

Stockage d'énergie par pompage thermique multi-énergétique low-tech à faible empreinte carbone en milieu minier : revue critique de la faisabilité du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches locales

Sullivan DURAND^{1*}, Didier HAILLOT¹, Daniel R. ROUSSE¹

¹Groupe de Recherche en Technologies de l'Énergie et en Efficacité Énergétique (t3e)
École de technologie supérieure - 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec H3C 1K3, Canada
*(auteur correspondant : sullivan.durand.1@ens.etsmtl.ca)

Résumé - Le stockage d'énergie par pompage thermique multi-énergétique se positionne comme une solution privilégiée pour le stockage énergétique en milieu minier. L'intégration du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches extraites à proximité permettrait de réduire la période de retour sur investissement et l'impact environnemental du système. Cette revue examine la recherche actuelle sur ces systèmes et propose une analyse critique de la faisabilité de l'intégration du stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique sur des roches extraites localement.

1. Introduction

Les émissions de CO₂ causées par les activités humaines sont principalement responsables des changements climatiques. L'industrie minière occupe une place prépondérante dans ce constat en tant que l'un des plus grands consommateurs mondiaux d'énergie, représentant environ 10% de la consommation mondiale [1], et contribuant à hauteur d'environ 6% des émissions de gaz à effet de serre (GES) [2]. Cette situation est principalement due à l'utilisation de combustibles fossiles, correspondant à 62% de l'énergie finale consommée [3]. Afin de réduire son impact environnemental, il est inévitable que le mode de fonctionnement de l'industrie minière évolue vers la production d'énergie locale à partir de sources renouvelables (ENR). Cependant, ces technologies se distinguent par leur caractère intermittent. Par ailleurs, l'un des enjeux significatifs de cette industrie réside dans le fait qu'environ 40% de l'énergie finale consommée est dissipée sous forme de chaleur [4]. Une solution permettant de valoriser ces pertes thermiques tout en résolvant la problématique d'intermittence des technologies ENR consiste à déployer des systèmes de stockage d'énergie par pompage thermique (PTES : *Pumped Thermal Energy Storage*, Stockage d'énergie par pompage thermique) multi-énergétiques [5]. Malgré son potentiel, l'adoption de cette technologie est entravée par son coût, largement influencé par celui du stockage [6]. Une approche récente dans le domaine du stockage thermique consiste à utiliser un lit garni pulvérisé, où le fluide caloporteur est dispersé sur le support plutôt que de l'immerger complètement [7]. Parallèlement, en raison de l'isolement inhérent aux sites miniers, il est pertinent d'explorer des solutions low-tech à faible empreinte carbone. Dans cette optique, l'utilisation de roches extraites localement en tant que support de stockage représente une option envisageable. En conséquence, cet article propose une analyse critique de la faisabilité de l'intégration du stockage en lit garni par pulvérisation (STPB : *Spray Type Packed Bed* - Lit garni pulvérisé) d'huile thermique sur des roches au sein d'un système PTES multi-énergétique. Les principes des systèmes PTES multi-énergétiques et de la pulvérisation seront introduits au sein d'une courte revue de littérature, suivie d'une analyse critique et d'une conclusion.

2. Revue de littérature

Ce paragraphe a pour objectif de présenter les principes de fonctionnement et l'état actuel des systèmes PTES, ainsi que du STPB. Elle offre les éléments clés nécessaires à la compréhension de l'analyse critique qui sera développée dans la section suivante.

2.1. Systèmes PTES multi-énergétiques

Les systèmes PTES s'inscrivent dans le contexte plus large des batteries de Carnot, lesquelles définissent des systèmes de stockage de l'énergie électrique convertie en énergie thermique pendant une phase de charge, puis restituée lors de la décharge [8]. Leur principe de fonctionnement repose sur la création d'une différence de température entre deux réservoirs : le réservoir basse température (BT) et le réservoir haute température (HT). Lors de la charge, l'énergie électrique est transformée en énergie thermique et stockée dans les réservoirs, ou dans l'un d'entre eux. Lors de la décharge, l'énergie thermique est libérée, permettant à la chaleur de circuler du réservoir HT vers le réservoir BT. Ce flux thermique alimente un moteur thermique, le convertissant en travail, puis en électricité à travers un alternateur. Ainsi, une fraction de l'énergie électrique initiale est récupérée. Les systèmes PTES se démarquent par leur simplicité, leur efficacité, et des caractéristiques qui pallient les limitations des technologies de stockage actuelles : indépendance géographique et durée de vie significative [5].

La littérature scientifique identifie deux catégories de systèmes, selon le cycle thermodynamique employé lors de la phase de décharge : les systèmes PTES Brayton et Rankine. Chacun de ces systèmes est conçu pour répondre à une plage spécifique de température de stockage. Les systèmes PTES Brayton sont privilégiés pour le stockage à des températures moyennes et élevées, tandis que les PTES Rankine sont adaptés au stockage à des températures basses et moyennes (jusqu'à 400°C) [9].

Pour caractériser l'efficacité de ces systèmes, un indicateur couramment utilisé est l'efficacité aller-retour. Cette efficacité est définie comme le rapport entre l'énergie électrique restituée et l'énergie électrique fournie au cours d'un cycle complet de charge/décharge (voir Formule 1).

$$\eta = \frac{E_{Décharge}}{E_{Charge}} = \eta_{Charge} \times \eta_{Stockage} \times \eta_{Décharge} \quad (1)$$

Les systèmes PTES Rankine sont largement prédominants dans la littérature scientifique et dans les applications pratiques en raison de leur mise en œuvre aisée et de coûts réduits par rapport aux PTES Brayton [10]. Une efficacité aller-retour comprise entre 60 et 70% est souvent mentionnée. La phase de charge peut être effectuée à l'aide d'une pompe à chaleur ou de résistances électriques, bien qu'une diminution de l'efficacité du système soit observée dans ce cas [8]. Le système comprend généralement deux réservoirs de stockage de chaleur (HT et BT) et quatre machines : un compresseur et un détendeur pour le cycle de charge, ainsi qu'une pompe et un détendeur pour le cycle de décharge ; le cycle de Rankine utilisant une pompe (voir Figure 1). Des configurations réversibles ont également été explorées [11]. Le choix du type de stockage et des matériaux varie selon l'application. Cependant, la littérature privilégie souvent le stockage latent alors que dans la pratique, le stockage sensible est prédominant (sels fondus, lits garnis, etc.). Une configuration économique couramment adoptée pour les systèmes PTES Rankine consiste en un seul réservoir chaud, exploitant l'environnement comme réservoir froid [12].

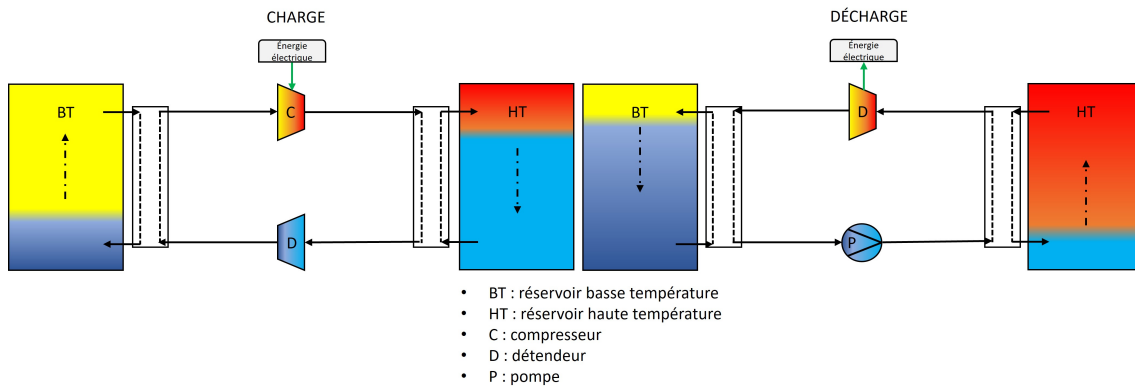


Figure 1 : Charge et décharge d'un système PTES Rankine, adapté de [9]

Les systèmes PTES multi-énergétiques représentent une amélioration des systèmes PTES évoqués précédemment. L'idée fondamentale est d'utiliser le système de stockage en tant que plateforme de gestion multi-énergétique, permettant une intégration complète de plusieurs vecteurs d'énergie et autorisant une restitution multiple : le système absorbe et produit de l'énergie électrique et thermique. Il se distingue ainsi des systèmes PTES classiques (voir Figure 2 et Figure 3). Des efficacités aller-retour dépassant 100% sont souvent mentionnées [13]. Il est crucial de souligner que l'efficacité aller-retour fait référence au rapport "énergie sortie/énergie entrée" et ne prend pas en compte l'apport de chaleur supplémentaire (voir Formule 1). Dans ce contexte, il serait nécessaire de définir un nouveau rendement prenant en considération cet apport de chaleur. Cependant, la littérature scientifique s'est entendue sur la validité de l'utilisation du rendement aller-retour.

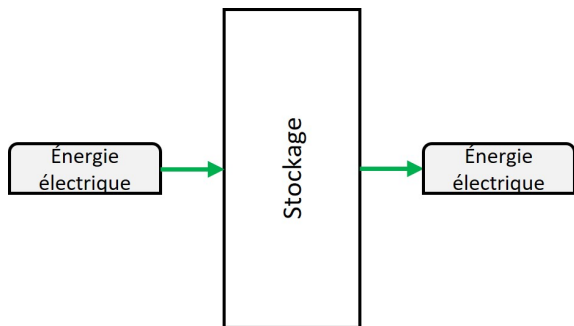


Figure 2 : Principe de fonctionnement des systèmes PTES "classiques", adapté de [14]

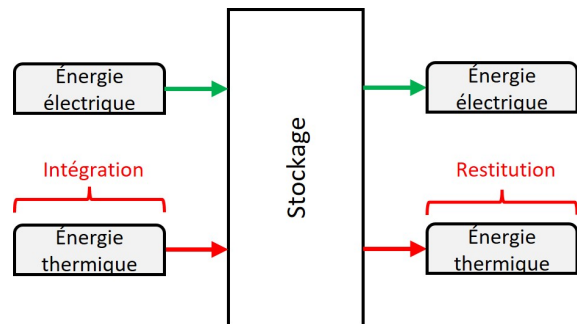


Figure 3 : Principe de fonctionnement des systèmes PTES multi-énergétiques, adapté de [14]

Les systèmes PTES Rankine, en raison de leur faible température de stockage, présentent une opportunité d'exploiter les flux de chaleur perdus pour améliorer leurs performances (intégration thermique). La configuration optimale implique l'utilisation de chaleur de faible qualité pour réduire la différence de température entre l'évaporation/condensation pendant le processus de charge [8]. Le réservoir BT est physiquement supprimé, et la source de chaleur résiduelle est employée pour évaporer le fluide de travail pendant la charge (voir Figure 4). Bien que les systèmes PTES Rankine soient particulièrement adaptés à l'intégration thermique, cette approche est également envisageable pour les systèmes PTES Brayton, à condition que la source de chaleur atteigne des niveaux élevés de température [15].

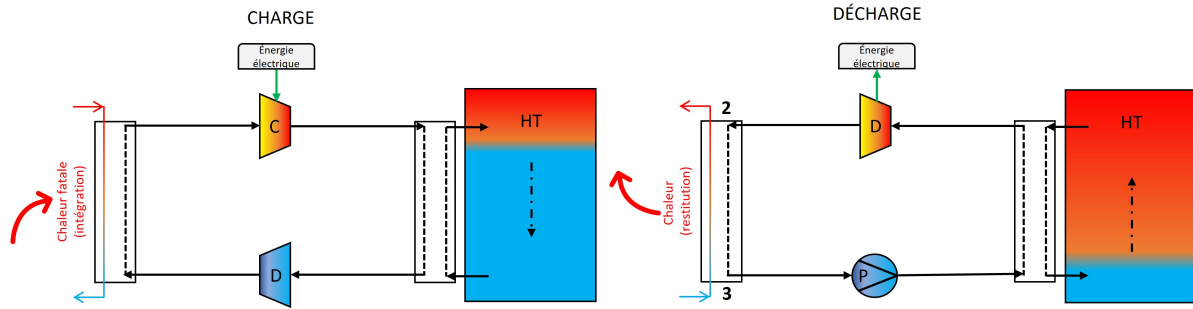


Figure 4 : Intégration et restitution thermique au sein d'un système PTES Rankine, adapté de [13]

Concernant le processus de restitution, la majorité des auteurs suggèrent l'exploitation de la chaleur en sortie du détendeur du cycle de décharge (voir Figure 4) [16][17]. Ainsi, l'énergie thermique résiduelle produite après la génération électrique est valorisée. Cependant, la restitution n'est réalisable que pendant la phase de décharge, et le système seul ne peut fournir un apport continu de chaleur. Une alternative envisageable consiste à utiliser un deuxième réservoir de stockage spécifiquement dédié à l'intégration et à la restitution thermique [5]. Cette option manque toutefois d'études approfondies quant à sa mise en œuvre, et les coûts de stockage augmentent, constituant ainsi un obstacle à l'adoption généralisée du système.

Peu d'études ont examiné en détail les performances des systèmes PTES multi-énergétiques, et les analyses se limitent parfois à une évaluation thermodynamique qui offre uniquement un aperçu des performances du système dans des conditions de conception, négligeant ainsi les études économiques et environnementales. La littérature scientifique souligne unanimement la problématique des coûts associés au système [6]. Plus précisément, le stockage représente environ 30% du coût global [18]. Ainsi, l'adoption du système dépend nécessairement d'une réduction des coûts liés au stockage. L'un des principaux défis est donc de trouver une solution de stockage énergétiquement efficace, abordable et idéalement à faible impact environnemental. Un stockage à faible coût mais fonctionnant à des températures proches de 400°C requiert inévitablement l'utilisation d'un stockage sensible. Le stockage en lit garni apparaît alors comme la solution privilégiée.

2.2. Stockage en lit garni par pulvérisation d'huile thermique

Les fluides caloporteurs les plus couramment utilisés pour le stockage thermique sensible en lit garni sont les huiles thermiques, les sels fondus et l'eau [19]. Les fluides caloporteurs liquides présentent des performances de transfert de chaleur plus élevées que les fluides gazeux et réduisent les pertes de pression à des débits élevés. Bien que l'eau soit facilement disponible, sa plage de température de fonctionnement est limitée. Par opposition, bien que les huiles thermiques et les sels fondus puissent fonctionner à des températures plus élevées, leurs coûts et les grandes quantités utilisées limitent leur utilisation. Pour une application donnée, les huiles thermiques restent privilégiées en raison de la température de solidification conséquente des sels fondus [19].

Cependant, un volume de fluide important est nécessaire pour remplir le lit garni, représentant entre 36 et 42% du volume du réservoir [7]. Dans le but de garantir à la fois un transfert de chaleur efficace, des coûts réduits et un impact environnemental limité, la technologie STPB a été proposée, avec pour objectif de minimiser la quantité de fluide présente dans le système [20].

Le stockage en lit garni par pulvérisation se compose de quatre éléments principaux : un réservoir renfermant le matériau de stockage, le fluide caloporteur, et un gaz, ainsi qu'un dispositif de pulvérisation (voir Figure 5). Dans ce système, la force de gravité est exploitée pour faire circuler le fluide caloporteur à travers le lit, occupant ainsi une fraction réduite du volume par rapport à un lit garni classique, où les vides entre les particules sont remplis (voir Figure 6). Le réservoir abrite ainsi trois phases distinctes : une phase solide (le matériau de stockage), une phase liquide (le fluide caloporteur) et une phase gazeuse (comblant l'espace entre les phases solide et liquide). Lors des phases de charge et décharge, le fluide est pulvérisé vers le sommet du lit sous forme de gouttelettes, s'écoulant à travers les interstices entre les particules de stockage sous forme d'écoulement filmique, entraîné par la gravité.

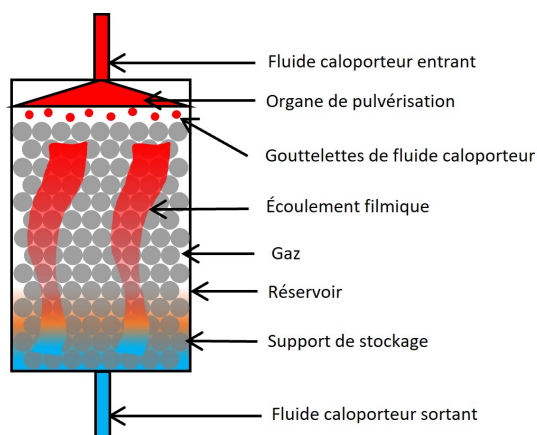


Figure 5 : Structure d'un lit garni par pulvérisation, adapté de [21]

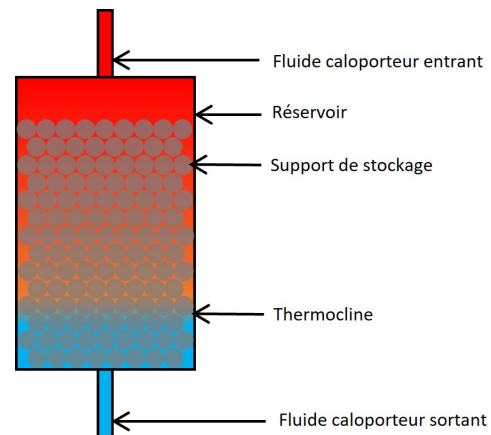


Figure 6 : Structure d'un lit garni conventionnel, adapté de [21]

En dépit du potentiel de ce type de stockage, très peu d'études ont été réalisées. Xie et al. [21] ont initialement proposé ce concept et mené une étude sur un dispositif expérimental utilisant de l'huile thermique, des particules sphériques en aluminium et de l'azote comme gaz. Le choix de l'huile thermique est motivé par les considérations abordées précédemment. Les sphères en aluminium sont sélectionnées en raison de leur capacité thermique élevée, de leur conductivité thermique favorable, de leur stabilité et de leur forme régulière. L'azote est utilisé pour éviter les problématiques de stabilité. Ces trois matériaux sont systématiquement employés dans l'ensemble des recherches portant sur le système. Les chercheurs ont étudié la rétention statique et dynamique de liquide dans le lit garni, contribuant à évaluer la quantité de fluide caloporteur. Les résultats de l'étude indiquent une réduction de 75% de la quantité d'huile par rapport à un lit garni classique, pour des conditions de fonctionnement similaires. L'étude démontre également une nette réduction des coûts par rapport à d'autres systèmes de stockage, avec une diminution de plus de 50% par rapport au lit garni conventionnel. Lin et al. [22] se sont concentrés sur les performances et la perte de charge de l'organe de distribution, proposant un principe de conception et un modèle de perte de charge. Bai et al. [20] ont proposé un modèle numérique transitoire validé sur un prototype expérimental du système à l'échelle du mégawatt. Les résultats expérimentaux ont révélé une efficacité énergétique comprise entre 90 et 98,8% (correspondant au rendement de stockage dans la Formule 1), et une efficacité exergetique comprise entre 75 et 88,9%. Lin et al. [23] ont étudié l'évolution de la thermocline au sein du système à l'aide d'un prototype à l'échelle du kilowatt. Lin et al. [7] ont finalement examiné le transfert de chaleur au sein du STPB à l'aide de ce dispositif et ont proposé une corrélation pour caractériser le coefficient de transfert de chaleur. Les conclusions de l'étude indiquent que le transfert de chaleur est comparable à celui d'un lit garni classique.

3. Analyse critique

La section précédente a présenté les principes de fonctionnement et a dressé un état de l'art des systèmes PTES multi-énergétiques et du STPB. Cette partie propose dans un premier temps une analyse critique sur la faisabilité de l'intégration de ce type de stockage au sein d'un système PTES multi-énergétique. Par la suite, l'utilisation de la roche en substitution des sphères en aluminium sera abordée.

La faisabilité de l'intégration du STPB au sein d'un système PTES repose d'abord sur une considération énergétique. Étant donné que l'objectif principal du système est de convertir l'énergie thermique stockée en énergie électrique, le lit garni pulvérisé doit être en mesure de maintenir une température de fluide suffisamment élevée en sortie. Dans le cadre du stockage en lit garni conventionnel, des zones chaudes et froides coexistent dans le même espace, séparées par un gradient thermique appelé "thermocline" (voir Figure 6). L'efficacité du système est étroitement liée à la présence de cette thermocline. L'objectif est de minimiser son épaisseur, assurant une stratification permettant de maintenir une température élevée et constante à la sortie du stockage. Le maintien de cette stratification dépend notamment de la direction du fluide, choisie pour suivre la stratification naturelle due à la variation de masse volumique avec la température. Ainsi, dans le cas d'un lit garni conventionnel, le fluide circule vers le bas pendant le processus de charge et vers le haut pendant le processus de décharge. Cependant, dans le cas du STPB, il est impossible que le fluide remonte pendant la décharge en raison du principe gravitaire du stockage : dans tous les cas, la circulation se déroule de manière descendante. Par conséquent, un problème de maintien de la thermocline pourrait survenir, entraînant une diminution de la température de sortie et compromettant le processus. Cependant, l'étude menée par Lin et al. [23] a démontré que la thermocline est présente, stable et se reconstruit à chaque cycle, assurant ainsi l'efficacité du système. Il est toutefois important de noter que peu d'études ont été réalisées, et le STPB n'a jamais été évalué dans le contexte de la production d'énergie électrique, encore moins au sein d'un système PTES.

La faisabilité repose également sur des considérations économiques et environnementales, découlant de la réduction de la quantité de fluide caloporteur. Toutefois, les études abordées dans la section 2.2 n'incluent pas d'évaluation économique et environnementale approfondie de l'impact de cette réduction. Bien qu'une comparaison des coûts de construction avec d'autres types de stockage ait été présentée [21], cette étude ne démontre pas clairement l'avantage économique à long terme du système. Ces considérations dépendent également de la dégradation du fluide caloporteur et du support de stockage, des aspects qui n'ont pas été évalués. Dans le cadre d'un stockage en lit garni conventionnel, Molina [24] a démontré que les variations des propriétés thermophysiques des huiles thermiques ne sont pas significatives au fil du temps, et que l'influence des propriétés du fluide sur le comportement global du stockage était limitée, sauf en ce qui concerne les pertes de charge, qui dépendent fortement de la viscosité du fluide. Cependant, le STPB implique une réduction de 75% de la quantité de fluide, ce qui pourrait avoir un impact significatif sur les performances du système. De plus, le travail de Molina ne couvre pas la dégradation du support de stockage, et Lin et al. [7] ont démontré que la vitesse réelle du fluide à la surface du support de stockage est supérieure à celle des lits garnis classiques. Par conséquent, les conditions de fonctionnement du STPB étant significativement différentes de celles des lits garnis classiques, la caractérisation du vieillissement de l'huile thermique et du support de stockage ne peut être prédite et doit être examinée. Cette évaluation est essentielle pour conclure sur les avantages économiques et environnementaux de ce type de stockage.

En raison de l'isolement caractéristique des sites miniers et dans l'optique de favoriser une gestion circulaire de l'exploitation tout en réduisant l'impact environnemental du système, il serait intéressant d'évaluer l'utilisation de roches extraites localement comme support de stockage. Cette perspective soulève plusieurs points qui nécessitent une attention particulière. Étant donné que la capacité et la conductivité thermique des roches sont inférieures à celles de l'aluminium [24], une étude approfondie est nécessaire pour évaluer la faisabilité énergétique de cette substitution. Selon le type de roche, la porosité du matériau peut être supérieure à celle des sphères en aluminium utilisées jusqu'à présent. Or, la quantité de fluide nécessaire au fonctionnement du système, déterminée en fonction de la rétention de liquide [21], dépend de cette porosité. Ainsi, la quantité de fluide requise dans le système pourrait augmenter, entraînant une diminution de son attrait. Par ailleurs, les effets de vieillissement doivent être pris en considération, les roches étant moins résistantes que les sphères en aluminium et leur forme étant moins régulière. Ce manque de régularité pourrait générer des problèmes de fluidité de l'écoulement, accélérant ainsi le vieillissement du fluide et de la roche. Jusqu'à présent, aucune étude n'a examiné avec précision la dégradation du support de stockage, même dans le cas des lits garnis classiques [24].

4. Conclusion

Cette revue présente les principes de fonctionnement ainsi que de l'état actuel des recherches sur les systèmes PTES multi-énergétiques et le STPB. L'analyse de la littérature suggère que les systèmes PTES multi-énergétiques sont particulièrement adaptés à un contexte minier. Leur intérêt est triple : (1) ils permettent de résoudre les problèmes liés à l'intermittence des technologies ENR ; (2) optimisent l'utilisation des rejets de chaleur fatale ; et (3) assurent l'asservissement en température d'autres processus. L'intégration du STPB se dégage comme une option envisageable, offrant des perspectives prometteuses pour la réduction des coûts et de l'impact environnemental du système. Elle permet : (1) une réduction de plus de 75% de la quantité de fluide caloporteur par rapport au lit garni conventionnel ; (2) une diminution des consommations énergétiques des pompes ; et (3) une baisse des coûts de construction par rapport aux solutions de stockage traditionnelles. Cependant, malgré ces avantages apparents, des recherches approfondies sont impératives pour mieux appréhender ce type de stockage, notamment en termes d'intérêt économique et environnemental. L'utilisation d'un support rocheux comme alternative à l'aluminium nécessite des études expérimentales. Ces recherches visent à fournir des données pour l'établissement d'un modèle permettant une évaluation de la faisabilité énergétique, économique et environnementale de cette approche.

Références

- [1] Pouresmaieli, M., Ataei, M., Nouri Qarahasanlou, A. & Barabadi, A., Integration of Renewable Energy and Sustainable Development with Strategic Planning in the Mining Industry, *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101412, (2023). DOI : 10.1016/j.rineng.2023.101412
- [2] Farjana, S. H., Huda, N., Parvez Mahmud, M. A. & Saidur, R., A Review on the Impact of Mining and Mineral Processing Industries through Life Cycle Assessment, *Journal of Cleaner Production*, vol. 231, pp. 1200–1217, (2019). DOI : 10.1016/j.jclepro.2019.05.264
- [3] Maennling, N. & Toledano, P., The Renewable Power of the Mine, (2018). DOI : 10.2139/ssrn.3661616
- [4] Kalantari, H., Amiri, L. & Ghoreishi-Madiseh, S. A., Analysis of the Performance of Direct Contact Heat Exchange Systems for Application in Mine Waste Heat Recovery, *International Journal of Energy Research*, vol. 46, no. 1, pp. 290–307, (2022). DOI : 10.1002/er.6734
- [5] Steinmann, W.-D., Bauer, D., Jockenhöfer, H. & Johnson, M., Pumped Thermal Energy Storage (PTES) as Smart Sector-Coupling Technology for Heat and Electricity, *Energy*, vol. 183, pp. 185–90, (2019). DOI : 10.1016/j.energy.2019.06.058

- [6] Sharma, S. & Mortazavi, M., Pumped Thermal Energy Storage : A Review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 213, p. 124286, (2023). DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124286
- [7] Lin, L., Wang, L., Bai, Y., Lin, X., Zhang, S., Ge, Z. & Chen, H., Heat Transfer Characteristics of the Innovative Spray-Type Packed Bed Thermal Energy Storage : An Experimental Study, *Journal of Energy Storage*, vol. 73, p. 108573, (2023). DOI : 10.1016/j.est.2023.108573
- [8] Dumont, O., Frate, G. F., Pillai, A., Lecompte, S., De paepe, M. & Lemort, V., Carnot Battery Technology : A State-of-the-Art Review, *Journal of Energy Storage*, vol. 32, p. 101756, (2020). DOI : 10.1016/j.est.2020.101756
- [9] Vecchi, A., Knobloch, K., Liang, T., Kildahl, H., Sciacovelli, A., Engelbrecht, K., Li, Y. & Ding, Y., Carnot Battery Development : A Review on System Performance, Applications and Commercial State-of-the-Art, *Journal of Energy Storage*, vol. 55, p. 105782, (2022). DOI : 10.1016/j.est.2022.105782
- [10] Novotny, V., Basta, V., Smola, P. & Spale, J., Review of Carnot Battery Technology Commercial Development, *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 647, (2022). DOI : 10.3390/en15020647
- [11] Steger, D., Regensburger, C., Eppinger, B., Will, S., Karl, J. & Schlücker, E., Design Aspects of a Reversible Heat Pump - Organic Rankine Cycle Pilot Plant for Energy Storage, *Energy*, vol. 208, p. 118216, (2020). DOI : 10.1016/j.energy.2020.118216
- [12] Abarr, M., Hertzberg, J. & Montoya, L. D., Pumped Thermal Energy Storage and Bottoming System Part B : Sensitivity Analysis and Baseline Performance, *Energy*, vol. 119, pp. 601–11, (2017). DOI : 10.1016/j.energy.2016.11.028
- [13] Dumont, O. & Lemort, V., Mapping of Performance of Pumped Thermal Energy Storage (Carnot Battery) Using Waste Heat Recovery, *Energy*, vol. 211, p. 118963, (2020). DOI : 10.1016/j.energy.2020.118963
- [14] Frate, G. F., Ferrari, L., Sdringola, P., Desideri, U. & Sciacovelli, A., Thermally Integrated Pumped Thermal Energy Storage for Multi-Energy Districts : Integrated Modelling, Assessment and Comparison with Batteries, *Journal of Energy Storage*, vol. 61, p. 106734, (2023). DOI : 10.1016/j.est.2023.106734
- [15] Zhang, H., Wang, L., Lin, X. & Chen, H., Combined Cooling, Heating, and Power Generation Performance of Pumped Thermal Electricity Storage System Based on Brayton Cycle, *Applied Energy*, vol. 278, p. 115607, (2020). DOI : 10.1016/j.apenergy.2020.115607
- [16] Trebilcock f, Ramirez, Pascual C, Weller T, Lecompte S, & Hassan A. H, Development of a Compressed Heat Energy Storage System Prototype, (2020).
- [17] Scharrer, D., Bazan, P., Pruckner, M. & German, R., Simulation and Analysis of a Carnot Battery Consisting of a Reversible Heat Pump/Organic Rankine Cycle for a Domestic Application in a Community with Varying Number of Houses, *Energy*, vol. 261, p. 125166, (2022). DOI : 10.1016/j.energy.2022.125166
- [18] Hu, S., Yang, Z., Li, J. & Duan, Y., Thermo-Economic Analysis of the Pumped Thermal Energy Storage with Thermal Integration in Different Application Scenarios, *Energy Conversion and Management*, vol. 236, p. 114072, (2021). DOI : 10.1016/j.enconman.2021.114072
- [19] Alva, G., Lin, Y. & Fang, G., An Overview of Thermal Energy Storage Systems, *Energy*, vol. 144, pp. 341–78, (2018). DOI : 10.1016/j.energy.2017.12.037
- [20] Bai, Y., Wang, L., Lin, L., Lin, X., Peng, L. & Chen, H., A Performance Analysis of the Spray-Type Packed Bed Thermal Energy Storage for Concentrating Solar Power Generation, *Journal of Energy Storage*, vol. 51, p. 104187, (2022). DOI : 10.1016/j.est.2022.104187
- [21] Xie, N., Wang, L., Wang, Y., Lin, X., Lin, L., Ji, L., Sheng, Y. & Chen, H., Spray-Type Packed Bed Concept for Thermal Energy Storage : Liquid Holdup and Energy Storage Characteristics, *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, p. 114082, (2019). DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2019.114082
- [22] Lin, L., Wang, L., Lin, X., Xie, N. & Chen, H., Experimental Investigation on the Distribution Uniformity and Pressure Drop of Perforated Plate Distributors for the Innovative Spray-Type Packed Bed Thermal Storage, *Particuology*, vol. 61, pp. 60–73, (2022). DOI : 10.1016/j.partic.2021.05.003
- [23] Lin, L., Wang, L., Bai, Y., Lin, X., Zhang, S., Ge, Z., Peng, L. & Chen, H., Experimental Study on the Storage Performance of the Innovative Spray-Type Packed Bed Thermal Energy Storage, *Applied Thermal Engineering*, vol. 219, p. 119415, (2023). DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2022.119415
- [24] Molina, S., Combinaisons Huiles/Solides Pour Le Stockage Thermocline : De l'étude Des Matériaux Au Modèle de Stockage Thermique, *Thèse de doctorat, Pau*, (2018).