

Comparaison de matériaux pour le stockage de chaleur/froid dans l'habitat.

Anaïs JEANJEAN^{1,2*}, Régis OLIVES¹, Xavier PY¹, Olivier ROUGE², Eric VILA²

¹Laboratoire PROCédés Matériaux Energie Solaire PROMES-CNRS UPR 8521, Université de Perpignan UPVD, Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud – 66100 Perpignan Cedex

² SARL VILMOR EnR, 615 rue Aristide Bergès, ZI Polygone Nord – 66000 Perpignan

Résumé – L'objectif de cette communication est de comparer l'ensemble des matériaux disponibles en fonction des besoins en inertie d'un bâtiment selon 3 critères : la performance thermique, le coût et l'énergie grise. Le logiciel CES Selector a été utilisé dans le but de comparer les matériaux conventionnels (béton, brique, pierre...) avec de nouveaux matériaux céramiques issus du traitement par vitrification de déchets amiantés, possédant des propriétés thermiques supérieures aux matériaux conventionnels avec un temps de retour énergétique similaire.

Nomenclature

C_m	coût, $\text{€}.\text{kg}^{-1}$	T	température, K
C_p	capacité calorifique, $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	D	déphasage thermique, h
a	diffusivité thermique, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	E_g	énergie grise, $\text{MJ}.\text{kg}^{-1}$
ρC_p	capacité de stockage, $\text{kJ}.\text{m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
x	épaisseur, m	ρ	masse volumique, $\text{kg}.\text{m}^{-3}$
E_{ff}	effusivité thermique, $\text{Ws}^{0.5}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	λ	conductivité, $\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
L_{diff}	longueur de diffusion, m	τ	temps de diffusion, s
q	quantité de chaleur fournie, J / m^2	θ	différence de température

1. Introduction

Dans le cadre de la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment, il s'avère nécessaire d'augmenter l'efficacité énergétique de chaque bâtiment. Cela conduit à la maîtrise de deux paramètres essentiels : d'une part l'isolation qui permet de réduire considérablement les déperditions thermiques et, d'autre part, l'inertie thermique qui amortit les variations extrêmes de température au cours d'une journée. Cette dernière permet également de conserver la chaleur en hiver mais également de limiter les surchauffes en été. Ainsi, le choix des matériaux pour l'inertie et l'isolation est essentiel à l'amélioration énergétique des bâtiments. Après des simulations effectuées sur le logiciel Pléiades+Comfie [1], il en ressort qu'une paroi « idéale » doit respecter certaines dimensions (15 à 25 centimètres) afin de pouvoir restituer en un laps de temps adapté une certaine quantité de chaleur ou de froid (ρC_p supérieure à $2000 \text{kJ}.\text{m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, conductivité de l'ordre de 1 à $2 \text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et déphasage d'environ 6 à 8 heures). Certains matériaux comme le béton et la brique de terre cuite pleine réunissent ces qualités, cependant la quantité d'énergie grise nécessaire à leur fabrication reste trop importante.

De nouveaux matériaux céramiques issus du traitement par vitrification de déchets amiantés (et cependant parfaitement inertes) possèdent des propriétés thermiques supérieures

au béton et à la brique avec un temps de retour énergétique similaire. L'exemple du COFALIT® est alors comparé aux matériaux initialement contenus dans la base de données du logiciel CES Selector 2010. Son usage dans le secteur du bâtiment permettrait d'améliorer l'efficacité énergétique de l'habitat tout en valorisant la filière du recyclage de déchets industriels.

2. Matériaux disponibles pour le stockage à basse température

Dans cette publication, la méthode de sélection des matériaux développée par Prof. Ashby à l'université de Cambridge [2] est utilisée avec le logiciel CES Selector, afin de donner un aperçu des matériaux disponibles pour le stockage thermique à basse température. Cette méthode est largement utilisée dans des phases de conception lorsque différents paramètres doivent être pris en compte tels que les propriétés thermiques, le comportement mécanique, le prix, la disponibilité, le recyclage, l'empreinte carbone...

2.1. Les matériaux conventionnels

La figure 1 présente la capacité de stockage (ρC_p) en fonction de la masse volumique, la capacité de stockage étant définie comme l'aptitude d'un matériau à stocker de la chaleur ou du froid. Les matériaux situés en haut à droite de la Figure 1 sont donc les plus performants en termes d'inertie. On y retrouve la famille des bétons, pierres et briques avec le béton haute performance, le calcaire et la brique de terre cuite.

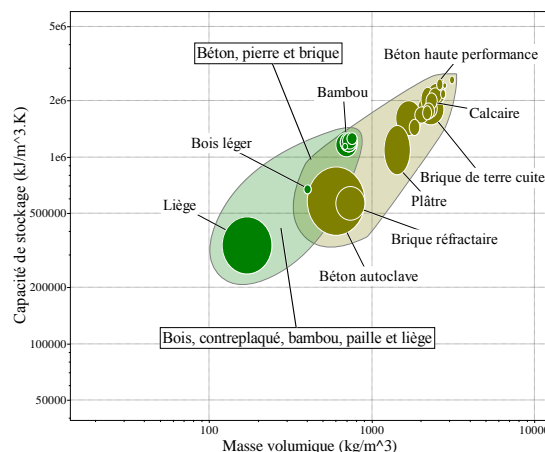


Figure 1 : Capacité de stockage fonction de la masse volumique

Une forte inertie est très intéressante pour conserver d'une part la chaleur en hiver provenant du chauffage et des apports solaires/internes et, d'autre part, le froid en été provenant du rafraîchissement nocturne. Lorsque la capacité de stockage est couplée à la conductivité, on peut alors considérer la diffusivité et le déphasage. Le déphasage thermique représente le décalage de temps lors du transfert de chaleur d'un côté à l'autre d'une paroi. Il s'exprime de la manière suivante:

$$D = 1.38x \sqrt{\frac{1}{3600d}} \quad (1)$$

Une forte capacité de stockage et une faible conductivité entraîne alors une faible diffusivité et donc un déphasage important. Ce type de matériaux, tels que le bambou et le bois comme le montre la figure 2, peuvent stocker plus longtemps la chaleur que du béton ou de la brique pour une même épaisseur. Ils ont cependant été ajoutés dans ce graphique à titre

de comparaison. En effet, la construction d'un mur d'une vingtaine de centimètres se fait majoritairement avec des matériaux de la famille des bétons, pierres et briques plutôt que du bois ou du bambou. Ainsi, le béton haute performance par exemple présente un déphasage moyen d'environ 7 heures pour un mur de 20cm.

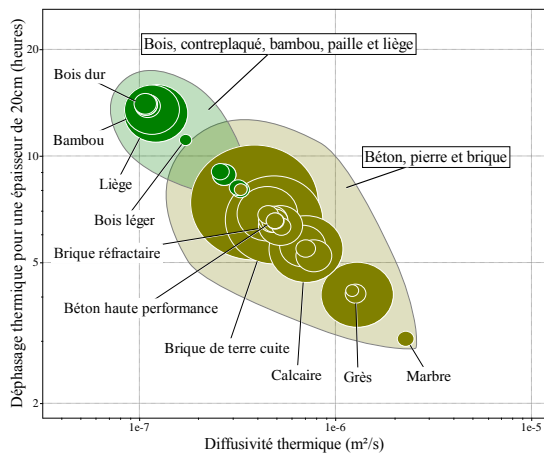


Figure 2 : Déphasage fonction de diffusivité

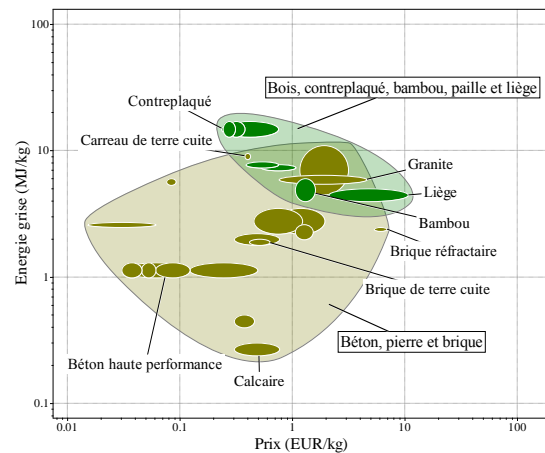


Figure 3 : Energie grise fonction du prix

Certains matériaux, bien que possédant de bonnes propriétés thermiques, s'avèrent avoir besoin de beaucoup d'énergie pour leur fabrication. Une énergie grise trop élevée ne peut être compatible avec une démarche de construction de bâtiments bioclimatiques. Ainsi, comme le montre la figure 3, les bois, bambou et briques sont des matériaux avec une énergie grise plus élevés que le béton haute performance ou la pierre calcaire, de même pour le prix.

Au vu des ces 3 figures, le béton haute performance, la pierre calcaire et la brique de terre cuite apparaissent comme étant les matériaux disponibles les plus performants au niveau thermique, environnementale et économique.

2.2. Le COFALIT®, matériau issu du recyclage de déchets amiantés

Le COFALIT® est fabriqué par la société INERTAM [3] située en France dans les Landes. Il est obtenu par vitrification de déchets amiantés par torche à plasma à 1400°C. En sortie de four, le vitrifiât est coulé dans des lingotières puis démoulé et refroidi à l'air libre. La dangerosité due au caractère fibreux de l'amiante a alors intégralement disparue, le matériau est totalement inerte et inoffensif pour l'homme [4]. Après une dernière étape de concassage, il est actuellement utilisé comme remblai de route, seul débouché industriel actuel.

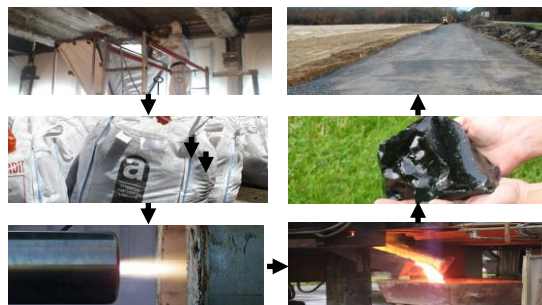


Figure 4 : Etapes du traitement par vitrification des déchets amiantés

Au vu des faibles débouchés de ce matériau, la société ne traite actuellement que 6000 tonnes de déchets amiantés sur les 250 000 extraits chaque année en France, le reste étant stocké dans des sacs doubles enveloppes en décharge spécialisée en attente d'un traitement

définitif. Sa grande disponibilité et son faible coût (10€ la tonne) ont donc fait du COFALIT® un candidat potentiellement utilisable pour le stockage thermique par chaleur sensible.

Le tableau 1 présente certaines propriétés du COFALIT®.

	ρ	ρC_p	λ	D (e=20cm)	C_m	E_g
	$kg.m^{-3}$	$kJ.m^{-3}.K^{-1}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$	h	€/kg	MJ/kg
COFALIT®	3120	2680	1,7	6,1	0,010	2,15

Tableau 1 : Propriétés thermiques, économiques et environnementales du COFALIT®

2.3. Etude comparative

Afin de sélectionner le matériau le plus performant vis-à-vis d'une application donnée, il est nécessaire d'élaborer une procédure [5] qui permettra de définir « les indices de performance » pour chaque application, indices résultant de la combinaison de plusieurs propriétés et permettant de maximiser la performance pour un modèle donné.

La fonction recherchée est le stockage d'énergie thermique avec pour principal objectif de maximiser ce stockage par unité de coût du matériau. L'énergie stockée par unité de volume et de coût peut s'exprimer comme la fonction suivante :

$$Q' = \frac{C_p \Delta T}{VC_m} \quad (2)$$

D'où l'indice de performance P1, dépendant de variables propres à chaque matériau :

$$P1 = \frac{C_p}{C_m} \quad (3)$$

Lors du stockage d'énergie thermique, le paramètre temps peut être inclus, et donc la diffusivité thermique. L'épaisseur du matériau sollicité peut s'exprimer en fonction de la diffusivité et du temps de diffusion :

$$x = \sqrt{2a\tau} \quad (4)$$

De même pour le coût :

$$C = mC_m = Ax\rho C_m = A\sqrt{2\tau}(a^{1/2})\rho C_m \quad (5)$$

D'où l'indice de performance P2 :

$$P2 = \frac{1}{(a^{1/2})\rho C_m} \quad (6)$$

La figure 5 illustre l'indice de performance P1 fonction de l'indice de performance P2. Dans ce cas, les matériaux avec les indices de performance les plus élevés sont ceux situés en haut à droite du graphique. Ils présentent un faible coût, une forte capacité de stockage ainsi qu'une importante diffusivité. La famille des bétons, notamment le béton haute performance, ainsi que le COFALIT® sont ainsi les matériaux les plus performants, ce dernier se situant loin devant de part son très faible coût et son importante capacité de stockage.

De la même manière, nous exprimons l'énergie stockée par unité de volume et d'énergie grise les 2 indices suivants sont obtenus :

$$P'1 = \frac{C_p}{E_g} \quad P'2 = \frac{1}{(a^{1/2})\rho E_g} \quad (7)$$

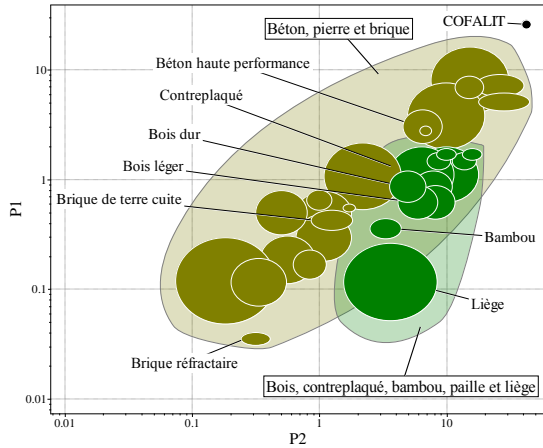


Figure 5 : P1 fonction de P2

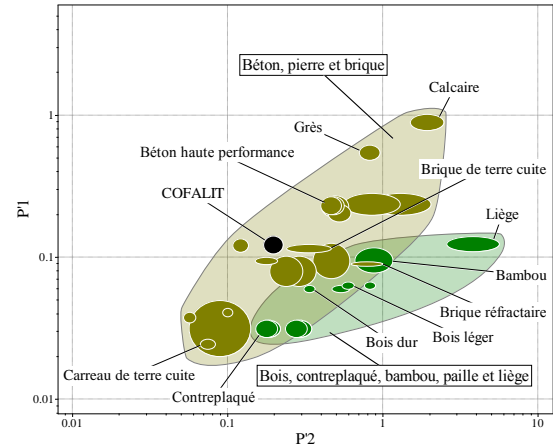


Figure 6 : P'1 fonction de P'2

Les matériaux à faible énergie grise, situés en haut à droite de la figure 6, sont les pierres qui nécessitent de l'énergie seulement pour leur extraction, et la famille des bétons. Le COFALIT®, avec une énergie grise d'environ $2 MJ.kg^{-1}$, se situe entre les bétons et les briques. Sa fabrication nécessite une montée en température à $1400^{\circ}C$ afin d'atteindre la fusion de la matière, d'où sa demande en énergie importante.

Suite à ces graphiques, il est important de prendre en compte le temps de retour énergétique des matériaux. Il est défini comme le temps en années nécessaire à un système pour « rembourser » son contenu initial en énergie. Il est calculé sur le cas d'une surface d'un m^2 pour chaque matériau. L'épaisseur de cette plaque dépend de la longueur de diffusion L_{diff} . Elle exprime la profondeur à laquelle près de la moitié du front de chaleur s'est propagé après un temps donné t :

$$L_{diff} = \sqrt{at} \quad (8)$$

Pour les matériaux suivants, la pierre calcaire, le béton, le COFALIT® et la brique de terre cuite, L_{diff} se situe entre 4 à 8 cm pour un temps de stockage équivalent à 3,5 heures par jour et 700 heures sur l'année de façon périodique. L'épaisseur de plaque sera donc prise égale à 20 cm afin d'être sûr de pouvoir stocker toute l'énergie reçue. Celle-ci se calcule de la manière suivante :

$$q = 2\theta \sqrt{\frac{t}{\pi}} E_{ff} \quad (9)$$

Le rapport de l'énergie reçue sur l'énergie grise est donc tracé en fonction du temps, pour une surface d' $1 m^2$ sur 20 cm d'épaisseur. Lorsque ce rapport est supérieur à 1, cela signifie que l'énergie reçue durant le nombre d'années correspondantes rembourse totalement l'énergie grise du matériau.

La pierre calcaire nécessitant de l'énergie seulement pour son extraction présente un temps de retour énergétique faible, de l'ordre de 1 an et demi (figure 7). Le béton rembourse son contenu énergétique initial au bout de 3 ans et demi et le COFALIT® au bout d'un peu plus de 4 ans. Le temps de retour énergétique de ce dernier est plus élevé compte tenu de la quantité d'énergie nécessaire à sa fabrication. Néanmoins, cela permet la réutilisation de

matériaux en fin de cycle de vie et donc une analyse de cycle de vie positive contrairement aux matériaux conventionnels cités précédemment.

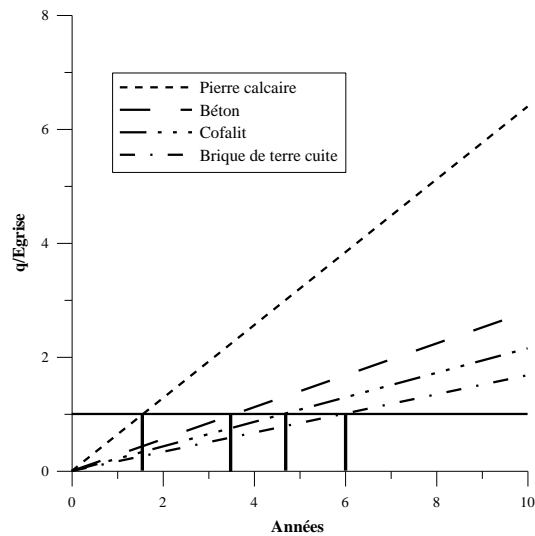


Figure 7 : Temps de retour énergétique des matériaux

3. Conclusion et perspectives

Le COFALIT® est donc un matériau d'avenir. Son utilisation permet le recyclage de déchets amiantés, aujourd'hui stockés en attente de traitement. Mais encore, grâce au principe du « pollueur payeur », les personnes à qui appartiennent les déchets amiantés sont contraintes de payer pour les vitrifier, d'où le prix si bon marché du COFALIT®.

Le fait que le COFALIT® soit fondu puis coulé permet une totale liberté de mise en forme et donc une facilité d'utilisation. Il se révèle être un matériau potentiellement multifonctionnel, utilisable pour l'inertie (mur capteur, mur Trombe), en tant que structure porteuse ou tout simplement pour son esthétique de roche vitrifiée (revêtement).

Ce matériau pourrait ainsi à terme remplacer, au moins partiellement, la famille des bétons et briques dans la construction. Des essais pilotes vont permettre prochainement de tester ses performances après intégration dans des bâtiments de type d'éco-construction.

Références

- [1] Pléiades+Comfie, <http://www.izuba.fr/logiciel/pleiadescomfie/>
- [2] M.F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, 3rd ed., Elsevier, Oxford, 2005.
- [3] Inertam, <http://www.inertam.com/>
- [4] Primeverre, <http://www.primeverre.com/>
- [5] A.I. Fernandez, M.Martinez, M.Segarra, I.Martorell, L.F.Cabeza, Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage, Solar Energy Materials and Solar Cells 94 (2010) 1723-1729

Remerciements

Les différents auteurs tiennent à remercier la société EUROPLASMA et l'entreprise INERTAM pour leur précieuse collaboration et pour les nombreux échantillons fournis gracieusement. Cette étude bénéficie d'un financement CIFRE de l'ANRT.