



Une analyse stratégique des principes de Safe & Sustainable by Design (SSbD) et Design2Recycle dans les textiles et composites intelligents

Thermoharv comme opportunité de définir de nouvelles normes industrielles

DUTCH AND ENGLISH VERSIONS BELOW

NEDERLANDSE EN ENGELSE VERSIES ONDERIN

Auteurs : Brecht Demedts (Centexbel) & Elbeshary Mohammed



THERMOHARV



I. Résumé exécutif : Catalyser la transition verte

L'impératif mondial de transition vers une économie circulaire et neutre en climat a stimulé le développement de matériaux et de produits innovants à l'intersection de la technologie et de la durabilité. Le projet Thermoharv, une initiative de recherche franco-belge, représente une étude de cas réelle cruciale pour cette transition. Sa mission de développer des textiles et composites intelligents pour la récupération de la chaleur résiduelle dans les bâtiments et les vêtements intelligents s'aligne directement avec les cadres politiques proactifs de l'Union européenne, en particulier le cadre volontaire Safe & Sustainable by Design (SSbD).¹ Ce rapport propose une analyse stratégique du Thermoharv, évaluant son application de ces principes de la sélection des matériaux à la valorisation en fin de vie.

Le défi central auquel sont confrontés les produits multi-matériaux comme ceux du projet Thermoharv est un paradoxe fondamental : la complexité fonctionnelle même qui les rend innovants, comme la fusion d'électronique et de polymères dans les textiles, compromet simultanément leur compatibilité avec les méthodes traditionnelles de recyclage.³ Ce rapport soutient que surmonter ce paradoxe nécessite une approche « couplée », intégrant les principes de conception circulaire de nouvelle génération et les technologies avancées de recyclage avec de nouveaux modèles économiques systémiques.⁵

L'analyse conclut que le succès de Thermoharv dépend de sa capacité à naviguer sur trois voies stratégiques clés : d'abord, en repensant ses produits pour faciliter le démontage et la séparation des matériaux ; deuxièmement, en tirant parti de technologies avancées de recyclage, telles que les procédés à base de solvants, pour obtenir une récupération de matériaux de haute pureté ; et enfin, en explorant des modèles économiques circulaires, tels que le produit en tant que service, afin d'assurer une gestion contrôlée en fin de vie.⁶ Ce faisant, le projet Thermoharv peut servir de modèle pour une économie véritablement circulaire et sûre, transformant la durabilité d'un fardeau réglementaire en source d'avantage concurrentiel et d'innovation.

Titre de la section	Thème principal	Point clé
I. Résumé exécutif	Aperçu stratégique	Thermoharv est un cas de test crucial pour la politique européenne, confronté à un paradoxe de complexité des matériaux.
II. Le paysage politique	Cadre contextuel	L'UE passe d'une réglementation réactive à une réglementation proactive sur la durabilité pour guider l'innovation.
III. Le projet Thermoharv	Application pratique	Les objectifs matériels et fonctionnels de Thermoharv s'alignent directement sur les principes SSbD pour la récupération d'énergie.

IV. Le défi de la circularité	Analyse critique	Les produits multimatériaux font face à d'importantes barrières techniques et à un « cycle de risque » lié aux additifs hérités dangereux du recyclage.
V. Vers un futur circulaire	Recommandations stratégiques	Le succès nécessite une approche couplée : recyclage avancé, conception circulaire et nouveaux modèles économiques.
VI. Conclusion	Synthèse et plan	Le parcours de Thermoharv peut servir de modèle pour une nouvelle ère d'innovation sûre, durable et économiquement viable.

II. Le paysage politique : un cadre pour l'innovation verte

2.1 Le cadre Safe & Sustainable by Design (SSbD) : un changement de paradigme

Le cadre Safe & Sustainable by Design (SSbD) de la Commission européenne représente un changement fondamental dans l'approche du continent en matière de politique environnementale et chimique. Proposé en décembre 2022 comme cadre volontaire, SSbD est conçu comme un guide proactif et pré-commercialisation pour l'innovation, plutôt qu'un outil réglementaire rigide post-marché.¹ Son objectif principal est d'accélérer la transition vers des produits chimiques, matériaux et produits plus sûrs et durables en fournissant des orientations claires pour la R&D, les politiques et le soutien financier.¹ Contrairement à des réglementations telles que REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), qui restreignent ou interdisent souvent les substances après leur utilisation généralisée, la SSbD cherche à intégrer les considérations de sécurité et de durabilité dès les premières étapes du cycle de vie d'un produit.¹

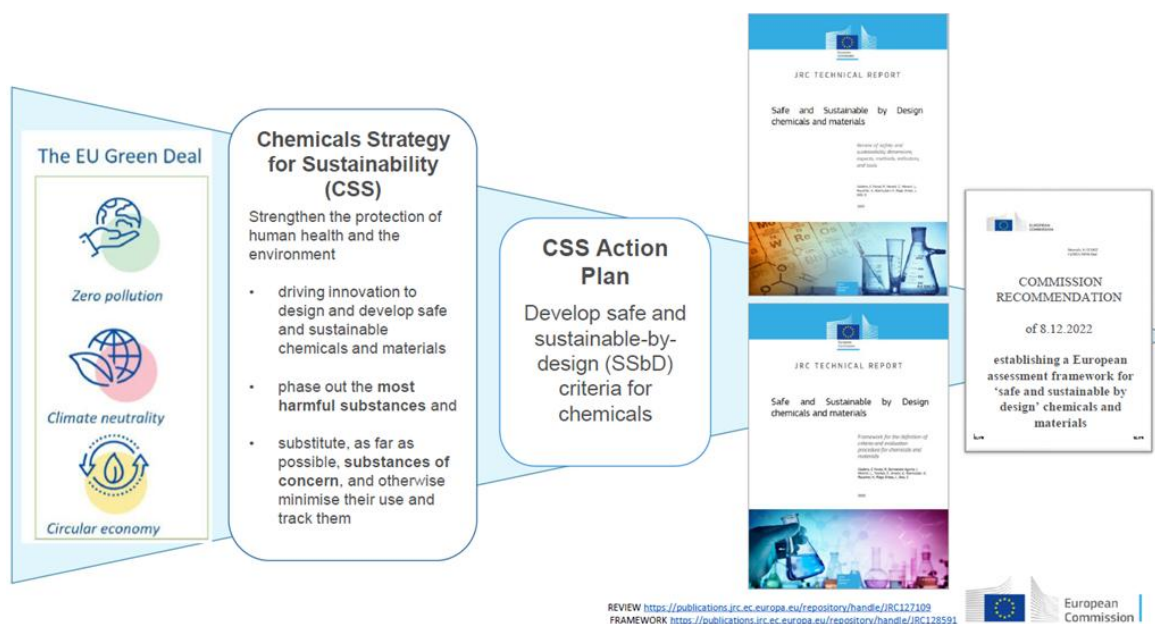


Figure 1. Principes fondamentaux pour le cadre SSbD

Cette approche préventive vise à éviter les obstacles économiques et techniques importants auxquels les pionniers de l'innovation durable ont historiquement été confrontés.¹ Le cadre (Figure 2) fournit de nouvelles définitions explicites pour ses principes fondamentaux : « sûr » est défini comme l'absence de risque inacceptable pour les humains et l'environnement, de préférence obtenu en évitant les matériaux intrinsèquement dangereux, tandis que « durable » fait référence à la capacité d'un matériau à remplir sa fonction sans dépasser les limites environnementales et écologiques sur l'ensemble de son cycle de vie, tout en apportant des bénéfices socio-économiques.¹ La nature itérative du cadre, actuellement en phase de test et de révision avec des retours issus de plus de 80 études de cas, indique que la Commission entend qu'il soit un outil dynamique et pratique pour l'industrie et le milieu universitaire.² En s'alignant sur le SSbD, les entreprises gagnent en « préparation réglementaire » et en « préparation à l'avenir », transformant efficacement la durabilité d'un coût potentiel de conformité en un avantage concurrentiel stratégique.¹⁰ L'engagement fondamental du projet Thermoharv envers une « approche éco-responsable » du choix des matériaux en fait un pilote inestimable pour cette politique en évolution, fournissant le type de retour pratique qui influencera le développement continu du cadre.¹²

2.2 L'économie circulaire et le design2Recycle : au-delà du modèle linéaire

Le concept d'économie circulaire constitue la base économique et systémique du cadre SSbD. Il contraste fortement avec le modèle traditionnel linéaire « prendre-faire-jeter », qui repose sur l'extraction continue de ressources finies.¹³ L'économie circulaire est une approche systémique fondée sur trois principes fondamentaux, tous guidés par le design : premièrement, éliminer les déchets et la pollution ; deuxièmement, faire circuler les produits et matériaux à leur valeur maximale ; et troisièmement, régénérer la nature.¹⁴ Les principes reposent sur une transition vers les énergies et matériaux renouvelables, créant un système résilient qui découple l'activité économique de la consommation de ressources finies.¹⁴

Dans ce cadre, « Design2Recycle » n'est pas une simple solution de fin de conduite, mais une philosophie fondamentale. Cela exige une repensée complète du processus de fabrication dès le départ, où les designers ont le pouvoir d'influencer l'ensemble du cycle de vie du produit.¹³ Cela implique la conception de produits pour leur durabilité, leur réparabilité et leur modularité, et de considérer le parcours de fin de vie d'un produit depuis sa création.¹³ Le principe SSbD de « Conception pour la fin de vie » impose directement cette approche aux innovateurs et chercheurs.¹¹ L'adoption de cette philosophie est motivée par bien plus que la simple responsabilité environnementale. Elle offre des avantages économiques significatifs, notamment une réduction de l'épuisement des ressources, des économies grâce à l'efficacité des matériaux, ainsi que la création de nouvelles sources de revenus et d'emplois verts.¹³ Le projet Thermoharv, par sa nature même, doit incarner cette philosophie pour réussir, car ses produits complexes et multicouches deviendraient autrement des flux de déchets difficiles à recycler à la fin de leur durée de vie utile.⁴

2.3 Les stratégies textiles et composites de l'UE : un mandat sectoriel

Le projet Thermoharv opère à la confluence de deux secteurs prioritaires pour la transition verte de l'Union européenne : le textile et les composites. La Stratégie européenne pour les textiles durables et circulaires fixe une vision ambitieuse pour 2030 où tous les produits textiles mis sur le marché sont durables, réparables, recyclables, en grande partie composés de fibres recyclées et exempts de substances dangereuses.¹⁷ Cette stratégie est soutenue par des outils législatifs clés tels que le Règlement sur l'écodesign pour les produits durables (ESPR) et la proposition d'introduction de règles obligatoires et harmonisées de responsabilité élargie du producteur (EPR) pour les textiles.¹⁷ Ces politiques visent à inverser la surproduction et la surconsommation et à inciter les producteurs à concevoir des produits plus durables.¹⁷

De même, pour l'industrie des composites, une feuille de route stratégique existe pour renforcer la durabilité des produits tout au long de leur cycle de vie.¹⁹ Objectifs à moyen terme (2026–2028) incluent la mise en œuvre de pratiques de conception qui privilégient la modularité, la facilité de démontage et la séparation des matériaux.¹⁹ Cela inclut l'utilisation de matériaux bio-d'origine à faible densité, plus faciles à retirer, et la capacité de démontage de chaque produit composite par conception.¹⁹ La pertinence à double secteur des produits de Thermoharv — textiles intelligents et composites flexibles — place le projet au cœur de ces réglementations en évolution. Le succès du projet ne dépend donc pas seulement de la performance technique, mais aussi de sa capacité à répondre de manière proactive et à contribuer à façonner ces mandats sectoriels spécifiques, un processus pleinement aligné sur le cadre SSbD.

III. Le projet Thermoharv : un lien entre politique et pratique

3.1 Aperçu du projet et objectifs

Le projet Thermoharv (F) est une initiative de recherche collaborative impliquant un consortium de partenaires français et belges, dont l'Université de Mons (coordinatrice), l'IMT Nord Europe, Centexbel et l'Université de Lille.¹² Financé par Interreg V FWVL, le projet se déroule d'octobre 2024 à septembre 2028 et est dédié au développement de dispositifs innovants pour la récolte d'énergie thermique.²⁰ La mission principale est de créer des matériaux polymères flexibles capables de récupérer la chaleur résiduelle des bâtiments — comme la chaleur des tuyaux d'eau chaude ou des surfaces vitrées exposées

au soleil — et de la convertir en énergie électrique utilisable.²⁰ Cette énergie est destinée à alimenter des dispositifs électroniques et capteurs à faible consommation, tels que les systèmes d'automatisation domestique, les détecteurs de fumée ou les capteurs de mouvement.²⁰

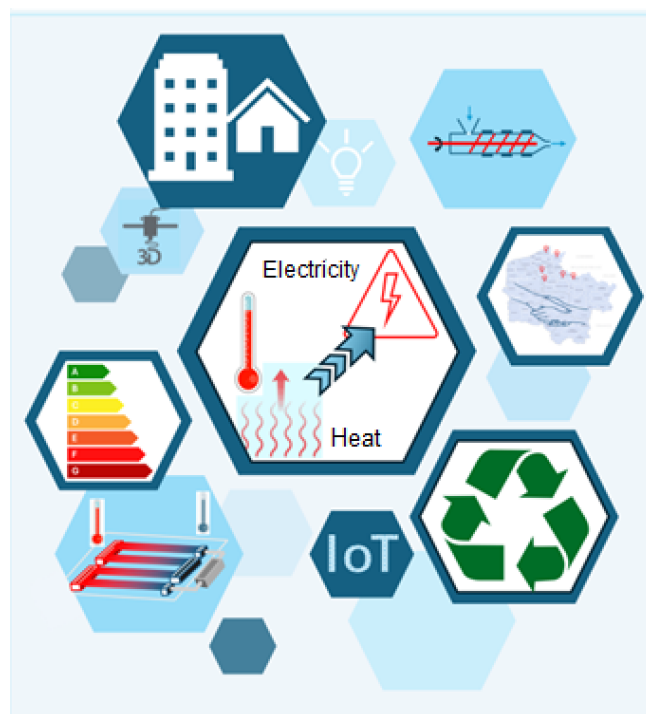


Figure 2. Aperçu du projet Thermoharv

Le champ d'action du projet va au-delà du simple développement technologique. L'objectif du consortium est d'« optimiser toute la chaîne de valeur des dispositifs, de la synthèse des matériaux à leur valorisation en fin de vie ». ²⁰ Cette approche holistique signifie un engagement direct envers les principes d'une économie circulaire et le cadre SSbD. En se concentrant sur la récupération d'énergie qui serait autrement perdue, Thermoharv répond à un défi clé de durabilité, contribuant directement au principe SSbD de minimiser l'impact environnemental du point de vue du cycle de vie. ¹¹ L'accent explicite du projet sur une « approche éco-responsable » de la sélection des matériaux souligne son rôle en tant qu'application vivante de ces politiques. ¹²

3.2 Matériaux et fonctionnalités : une analyse technique approfondie

La base technique des dispositifs de Thermoharv repose sur les principes physiques de la thermoélectricité et de la pyroélectricité. ¹² La thermoélectricité convertit une différence de température entre deux surfaces en un courant électrique, tandis que la pyroélectricité convertit les fluctuations thermiques en charge électrique (Figure 4). ¹² Les matériaux principaux du projet sont des polymères flexibles et des thermoplastiques, intégrés à des appareils électroniques imprimés et des impressions conductrices. ¹² Centexbel, un partenaire clé, possède une expertise dans l'intégration de ces appareils imprimés dans une variété de matériaux, y compris des revêtements, des matériaux textiles et des composites, souvent en utilisant un procédé de transfert sur un support recouvert de TPU. ¹² Cette

technique de lamination est utilisée pour créer des prototypes, tels que des manchons pour les tuyaux d'eau chaude, qui sont ensuite testés dans des conditions réelles.²⁰

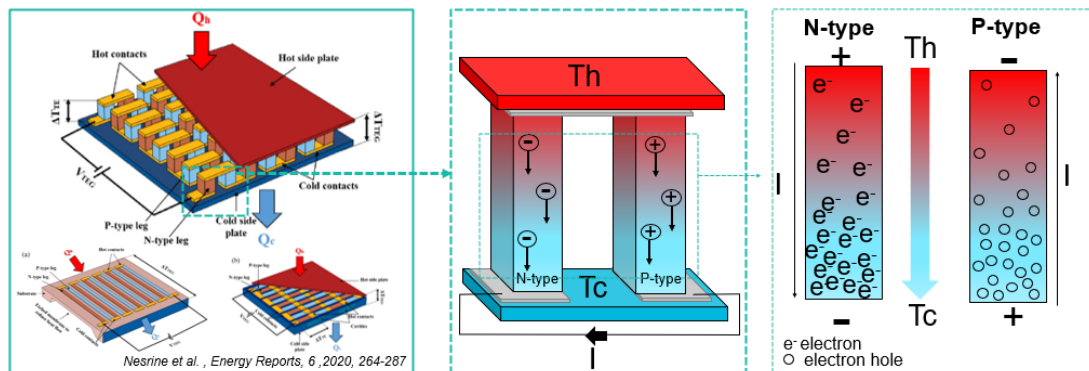


Figure 3. Principe du générateur thermo-électrique (TEG)

Les matériaux et la fonctionnalité du projet Thermoharv démontrent un alignement délibéré avec le pilier « durable » du cadre SSbD. En développant des textiles et composites intelligents légers et flexibles, le projet remplit une fonction précieuse : la récupération d'énergie — tout en utilisant moins de ressources que les systèmes électroniques rigides traditionnels.²¹ Le développement de ces matériaux contribue à la réduction globale de la consommation d'énergie dans les bâtiments, car l'énergie thermique récupérée réduit l'empreinte énergétique globale de la structure.¹² Cette focalisation sur la réduction de la consommation d'énergie et de ressources est conforme aux principes SSbD de « Concevoir pour l'efficacité énergétique » et « Efficacité des matériaux ».¹¹

IV. Le défi de la circularité : analyser les barrières de fin de vie

4.1 Le dilemme du recyclage des produits multi-matériaux

Bien que les matériaux de Thermoharv soient conçus pour des performances et une fonctionnalité élevées, leur nature multi-matériau représente un défi important en fin de vie. Les textiles intelligents et composites du projet, comme les emballages multicouches, sont composés de différents matériaux (par exemple, polymères, électronique, adhésifs) qui sont fusionnés entre eux.³ Cette hétérogénéité rend la séparation et le recyclage extrêmement difficiles. Moins de 10 % des films plastifiés sont recyclés dans le monde, la plupart finissant dans des décharges ou des incinérateurs.⁴

Les principaux obstacles au recyclage sont doubles. Premièrement, il existe une incompatibilité chimique fondamentale entre différents matériaux. Par exemple, les plastiques courants comme le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) ont des points de fusion différents (environ 115 °C et 160 °C respectivement), ce qui rend difficile leur traitement ensemble dans le même flux de recyclage.⁴ Deuxièmement, les structures complexes et étroitement liées de ces matériaux résistent aux méthodes de séparation mécanique conventionnelles, telles que la classification par flotteur-puits ou la classification de l'air, qui sont souvent inadéquates pour des couches fines et fusionnées.⁴ Cela crée un paradoxe fondamental : les propriétés mêmes qui rendent ces matériaux innovants et durables les rendent également incompatibles avec les infrastructures de recyclage existantes. Les méthodes

traditionnelles de recyclage textile, qui manipulent principalement les matériaux avant et après la consommation pour leur réutilisation ou un recyclage dans des chiffons à essuyer ou de l'isolant, ne sont pas équipées pour gérer l'intégration complexe de l'électronique et des polymères conducteurs présents dans les produits Thermoharv.²³ Le succès du projet dépend donc de sa capacité à résoudre ce dilemme fondamental de complexité multi-matériaux.

4.2 Le « cycle de risque » des additifs hérités : une menace pour la sécurité et la circularité

Le deuxième grand défi en fin de vie est la présence de produits chimiques dangereux, ou « additifs hérités », dans les matériaux recyclés. Ces substances, telles que le plomb, le cadmium et certains ortho-phthalates spécifiques comme le bis(2-éthylhexyle) phthalate (DEHP), étaient historiquement utilisées dans les plastiques mais sont désormais réglementées.²⁴ Une étude sur un nouveau revêtement de sol en polychlorure de vinyle (PVC) a révélé que 16 % des échantillons contenaient ces produits chimiques dangereux réglementés supérieurs à 0,1 % de poids, probablement en raison de l'utilisation de PVC recyclé.²⁵ Cela démontre un « cycle de risque » où les substances dangereuses issues de produits anciens sont réintroduites sur le marché par des pratiques de recyclage non contrôlées, retardant ainsi leur retrait et contaminant les nouveaux matériaux.²⁴

Cette perpétuation des produits chimiques dangereux dans l'économie circulaire constitue une justification empirique puissante pour le pilier « sûr » du cadre SSbD. Il démontre que s'appuyer sur les processus de fin de vie pour contenir les dangers est une stratégie insuffisante ; La responsabilité doit être transférée aux phases de conception et d'approvisionnement des matériaux. Pour Thermoharv, cela signifie que même si une technologie de recyclage parfaite est développée, la stratégie d'approvisionnement en matériaux du projet doit activement filtrer et éviter les matières premières contenant ces additifs hérités. Sans de telles mesures proactives, le produit final, bien qu'étant fabriqué à partir de contenu recyclé, pourrait rester dangereux et ne pas répondre aux critères SSbD, compromettant à la fois la sécurité et la viabilité à long terme du modèle circulaire.

V. Vers un avenir circulaire : recommandations et voies stratégiques

5.1 Repenser pour une économie circulaire : une approche « couplée »

Une solution purement technique pour le recyclage est insuffisante pour atteindre une véritable circularité. Une approche globale nécessite une « innovation au niveau du système »⁵ où la conception physique du produit est « couplée » à un modèle économique stratégique. Pour le projet Thermoharv, cela signifie concevoir des vêtements intelligents ou des manchons composites avec des composants faciles à démonter, qui peuvent être réparés ou remplacés.¹⁹ Cela inclut l'utilisation de pièces et de matériaux modulaires facilement séparés, un principe fondamental dans la feuille de route de l'industrie des composites pour la conception circulaire.¹⁹ Cependant, l'efficacité de ces méthodes de conception peut être limitée par des modèles économiques existants et un manque de marché pour les matériaux recyclés.¹⁵

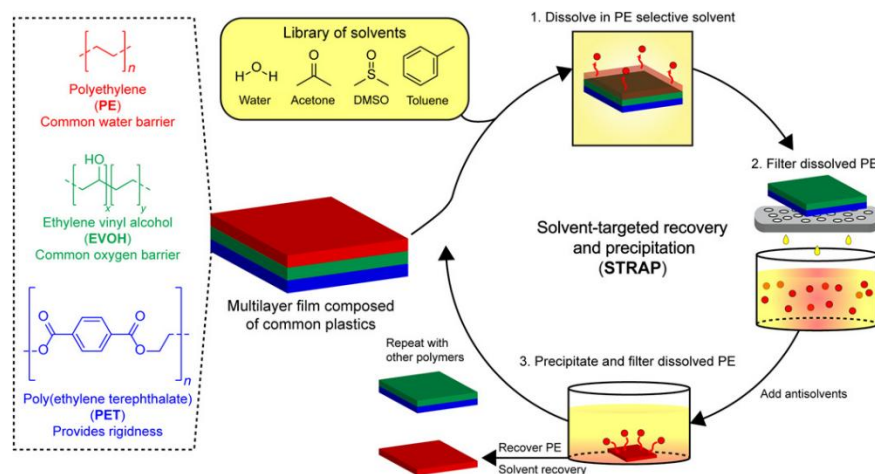
Pour surmonter cela, le consortium Thermoharv devrait explorer et prototyper des modèles économiques circulaires garantissant le contrôle en fin de vie. Un modèle convaincant est le « produit en tant que service », où le consortium ou un partenaire associé conserve la propriété des dispositifs de collecte d'énergie thermique.¹³ Au lieu de vendre les produits directement, ils pourraient louer les

vêtements élégants ou fabriquer des manches, garantissant ainsi qu'à leur fin de vie, les appareils soient retournés dans une installation centralisée et contrôlée pour leur valorisation.⁸ Ce modèle, qui gagne en popularité dans l'industrie textile, permettrait de maintenir les produits en circulation plus longtemps et d'empêcher qu'ils n'entrent dans un flux de déchets fragmenté et non équipé.⁸ Cette stratégie commerciale fournirait une boucle de rétroaction directe aux concepteurs, permettant une amélioration continue des produits et l'innovation des matériaux, fermant ainsi la boucle en pratique, et pas seulement en théorie.

5.2 Technologies avancées de recyclage : un chemin vers la valorisation de la haute pureté

Compte tenu de la complexité inhérente aux matériaux multicouches de Thermoharv, le recyclage mécanique conventionnel n'est pas une voie viable vers une circularité à haute valeur. La dégradation des propriétés thermomécaniques due à la fusion répétée et l'incapacité à séparer les couches fusionnées en font un choix sous-optimal.⁴ Une voie plus prometteuse est l'application de technologies avancées de recyclage, en particulier les procédés à base de solvants.

Le recyclage à base de solvants utilise des solvants pour dissoudre sélectivement les polymères cibles (Figure 5), les séparant ainsi des additifs, colorants et autres contaminants.⁶ Cette méthode offre une solution plus propre et plus ciblée, capable de produire des recyclages de haute pureté avec des « propriétés de matériaux vierges ».⁶ Le procédé est moins énergivore que le recyclage thermochimique et convient particulièrement aux plastiques et composites complexes et contaminés.⁶ Des procédés spécifiques, tels que la méthode de récupération et de précipitation ciblées par solvant (STRAP), ont démontré la capacité de récupérer toutes les couches polymères constitutives à partir de films multicouches avec une grande efficacité des matériaux.²⁷ Une approche alternative consiste en un procédé de micro-perforation permettant aux agents chimiques d'accéder et d'enlever les adhésifs, une procédure simple et respectueuse de l'environnement qui permet de séparer les matériaux multicouches sans avoir besoin de solvants organiques.²⁸ L'existence de ces technologies offre une orientation claire et concrète pour le projet Thermoharv. En intégrant un protocole de recyclage à base de solvants, le projet peut faire passer le défi de fin de vie d'une question de « si » à un « comment », garantissant ainsi que les polymères et composants précieux sont récupérés et réutilisés, complétant ainsi la boucle circulaire.



Theodore W. Walker et al., Sci. Adv.6, eaba7599(2020)

Figure 4 Exemple de dissolution d'un film polymère multicouche

5.3 Le rôle des matériaux de nouvelle génération : l'idéal SSbD

L'alignement le plus profond avec le cadre SSbD impliquerait la recherche et le développement de Thermoharv sur les matériaux explorant les polymères de nouvelle génération conçus intrinsèquement pour la circularité et la sécurité. L'une de ces classes de matériaux est celle des polyuréthanes non isocyanates (NIPU). Les polyuréthanes conventionnels (PU), qui sont susceptibles d'être utilisés dans les composites flexibles de Thermoharv, sont généralement fabriqués à partir d'isocyanates, qui sont très réactifs et posent des risques de sécurité.²⁹ NIPU, en revanche, sont synthétisés via des voies « sans isocyanate », souvent à partir de précurseurs bio-basés.³⁰

La structure chimique unique des NIPU, qui comprend des groupes fonctionnels adaptés à l'échange dynamique de liaisons, les rend plus faciles à retraiter et à recycler.³⁰ L'exploration des NIPU ou de polymères bio-basés similaires, de nouvelle génération, serait une puissante incarnation du cadre SSbD en action. En résolvant fondamentalement un problème de sécurité à la source—l'élimination d'un produit chimique dangereux du processus de synthèse—ce choix de matériau satisfait simultanément à la fois les piliers « sûrs » et « durables » du cadre SSbD.³⁰ C'est un exemple par excellence d'une approche de conception pour la circularité, où le matériau lui-même est conçu pour permettre un système véritablement bouclé, représentant l'avenir idéal pour les projets à l'intersection de la technologie et de la durabilité.

Aspect	Description de l'alignement avec SSbD
Cadre volontaire	L'approche explicite « éco-responsable » du projet et son accent mis sur la valorisation en fin de vie démontrent un engagement proactif envers les principes volontaires de la SSbD, le positionnant comme un projet pilote pour l'application pratique du cadre.
Définition « sûre »	Le processus de sélection des matériaux du consortium doit prioriser l'évitement des propriétés intrinsèquement dangereuses et filtrer activement les additifs hérités afin d'assurer la sécurité du produit final et d'empêcher leur réintroduction dans la chaîne d'approvisionnement par le recyclage.
Définition de « durable »	Le projet Thermoharv répond directement à ce critère en accomplissant une fonction précieuse — la récupération d'énergie — sans dépasser les limites environnementales, en utilisant la chaleur résiduelle pour produire de l'électricité et en réduisant l'empreinte énergétique globale des bâtiments.
Principe directeur : Efficacité des matériaux	En développant des matériaux légers et flexibles pour la récupération d'énergie, le projet maximise la production fonctionnelle par unité de matériau, réduisant ainsi la consommation de ressources par rapport aux systèmes électroniques rigides traditionnels.

Principe directeur : Conception pour la fin de vie	Le succès du projet repose sur sa capacité à concevoir des produits multi-matériaux qui peuvent être facilement démontés, séparés et valorisés en fin de vie. Cela nécessite un passage des pratiques de conception conventionnelles à un accent sur la modularité et la compatibilité des matériaux avec les processus avancés de recyclage.
Processus itératif	En tant que projet de recherche, Thermoharv a l'opportunité d'appliquer l'approche d'évaluation itérative et progressive du cadre SSbD. Cela permet une réévaluation continue et une optimisation de la sécurité et de la durabilité du produit à mesure que l'innovation mûrit et que de nouvelles données deviennent disponibles.

Protocole de recyclage	Description du procédé	Avantages	Inconvénients et applicabilité à Thermoharv
Recyclage mécanique	Broyer et faire fondre des plastiques pour les réutiliser dans de nouveaux produits, souvent avec une application différente (downcycling). ²⁶	Simple, relativement peu coûteux et largement disponible. ³	Inefficace pour les structures multi-matériaux en raison de l'incompatibilité chimique et de la difficulté de séparation. ⁴ Les propriétés thermomécaniques se dégradent à chaque cycle. ²⁶ Non adapté aux matériaux complexes de Thermoharv.
Recyclage chimique	La dépolymérisation des déchets plastiques en monomères ou en petites molécules précieuses à l'aide de haute chaleur ou de catalyseurs. ⁶	Crée des matières premières de haute qualité pour de nouveaux produits. ⁶ Peut gérer certains flux de déchets mixtes.	Une forte intensité énergétique nécessite souvent des conditions difficiles. ²⁶ Les méthodes les plus courantes (par exemple, la glycolyse) ne récupèrent qu'un seul composant (polyols), pas tous les matériaux de départ originaux. ²⁶

Recyclage à base de solvants	Utilise des solvants pour dissoudre sélectivement un polymère cible à partir d'un matériau mélangé, laissant derrière lui des contaminants et d'autres matériaux. Les polymères de haute pureté sont récupérés par précipitation. ⁶	Produit des recyclages de haute pureté avec des « propriétés de matériaux vierges ». ⁷ Élimine efficacement les contaminants et les additifs dangereux. Moins énergivore que le recyclage chimique. ⁶	Cela nécessite des solvants spécialisés et une infrastructure. Le choix du solvant dépend du type de stratifié plastique. ²⁷ Des résidus de promoteurs d'adhérence peuvent rester sur des couches séparées. ²⁷ itinéraires les plus prometteurs pour Thermoharv.
-------------------------------------	--	---	--

VI. Conclusion : Un plan directeur pour l'innovation durable

Le projet Thermoharv est plus qu'une initiative technique ; il constitue un cas d'essai crucial pour l'application pratique du cadre Safe & Sustainable by Design (SSbD) de l'Union européenne et des principes de l'économie circulaire. La mission du projet de créer des dispositifs multimatériaux et flexibles de récupération d'énergie pour les bâtiments et les vêtements intelligents s'aligne directement avec la vision stratégique de l'UE pour une transition industrielle verte et circulaire. Cette analyse démontre qu'en convertissant l'énergie thermique résiduelle en énergie utilisable, le projet incarne les principes fondamentaux SSbD de minimisation de l'impact environnemental et de fourniture de fonctions dans les limites planétaires.¹¹

Cependant, l'analyse révèle également un défi systémique important : le paradoxe inhérent aux produits multi-matériaux, où l'innovation fonctionnelle peut involontairement entraîner des échecs en fin de vie.⁴ Surmonter cela nécessite une approche stratégique et multifacette. Le consortium doit aller au-delà d'un simple focus sur la performance technique pour une prise en compte globale de l'ensemble du cycle de vie du produit, guidée par le cadre SSbD. Cela inclut la conception de produits facilement réparables et démontables, une philosophie de conception qui doit être « couplée » à un modèle économique garantissant le contrôle en fin de vie, comme un cadre produit en tant que service.⁸

De plus, le succès du projet dépend de sa capacité à exploiter des technologies avancées de recyclage. Les preuves suggèrent que le recyclage à base de solvants, avec sa capacité à séparer les matériaux de haute pureté et à éliminer les contaminants, représente la voie la plus viable vers une circularité à haute valeur pour les matériaux complexes de Thermoharv.⁶ Un engagement envers cette technologie, combiné à une stratégie proactive d'approvisionnement en matériaux qui évite les additifs hérités, garantirait que les produits finaux soient à la fois sûrs et véritablement durables.²⁵

En fin de compte, le projet Thermoharv a le potentiel de devenir un modèle définitif pour une nouvelle ère d'innovation durable. En démontrant que l'excellence technique peut être intégrée de manière transparente à la sécurité, à la circularité et à des modèles économiques solides, elle peut fournir un modèle concret pour surmonter les défis d'une économie linéaire et construire un avenir non

seulement fonctionnel et compétitif, mais aussi intrinsèquement plus sûr et plus durable pour les personnes et la planète.

Remerciements

Le projet Thermoharv a été rendu possible grâce au soutien d'Interreg France Wallonie Vlaanderen et au cofinancement de la province de Flandre-Occidentale. Thermoharv est un projet coordonné par l'Université de Mons.

