

Optimisation monocritère des performances exergetique, environnementale et économique d'un stockage thermique thermocline en fonction des taux de *cut-off* en charge et en décharge.

Diane LE ROUX^{1*}, Pierre NEVEU², Régis OLIVES^{1,2}

¹Laboratoire PROMES (Procédés Matériaux Energie Solaire), UPR 8521
Tecnosud, Rambla de la thermodynamique – 66100 Perpignan.

²Université de Perpignan Via Domitia
52 Avenue Paul Alduy – 66100 Perpignan

* (auteur correspondant : diane.leroux@promes.cnrs.fr)

Résumé – Récemment, les stockages thermiques de type thermocline sont considérés comme une alternative prometteuse aux stockages sensibles de la chaleur. Cette étude cherche à optimiser l'efficacité exergetique, les impacts environnementaux et le coût actualisé de l'énergie du réservoir industriel à haute température Eco-Stock®, à travers différents critères d'arrêt (*cut-off*) des phases de charge et de décharge. Ces critères d'arrêt influencent les performances exergetiques de façon contraire aux performances environnementales et économiques.

Nomenclature

<i>ex</i>	exergie spécifique, J.kg ⁻¹	τ	taux
<i>Ex</i>	exergie, J	<i>Indices et exposants</i>	
<i>I</i>	revenus économiques, €.an ⁻¹	*	réel
<i>m</i>	débit massique, kg.s ⁻¹	∞	ambient
<i>T</i>	température, K	<i>co</i>	<i>cut-off</i>
<i>U</i>	énergie interne, J	<i>ch</i>	charge
<i>S</i>	entropie, J.K ⁻¹	<i>dc</i>	décharge
<i>t</i>	temps, s	<i>ex</i>	exergie
<i>Symboles grecs</i>		<i>H</i>	chaud
Δ	variation	<i>L</i>	froid
ε	porosité	<i>theo</i>	théorique
η	efficacité	<i>u</i>	utilisation

1. Introduction

En France, dans le secteur industriel, les procédés génèrent une chaleur fatale à hauteur de 52,9 TWh/an, soit 10 % de la consommation industrielle [1]. Un des enjeux de l'amélioration de l'efficacité énergétique est la récupération de cette chaleur fatale et donc l'implantation de stockage thermique afin d'ajuster au mieux l'offre à la demande.

Dans cette étude, un réservoir de type thermocline est utilisé comme stockage sensible de la chaleur (TES : *Thermal Energy Storage*). Le principe de fonctionnement d'une telle cuve est illustré sur la Figure 1. Un fluide caloporteur circule à travers un lit de particules, appelées solides de garnissage. Le fluide caloporteur peut être du gaz, comme de l'air, ou du liquide, comme des sels fondus ou des huiles synthétiques. Le gaz est préféré à haute température de stockage, alors que pour des basses températures, un liquide est utilisé.

Lors de la phase de charge (apport d'énergie), le fluide chaud (de température T_H) est injecté par le haut de la cuve et le fluide froid est extrait par le bas. Une zone chaude quasi-

isotherme se crée alors en entrée de cuve. Cette dernière se déplace vers le bas au fur et à mesure que de la chaleur est injectée dans la cuve. Un gradient thermique séparant la zone chaude de la zone froide apparaît, définissant la thermocline. En décharge, le sens de circulation du fluide est inversé. De ce fait, le fluide froid (de température T_L) est injecté par le bas de la cuve et le fluide chaud est extrait par le haut. La même zone thermocline apparaît entre les deux zones quasi-uniformes. Dans les deux cas, la thermocline se déplace dans le réservoir jusqu'à être partiellement ou complètement extraite. L'intérêt des TES thermoclines s'est accru ces dernières années. En effet, en combinant les deux cuves utilisées dans les stockages doubles cuves, les contraintes liées au coût et à l'encombrement se réduisent [2].

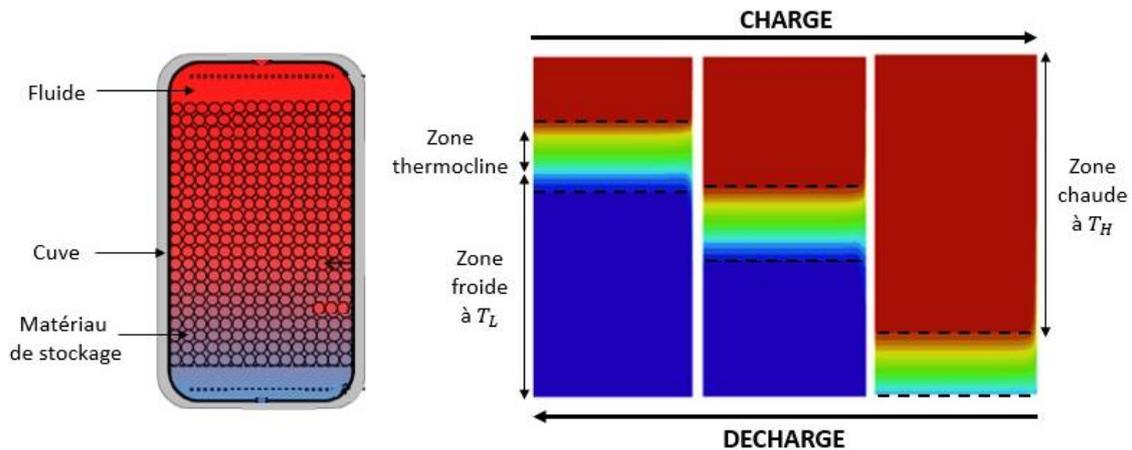


Figure 1 : Principe d'un stockage thermique de type thermocline

L'arrêt des phases de charge et de décharge est donné par le niveau de température atteint par le fluide en sortie de cuve. Les températures dites de *cut-off* en charge et décharge, respectivement $T_{ch,co}$ et $T_{dc,co}$ sont ainsi définies :

$$T_{ch,co} = T_L + x \cdot (T_H - T_L) \quad \text{et} \quad T_{dc,co} = T_H - x \cdot (T_H - T_L) \quad (1)$$

Où T_H et T_L sont les températures opérationnelles du stockage, les indices *ch* et *dc* les phases de charge et de décharge et x le taux de *cut-off* ($0 < x < 1$) correspondant à un taux d'utilisation du réservoir. Les températures $T_{ch,co}$ et $T_{dc,co}$ sont issues d'un compromis entre la capacité énergétique du stockage et les niveaux acceptables des températures de sortie pour les procédés en amont et aval. Le taux de *cut-off* est généralement fixé à 20 % pour des applications solaires où les températures en sortie de stockage ne doivent pas dépasser les températures admissibles dans le champ solaire (procédé en amont) et le bloc de puissance (en aval) [3, 4]. Cependant, aucune étude n'a étudié leur influence sur les performances d'un TES thermocline, dans un contexte de valorisation des chaleurs fatales industrielles.

Cette étude vise à faire une optimisation monocritère d'une cuve thermocline industrielle à haute température, selon différents taux de *cut-off* en charge et en décharge. Trois critères sont étudiés : l'efficacité exergetique, l'empreinte environnementale et le coût actualisé de l'énergie (LCOE : *Levelised Cost Of Energy*).

2. Méthodologie

Dans un premier temps, le TES thermocline de référence est défini. Les trois modèles utilisés sont décrits par la suite. Un modèle numérique et dynamique évalue l'efficacité exergetique du système. Les impacts environnementaux sont calculés à partir d'une Analyse

du Cycle de Vie (ACV). Le LCOE est enfin déterminé par une Analyse des Coûts du Cycle de vie (ACC). Ces trois modèles ont été précédemment explicités dans [5] et [6].

2.1. Système étudié

Le stockage thermique thermocline de référence est une cuve industrielle, développée et commercialisée par Eco-Tech Ceram. Ce réservoir, appelé Eco-Stock® permet de valoriser les chaleurs fatales perdues par l'industrie, jusqu'à 600°C. Il utilise de l'air comme fluide caloporteur et de la céramique (bauxite) comme solide de garnissage [7]. Cette cuve est définie à 20 % de *cut-off*. Elle possède un diamètre de 1,92 m pour une hauteur de 3,08 m, soit un volume de 8,9 m³. Les particules à l'intérieur du réservoir sont de 30 mm de diamètre.

2.2. Modèle physique

Le modèle dynamique consiste à résoudre les bilans transitoires de masse et d'énergie appliqués à un volume élémentaire représentatif, composé de fluide et de solide [4]. Il s'agit d'un modèle monodimensionnel à deux phases (les gradients radiaux sont négligés). Pour un couple fluide/solide donné, ce modèle permet d'évaluer le comportement énergétique et les performances du réservoir thermocline selon cinq paramètres de conception indépendants (capacité énergétique théorique, temps de charge/décharge, températures opérationnelles, porosité) et deux variables adimensionnelles (facteurs de forme externe et interne) [5]. Ces deux variables sont liées à la géométrie du réservoir et la granulométrie des particules.

Ce modèle physique permet de déterminer l'efficacité exergetique du stockage. Cet indicateur compare la puissance exergetique extraite du stockage par le fluide pendant la décharge et la puissance exergetique fournie au stockage par le fluide pendant la charge :

$$\eta_{ex} = \frac{-\int_0^{t_{dc}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt}{\int_0^{t_{ch}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt} \quad (3)$$

Où t_{dc} et t_{ch} sont les durées de charge et de décharge respectivement, \dot{m} le débit massique du fluide caloporteur et Δex la variation d'exergie spécifique subie par le fluide lors de la traversée du TES, tenant compte de la variation de température et de pression.

Un autre indicateur est utilisé dans cette étude. Le taux d'utilisation exergetique représente la fraction de volume réellement chargée/déchargée dans le stockage thermocline. Il s'écrit :

$$\tau_{u,ex} = \frac{\Delta Ex}{\Delta Ex_{theo}} = \frac{\Delta U - T_{\infty} \cdot \Delta S}{\Delta U_{theo} - T_{\infty} \cdot \Delta S_{theo}} \quad (4)$$

Avec T_{∞} la température ambiante, ΔEx , ΔU et ΔS respectivement les variations d'exergie, d'énergie interne et d'entropie du système durant une phase de charge ou de décharge.

2.3. Modèle environnemental

Les impacts environnementaux sont déterminés à partir d'une ACV, une méthode normalisée (ISO 14040) évaluant les effets quantifiables d'un produit ou service sur l'environnement, tout au long de son cycle de vie. Afin de comparer équitablement les bénéfices environnementaux d'un système à un cas de référence, un même service est spécifié. L'ACV du stockage de référence Eco-Stock® (ES) est basée sur les travaux antérieurs de Lalau *et al.* [8]. Dans cette étude, la chaleur est directement valorisée sous forme de chaleur. L'unité fonctionnelle à laquelle se référeront tous les impacts est alors définie par :

« Fournir une énergie thermique restituée égale à celle de la cuve de référence ($(Q_{dc})^* = (Q_{dc})_{ES} = 1567 \text{ kWh}_{th}/\text{cycle}$), pendant sa durée de vie (25 ans) en considérant deux cycles par jour et 15 jours de repos par an pour la maintenance »

Quatre indicateurs environnementaux, représentant quatre catégories d'impact (déplétion des ressources, changement climatique, énergie consommée et santé humaine), sont sélectionnés à partir de précédentes ACV disponibles dans la littérature sur les TES [2, 8] :

- L'épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables (ADP) en kg Sb_{eq} ,
- Le potentiel de réchauffement climatique (GWP) en $\text{gCO}_2_{eq} \cdot \text{kWh}^{-1}$,
- La demande énergétique cumulée (CED) en $\text{MJ}_{eq} \cdot \text{kWh}^{-1}$,
- L'émissions de particules (PM) en $\text{kg PM}_{2.5_{eq}}$.

La méthode du point médian ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) 2016 est utilisée pour calculer ces indicateurs à partir du logiciel OpenLCA v.1.8 et de la base de données EcoInvent v.3.5. Pour comparer l'importance relative de chaque indicateur, il est nécessaire de les normaliser selon la qualité de vie d'un européen [9]. Le critère d'optimisation retenu est ainsi défini comme la somme de ces quatre indicateurs normalisés.

2.4. Modèle économique

Le modèle économique se base sur une ACC, détaillée dans [6]. Elle permet de déterminer plusieurs indicateurs économiques : les Coûts du Cycle de Vie (CCV), la Valeur Actualisée Nette (VAN) et le LCOE. Le premier indicateur représente le montant total des coûts impliqués pendant la durée de vie d'un projet. La VAN est la somme des différents flux financiers considérés à la valeur actualisée qu'ils auraient à la date de début de projet. Enfin, le LCOE correspond au prix de vente de l'énergie qui annule la VAN [10] :

$$LCOE = \frac{CCV}{US_f(N, i^*) \cdot I} \quad (5)$$

Où I représente les intrants économiques du système considéré (€/an) et CCV inclut les coûts d'investissement, de maintenance, d'opération, de remplacement et de démantèlement et la valeur résiduelle du système (€). Le facteur d'actualisation US_f (*Uniform Series factor*) défini dans [10], permet de sommer et d'actualiser les revenus annuels sur la durée de vie (N années) du système, selon le taux d'actualisation et le taux d'inflation. Les revenus induits par le stockage thermocline sont uniquement dus à la vente de la chaleur. Ce gain économique est le produit de la production annuelle de chaleur par le prix de vente de la chaleur. Ce prix est considéré égal à celui du gaz naturel en France. Selon l'unité fonctionnelle choisie, cette production de chaleur est constante et vaut $1\,097 \text{ MWh}_{th}/\text{an}$. Ainsi, minimiser le LCOE revient à maximiser la VAN et minimiser le CCV. Le Tableau 1 présente les différents paramètres économiques considérés dans ce modèle économique.

Paramètres économiques	Valeurs
Taux d'intérêt	0,10 % par an
Taux d'inflation	0,03 % par an
Taux d'intérêt réel i^*	0,068 % par an
Facteur d'actualisation US_f	11,87
Durée de vie du stockage N	25 ans
Prix de vente de la chaleur	6,0 c€/kWh _{th}

Tableau 1 : Paramètres économiques de l'ACC

2.5. Problème d'optimisation

Le problème d'optimisation recherche les valeurs optimales des facteurs de forme permettant d'optimiser un par un les critères présentés, pour différents taux de *cut-off* (10, 50 et 90 %). Ces critères sont optimisés via la minimisation d'une fonction objectif, définie par :

$$f_{obj} = 1 - \eta_{ex} \quad \text{ou} \quad f_{obj} = ACV \quad \text{ou} \quad f_{obj} = LCOE \quad (6)$$

Finalement, le problème d'optimisation à résoudre se résume à :

$$\text{Min}(f_{obj}) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} (Q_{dc})^* = (Q_{dc})_{ES} \\ \tau_{co} = x, \quad 0 \leq x \leq 1 \\ \varepsilon = 0,4 \\ T_H = 600^\circ\text{C}, T_L = 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

Pour résoudre ce problème, l'algorithme génétique développé par Matlab® est utilisé pour une meilleure robustesse. Il est basé sur l'algorithme NSGA-II (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II*) [11]. Les paramètres par défaut sont conservés.

3. Résultats

Dans cette section sont présentés les résultats des trois optimisations monocritères pour les différents taux de *cut-off* considérés. Les dimensions du stockage et des particules sont présentées sur la Figure 2. Pour un taux de *cut-off* très faible (10 %), toutes les cuves optimisées sont effilées ($D_c < L_c$). Lorsque ce taux augmente, deux géométries se détachent : des cuves effilées sont obtenues pour les optimisations exergetiques, alors qu'elles sont plus ou moins trapues pour les optimisations environnementales (ACV) et économiques (LCOE).

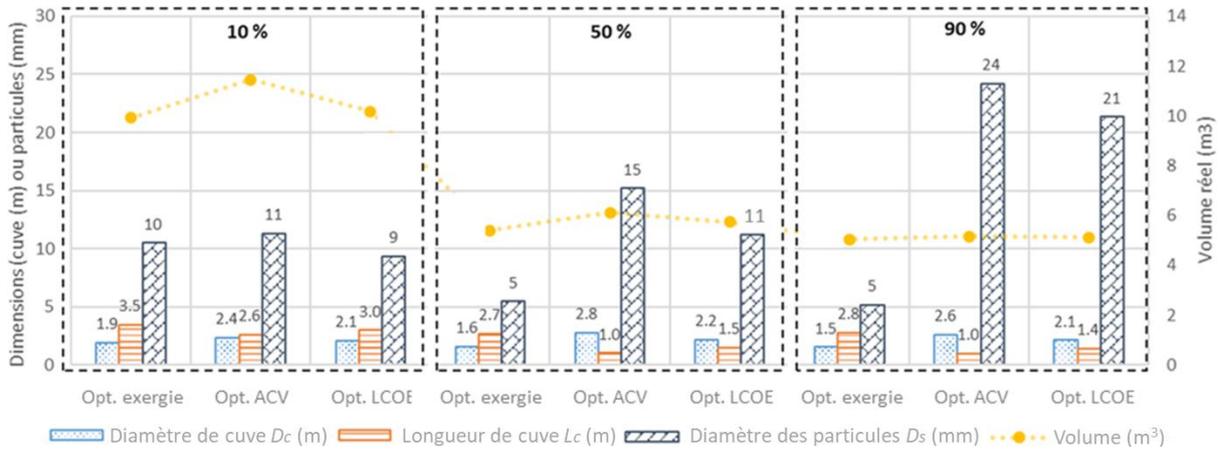


Figure 2 : Comparaison des géométries de stockage pour les différents taux de *cut-off* considérés

A 10 % de *cut-off*, les différences de volume entre les trois optimisations et la cuve de référence (cf. section 2.1) est faible (en moyenne 10,5 vs 8,9 m³). Pour des taux de *cut-off* plus élevés, ces différences augmentent considérablement puisque les volumes des cuves optimisées sont réduits de près de moitié par rapport à la cuve de référence. Quant aux diamètres de particules, ils sont similaires entre les optimisations à 10 % de *cut-off* (1 vs 3 cm pour la référence). Pour des taux de *cut-off* plus élevés, les différences de diamètre de particules s'atténuent entre la cuve de référence et les optimisations ACV et LCOE, alors qu'elles s'accroissent pour l'optimisation exergetique (- 83 % par rapport à la référence). Pour résumer, lorsque les taux de *cut-off* augmentent, les tailles de particules diminuent pour les optimisations exergetiques, alors qu'elles augmentent pour les optimisations ACV et LCOE.

Plus les taux de *cut-off* augmentent et plus le volume du stockage diminue, avec une réduction de moitié pour des taux de *cut-off* de 90 % par rapport à des taux de 10 %. En effet, dans ce cas les taux d'utilisation exergetique se rapprochent de 1 (1, 0,978 et 0,984 respectivement pour les optimisations exergetique, ACV et LCOE), permettant une utilisation optimale du volume stockage. Ces tendances sont illustrées sur la Figure 3, qui présentent les profils de température limites obtenus pour les trois optimisations exergetiques selon leur longueur normalisée. Les profils de température à 50 et 90 % de *cut-off* sont plus pentus que celui à 10 %. Par conséquent, la stratification est meilleure lorsque le taux de *cut-off* augmente, et la zone thermocline est plus fine. La taille de la zone thermocline impacte directement le taux d'utilisation exergetique. En effet, les limites des profils de température représentent la zone active du stockage. Grâce à une meilleure stratification à 50 et 90 % de *cut-off*, cette zone est plus grande (0,933 et 1,000 respectivement), alors qu'elle est largement plus faible à 10 % (0,506). Par conséquent, des volumes plus petits sont nécessaires pour fournir la même quantité d'énergie, comme illustré sur la Figure 2.

L'augmentation du taux de *cut-off* permet de décharger une énergie à plus faible température, et donc une plus faible exergetie. Malgré l'amélioration des taux d'utilisation exergetiques à 50 et 90 % de *cut-off*, l'efficacité exergetique est donc pénalisée par rapport à 10 %. En effet, elle atteint 0,955 et 0,908 respectivement à 50 et 90 % contre 0,975 à 10 % de *cut-off* pour les optimisations exergetiques. Cette tendance est encore plus marquée pour les optimisations ACV (0,971, 0,966 et 0,864 respectivement à 10, 50 et 90 % de *cut-off*).

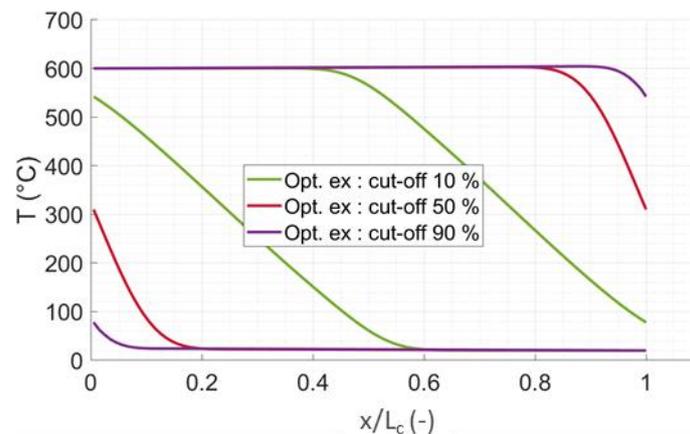


Figure 3 : Profils de température des optimisations exergetiques pour les taux de *cut-off* étudiés

La Figure 4 illustre l'évolution de l'impact environnemental des différentes configurations, sur les quatre indicateurs retenus. De manière générale, les impacts environnementaux diminuent lorsque le taux de *cut-off* augmente : - 35 % pour les optimisations ACV et LCOE à 90 % de *cut-off* par rapport à 10 %. La réduction du volume du stockage entraîne une diminution des masses des solides de garnissage et du réservoir. Moins de matériaux sont nécessaires pour produire autant d'énergie de décharge grâce à l'utilisation plus optimale du TES. Ainsi, l'empreinte environnementale de ces deux optimisations diminue. Cependant, les cuves optimisées exergetiquement voient leur empreinte environnementale augmenter de moitié. Dans ce cas, les indicateurs CED et ADP sont beaucoup plus impactant. En effet, comme illustré précédemment, les géométries des cuves optimisées exergetiquement sont plus effilées et présentent des petits diamètres de particules. De ce fait, les pertes de charge sont multipliées par plus de 4 entre des taux de *cut-off* de 10 % et 90 %, augmentant considérablement l'énergie consommée par le ventilateur, comme expliqué dans [5].

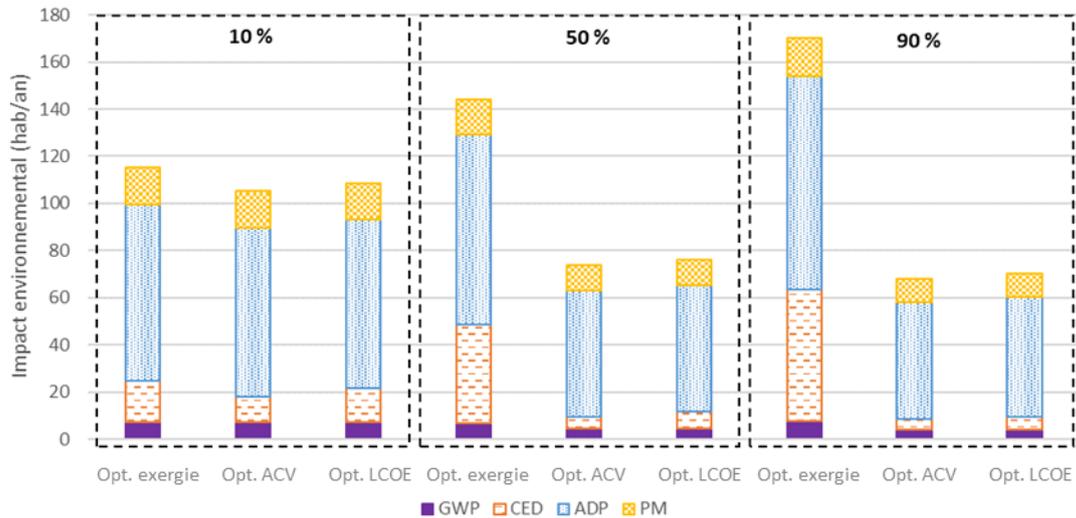


Figure 4 : Evolution de l'impact environnemental des stockages en fonction des taux de cut-off

Les indicateurs économiques sont détaillés sur la Figure 5. Lorsque le taux de *cut-off* augmente de 10 à 90 %, le CCV diminue de plus d'un tiers en moyenne. En effet, la réduction considérable du volume de stockage permet de limiter les coûts d'investissement de moitié. De ce fait, la VAN augmente de 284 à 420 k€ pour l'optimisation exergetique et de 283 à 459 k€ en moyenne pour les optimisations économiques et environnementales pour de taux de *cut-off* de 10 à 90 %. Le prix de vente de la chaleur produite suit les mêmes tendances que le CCV, car l'énergie déchargée est constante entre toutes les configurations. Les optimisations exergetiques sont moins rentables que les deux autres optimisations, notamment à cause des pertes de charge plus élevées qui entraînent des surcoûts d'utilisation d'électricité par le ventilateur. Finalement, le LCOE est très faible pour de taux de *cut-off* élevés : 2,5 c€/kWh_{th} pour les optimisations environnementales et économiques, soit 58 % de moins que le prix du gaz naturel en France (6,0 c€/kWh_{th}).

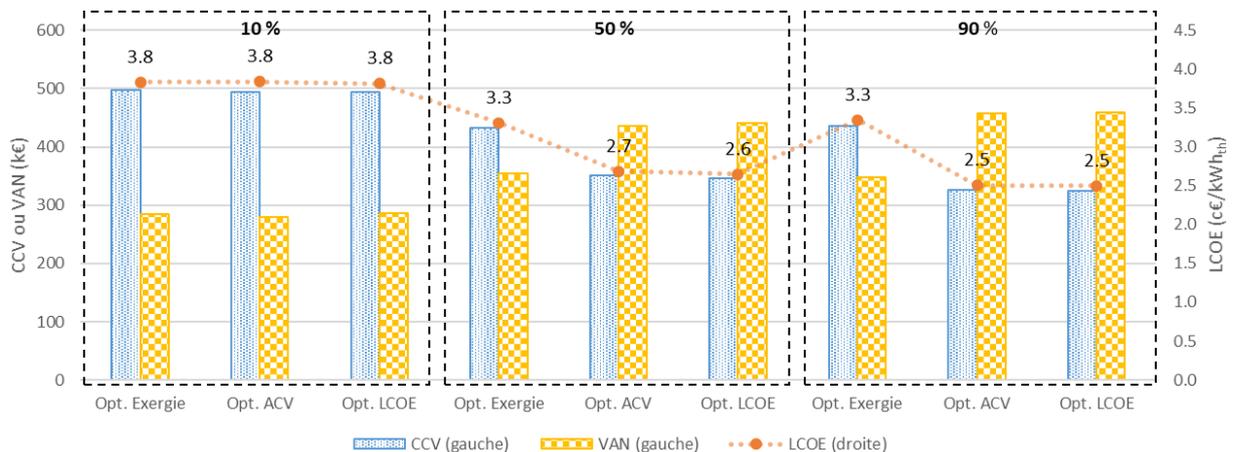


Figure 5 : Evolution des indicateurs économiques en fonction des taux de cut-off

4. Conclusion

Un stockage thermique de type thermocline permettant de valoriser les chaleurs fatales issues de l'industrie est étudié dans ce travail. Ce système est optimisé sur trois critères indépendamment les uns des autres : l'efficacité exergetique, l'impact environnemental et le LCOE. En parallèle, différents taux de *cut-off* permettant d'arrêter les phases de charge et de décharge sont considérés (10, 50 et 90 %).

L'augmentation des taux de *cut-off* permet de maximiser le taux d'utilisation exergetique du stockage, et de ce fait réduire le volume nécessaire pour décharger la même quantité d'énergie. Néanmoins, l'efficacité exergetique diminue légèrement. La diminution du volume du réservoir permet de limiter la masse totale des composants nécessaires. L'empreinte environnementale est donc réduite pour des taux de *cut-off* plus élevés. Cependant, celle des cuves optimisées exergetiquement est plus importante car les pertes de charge sont plus élevées, ce qui multiplie par cinq l'énergie consommée par le ventilateur. Les indicateurs ADP et CED sont alors largement impactés et la diminution du volume du stockage ne permet pas de compenser leurs élévations. De plus, moins de matériaux sont nécessaires à l'élaboration du stockage thermocline, ce qui diminue les coûts d'investissement. Par conséquent, les indicateurs économiques s'améliorent avec l'augmentation des taux de *cut-off*. Pour de faibles taux de *cut-off*, des géométries effilées (diamètre de cuve inférieur à sa hauteur) sont privilégiées, alors qu'elles deviennent plus trapues (diamètre de cuve supérieur à sa hauteur) pour des taux élevés, excepté lorsque l'efficacité exergetique est maximisée.

La présente étude montre ainsi l'influence des taux de *cut-off* sur la géométrie d'un stockage thermocline. S'ensuivra une optimisation multi-critères qui combinera simultanément les trois critères exergetique, environnemental et économique.

Références

- [1] ADEME, Excess heat, 2017e éd. Angers: ADEME (2018).
- [2] G. Heath et al., LCA of TES: Two-Tank Indirect and Thermocline, ASME 2009 3rd ICES, vol. 2 (San Francisco, USA, sept. 2010), 689-690.
- [3] B. Rebouillat et al., 2nd law analysis of thermocline – heat storage system, ECOS 2019 (Wrocław, Poland, june 2019), 3065-3076.
- [4] J.-F. Hoffmann et al., A thermocline TES system with filler materials for concentrated solar power plants: Experimental data and numerical model sensitivity to different experimental tank scales, Appl. Therm. Eng., vol. 100 (2016), 753-761.
- [5] D. Le Roux et al., Thermocline TES optimisation combining exergy and LCA, Energy Convers. Manag., vol. 248 (2021), 114787.
- [6] D. Le Roux et al., Geometry optimisation of an industrial thermocline TES combining exergy, LCA and life cycle analysis, J. of Energy Storage, (in press).
- [7] A. Touzo et al., Experimental and numerical analysis of a packed-bed TES system designed to recover high temperature waste heat: an industrial scale up, J. Energy Storage, vol. 32 (2020), 101894.
- [8] Y. Lalau et al., Energy analysis and LCA of a TES unit involving conventional or recycled storage materials and devoted to industrial waste heat valorisation, J. Clean. Prod., (2021), 129950.
- [19] European Commission et Joint Research Center, Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context, Institute for Environment and Sustainability (2011).
- [10] D. Tsuanyo et al., Modeling and optimization of batteryless hybrid PV/Diesel systems for off-grid applications, Energy, vol. 86 (2015), 152-163.
- [11] K. Deb et al., A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II, PPSN VI, Berlin, Heidelberg, vol. 1917 (2000), 849-858.

Remerciements

Ce projet a reçu un financement de la région Occitanie sous le numéro de subvention 19008845-ALDOCT-000791.