets, la distance parcourue sera différente : plusieurs bacs de récupération sont placés à différentes distances de la machine pour récupérer tel ou tel matériau.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Information non disponible.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Information non disponible.
	Plastiques obtenus	Information non disponible.
Données environnementales	N'implique pas l'utilisation de produits ou substances dangereux.	
Forces	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne séparation des déchets de masses différentes. • Technique non destructive : aucune dégradation de la matière. • Possibilité de séparer en 2 ou 3 flux. • Technique utilisée pour le dépoussiérage. • Nombreuses configurations possibles. 	
Faiblesses	Ne permet pas de trier des déchets de masses trop similaires (pas de donnée chiffrée trouvée pour la différence minimale).	

28 Tables densimétriques

Famille	Voie sèche, séparation densimétrique.	
Type	Séparation, non destructif.	
Niveau de développement	TRL 9. Bien maîtrisée.	
Description de la technologie	Plaques vibrantes et inclinées, avec un système d'air par ventilateurs aspirant les matériaux les moins denses au centre et évacuant les plus denses aux extrémités de la plaque.	
Caractéristiques techniques	Rendement	Sélectivité précise grâce à un dosage fin de la vitesse de vibration et du débit d'air.
	Capacité	Information non disponible.
	Nature de l'entrant	Granulés.
	Plastiques obtenus	Tous types de plastiques de densités assez différentes (pas de données chiffrées).
Données environnementales	Longue durée de vie grâce à des éléments vibrants sans entretien. N'implique pas l'utilisation de produits ou substances dangereux.	
+ Forces	Convient aussi dans un tri plus grossier pour séparer le cuivre et les plastiques.	
- Faiblesses	Information non disponible.	

AUTRES RESSOURCES UTILES



> WEBINAR ÉCO-CONCEPTION

Des plastiques recyclés de qualité : mythe ou réalité ?

2022

https://www.youtube.com/watch?v=rpfbayL_1Rc&list=PLJla_p7CXqeM66oNYFYUsdTMkUMVnfzoc&index=12



> SÉRIE DE WEBINARS SUR L'ÉCO-CONCEPTION

Réalisés avec le Pôle Éco-conception

Cette série de webinars éco-conception pour une seconde vie des matières et des produits vous accompagne dans vos projets de circularité.

2021-2023

https://www.youtube.com/playlist?list=PLJla_p7CXqeM66oNYFYUsdTMkUMVnfzoc



> ÉTUDE

Synthèse sur les bénéfices environnementaux de l'intégration de plastiques recyclés issus de DEEE.

2022

Ce guide vise à accompagner les projets d'intégration de plastiques recyclés issus de DEEE dans de nouveaux produits, en présentant les enjeux environnementaux associés.

<https://www.ecosystem.eco/upload/media/default/0001/02/ce7789dbd7d0c1c8afc91b6d8b830f85f2e3790c.pdf>



> RESSOURCES ET OUTILS

Toutes nos ressources et outils pour réduire l'empreinte environnementale de vos produits

<https://www.ecosystem.eco/fr/article/bonnes-pratiques>



> CONSEILS PRATIQUES

Les bonnes pratiques de conception en vue de la fin de vie des équipements électriques

Choix des matériaux et des liaisons entre les différents composants, présence et accessibilité des polluants... Découvrez nos recommandations pour éco-concevoir.

<https://www.ecosystem.eco/fr/article/ecoconception>



Vous avez une question, un projet ?

Contactez notre pôle Performance Environnementale :

ecoconception@ecosystem.eco

www.ecosystem.eco