



EUROPEAN UNION

Interreg



EUROPEAN UNION

France (Channel
Manche) England

Projet BIO-CIRC

Fonds européen de développement régional

Projet BIO-CIRC

Bio(and)**Circular** **I**nsulation for **R**esourceful
Construction

Note de concept du prototype

30 juin 2022 – Version finale

Rédigé par Mark Lynn, directeur général d'Eden Renewable Innovations Ltd.

Relecture et contribution des partenaires de BIO-CIRC



EUROPEAN UNION
European Regional Development Fund

nomadéïs

ASBP
The Alliance
for Sustainable
Building Products

therma
fleece
Nature's finest insulation

backtoearth

Synopsis du projet

Le projet BIO-CIRC (Bio(and)Circular Insulation for Resourceful Construction) souhaite apporter une réponse aux dépendances du secteur du bâtiment au carbone, à l'énergie et aux ressources tout en tirant partie d'un déchet non-valorisé : le polyester issu de literie usagée.

Le projet vise à concevoir, développer et à déployer 3 prototypes d'isolants innovants et bas-carbone fait à partir de polyester en combinaison avec des fibres biosourcées. Il vise aussi à promouvoir l'émergence d'une filière dédiée à la valorisation du polyester et l'usage de Fibres Naturelles et Recyclées dans la construction.

Ce projet est porté par un partenariat transmanche de 4 maillons clés et complémentaires de la chaîne de valeur du bâtiment :

- Nomadéis (chef de file) ;
- Alliance for Sustainable Building Products ;
- Eden Renewable Innovations ;
- Back to Earth.

Planifié sur une durée de 2 ans, le projet BIO-CIRC est financé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER). La contribution du FEDER s'élève à 399 600€ pour un budget total de 499 500€.



EUROPEAN UNION



Nomadéis Le Havre

120, boulevard Amiral Mouchez • 76600 Le Havre • France

Téléphone : +33 (0)1 45 24 31 44

www.nomadeis.com



The Alliance for Sustainable Building Products

The Foundry, 5 Baldwin Terrace • London N1 7RU • United Kingdom

Téléphone : +44 (0) 20 7704 3501

<https://asbp.org.uk>



Eden Renewable Innovations Limited

Soulands Gate, Soulby, Penrith • Cumbria, CA11 0JF • United Kingdom

Téléphone : +44 (0) 1768 486285

<https://www.thermafleece.com>



Back To Earth Limited

22 Tuns Lane, Silverton • Exeter, EX5 4HY • United Kingdom

Téléphone : +44 (0) 1392 861763

<https://www.backtoearth.co.uk/>

Droits de copyrights

Le texte de la présente publication peut être reproduit en tout ou en partie à des fins pédagogiques et non lucratives sans autorisation spéciale de la part du détenteur du copyright, à condition de faire mention de la source. Les partenaires du projet BIO-CIRC seraient reconnaissants de recevoir un exemplaire de toutes les publications qui ont utilisé ce matériel comme source. Il n'est pas possible d'utiliser la présente publication pour la revente ou à toute autre fin commerciale sans demander au préalable par écrit l'autorisation de ses auteurs.

Sommaire

Résumé	5
Contexte	5
Polyester	6
Vue d'ensemble	6
Fin de Vie	8
Recyclage.....	8
Biodégradation.....	8
Hygroscopicité et absorption d'humidité	8
Fibres naturelles	9
Respirabilité	9
Tampon thermique.....	10
Faible source de polluants et bonne qualité de l'air intérieur (QAI)	10
Propriétés d'isolation pour la modélisation hygrothermique.....	11
Caractéristiques de l'isolation du prototype	11
Matériaux	11
Exigences de performance	11
Structure.....	11
Composition et estimations des quantités de matières premières requises.....	12
Sources	13



Résumé

Le polyéthylène téréphtalate (PET), communément appelé polyester, est le quatrième polymère le plus produit dans le monde. Il est principalement utilisé dans la fabrication de fibres synthétiques (60%) et d'emballages (30%). Les fibres de polyester sont généralement utilisées dans les produits de literie rembourrés, comme les couettes ou les oreillers, qui génèrent des déchets importants en fin de vie. Certains produits à base de PET, tels que les emballages post-consommation, sont recyclés, alors que d'autres, comme les articles de literie rembourrés, ne le sont pas.

La technologie permettant de dégrader le PET par voie enzymatique en ses composants (acide téréphtalique et éthylène glycol) est en plein développement. Elle permet de résoudre le problème de persistance du PET et offre des options de fin de vie utiles pour les déchets de PET. De nombreux progrès sont cependant nécessaires. Dans l'intervalle de temps, il est donc essentiel de retirer les plastiques tels que le PET de la circulation jusqu'à ce que la technologie de traitement des déchets progresse.

Les fibres de PET sont utilisées pour fabriquer des isolants sûrs, abordables et efficaces. S'il est effectivement possible de récupérer les fibres de PET et de les re-fibrer à partir de matériaux à base de fibres de PET, ces fibres pourraient donc être converties en isolants. Les couettes et les oreillers utilisent des fibres de PET conçues pour isoler et constituent donc une source idéale d'approvisionnement.

Si le PET est hygroscopique, le degré d'hygroscopicité et le caractère naturel de l'isotherme de sorption de l'humidité sont tels que l'incorporation de fibres naturelles dans un isolant contenant du PET confère à l'isolant des propriétés respirantes. La laine de mouton et le chanvre sont les fibres les plus facilement accessibles et les plus appropriées à cet effet.

Cette note conceptuelle décrit les propriétés physiques et chimiques du PET, les méthodes de recyclage et l'impact du fibrage sur les propriétés physiques et chimiques. Les propriétés isolantes du polyester sont également étudiées, ainsi que le processus de dégradation du PET. Les spécifications des mélanges de PET et de fibres naturelles sont examinées.

L'objectif de ce travail est de re-fibrer les fibres de PET existantes plutôt que de retraiter le PET et de refilet de nouvelles fibres. Trois prototypes et leurs caractéristiques sont présentés.

Contexte

En 2019, le gouvernement britannique a inscrit dans la loi son engagement à atteindre des émissions de gaz à effet de serre nettes nulles d'ici 2050. Cet engagement pour un objectif ambitieux a ainsi multiplié les opportunités au sein des secteurs (dont celui de l'isolation thermique).

Les produits d'isolation thermique permettent de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Pour poursuivre ces efforts, il faut fabriquer des isolants à partir de matériaux qui ont eux-mêmes moins d'impact sur les niveaux de gaz à effet de serre : les matériaux tels que les fibres naturelles et recyclées répondent à cet enjeu. Jusqu'à présent, l'utilisation de ces matériaux et technologies pour l'isolation est néanmoins restée limitée au Royaume-Uni.



L'ensemble du marché britannique de l'isolation est actuellement estimé à 3-5 milliards de livres sterling par an. L'ensemble du marché britannique de l'isolation en fibres naturelles et recyclées (NRFI) représente moins de 20 millions de livres par an, soit une pénétration du marché inférieure à 0,5 %. Malgré cela, le marché de l'isolation en fibres naturelles et recyclées croît plus rapidement que le marché général et connaît actuellement un taux de croissance de plus de 20 %.

Parmi les obstacles à la croissance, on note le manque de sensibilisation aux produits existants, le manque de cohésion entre les technologies existantes qui pourraient être utilisées pour la fabrication d'isolants et le manque de flux de matières premières plus abordables.

Actuellement, le prix des IFNR se situe dans le haut de la gamme du marché et côtoie celui de matériaux comme le PIR et le PUR. Les IFNR sont environ 50% plus chers que l'isolation minérale de haute qualité et environ 5 à 10 fois plus chers que l'isolation en fibre de verre de qualité inférieure.

Le coût des matières premières représente jusqu'à 75 % du coût des IFNR finis. Trouver des sources d'approvisionnement moins chères peut donc réduire considérablement le coût du produit fini. Une réduction de 50% du coût des matières premières entraînerait une réduction de 40% du prix des IFNR. Cela placerait le prix des IFNR au niveau de celui de la fibre de verre de bonne qualité et augmenterait considérablement le potentiel du marché.

Trouver de nouveaux canaux d'approvisionnement nécessite d'établir des liens entre des technologies existantes. Les technologies d'assainissement des oreillers et couettes usagés post-consommation existent dans le secteur de la blanchisserie industrielle. La technologie de transformation des oreillers et couettes en fibres réutilisables existe pour d'autres textiles domestiques à l'échelle industrielle et de nombreuses entreprises du secteur des non-tissés disposent d'une technologie pouvant être utilisée pour transformer ces fibres en isolant.

Le principal fournisseur britannique de couettes en polyester fabrique actuellement 10 millions d'unités par an. La fibre de polyester contenue dans ces couettes suffirait à elle seule à isoler environ 200 000 propriétés par an si la fibre peut être retraitée.

En connectant les processus évoqués, il serait possible de créer une nouvelle industrie tout en réduisant considérablement le prix du marché pour les produits d'isolation finis. Une étude de marché plus complète nous permettra de compléter le tableau et de mieux comprendre et promouvoir cette opportunité.

Polyester

Vue d'ensemble

Les polyesters sont des polymères semi-cristallins formés par la polymérisation d'un acide dicarboxylique et d'un diol. Les polyesters possèdent un groupe fonctionnel ester dans chaque unité répétitive de leur chaîne principale. Le polyester le plus couramment utilisé est le polyéthylène téréphtalate (PET).

La majorité de la production mondiale de PET est destinée aux fibres synthétiques (plus de 60%), la production de bouteilles représentant environ 30% de la demande mondiale. Dans le contexte des applications textiles, le PET est désigné par son nom commun, le polyester, tandis que

l'acronyme PET est généralement utilisé en relation avec les emballages. Le polyester représente environ 18% de la production mondiale de polymères et est le quatrième polymère le plus produit.

Le PET est constitué d'unités polymérisées du monomère éthylène téréphthalate ainsi que d'unités répétitives (C₁₀H₈O₄).

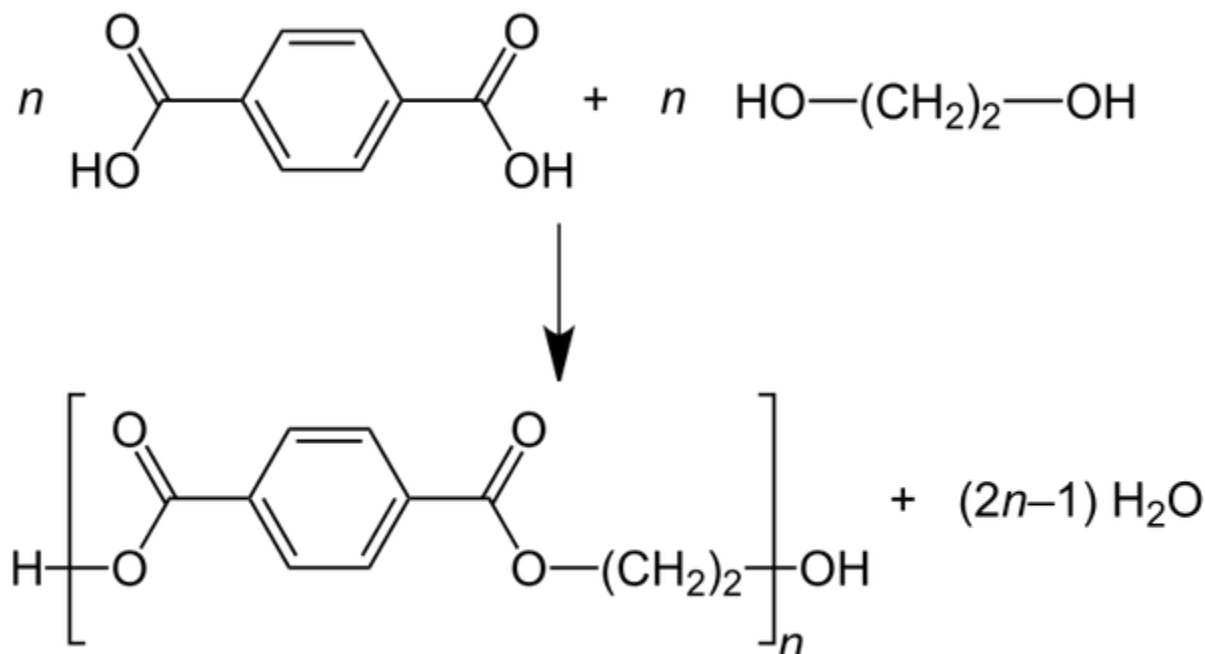


Tableau 1 : Propriétés physiques et chimiques du PET

PROPRIETE	VALEUR
Poids Moléculaire de l'Unité Répétée	192 g.mol ⁻¹
Poids Moléculaire Moyen	30,000- 80,000 g.mol ⁻¹
Densité	1.41 g.m ⁻³
Température de Transition Vitreuse	69-115 °C
Point de Fusion	265 °C
Chaleur de fusion	166 J.g ⁻¹
Résistance à la Rupture	50 Mpa
Résistance à la Traction (module de Young)	1700 Mpa
Absorption d'Eau (24h)	0.5% w/w
Chaleur de Combustion	5.7 Kcal.g ⁻¹
Indice Limite d'Oxygène	20.60%
Température d'Allumage	485-560 °C



Fin de Vie

Recyclage

Le PET est lavé pour séparer la saleté et les contaminants hydrosolubles. Le PET est séparé des autres plastiques et fibres par flottaison et les métaux sont éliminés par des méthodes électrostatiques et magnétiques.

Le recyclage du PET consomme moins d'énergie que la production de PET vierge. Cependant, le re-fibrage des fibres de PET pourrait utiliser beaucoup moins d'énergie et serait l'option de fin de vie privilégiée pour les matériaux qui contiennent des fibres textiles de PET pouvant être utilisées dans l'isolation.

Biodégradation

Les hydrolases microbiennes du polyéthylène téréphtalate agissent sur le plastique polyéthylène téréphtalate (PET). Les enzymes qui présentent des activités d'hydrolyse du PET comprennent les enzymes hydrolases d'esters carboxyliques telles que les cutinases, les lipases et les estérases (Guebitz et Cavaco-Paulo, 2008 ; Kawai et al., 2020). Les hydrolases ont été isolées de sources bactériennes telles que *Ideonella sakaiensis* et *Thermobifida fusca* et de champignons tels que *Fusarium solani*, *Humicola insolens* et *Aspergillus oryzae* (Wang et al., 2008 ; Korpecka et al., 2010 ; Zimmermann et Billig, 2010).

Plus précisément, les cutinases et les enzymes de type cutinase sont capables de transformer des polyesters de poids moléculaire élevé (Taniguchi et al., 2019). Les cutinases se sont avérées hydrolyser la cutine, et divers polyesters dans des conditions de température de 40-70°C et de pH 7-9, sans l'aide de cofacteurs (Furukawa et al., 2019)

Les outils d'ingénierie génétique et protéique ont généralement été utilisés pour augmenter la capacité de dégradation du plastique des microorganismes et de leurs enzymes, respectivement (Wilkes et Aristilde, 2017 ; Jaiswal et al., 2020). Les principaux produits de dégradation de l'hydrolyse du PET sont l'acide mono-(2-hydroxyéthyl)téréphtalique (MHET), l'éthylène glycol (EG) et l'acide téréphtalique (TPA). Le MHET peut à son tour être dégradé par la MHETase, produisant de l'éthylène glycol et de l'acide téréphtalique. Il a également été démontré que *Bacillus* sp. peut dégrader davantage le TPA (T.B. Karegoudar, B.G. Pujar).

Tableau 2 – Enzymes actives du PET sélectionnées

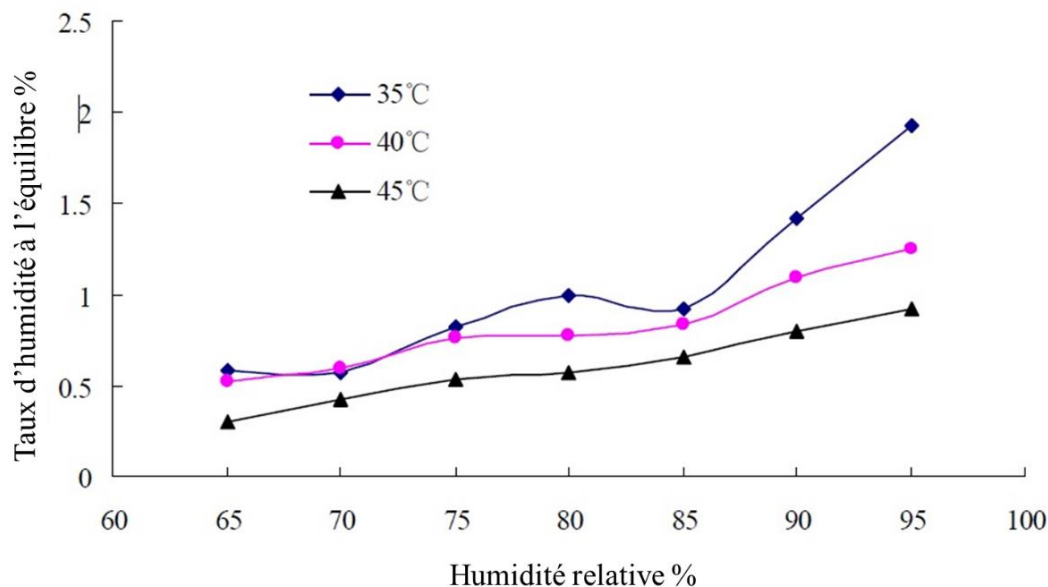
Enzyme	Source Microbienne	Température de réaction (°C)	Substrat	Dégradation constatée	Source
BsEstB	<i>Bacillus subtilis</i> 4P3-11	40 - 45	3PET	Libération de TPA, MHET	Ribitsch et al., 2011
Cut190	<i>Saccharomonosora iviris</i> AHK190	60 - 65	Film PET amorphe et PET de type emballage	Libération de TPA, MHET	Kawai et al., 2014
IsPETase	<i>Ideonella sakaiensis</i> 201-F6	20 -45	lcpET et PET de type bouteille	Libération de TPA, MHET, EG	Yoshida et al., 2016
PE-H	<i>Pseudomonas aestusnigri</i>	30	Film PET amorphe	Libération de MHET	Bollinger et al., 2020

Hygroscopicité et absorption d'humidité

Le PET est légèrement hygroscopique avec une absorption d'humidité (24h) d'environ 0,5% p/p. Le PET est considéré comme un matériau hydrophobe non respirant. Des recherches ont été menées pour déterminer si les pores et les rainures de surface créés dans les fibres de polyester



peuvent créer un élément de sorption d'humidité et de respirabilité (Hong-ru Liu 1,a*, Shang-ping Wu). L'isotherme de sorption ci-dessous montre la teneur en humidité des fibres de PET modifiées sous une humidité relative et une température variable.



Les isothermes de sorption montrent que le PET modifié en surface est capable de sorption d'humidité à température normale, mais celle-ci est limitée à moins de 1%, ce qui est un ordre de grandeur inférieur à celui des fibres naturelles telles que la laine ou le chanvre. Afin de conférer un niveau fonctionnel de respirabilité à l'isolation à base de PET, il est nécessaire d'incorporer des fibres naturelles dans l'isolation.

Fibres naturelles

Les isolants en fibres naturelles possèdent un certain nombre de propriétés clés qui pourraient être incorporées dans un isolant en polyester recyclé, à la condition que les fibres soient mélangées dans les bonnes proportions.

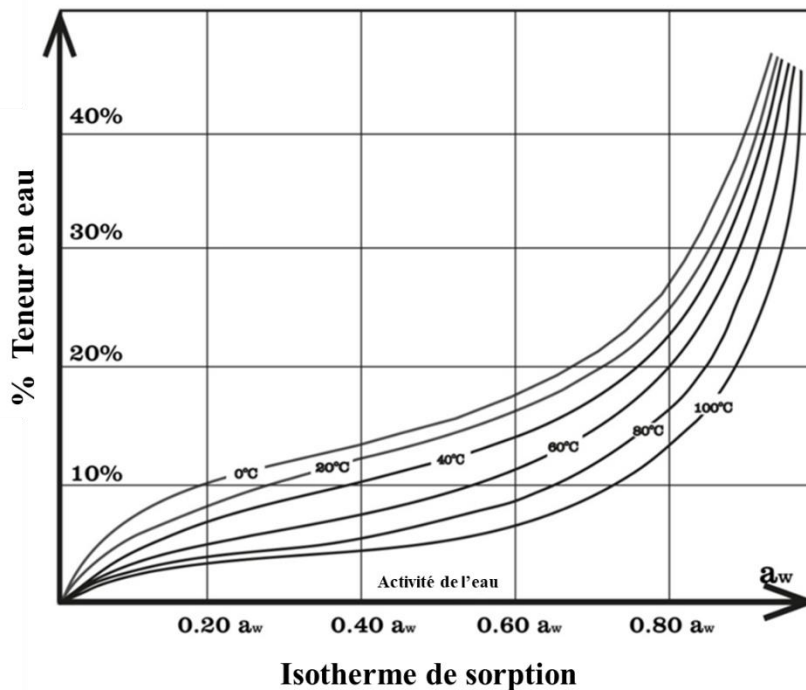
Respirabilité

La chaleur et l'humidité sont inextricablement liées. Il est connu qu'une trop faible humidité peut avoir un effet très néfaste sur les occupants et l'état de la structure du bâtiment dans les habitations. Des travaux mal menés pour améliorer l'efficacité énergétique peuvent au contraire aggraver les problèmes liés à une humidité excessive. Le UK Centre for Moisture in Buildings a été fondé pour rechercher, étudier et informer sur ces questions : <https://ukcmb.org/>.

La respirabilité est un aspect souvent négligé ou mal compris, qui peut contribuer à un équilibre sain de l'humidité dans la maison. Des matériaux véritablement respirants permettent le passage de l'humidité là où elle est nécessaire, tout en la retenant et en la libérant en fonction du taux d'humidité interne. Cela permet aux matériaux respirants de capter l'humidité et de la conserver sous une forme sûre, tout en évitant les goulots d'étranglement qui créent l'accumulation d'humidité dans la structure du bâtiment.



L'isotherme de sorption de l'humidité ci-dessous est typique des fibres naturelles et montre une capacité tampon d'humidité fonctionnelle d'environ 10 % de la fibre naturelle. Cela équivaut à 100 g par kg de fibre naturelle par mètre carré d'isolation utilisée.



Tampon thermique

Les isolants et les matériaux de construction biosourcés ont une masse thermique optimale qui leur permet d'absorber la chaleur au bon rythme afin d'éviter une accumulation excessive de chaleur interne pendant la partie la plus chaude de la journée durant les mois chauds. Cela permet de réduire la demande en systèmes de climatisation énergivores pendant les mois d'été et de créer un équilibre thermique beaucoup plus sain dans l'habitation tout au long de l'année.

Le gain de chaleur est mesuré par le délai de décrémentation. Le niveau de retard de décrémentation devrait faire partie des mesures de performance pour les nouvelles constructions et les rénovations et être enregistré dans les DPE par exemple.

Faible source de polluants et bonne qualité de l'air intérieur (QAI)

Les matériaux de construction peuvent être une source importante de composés organiques volatils (COV). Les COV réduisent la qualité de l'air intérieur et peuvent être nocifs. Le contrôle de ces polluants à la source doit être un élément clé dans le choix des matériaux et des systèmes à moderniser. L'humidité excessive donne naissance à des COV microbiens (COVM) qui contribuent à une série de maladies respiratoires et autres. Les produits de construction durables tels que les IFN sont une faible source de COV et jouent un rôle crucial dans le maintien de niveaux d'humidité intérieure sains, contribuant à contrôler les concentrations de COV dans le logement.



Propriétés d'isolation pour la modélisation hygrothermique

Selon le matériau de construction, certaines propriétés hygrothermiques doivent être quantifiées afin de déterminer les performances attendues des systèmes dans lesquels le matériau est incorporé. Le tableau ci-dessous présente les exigences relatives au WUFI pour les prototypes :

Propriété du matériau	Standard
Densité apparente	EN 1602
Porosité (%)	ISO 15901-1:2016
Conductivité thermique	ISO 8301:1991 / BS EN 12667:2001
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	EN ISO 12572 :2016
Coefficient d'absorption d'eau	EN ISO 15148: 2002
Sorption de la vapeur d'eau	EN ISO 12571:2013

Caractéristiques de l'isolation du prototype

Matériaux

1. Un liant polyester bi-composant est nécessaire pour maintenir les fibres d'isolation ensemble. La proportion minimale de liant nécessaire pour assurer la durabilité est de 10%.
2. Polyester recyclé, récupéré de déchets de literie rembourrés et re-fibré.
3. Laine grossière.
4. Chanvre.
5. Retardateur de feu - minéral inorganique.

Exigences de performance

- ISO 8301:1991 - Isolation thermique - conductivité thermique minimale de 0,044 W/mK.
- EN 11925 - Essais de réaction au feu. Propagation de la flamme <150mm.
- ISO 12572 - Facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau - tel que déterminé.
- EN 1602 - Densité apparente - telle que déterminée.
- BS EN ISO 12571:2013 - Fonction de stockage de l'humidité - telle que déterminée.
- BS ISO 15901-1:2016 - Porosité - % tel que déterminé.
- EN ISO 15148 - Coefficient de transport des liquides - tel que déterminé.

Structure

- Isolation matelassée à liaison thermique
- Epaisseur > 50mm
- Largeur 300-600mm
- Longueur 1200mm
- Densité - suffisante pour obtenir une conductivité thermique minimale de 0,044 W/mK.



Composition et estimations des quantités de matières premières requises

En vue d'exploiter une nouvelle unité de fabrication, il est anticipé que 500 tonnes de PET recyclé issu de couettes et oreillers usagés par an devraient être suffisantes. Il est ainsi possible d'estimer les quantités nécessaires des autres matières premières pour chaque prototype. Les compositions des prototypes testés et les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

		PET recyclé de couettes et oreillers	PET recyclé de bouteilles	Laine de mouton	Co-liant PET
Prototype 1	%	65%	25%	0%	10%
	Quantité (t)	500,0	192,3	0,0	76,9
Prototype 2	%	25%	0	65%	10%
	Quantité (t)	500,0	0,0	1300,0	200,0
Prototype 3	%	39%	0	51%	10%
	Quantité (t)	500,0	0,0	653,8	128,2



Sources

- Hong-ru Liu 1,a*, Shang-ping Wu Study of Fitting Models on Moisture Sorption Isotherms of Profiled Polyester Fabric
- Guebitz, G. M., and Cavaco-Paulo, A. (2008). Enzymes go big: surface hydrolysis and functionalisation of synthetic polymers. Trends Biotechnol. 26, 32–38. doi: 10.1016/j.tibtech.2007.10.003
- Wang, X., Lu, D., Jönsson, L., and Hong, F. (2008). Preparation of a PET-Hydrolyzing Lipase from *Aspergillus oryzae* by the Addition of Bis (2-hydroxyethyl) terephthalate to the culture medium and enzymatic modification of PET Fabrics. Eng. Life Sci. 8, 268–276. doi: 10.1002/elsc.200700058
- Taniguchi, I., Yoshida, S., Hiraga, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., and Oda, K. (2019). Biodegradation of PET: current status and application aspects. ACS Catal. 9, 4089–4105. doi: 10.1021/acscatal.8b05171
- Furukawa, M., Kawakami, N., Tomizawa, A., and Miyamoto, K. (2019). Efficient degradation of poly(ethylene terephthalate) with *thermobifida fusca* cutinase exhibiting improved catalytic activity generated using mutagenesis and additive-based approaches. Sci. Rep. 9:16038. doi: 10.1038/s41598-019-52379-z
- Wilkes, R. A., and Aristilde, L. (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. J. Appl. Microbiol. 123, 582–593. doi: 10.1111/jam.13472
- EN ISO 15148: 2002 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment — Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle
- EN ISO 12571:2013 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment — Détermination des propriétés de sorption hygroscopique
- EN ISO 12572 :2016 Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment — Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau — Méthode de la coupelle
- ISO 15901-1:2016 Evaluation de la distribution de taille des pores et la porosité des matériaux solides par porosimétrie à mercure et l'adsorption des gaz — Partie 1: Porosimétrie à mercure
- EN 12667:2001 Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique
- ISO 11925-2:2020 Essais de réaction au feu — Allumabilité de produits soumis à l'incidence directe de la flamme — Partie 2: Essai à l'aide d'une source à flamme unique



EUROPEAN UNION

Interreg



France (Channel
Manche) England

Projet BIO-CIRC

Fonds européen de développement régional

Le projet BIO-CIRC s'inscrit dans le programme de coopération territoriale européenne Interreg VA France (Manche) Angleterre et bénéficie du soutien financier du Fonds Européen de Développement Régional