

Matériaux pour la transition énergétique : cas de la production d'eau chaude sanitaire

Régis OLIVÈS^{1*}, Jean-Marie MANCAUX¹, Maxime PERIER-MUZET¹

¹Laboratoire PROMES-CNRS - Université de Perpignan Via Domitia
Rambla de la thermodynamique - 66860 Perpignan

*(auteur correspondant : olives@univ-perp.fr)

Résumé - Les systèmes de conversion des EnR requièrent, a priori, la mobilisation de matériaux en quantité relativement importante du fait de la faible concentration de la ressource énergétique. L'évaluation des quantités de matériaux nécessaires sur l'ensemble du cycle de vie pour différents systèmes de production d'eau chaude sanitaire (chaudière gaz, chauffe-eau électrique, chauffe-eau thermodynamique et chauffe-eau solaire avec appoint électrique) montre a contrario que le chauffe-eau solaire est le système le plus frugal lorsque l'on tient compte de l'énergie et des matériaux mobilisés pour la production d'énergie primaire, c'est-à-dire de l'ensemble de la chaîne énergétique.

Nomenclature

C_p	capacité thermique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	η	rendement,
CED	demande énergétique cumulée, J	<i>Indices et exposants</i>	
LT	durée de vie, an	i	investi
m	masse, kg	NoR	non renouvelable (fossile et fissile)
M	masse par unité d'énergie, $kg.GWh^{-1}$	$NoRec$	non recyclé (matière première vierge)
T	température, K	r	réel
V	consommation annuelle d'ECS, m^3/an	sta	standard
<i>Symboles grecs</i>		$sust$	soutenable
ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$		

1. Introduction

Le déploiement des systèmes à énergie renouvelable s'avère nécessaire pour répondre au défi climatique et, en particulier, remplacer les énergies fossiles par des énergies décarbonées. Compte tenu de la plus faible densité énergétique des énergies renouvelables (EnR) par rapport aux énergies fossiles, le développement massif des EnR engendre une mobilisation importante de matériaux [1]. Il en résulte la nécessité d'accentuer les efforts en matière de sobriété pour pouvoir ensuite mieux intégrer les EnR. Il s'agit donc d'être attentifs aux besoins exprimés par les acteurs du domaine afin d'éviter d'accélérer la déplétion des ressources en matière première vierge.

Aussi, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) est un poste particulièrement consommateur d'énergie dans le secteur du bâtiment. Il peut correspondre, selon l'ADEME [2], de 10 à 20 % de la consommation énergétique dans l'habitat. Plusieurs études ont déjà traité des performances environnementales des systèmes de production d'ECS en utilisant des analyses de cycle de vie [3, 4]. Elles présentent une forte dépendance du lieu où ces systèmes sont installés. Néanmoins, la question des ressources aussi bien matérielles qu'énergétiques ne sont pas abordées du point de vue de la soutenabilité.

Afin d'analyser l'impact environnemental et l'intérêt des systèmes de production d'ECS en termes d'exploitation des ressources, nous évaluons les énergies non renouvelables mais

aussi les quantités de matériaux mobilisés tout au long du cycle de vie pour le service rendu. Nous déterminons ainsi les quantités de matériaux nécessaires à la mise en œuvre de différents systèmes de production d'ECS : chaudière gaz instantané (CGI), chaudière gaz avec stockage (CGS), chauffe-eau électrique (CEE), chauffe-eau thermodynamique (CET) et chauffe-eau solaire avec appoint électrique (CES). On se focalise sur les matières principales : acier, cuivre, aluminium, verre et polymères.

Afin de comparer ces différents procédés, le rapport entre l'énergie restituée durant la durée de vie et l'énergie investie ($EROEI$) est aussi étudié. La prise en compte de la soutenabilité nous conduit à analyser le rapport $EROEI_{sust}$ qui compare l'énergie restituée à la part d'énergie non renouvelable investie. De manière similaire, le rapport $EROMI_{sust}$ est proposé. Ce rapport compare l'énergie restituée à la quantité de matière non recyclée investie. L'objectif est donc de mettre en évidence la soutenabilité des systèmes de production d'ECS aussi bien en termes de ressources énergétiques que matérielles sur le cycle de vie et en tenant compte de l'ensemble de la chaîne énergétique.

2. Unité fonctionnelle et définition des indicateurs

Nous souhaitons comparer les différents procédés de production d'ECS. L'unité fonctionnelle retenue dans notre cas correspond au *service rendu*, c'est-à-dire au besoin d'un habitat individuel consommant en moyenne 200 L d'ECS par jour [2]. Compte tenu de la durée de vie LT , on obtient la quantité d'énergie produite sur l'ensemble du cycle de vie pour chacun des systèmes :

$$E_{ECS} = \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot V \cdot LT \quad (1)$$

où ΔT est la variation de température entre l'eau froide en entrée du système (considérée en moyenne à 16°C [2]) et l'eau chaude délivrée aux usagers par l'intermédiaire ou non d'un stockage. Pour la chaudière gaz en instantané, cette eau est supposée produite à 40 °C et correspond à une énergie fournie de 8200 MJ/an, soit 2,28 MWh/an. Pour les autres systèmes intégrant un stockage, l'eau est plutôt produite à 50°C, correspondant à une énergie de 11620 MJ/an, soit 3,23 MWh/an.

À partir de données issues de la littérature et en particulier d'inventaires établis pour des analyses de cycle de vie (ACV), il est possible de déterminer, dans un premier temps, les principales quantités de matière à mobiliser pour la construction des procédés de production d'ECS. Afin de comparer ces différents systèmes en termes de quantités de matériaux investis m_i , nous rapportons cette quantité à la production d'ECS sur toute la durée de vie E_{ECS} (voir figure 1) pour obtenir Me :

$$Me = \frac{m_i}{E_{ECS}} \quad (2)$$

Nous n'analysons que quelques familles de matériaux, a priori représentatives de ces systèmes : acier, cuivre, aluminium, verre et polymères. Les matériaux dits critiques ne sont pas ici considérés. On les retrouve bien souvent dans les systèmes électroniques employés pour la commande et la régulation. Leur quantité est bien souvent nettement plus faible (quelques centaines de grammes). Il ne faut cependant pas oublier ces matériaux critiques tels que les métaux rares qui, malgré leur faible quantité, peuvent poser problème en termes de ressources du fait précisément de leur rareté [5].

Dans un second temps, nous élargissons le périmètre d'étude en incluant la quantité de matériaux inhérente à la ressource énergétique exploitée par le système : gaz ou électricité (voir figure 2). Nous prenons ainsi en compte l'ensemble de la chaîne énergétique. Les quan-

tités de gaz consommées par ces chaudières sont calculées sur tout le cycle de vie. On obtient environ 85000 kg/GWh. Concernant l'électricité, si nous faisons l'hypothèse qu'elle est issue de centrales nucléaires, la quantité de matériaux mobilisés en y incluant le béton et la matière fissile est d'environ 2300 kg/GWh, quantité obtenue à partir des données du rapport de l'AEA pour EDF [6]. Cette valeur ne prend pas en compte l'énergie et les matériaux à mobiliser pour le stockage des déchets nucléaires ainsi que pour la déconstruction des centrales.

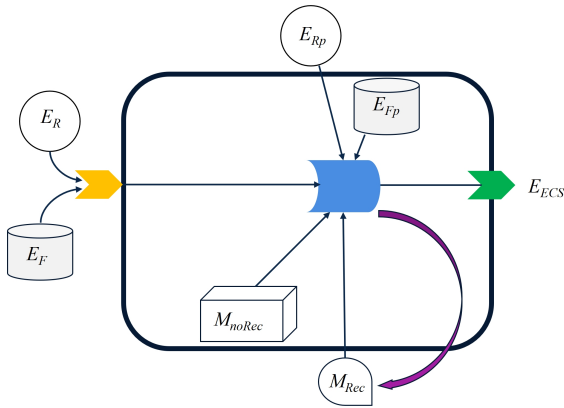


Figure 1 : Périmètre d'étude

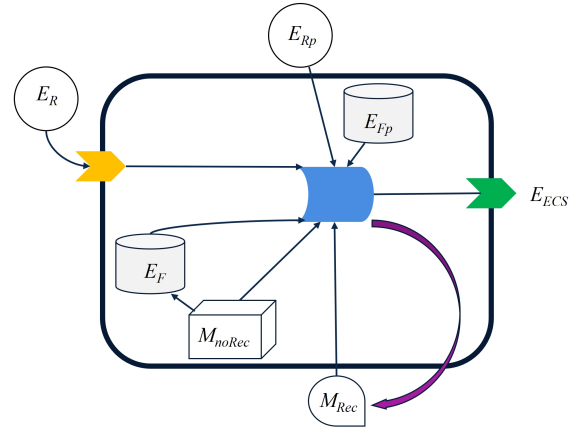


Figure 2 : Périmètre d'étude incluant l'énergie primaire et la quantité de matériaux associée

Pour qualifier les procédés énergétiques, différents indicateurs ont été proposés afin d'aider à leur sélection. En particulier, il est désormais courant de calculer le taux de retour énergétique standard : $EROEI_{sta}$ (Energy Return of Energy Invested) [7, 8]. Il s'agit du rapport de l'énergie restituée et de l'énergie investie. L' $EROEI_{sta}$ peut, a priori, et en première approximation, être obtenu à partir de l'énergie produite sur la durée de vie (E_{ECS}) et de la demande énergétique cumulée (CED) :

$$EROEI_{sta} = \frac{E_{ECS}}{CED} \quad (3)$$

La demande énergétique cumulée est déterminée par une ACV selon la norme NF EN ISO 14044. Il s'agit de la somme des énergies nécessaires à l'extraction des ressources, à la construction, à l'exploitation, à l'élimination et au recyclage en fin de vie. Afin d'introduire la notion de soutenabilité, il nous faut prendre en compte le fait que l'énergie réellement à investir n'est que de type non renouvelable. À l'instar de Multon et Horsin Molinaro [9], on introduit l' $EROEI_{sust}$:

$$EROEI_{sust} = \frac{E_{ECS}}{CED_{NoR}} \quad (4)$$

où CED_{NoR} correspond à la demande énergétique cumulée d'origine non renouvelable. Ainsi, on met en évidence qu'un système soutenable satisfera la condition $EROEI_{sust} > 1$.

Le périmètre d'étude est ainsi défini par la prise en compte des énergies non renouvelables (fossiles et fissiles) directement utilisées durant la phase d'exploitation et donc de production d'ECS, E_F , et mobilisées durant les étapes de fabrication et en fin de vie, E_{Fp} (voir figure 2). On ne tient pas compte, de ce fait, des énergies renouvelables E_R et E_{Rp} .

De même, il est possible d'introduire un indicateur similaire à l' $EROEI$ mais relatif aux matériaux investis avec toujours comme référence l'énergie restituée E_{ECS} . On peut alors établir le rapport suivant :

$$EROMI_{sta} = \frac{E_{ECS}}{m_i} = \frac{1}{Me} \quad (5)$$

De la même façon, il est possible de tenir compte des fractions de matériaux recyclés et de matériaux non recyclés (Me_{NoRec}), qui conduit à former l' $EROMI_{sust}$:

$$EROMI_{sust} = \frac{1}{Me_{NoRec}} \quad (6)$$

Cet indicateur rend compte de l'énergie restituée à partir de matériaux non recyclés utilisés durant non seulement l'étape de fabrication mais aussi l'étape de production d'ECS (voir figure 2). Un $EROMI_{sust}$ sera donc d'autant plus grand que le système fera appel à une plus faible quantité de matière première vierge.

3. Systèmes de production d'eau chaude sanitaire

Nous nous proposons de comparer différents systèmes de production d'eau chaude sanitaire à l'aide des indicateurs précédemment présentés. L'étude porte donc sur une chaudière gaz à production instantanée (CGI), une chaudière gaz avec réservoir de stockage (CGS), un chauffe-eau électrique avec cumulus (Zeneo Atlantic 200 L) (CEE), un chauffe-eau thermodynamique (Chappee TD 200 split WH)(CET) et un chauffe-eau solaire (CES). Tous ces systèmes permettent de répondre aux besoins spécifiés dans la section précédente. Les données sont issues des articles [4, 10, 11] pour les chaudières gaz et le chauffe-eau solaire et des fiches PEP (profil environnemental du produit) du CEE et du CET. Les quantités de matériaux et les énergies grises sont présentées dans le tableau 1.

	CGI	CGS	CEE	CET	CES
matériaux (kg)					
acier	11	67,7	70	89,77	68,3
cuiivre	5,3	5,3	0,3	0,157	17,5
aluminium	1,3	1,3	0	6,93	22,2
verre	0	0	0	0	34,8
polymères	0,5	2,4	5,7	15,4	10,1
énergie grise (MJ)	7200	12560	14500	22400	16800
efficacité	$\eta_r = 67\%$	$\eta_r = 56\%$	$\eta_r = 83\%$	$COP_r = 1,8$	$TCS = 70\%$
durée de vie (an)	15	15	15	12	20

Tableau 1 : Inventaires des quantités de matériaux et énergies grises nécessaires aux procédés de production d'ECS, efficacité (rendements, COP (coefficient de performance), TCS (taux de couverture solaire) et durée de vie)

Sont aussi indiqués les rendements réels pour CGI, CGS et CEE [11, 2], le COP réel constaté pour le CET [2] et le taux de couverture solaire moyen constaté au niveau national pour le CES [2] ainsi que la durée de vie moyenne constatée des systèmes.

4. Résultats et discussion

4.1. Quantités de matériaux investis pour la production d'ECS

À partir des inventaires de cycle de vie des différents procédés, les quantités de matériaux mobilisés pour assurer le service consistant à un volume d'ECS de 81760 L/an et rapportées

à l'énergie produite sur toute la durée de vie peuvent être calculés. On obtient les résultats présentés dans la figure 3(A). Pour chaque procédé, nous retenons les quantités de matière prépondérantes et classées selon les principales familles de matériaux (acier, aluminium, cuivre, verre, polymères).

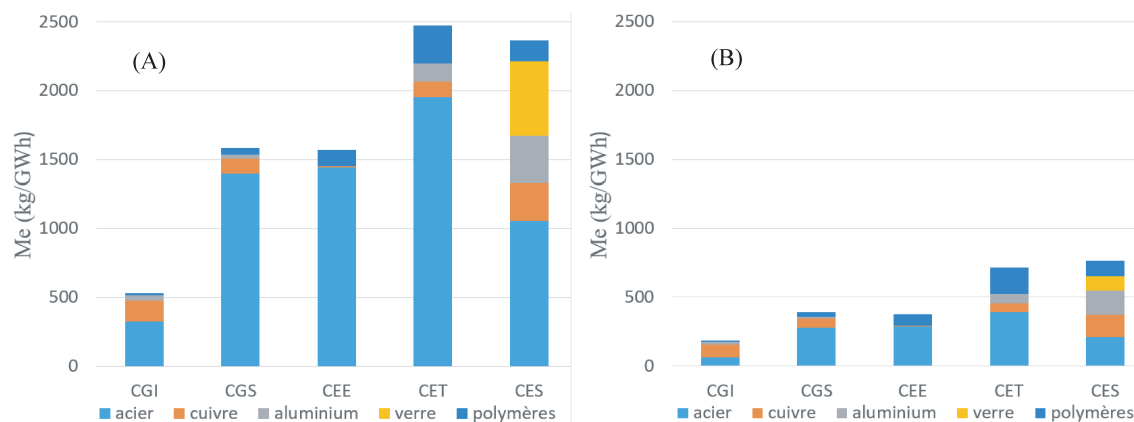


Figure 3 : Quantité de matériaux totale (A) et non recyclés (B) rapportée à l'énergie produite

Afin de pouvoir développer de façon massive les EnR sans subir les limitations matérielles, le recours aux matériaux recyclés s'avère nécessaire. Certains matériaux bénéficient depuis de nombreuses années d'un effort conséquent sur le recyclage. On constate des taux de recyclage élevés dans les secteurs du verre et de certains métaux. Les aciers, en particulier, sont recyclés avec des taux qui peuvent être supérieurs à 90 %. L'aluminium et le cuivre font partie aussi des matériaux de plus en plus recyclés (respectivement plus de 50 % et de 60 %). Concernant les polymères, les thermoplastiques ont des taux de recyclage de plus en plus élevés qui conduit à des contenus en matériaux plastiques recyclés de 20 % en France et dans certains pays d'Europe de 30 %. Du fait de leurs propriétés, ils peuvent réintégrer de nouveaux cycles de vie après un traitement thermique adéquat. Les thermodurcissables, quant à eux, sont plus difficiles à réutiliser car ils ne peuvent pas subir de traitement thermique sans dégradation. Ils sont bien souvent réemployés après déchetage sous une forme de plus faible valeur ajoutée (downcycling), voire plutôt valorisés énergétiquement.

Pour les systèmes de production d'ECS, il apparaît intéressant de reprendre les résultats de la figure précédente et de les analyser en tenant compte de la possibilité d'incorporer des matériaux recyclés. Ainsi, en retirant les quantités de matériaux recyclés et en ne gardant que les matériaux mobilisés issus de matière première vierge, il est possible de déterminer les quantités de matériaux non recyclés Me_{NoRec} . Compte tenu des taux moyens actuels d'incorporation de matériaux recyclés en France (acier 80%, cuivre 60%, aluminium 50%, verre 80%, polymères 30% [12]), on obtient les résultats présentés à la figure 3(B).

On constate d'abord que le CET et le CES nécessitent davantage de matériaux que les autres systèmes CGI, CGS et CEE qui utilisent exclusivement une énergie primaire (gaz ou uranium) plus concentrée. Ceci est dû à leur relative complexité, d'une part liée à la pompe à chaleur du CET et d'autre part aux capteurs solaires du CES.

Désormais, il devient pertinent d'inclure les matériaux qui permettent l'alimentation en énergie primaire et en particulier, pour les chaudières gaz, le gaz naturel, et pour les systèmes alimentés en électricité, les matériaux utilisés pour la production d'électricité. On ne prend pas en compte les matériaux mobilisés pour les infrastructures et les réseaux de transport. Compte tenu de la part de l'électricité nucléaire dans le mix électrique français, nous ne comptabiliserons

que la quantité de matériaux nécessaires pour la centrale nucléaire. La figure 4 montre l'importance des quantités de matériaux mobilisés pour produire l'énergie convertie par le système de production d'ECS.

Les systèmes utilisant le gaz naturel font appel à une quantité de matière première tout au long du cycle de vie bien plus grande que les autres systèmes (près de 85000 kg/GWh, inverse du pouvoir calorifique du gaz). Aussi, la comparaison des systèmes CEE, CET et CES montre que la prise en compte de la quantité de matériaux nécessaires à la production électrique en supposant qu'elle soit d'origine nucléaire conduit, tout de même, à fortement augmenter la quantité totale de matériaux non recyclés. Ainsi, on met en évidence la part importante occupée par la ressource énergétique à mobiliser pour faire fonctionner le système par rapport à la quantité de matière investie pour sa fabrication. Autant pour le CES, cette quantité est doublée du fait de la prise en compte de la matière nécessaire à la production d'électricité, pour le CET elle est quasiment multipliée par un facteur 3 et pour le CEE par un facteur 5.

Remarquons que, dans le cas de la rénovation énergétique, le réemploi, par exemple, d'un ballon de stockage pour venir y connecter une installation solaire participera à la réduction du contenu en matière première vierge et donc à Me_{NoRec} . On peut estimer un gain d'environ 200 à 250 kg/GWh, soit de 13 à 17 % pour le CES.

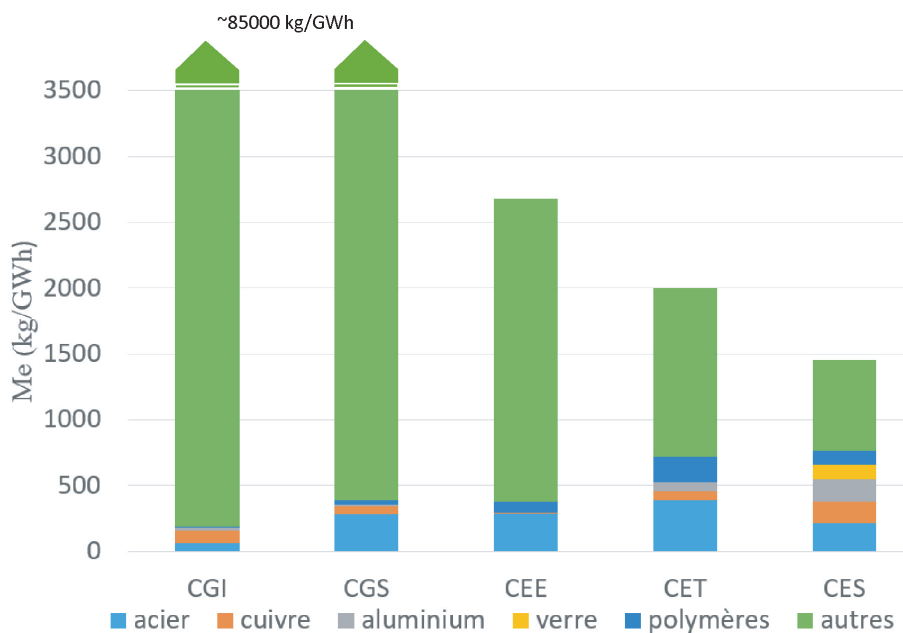


Figure 4 : *Quantité de matériaux non recyclés investis pour la fabrication du système et pour la production d'énergie primaire (autres), rapportée à l'énergie produite*

4.2. Énergie et quantités de matériaux investis et soutenabilité

Il apparaît intéressant d'analyser ces résultats à l'aide des indicateurs définis précédemment : $EROEI_{sust}$ et $EROMI_{sust}$. Ces indicateurs nous montrent la pertinence des procédés en matière de soutenabilité. Ainsi, la figure 5 permet de positionner les différents systèmes de production d'ECS selon les deux indicateurs. Des valeurs d' $EROEI_{sust} > 1$ et des valeurs élevées d' $EROMI_{sust}$ confèrent aux systèmes le caractère soutenable concernant les quantités d'énergie et de matériaux investis. Les systèmes basés sur le gaz ou sur l'électricité avec une ef-

ficacité peu élevée, se retrouvent avec un $EROEI_{sust}$ faible voire inférieur à 1. On montre donc que, selon ces critères, le chauffe-eau solaire (CES) et, dans une moindre mesure, le chauffe-eau thermodynamique (CET) peuvent être considérés comme des procédés de production d'ECS soutenables. Malgré une énergie grise plus importante, le CES est un système qui s'avère plus pertinent que le CET sur l'ensemble du cycle de vie.

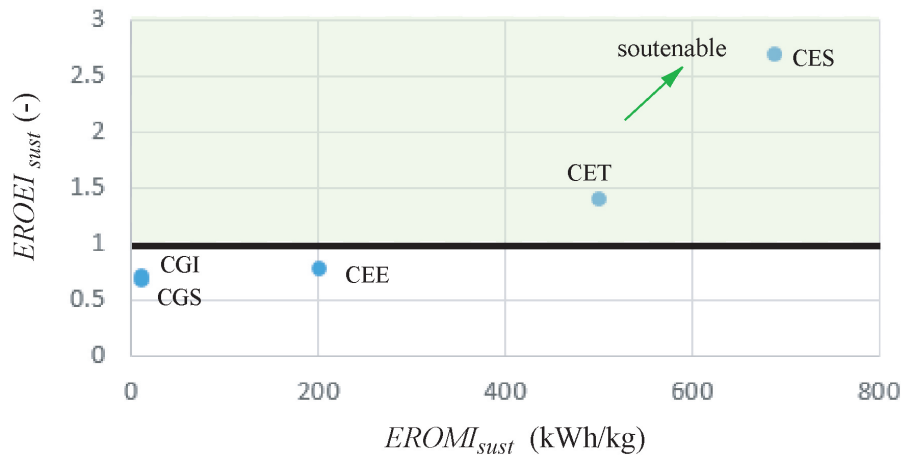


Figure 5 : $EROEI_{sust}$ vs $EROMI_{sust}$: énergie restituée selon l'énergie non renouvelable investie et la quantité totale de matériaux non recyclés investis

Quelques précisions peuvent être apportées. D'abord, la prise en compte du contenu matière du mix énergétique et non plus de l'électricité d'origine uniquement nucléaire modifie les valeurs respectives de chaque système tout en respectant la hiérarchie établie précédemment. On peut remarquer aussi que, selon les études, l'électricité nucléaire peut avoir un contenu matière plus élevé du fait du stockage des déchets nucléaires et du démantèlement. Selon les technologies adoptées, en particulier pour le stockage, les quantités de béton et d'acier peuvent varier d'un facteur 1 à 10 et dépendent fortement de l'activité des déchets. Notons, en outre, que l'énergie nécessaire au recyclage des matériaux n'a pas été prise en compte dans ces calculs. Il s'avère que l'utilisation de matériaux recyclés conduit à un gain énergétique par rapport à l'exploitation de matière première vierge. Ainsi, on estime que l'économie d'énergie est de 60 à 75 % pour l'acier, de 84 à 88 % pour le cuivre et de 90 à 97 % pour l'aluminium, selon l'ONU [13].

Enfin, lorsque l'on se focalise sur le CET et le CES, il est possible d'affiner les résultats afin de mettre en évidence l'influence du COP pour le CET, du taux de couverture solaire (TCS) pour le CES. La figure 6 présente comment évoluent les rapports $EROEI_{sust}$ et $EROMI_{sust}$ avec d'une part le COP pour le CET et d'autre part le TCS pour le CES. En faisant varier le COP de 1,4 à 3 (gamme de variation constatée en situation réelle [2]), on remarque que $EROEI_{sust}$ passe de 1,1 à 2. Alors que pour le CES, une augmentation du taux de couverture de 50% à 80% (gamme typique constatée en France métropolitaine) induit une variation de l' $EROEI_{sust}$ de 1,75 à 3,7. Ainsi, un CET possédant un COP_r de l'ordre de 1,2 impliquant $EROEI_{sust} \simeq 1$ ne sera plus pertinent en termes de soutenabilité. Bien évidemment, un CES sera d'autant plus pertinent que le TCS sera élevé, néanmoins, un CES avec un taux de couverture solaire de 50% est aussi intéressant qu'un CET avec un COP de 2.

5. Conclusion

La production d'eau chaude sanitaire étant un poste de consommation important dans l'habitat, il nous est apparu intéressant d'évaluer la quantité de matériaux et d'énergie à mobiliser

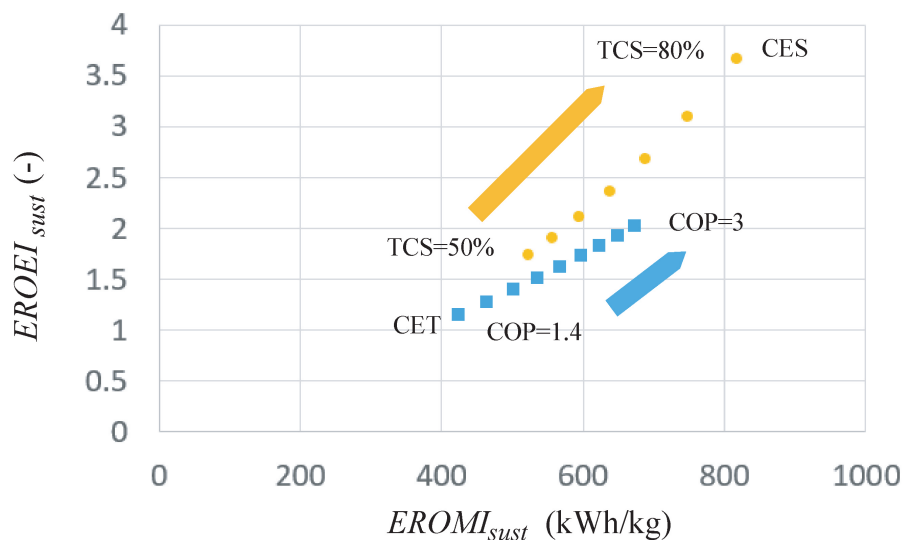


Figure 6 : $EROEI_{sust}$ vs $EROMI_{sust}$: influence du COP pour le CET et du taux de couverture solaire (TCS) pour le CES

pour satisfaire ce besoin. Nous avons établi des critères qui permettent d'estimer la soutenabilité à partir des énergies non renouvelables et des matériaux non recyclés à investir tout le long du cycle de vie et par rapport au service réellement rendu. Ainsi, en comparant différents systèmes (chaudière gaz en instantané ou avec stockage, chauffe-eau électrique avec cumulus, chauffe-eau thermodynamique et chauffe-eau solaire), l'étude montre que le chauffe-eau solaire requiert d'investir moins d'énergie non renouvelable et de matériaux non recyclés que les autres procédés. Il s'agira désormais d'y associer d'autres indicateurs de types économiques et environnementaux pour mener une analyse multicritère.

Références

- [1] O. Vidal, *Matières premières et énergie : Les enjeux de demain*, ISTE Group (2018).
- [2] ADEME-COSTIC, *Guide technique, Les besoins d'ECS en habitat individuel et collectif* (2016)
- [3] R. G. Raluy and A. C. Dias, Domestic hot water systems : Environmental performance from a life cycle assessment perspective, *Sustainable Production and Consumption* 26 (2021)
- [4] A.D. Moore et al., LCA of domestic hot water systems in Australia, *Renewable Energy* 103 (2017)
- [5] IEA, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, W. E. O. Specific Report (2021).
- [6] EDF Energy - AEA, *Environmental Product Declaration of electricity from Sizewell B nuclear power station* (2009).
- [7] D. J. Murphy et al., Energy Return on Investment of Major Energy Carriers : Review and Harmonization, *Sustainability* 14, 7098 (2022)
- [8] D. Weissbach et al., Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants, *Energy* 52 (2013).
- [9] B. Multon et H. Horsin Molinaro, *Conversion d'énergie et efficacité énergétique*, ENS - Paris Saclay
- [10] S. Kalogirou, The return of embodied energy invested in domestic solar water heating systems, *HPC 2004, 3rd Int. Conf. on Heat Powered Cycles*, Cyprus, October 2004
- [11] R. H. Crawford and G. J. Treloar, Net energy analysis of solar and conventional domestic hot water systems in Melbourne, Australia. *Solar Energy* 76 (2004)
- [12] C. Devauze et al., ADEME, *Bilan National du Recyclage 2010-2019* (2021).
- [13] UNEP, *Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles* (2013).