

Concept de rareté thermodynamique des ressources pour la sélection de procédés de production de chaleur décarbonée

Concept of thermodynamic rarity of resources for the selection of carbon-free heat production processes

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

¹Laboratoire PROMES-CNRS, Université de Perpignan Via Domitia
Rambla de la thermodynamique, Tecnosud, 66100 Perpignan

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

Résumé - La décarbonation de l'énergie consiste, entre autres, à passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables. Ceci se traduit par le remplacement des matières premières énergétiques par des matières premières non énergétiques. Ainsi, nous proposons d'intégrer à l'analyse de cycle de vie, la notion de rareté thermodynamique qui consiste à attribuer aux matériaux une valeur thermodynamique, dépendant de leur concentration et de leur abondance dans la croûte terrestre. Nous appliquons ce concept à la comparaison entre plusieurs systèmes de production d'eau chaude sanitaire à partir d'énergie solaire.

Abstract - Carbon-free energy involves, among other things, switching from fossil fuels to renewable energies. This translates into replacing energy-producing raw materials with non-energy-producing raw materials. We therefore propose incorporating the concept of thermodynamic scarcity into life cycle analysis, which involves assigning materials a thermodynamic value based on their concentration and abundance in the Earth's crust. We apply this concept to a comparison of several solar-powered domestic hot water production systems. We thus demonstrate that solar thermal water heaters are more relevant than photovoltaic-powered systems for all criteria.

Nomenclature

IRT	indicateur de rareté thermodynamique,	m	masse, kg
IRT_m	indicateur de rareté thermo. massique,	TR	taux de recyclage, %
	kWh.kg^{-1}		

1. Introduction

Les technologies à énergie renouvelable se révèlent pertinentes pour la réduction des émissions de CO₂ et pour l'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement énergétique. Néanmoins, le fait de passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables se traduit par l'abandon des matières premières énergétiques (charbon, pétrole, gaz) nécessaires à l'exploitation des systèmes de conversion d'énergie et la mobilisation de matières premières non énergétiques (matières minérales et organiques) pour la construction des systèmes à énergies renouvelables. La fabrication de ces procédés nécessitent davantage de matériaux variés pour leur fabrication [1]. Or, tous les matériaux ne présentent pas les mêmes ressources sur Terre et ne demandent pas la même énergie pour les extraire et les raffiner. L'augmentation de la demande met en exergue les problèmes liés à la disponibilité et à la rareté de certaines ressources. Cela peut

devenir prégnant dans un secteur comme les énergies renouvelables où la pénurie de matériaux peut freiner voire interrompre leur déploiement. Le secteur des énergies renouvelables fait appel à de nombreux matériaux dont certains peuvent être critiques dans le sens où, en plus de leur importance économique, les risques d'approvisionnement se révèlent élevés. Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et la Communauté Européenne d'un côté et le DOE (Department of Energy des États-Unis) de l'autre ont publiés des cartes établissant la criticité des matériaux [2, 3]. Néanmoins, elles présentent des différences notables et restent très qualitatives.

Afin de prendre compte de cette potentielle criticité, il semble intéressant de rajouter aux outils d'aide à la décision et à la sélection des filières énergétiques, de nouveaux indicateurs. Ainsi, en tant qu'outil d'aide à la décision, l'analyse de cycle de vie (ACV) peut être enrichie d'indicateurs relatifs à la criticité physique des matériaux. Nous proposons donc d'intégrer la notion de rareté thermodynamique. Introduite initialement par Valero et Valero [4], la rareté thermodynamique consiste à donner aux matériaux une valeur thermodynamique dépendant de leur concentration dans les mines et de leur abondance dans la croûte terrestre. Afin d'illustrer le propos, nous appliquons ce concept à la comparaison entre plusieurs systèmes de production d'eau chaude sanitaire à partir d'énergie solaire.

2. Matériels et méthodes

2.1. Objectif et champ d'application

Le but de l'étude est de comparer les performances énergétiques et environnementales de trois systèmes de production d'eau chaude sanitaire alimentés par l'énergie solaire : un chauffe-eau solaire thermique (CST), un cumulus électrique alimenté par des panneaux photovoltaïques (CEPV) et un chauffe-eau thermodynamique alimenté par des panneaux photovoltaïques (CTPV) (fig 1). Ces trois systèmes comportent un réservoir d'eau chaude dont l'énergie de chauffage est apportée par :

- la circulation d'un fluide caloporteur chauffé par le rayonnement solaire dans le cas du CST,
- l'électricité provenant des panneaux photovoltaïques et fournie à une résistance électrique dans le cas du CEPV et
- l'électricité provenant des panneaux photovoltaïques et fournie à une pompe à chaleur dans le cas du CTPV.

L'unité fonctionnelle retenue dans notre cas est basée sur le *service rendu*, c'est-à-dire les besoins d'un habitat individuel consommant en moyenne 200 L d'ECS par jour [5] et nécessitant une énergie de 3,23 MWh/an. Ainsi, en France métropolitaine, en moyenne, cela correspond à un chauffe-eau solaire thermique avec 4 m² de capteur solaire plan, à un cumulus électrique alimenté par une installation PV de 4 kW_c ($\simeq 20$ m²) et un chauffe-eau thermodynamique alimenté par une installation PV de 2 kW_c ($\simeq 10$ m²).

Une première analyse comparative de ces trois systèmes avait déjà été menée [6]. Elle reposait sur l'ACV et permettait d'en extraire les indicateurs clés tels que l'énergie grise et le contenu CO₂, par exemple. Elle est ici complétée par l'ajout de la partie photovoltaïque pour le cumulus électrique et le chauffe-eau thermodynamique.

Nous enrichissons l'analyse par la prise en compte de tous les matériaux y compris ceux en faible quantité et qui peuvent influencer l'interprétation des résultats du fait de leur rareté et de leur criticité.

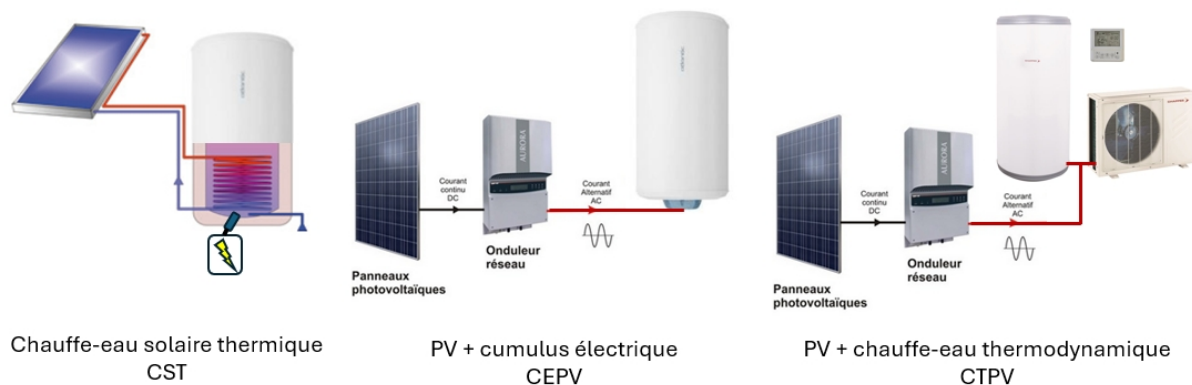


Figure 1 : *Chauffe-eau solaire thermique (CST), Cumulus électrique + PV (CEPV), Chauffe-eau thermodynamique + PV (CTPV)*

2.2. Concept de rareté thermodynamique

L'ACV repose sur des bilans de matière et d'énergie réalisés à chacune des étapes du cycle de vie. Cette analyse multi-critère a l'avantage de pouvoir tenir compte d'un grand nombre d'impacts. Néanmoins, à ces bilans d'énergie, il s'est révélé fort intéressant d'y adjoindre la valeur thermodynamique de l'énergie et ainsi de raisonner en bilan d'exergie pour distinguer les différentes formes d'énergie [7]. Dans le même ordre d'idée, il semble aussi intéressant d'associer à la quantité de matériaux leur valeur thermodynamique. On conçoit bien que l'on ne peut considérer de façon identique un matériau comme le cobalt ou l'indium et un matériau nettement plus abondant et plus facile à extraire et à raffiner comme le fer ou le silicium. D'autre part, le recours à des ressources non renouvelables sans les remplacer entraîne leur perte irréversible. Ce caractère irréversible se retrouve d'ailleurs dans le cas de l'exploitation de matières premières énergétiques fossiles ou fissiles. Enfin, la rareté et le coût de remplacement des ressources sont très peu considérés dans les méthodes comptables conventionnelles.

Valero et Valero [4] introduisent donc le concept de rareté thermodynamique pour former un indicateur qui rend compte du niveau d'efficacité technologique relatif à l'extraction et au raffinage de matériaux en incluant l'exergie liée à la concentration des minerais dans les mines actuelles. Cet indicateur traduit la qualité de la ressource qui peut alors être attribuée à chacun des matériaux à mobiliser pour, par exemple, un procédé énergétique. Afin de pouvoir comparer tous les matériaux entre eux, il est nécessaire de définir une référence. Valero et Valero fixent cette référence selon l'état théorique d'une planète totalement dégradée (Thanatia) (voir figure 2) [4]. Comme il n'est pas possible de recycler l'intégralité des matériaux exploités, l'extraction de matériaux de la croûte terrestre implique une réduction progressive du stock d'exergie de la nature. Par conséquent, la Terre se rapproche (certes de façon très lente !) d'une planète dégradée à l'exergie minimale, dépourvue de gisements combustibles et non combustibles, simplement en raison de la deuxième loi de la thermodynamique.

Ainsi, cet indicateur de rareté thermodynamique massique (IRT_m) peut être considéré comme un coût exergétique pour 1 kg de matériau incluant l'exergie nécessaire à l'extraction, au raffinage ainsi que l'exergie évitée lorsque la matière est issue d'une mine en plus ou moins grande concentration (voir figure 2). L'extraction du minerai d'une mine nécessite une certaine quantité d'énergie (bien souvent sous forme de combustibles fossiles) dépendant de la

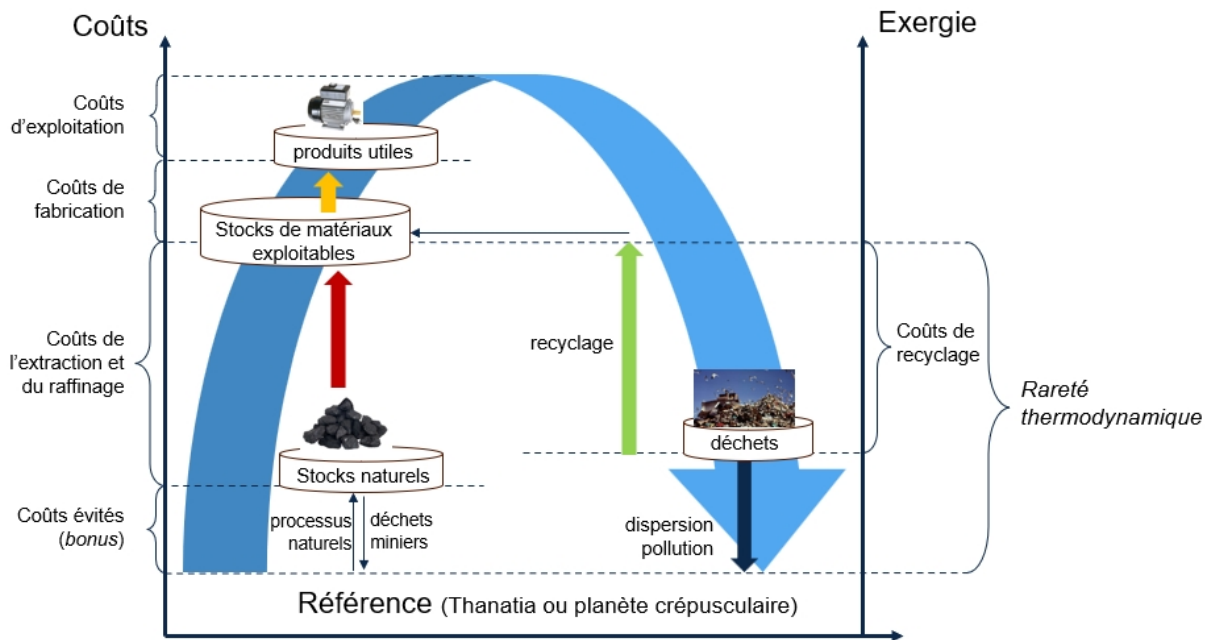


Figure 2 : Cycle de vie des matériaux et coût exergétique

concentration. Son empreinte environnementale correspondante comporte deux composantes : l'impact de l'extraction du minerai et la dette générée par la dissipation finale de ce minerai précédemment concentré par la nature. Chaque ressource naturelle a un coût environnemental lié à sa dispersion, de sorte que tout processus qui réduit cette extraction primaire est positif, qu'il s'agisse du remplacement, du recyclage ou de l'amélioration de l'efficacité du processus d'extraction.

Ainsi, la figure 3 présente les valeurs de l' IRT_m pour quelques matériaux et telles que Valero et Valero les ont déterminées [4]. Cette figure illustre la disparité des valeurs de rareté thermodynamique d'un certain nombre de matériaux et conduit à les distinguer par un critère physique. Cet indicateur a pour avantage de permettre d'attribuer à un matériau une valeur objective en vue d'une gestion durable des ressources stratégiques.

D'autre part, le recyclage des matériaux est un moyen de préserver les ressources naturelles. Le taux de recyclage s'avère supérieur à 50 % pour quelques matériaux comme le fer, le cuivre l'aluminium et le silicium. La figure 4 présente le taux de recyclage des matériaux constituant les panneaux solaires en distinguant les panneaux solaires thermiques (éléments encadrés) des panneaux photovoltaïques (tous les éléments). On remarque que le taux de recyclage des matériaux critiques est bien souvent très faible.

Par ailleurs, le matériel électronique présent dans ces systèmes requiert une grande diversité de matériaux. Les composants électroniques sont généralement constitués de cuivre, de fibre de verre, de céramique, de résines, etc. Cependant, en plus de ces matériaux, il en existe beaucoup d'autres en petites quantités qui sont plus rares, parmi lesquels on trouve l'antimoine, le béryllium, le gallium, le germanium, l'indium, le niobium ou le tantale.

Dans les installations photovoltaïques, l'onduleur est un élément essentiel qui a pour premier rôle de convertir le courant continu en courant alternatif. Un onduleur de 2,5 kW contient environ 9,8 kg d'acier, 1,4 kg d'aluminium, 5,5 kg de cuivre [8]. La part de l'électronique s'élève à 1,8 kg. En moyenne, l'IRT d'un tel boîtier électronique est de 218 kWh.

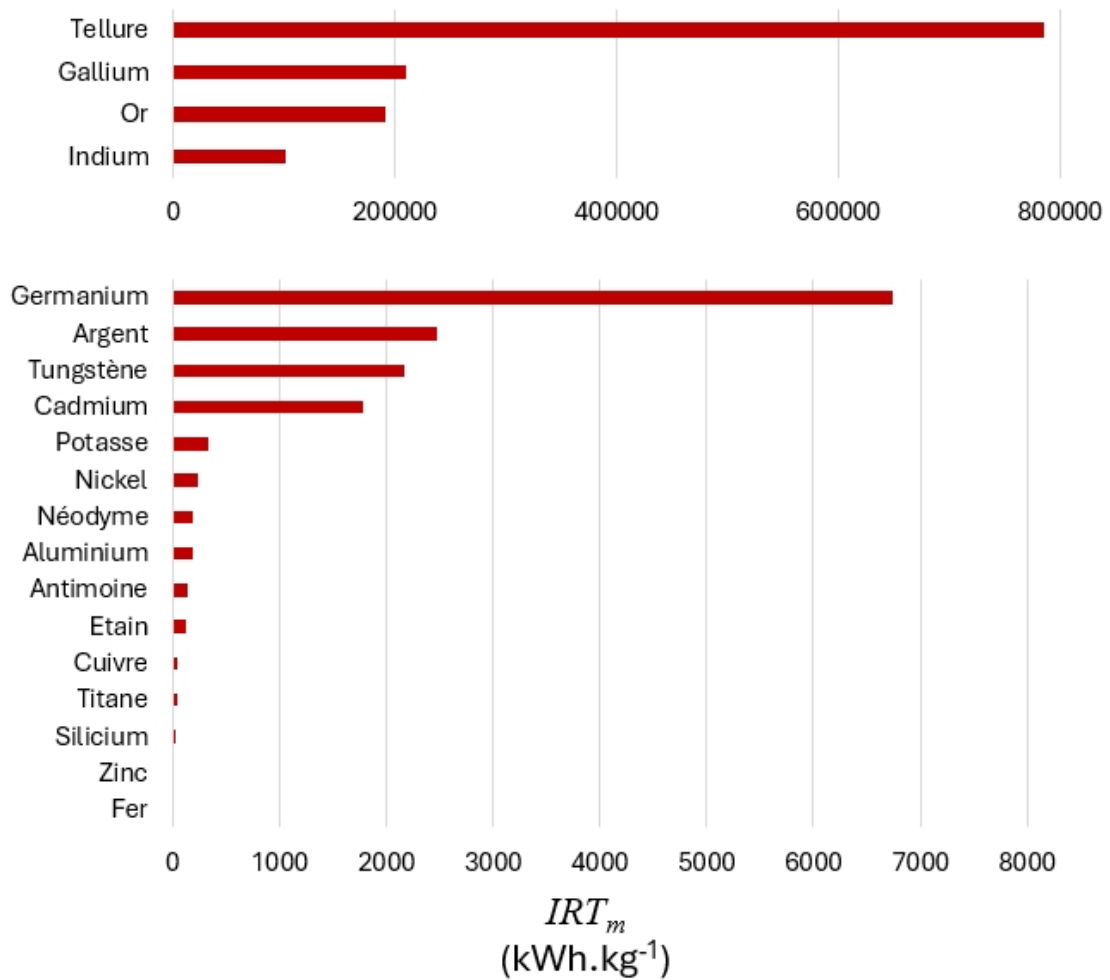


Figure 3 : Valeurs de l' IRT_m (kWh.kg⁻¹) pour quelques matériaux

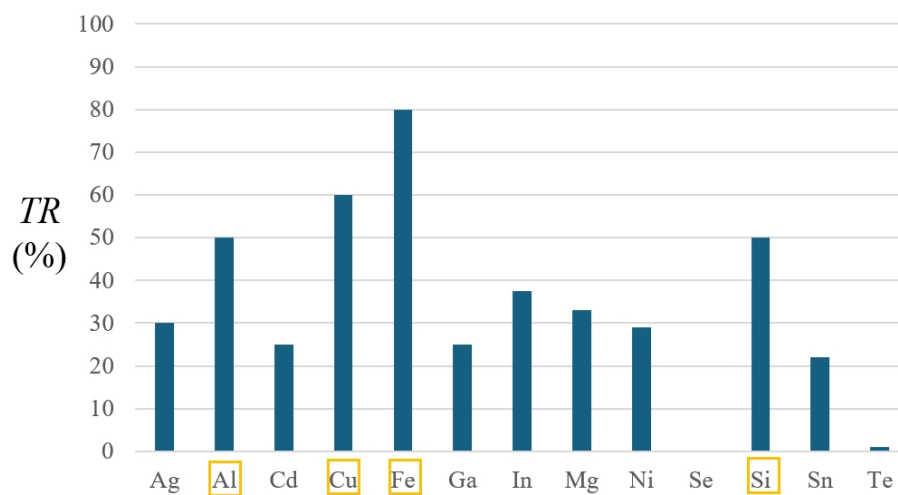


Figure 4 : Taux de recyclage TR (%) des éléments présents dans les panneaux photovoltaïques (tous) et dans les panneaux solaires thermiques (éléments encadrés).

3. Résultats et discussion

De façon identique à [6], les inventaires de cycle de vie des différents procédés conduisent à la détermination de l'énergie grise, du contenu CO_2 et des quantités de matériaux mobilisés pour assurer le même service. Ainsi, en reprenant les valeurs précédemment obtenues et en y rajoutant l'installation PV pour le CEPV et le CTPV, nous réévaluons ces différents indicateurs. La figure 5 présente les énergies grises et les contenus CO_2 des trois systèmes. Tout comme Carnevale *et al.* [9], nous constatons qu'en termes aussi bien d'énergie grise que de contenu CO_2 , le CST est bien moins impactant que le CTPV et le CEPV. Notons que les gains du CTPV par rapport au CEPV ne sont pas aussi élevés que la

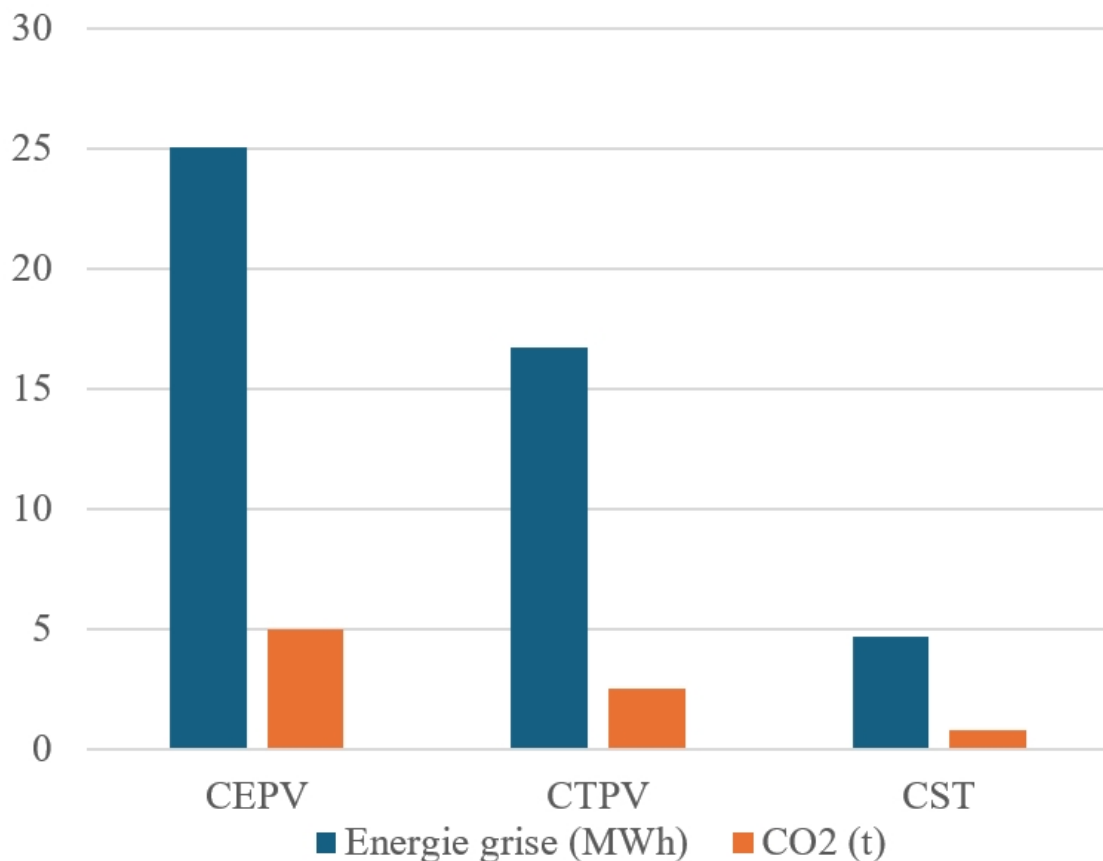


Figure 5 : Comparaison de l'énergie grise et du contenu CO_2 des trois systèmes CEPV, CTPV et CST

En reprenant les quantités de matériaux nécessaires pour la fabrication des trois systèmes, il est alors possible de calculer leur *IRT*. La figure 6 présente l'ensemble des résultats de la comparaison.

Ainsi, le CST s'avère le système le plus pertinent pour produire l'eau chaude sanitaire et ceci de façon particulièrement nette par rapport aux deux autres systèmes. En outre, la comparaison de CEPV et CTPV à l'aide de cet indicateur montre que les performances plus élevées du CTPV le rendent plus intéressant que le CEPV malgré une plus grande complexité. Néanmoins, l'intérêt n'est pas aussi important que la différence de performance qui peut exister entre ces deux systèmes.

En outre, la prise en compte du recyclage de certains matériaux accentue la différence entre les systèmes tout en préservant la hiérarchie. Des taux de recyclage élevés sont plutôt ca-

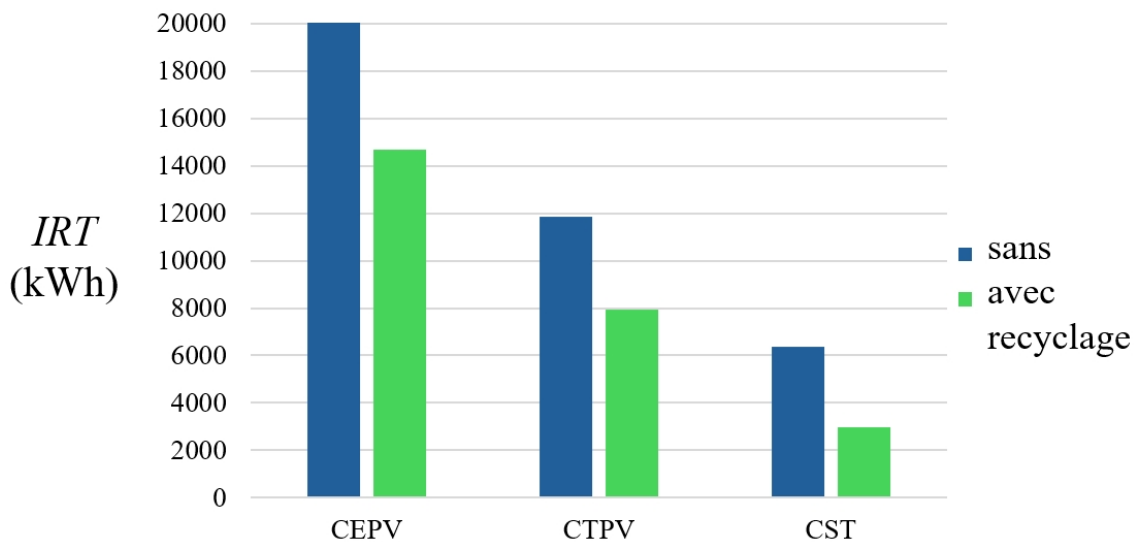


Figure 6 : Comparaison de l'IRT des trois systèmes CEPV, CTPV et CST en tenant compte ou non du recyclage

ractéristiques de matériaux couramment utilisés et qui se présentent actuellement en une relative abondance. On remarque que le CST présente des matériaux avec un IRT_m faible le rendant encore plus intéressant quand le recyclage est pris en compte.

Cette comparaison met en exergue l'intérêt de systèmes sobres en matériaux de façon générale et, en particulier, de matériaux pouvant se révéler critiques. Dans le but de produire de l'eau chaude sanitaire, il n'est pas nécessaire de devoir faire appel à des systèmes complexes qui mobilisent des matériaux pouvant servir à des usages à valeur ajoutée nettement plus élevée. L'indicateur IRT peut être adjoint à l'analyse de cycle de vie pour apporter la notion relative à la valeur intrinsèque des matériaux, elle-même liée à la disponibilité de la ressource et à la facilité d'exploitation. Notons que, dans cette étude, cet indicateur se révèle aussi discriminant que l'énergie grise ou les quantités de CO_2 évitées.

Actuellement, cet indicateur semble pertinent pour les ressources minérales. Néanmoins, son application aux matières organiques et matériaux à base de polymère n'est pas, par contre, aussi évidente [10]. Ainsi, dans cette étude, les matières polymériques n'ont pas été prises en compte dans le calcul de l'IRT. Il serait intéressant de tenir compte de l'exergie associée à ce type de matériaux pour affiner l'étude.

Cette étude nous conduit à reconsidérer les solutions énergétiques que l'on doit choisir pour mener à bien la transition énergétique. Dans le cadre de la décarbonation de l'énergie, le fait de passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables se traduit par une mobilisation bien plus grande en matières minérales pour la construction du système de conversion. L'attention doit donc se porter désormais sur les matières non-énergétiques en tenant compte des matériaux critiques qui peuvent être en quantité certes faible mais qui peuvent ne pas être facilement substituables. Ce cas est typique des matériaux photovoltaïques. De plus, les technologies qui peuvent sembler plus efficaces ne sont pas nécessairement plus "durables" du point de vue des matériaux qui les composent. En réalité, les systèmes avec une composition basique présente une valeur de rareté thermodynamique considérablement plus faible. De plus, le taux de recyclage des matériaux critiques est bien souvent très bas. Si les éléments présents dans les produits étaient récupérés, la rareté thermodynamique associée aux matériaux diminuerait, ce qui augmenterait la durabilité du produit. Il est donc essentiel de promouvoir la récupération et

le recyclage des matériaux précieux.

4. Conclusion

Dans cette étude, on met en évidence un indicateur qui associe à chacun des matériaux une valeur exergetique. Cet indicateur relatif à la rareté thermodynamique met en exergue les matériaux qui présentent des ressources difficiles à exploiter du fait de leur rareté et donc de leur faible concentration ainsi que de l'exergie nécessaire à leur raffinage. La présence de matériaux critiques certes en faible quantité dans un système conduit à devoir leur porter davantage d'attention. L' IRT_m est un indicateur intéressant pour mieux les intégrer dans l'analyse de cycle de vie. La comparaison à l'aide de cet indicateur de trois systèmes de production d'eau chaude sanitaire alimentés par l'énergie solaire montre que le chauffe-eau solaire thermique est nettement plus pertinent que les systèmes photovoltaïques. Le passage par le vecteur électricité pour, *in fine*, produire de la chaleur nécessite la mobilisation de nombreux matériaux caractérisés par une rareté thermodynamique élevée. Ainsi, l'électrification des usages thermiques à basse température comme l'ECS n'apparaît pas forcément comme la meilleure solution au regard de ce critère. De façon générale, la production de chaleur se révèle bien plus adaptée à partir d'une EnR thermique que d'une EnR électrique. L' IRT est donc un indicateur qui peut aider à la sélection de procédés énergétiques dans le cadre de la décarbonation de l'énergie. Pour consolider l'analyse, il devra être accompagné de l'évaluation du coût exergetique en fin de vie, c'est-à-dire de l'exergie nécessaire au recyclage et à la valorisation des procédés et des matériaux pour pouvoir les réintégrer dans un nouveau cycle de vie.

Références

- [1] O. Vidal, *Matières premières et énergie : Les enjeux de demain*, ISTE Group (2018).
- [2] Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - A Foresight Study, 2020
- [3] D.J. Bauer, R.T. Nguyen, B.J. Smith, *Critical Materials Assessment*, US Department of Energy, Jul. 2023
- [4] A. Valero and A. Valero, *Thanatia - The destiny of the earth's mineral resources*, World Scientific (2015)
- [5] ADEME-COSTIC, *Guide technique, Les besoins d'ECS en habitat individuel et collectif* (2016)
- [6] R. Olivès, J.-M. Mancaux, M. Perier-Muzet, *Congrès SFT* (Reims 2023)
- [7] R. L. Cornelissen, *Thermodynamics and sustainable development : the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility*, PhD dissertation, University of Twente, Netherlands, (1997)
- [8] V.M. Fthenakis, H.C. Kim, R. Frischknecht, M. Raugei, P. Sinha, M. Stucki, *Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems*. IEA, PVPS Task 12, Report T12-T02. (2011).
- [9] E. Carnevale, L. Lombardi, L. Zanchi, Life Cycle Assessment of solar energy systems : Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale, *Energy* 77 (2014)
- [10] K. Whiting, L. G. Carmona, T. Sousa, A review of the use of exergy to evaluate the sustainability of fossil fuels and non-fuel mineral depletion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76 (2017)