



HAL
open science

Éco-conception d'un échangeur-stockeur thermique de type thermocline

Diane Le Roux

► **To cite this version:**

Diane Le Roux. Éco-conception d'un échangeur-stockeur thermique de type thermocline. Energie électrique. Université de Perpignan, 2022. Français. NNT : 2022PERP0013 . tel-03813734

HAL Id: tel-03813734

<https://theses.hal.science/tel-03813734>

Submitted on 13 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par
UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA

Préparée au sein de l'école doctorale
Énergie et environnement ED 305

Et de l'unité de recherche
PROMES-CNRS UPR 8521

Spécialité : **Sciences de l'ingénieur**

Présentée par **Diane Le Roux**

**Eco-conception d'un échangeur-stockeur de type
thermocline**

Soutenue le 09/09/2022

devant le jury composé de

M. Ludovic MONTASTRUC, Professeur des universités, INP – ENSIACET, LGC	Rapporteur
M. Jean-Pierre BEDECARRATS, Professeur des universités, UPPA, LATEP	Rapporteur
M. Assaad ZOUGHAIB, Professeur des universités, MINES Paris Tech, CES	Examineur
M. Jean CASTAING-LASVIGNOTTES, Maître de conférence, Université de la Réunion, PIMENT	Examineur
M. Vincent GOETZ, Directeur de recherche, PROMES – CNRS	Examineur
M. Régis OLIVÈS, Professeur des universités, UPVD, PROMES – CNRS	Directeur
M. Pierre NEVEU, Professeur des universités, UPVD, PROMES – CNRS	Co-directeur

REMERCIEMENTS

Ce fut dur, mais tellement enrichissant ! Une thèse, en plus d'être une expérience scientifique, c'est avant tout une expérience humaine. Ces quelques mots sont donc dédiés à toutes les personnes qui agissent dans l'ombre du manuscrit final, en m'ayant aidée, encouragée et surtout soutenue tout au long de ces trois années.

En premier lieu, je tiens à remercier M. Ludovic Montastruc et M. Jean-Pierre Bédécarrats pour leur relecture attentive et leurs critiques constructives. Merci également à M. Assaad Zougahib, M. Jean Castaing-Lasvignottes et M. Vincent Goetz pour avoir accepté d'assister à ma soutenance en tant qu'examinateur. Vous avez pu suivre ma thèse tout au long de ces trois années à travers le comité de suivi individualisé, en me posant les bonnes questions pour améliorer mes connaissances et le contenu de ce travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier mes directeurs de thèse M. Régis Olivès et M. Pierre Neveu. Votre rigueur d'analyse, vos conseils et votre soutien sans faille, malgré les nombreuses complications tout au long de cette thèse, ont été très importants à mes yeux.

Je souhaite également remercier M. Thibaut Esence, d'Eco-Tech Ceram, pour m'avoir accordé du temps pour échanger à propos de l'Eco-Stock® et Mme Yasmine Lalau pour nos nombreux échanges sur l'ACV et son fonctionnement.

Mais la thèse n'est pas qu'une affaire de travail et de rigueur scientifique. De nombreuses personnes ont égayé mon parcours durant ces trois années.

Mes remerciements vont donc également à tout le personnel du laboratoire PROMES, qui fait vivre ce lieu formidable. Merci de m'avoir fournie à la fois un cadre de thèse sain et agréable ainsi qu'un soutien logistique indispensable au bon déroulement d'un travail de recherche. Merci à Sandrine, Romie, Naoual, Armelle, Philippe et Faïssal pour les aspects logistiques. Merci Françoise d'avoir créé les cellules d'initiative pour améliorer la vie du laboratoire. Merci Jean-Marie pour les plans de tomates. Vivement le jardin promessien !

Toute cette incroyable expérience humaine n'aurait pas été possible sans tous les doctorants du laboratoire, avec qui nous avons partagé un bureau, des soirées, des pauses café ou des activités

sportives. L'ambiance n'aurait pas été la même sans vous ! Je tiens donc à remercier Aubin, Baptiste avec qui nous avons pu créer le bureau des thermocliniciens, qui malheureusement n'excite plus désormais, suite à l'invasion des nouveaux doctorants... Merci également à Antoine G., Edouard, Corentin, Anis, Alex, Kadar, Youssef pour nos parties de volley sur la plage, mais aussi à Alexis, Chloé, Antoine P, Reine. Merci Youssef pour avoir autant passé de temps avec moi au début de la thèse, lors de petites pauses café. Merci Romain d'avoir organisé ce soutien suite à mon opération et créer cette jolie vidéo qui m'a tellement fait du bien ! Je ne sais pas comment tous vous remercier pour avoir participé à cette vidéo et l'avoir rendue aussi spéciale, avec cet immense soutien qui m'a permis de me relever plus forte.

Je souhaite également remercier les autres personnes que j'ai rencontrées durant ma vie à Perpignan, ou que j'ai gardé de l'école. Merci à Léna et Mélanie pour les moments passés ensemble, que ce soit nos balades et repas à l'extérieur, ou nos soirées ou moments de jeux de société passés ensemble. Je n'oublierai pas notre victoire éclatante à « Burger Quiz » face à Baptiste, Aubin et Martin ! Merci Lilian de rester à mes côtés depuis déjà 5 ans. Malgré la distance, nos retrouvailles sont toujours aussi fantastiques.

Tout ce travail n'aurait pas été possible sans ma famille. Nul besoin de détails pour vous, votre contribution est évidente et inestimable. Maman, je sais que je t'en ai fait voir de toutes les couleurs avec ce gros évènement qui a bousculé nos quotidiens. Sans ton énorme soutien, je n'aurais pas pu me remettre aussi rapidement et finir cette thèse.

Martin, ces derniers mots sont pour toi. La thèse nous a permis de nous rencontrer et de nous épanouir ensemble. Ta présence à mes côtés tous les jours depuis lors, dans les bons comme les mauvais moments, a rendu la vie plus facile et légère. Merci pour tout ce que tu m'apportes chaque jour, pour tout ce que nous avons vécu et que nous partagerons encore.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS.....	II
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	VII
LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE	VIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
1.1. Contexte	6
1.1.1. Centrales solaires thermodynamiques à concentration	6
1.1.2. Gisements de chaleurs fatales.....	7
1.1.3. Stockage thermique	8
1.2. Stockage thermique de type thermocline	10
1.2.1. Principe de fonctionnement.....	10
1.2.2. Solide de remplissage	12
1.2.3. Fluide caloporteur	17
1.2.4. Compatibilité fluide caloporteur et solide de remplissage	19
1.2.5. Comportement des systèmes de stockage thermocline	25
1.2.6. Dimensionnement du réservoir	29
1.2.7. Résultats expérimentaux	31
1.2.8. Indicateurs de performance	33
1.3. Éco-conception.....	34
1.3.1. Analyse du cycle de vie.....	36
1.3.2. Analyses économiques	47
1.3.3. Analyses sociales.....	52
1.4. Optimisation multi-objectifs	55
1.4.1. Principe d'un problème d'optimisation multi-objectifs	55
1.4.2. Méthodes d'optimisation multi-objectifs	56
1.4.3. Méthodes d'aide à la décision multi-objectifs.....	60
1.5. Synthèse	61
1.6. Conclusion.....	62
CHAPITRE 2 METHODOLOGIE	67
2.1. Modèle physique de la cuve thermocline	68
2.1.1. Modèle monodimensionnel à deux équations de type « Schumann ».....	69
2.1.2. Paramètres de description d'une cuve thermocline	74
2.1.3. Indicateurs de performances énergétiques et exergetiques	75
2.1.4. Application du modèle physique sur l'Eco-Stock®.....	80
2.2. Modèle environnemental.....	82
2.2.1. Unité fonctionnelle	82
2.2.2. Périmètre de l'étude	83
2.2.3. Indicateurs environnementaux	84
2.2.4. Application du modèle environnemental sur l'Eco-Stock®	85
2.3. Modèle économique	88
2.3.1. Indicateurs économiques	89

2.3.2.	Méthode de la valeur actualisée nette	90
2.3.3.	Application du modèle économique sur l'Eco-Stock®.....	95
2.4.	Apport aux modèles	97
2.4.1.	Prise en compte du carbone évité.....	97
2.4.2.	Application de la taxe carbone sur l'Eco-Stock®	98
2.4.3.	Changement d'unité fonctionnelle	98
2.4.4.	Application du changement d'unité fonctionnelle sur l'Eco-Stock®	100
2.5.	Optimisation multi-objectifs	100
2.5.1.	Définition du problème d'optimisation	100
2.5.2.	Algorithme d'optimisation	101
2.5.3.	Sélection d'une solution de compromis	104
2.6.	Structure générale de l'optimisation d'un stockage thermocline	108
2.7.	Synthèse	109
2.8.	Conclusion.....	111
CHAPITRE 3 OPTIMISATIONS MONO-CRITERES.....		113
3.1.	Géométries optimales et performances	114
3.1.1.	Dimensions des cuves optimisées	114
3.1.2.	Performances exergetiques.....	115
3.1.3.	Impacts environnementaux	117
3.1.4.	Indicateurs économiques	120
3.2.	Études de sensibilité	122
3.2.1.	Influence des taux de <i>cut-off</i>	122
3.2.2.	Influence de la porosité	131
3.1.	Conclusion.....	136
CHAPITRE 4 OPTIMISATIONS MULTI-CRITERES.....		139
4.1.	Optimisation de la cuve Eco-Stock®	140
4.1.1.	Détermination de la géométrie optimale sur un lit air/bauxite.....	140
4.1.2.	Sélection du matériau de garnissage optimal et de sa géométrie associée.....	146
4.1.3.	Prise en compte du carbone évité.....	161
4.2.	Optimisation de la cuve type Andasol.....	164
4.2.1.	Définition du stockage de référence	165
4.2.2.	Sélection du matériau de garnissage optimal et de sa géométrie associée.....	166
4.3.	Conclusion.....	171
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		175
LISTE DES FIGURES.....		181
LISTE DES TABLEAUX		187
ANNEXES 189		
A.1	Liste des logiciels et bases de données disponibles	189
A.2	Catégories et sous-catégories d'impacts sociaux de l'ASCV	192
A.3	Principe des méthodes multi-objectifs d'aide à la décision : TOPSIS et entropie de Shannon.....	193
A.3.1.	Méthode TOPSIS	193
A.3.2.	Entropie de Shannon	194
A.3.3.	TOPSIS combinée à l'entropie de Shannon.....	194

A.3.4.	Application des méthodes multi-objectifs d'aide à la décision TOPSIS et entropie de Shannon	195
A.4	Études de sensibilité sur des stockages thermoclines.....	198
A.5	Algorithme d'optimisation par essaim particulaire (OEP).....	201
A.6	Procédés EcoInvent v.3.7.1 utilisés pour les ACV	203
A.7	Inventaire de la phase de conception des matériaux de garnissage.....	205
A.8	Étude de sensibilité sur les taux d'intérêt réel.....	207
A.9	Variation des modèles environnemental et économique pour la cuve type Andasol	208
A.9.1.	Inventaire du cycle de vie.....	208
A.9.2.	Variation du modèle économique	212
A.10	Comparaison de l'impact environnemental des laitiers pour trois mises en forme différentes.....	216
A.11	Valorisation	217
BIBLIOGRAPHIE		218

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACC : Analyse des Coûts du Cycle de vie
ACV : Analyse du Cycle de Vie
ADP : Déplétion des ressources abiotiques (*Abiotic Depletion Potential*)
AIE : Agence Internationale des Énergies
ASCV : Analyse Sociale du Cycle de Vie
CASES : *Cost Assessment of Sustainable Energy Systems*
CCV : Coût du Cycle de Vie
CED : Demande énergétique cumulée (*Cumulative Energy Demand*)
CO₂ : Dioxyde de carbone
CSP : Centrale solaire à concentration d'énergie (*Concentrating Solar Power*)
EROI : Taux de retour énergétique (*Energy Return On Investment*)
ESTELA : *European Solar Thermal Electricity Association*
GES : Gaz à Effet de Serre
GWP : Potentiel de réchauffement climatique global (*Global Warming Potential*)
HTF : Fluide de Transfert de Chaleur (*Heat Transfer Fluid*)
ILCD : *International Reference Life Cycle Data System*
ISO : Organisation internationale de normalisation (*International Organisation for Standardisation*)
JRC : *Joint Research Centre*
LCOE : Coût actualisé de l'énergie (*Levelised Cost Of Energy*)
NSGA-II : *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*
OEP : Optimisation par Essaim Particulaire
PBT : Temps de retour environnemental (*PayBack Time*)
PM : Emission de particules respiratoires (*Particulate Matter*)
PSILCA : *Product Social Impact Life Cycle Assessment database*
PV : Photovoltaïque
TES : Stockage d'Énergie Thermique (*Thermal Energy Storage*)
TESM : Matériaux de Stockage d'Énergie Thermique (*Thermal Energy Storage Material*)
TOPSIS : *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*
UE : Union Européenne
VAN : Valeur Actualisée Nette

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Variables (lettres latines)

a	$\%.an^{-1}$	Taux d'actualisation ou taux d'intérêt
a_s	$m^2.m^{-3}$	Surface externe de solide par unité de volume du lit fixe
a_c	$m^2.m^{-3}$	Surface externe du lit fixe (ou de la paroi interne du réservoir) par unité de volume du lit fixe ($a_c = A_c/V_c$)
A	m^2	Surface externe
A_E	-	Constante du terme visqueux de la loi d'Ergun ($A_E = 150$)
ACV	hab.an	Impact environnemental total (Indicateur ACV)
ADP	kg Sb eq	Déplétion des ressources abiotiques (Indicateur ACV)
B_E	-	Constante du terme inertiel de la loi d'Ergun ($A_E = 1.75$)
Bi	-	Nombre adimensionnel de Biot
c	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	Capacité thermique massique
C	€	Coût
C_{ref}	$€.m^{-3}$ ou $€.kg^{-1}$	Coûts spécifiques
CCV	€	Coût du Cycle de Vie (Indicateur ACC)
CED	MJ_{eq}	Demande énergétique cumulée (Indicateur ACV)
D	m	Diamètre
e	m	Épaisseur
E	kWh	Énergie consommée
ex	$J.kg^{-1}$	Exergie spécifique
Ex	J	Exergie
EROI	an	Taux de retour énergétique
f	-	Facteur de correction
$f_{M\&S}$	-	Index de Marshall & Swift
f_{obj}	-	Fonction objectif

F_e	-	Facteur de forme externe de la cuve ($F_e = D_c/L_c$)
F_i	-	Facteur de forme interne de la cuve ($F_i = D_s/D_c$)
GWP	kg CO ₂ eq	Potentiel de réchauffement climatique (Indicateur ACV)
h	J.kg ⁻¹	Enthalpie massique
H	J ou kWh _{th} .an ⁻¹	Enthalpie ou production annuelle de chaleur
\dot{H}	J.s ⁻¹	Flux advectif enthalpique
i	%.an ⁻¹	Taux d'inflation
I	€.an ⁻¹	Revenus annuels
L	m	Longueur (ou hauteur)
L_{carac}	m	Longueur caractéristique ($L_{carac} = V/A_{ext}$)
LCOE	€.kWh ⁻¹	Coût actualisé de l'énergie (Indicateur ACC)
m	kg	Masse
\dot{m}	kg.s ⁻¹	Débit massique
N	an	Nombre d'années du cycle de vie
Nu	-	Nombre adimensionnel de Nusselt
ΔP	Pa	Pertes de charge
P	Pa ou €.kWh ⁻¹	Pression ou Prix de vente de la chaleur ou de l'électricité
PBT	an	Temps de retour environnemental
PM	kg PM2.5 eq	Émission de particules respiratoires (Indicateur ACV)
Pr	-	Nombre adimensionnel de Prandtl ($Pr = \mu_f \cdot C_{p,f} / \lambda_f$)
\dot{q}_p	J	Pertes thermiques
Q	J	Capacité de stockage de la cuve thermocline
$R_{th,cyl}$	K.W ⁻¹	Résistance thermique de conduction pour un cylindre
Re	-	Nombre adimensionnel de Reynolds ($Re = \rho_f \cdot \varepsilon \cdot u \cdot D_c / \mu_f$)
s	J. kg ⁻¹ .K ⁻¹	Entropie massique

\dot{S}_{irr}	J. K ⁻¹ .s ⁻¹	Production d'entropie
S	J. K ⁻¹	Entropie
\dot{S}	J. K ⁻¹ .s ⁻¹	Flux entropique
t	s	Temps
T	°C ou K	Température
u	m.s ⁻¹	Vitesse interstitielle du fluide, soit la vitesse de Darcy
u_{sup}	m.s ⁻¹	Vitesse superficielle du fluide ($u_{sup} = \varepsilon. u$)
ΔU	J	Variation d'énergie interne du stockage
U	W.m ⁻² .K ⁻¹	Coefficient global de perte de chaleur entre le fluide et l'extérieur
US_f	-	Facteur d'actualisation (<i>Uniform Series Factor</i>)
\dot{v}	m ³ .s ⁻¹	Débit volumique
V	m ³	Volume
VAN	€	Valeur Actualisée Nette
W	kW	Puissance
z	m	Coordonnées longitudinales (dans la direction de l'écoulement)

Variables (lettres grecques)

Δ	-	Différence entre deux grandeurs / Variation
∂	-	Dérivée partielle
Θ	-	Température adimensionnée
α	m ² .s ⁻¹ ou W.m ⁻² .K ⁻¹	Diffusivité thermique ($\alpha = \lambda/(\rho. C_p)$) ou Coefficient d'échange convectif
ε	-	Porosité du garnissage ($\varepsilon = V_f/V_c$) : fraction volumique de fluide dans le lit fixe
ϵ	-	Émissivité
η	-	Rendement
λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Conductivité thermique

μ	Pa.s	Viscosité dynamique
ρ	kg.m ⁻³	Masse volumique
τ	-	Taux
τ_u	-	Taux d'utilisation de la cuve

Indices et exposants

∞	Ambiance extérieure ou en condition libre
*	Réel(le)
~	Critère normalisé
^	Critère normalisé et pondéré
aleas	Aléas, imprévus
BP	Bloc de puissance
c	Cuve de stockage
ch	Charge
circ	Circulation du fluide caloporteur dans le système : ventilateur ou pompe
CO ₂	Dioxyde de carbone
conv	Conversion de la chaleur en électricité
<i>cut-off</i>	Critère d'arrêt de la phase (charge ou décharge)
cycle	Cycle
d	Détruite
D	Démantèlement
dech	Décharge
e	Électrique
eff	Valeur effective
en	Énergie
eq	Valeur équivalente
eqp	Équipements principaux

eq,V	Équivalent au diamètre de la sphère de volume équivalent
ex	Exergie
ext	Surface externe des parois de la cuve
f	Fluide
fin	Condition finale
fond	Fondations
H	Température haute de stockage
HTF	Fluide caloporteur
I	Investissement
in	Entrée
int	Surface interne des parois de la cuve
init	Condition initiale
ing	Ingénierie
inst	Installation
isol	Isolant recouvrant la cuve
j	Équipement j
L	Température basse de stockage
M	Maintenance
mat	Matériau
max	Valeur maximale
min	Valeur minimale
norm	Valeur normalisée
O	Opération
out	Sortie
p	Parois de la cuve
R	Remplacement
Res	Résiduel

ref	Conditions de référence
s	Solide
TC	Thermocline
th	Thermique
theo	Théorique
tot	Valeur totale
tuy	Tuyauterie / Conduites
utilisation	Phase d'utilisation du cycle de vie d'un produit

INTRODUCTION

Actuellement, notre mode de vie implique une consommation énergétique toujours plus importante. Cette énergie abondante est fournie en grande partie par des ressources fossiles. Or les réserves actuelles s'amenuisent et les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) ne cessent d'augmenter. D'après le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), le réchauffement climatique pourrait atteindre $+7,2^{\circ}\text{C}$ en 2100 (1).

Afin de réduire drastiquement nos émissions de GES, deux solutions sont proposées par le GIEC pour réussir la transition énergétique et écologique (1) :

- Remplacer les énergies fossiles par des **sources d'énergie à bas carbone** ou neutres, comme les énergies renouvelables,
- Réduire notre consommation d'énergie dans tous les secteurs (transport, industrie, résidentiel et tertiaire), grâce à la mise en place de **mesures d'efficacité énergétique** notamment.

Les énergies renouvelables, abondantes et faiblement carbonées, représentent désormais 84 % des nouvelles capacités installées chaque année dans le monde pour produire de l'électricité (2). Le solaire photovoltaïque (PV) ainsi que les éoliennes sont en forte croissance (augmentation de 287 GW_e en 2021), grâce à leur large disponibilité géographique et à leurs coûts de plus en plus bas (2). Les centrales solaires à concentration (CSP : *Concentrated Solar Power*) se sont largement développées en 2019 avec une augmentation de 11 % du parc mondial, notamment en Chine et au Maroc (3). Elles totalisent 6,0 GW_e sur les 3 146 GW_e d'énergies renouvelables installées dans le monde en 2021. Le CSP est estimé à 15,93 TWh_e sur les 27 521 TWh_e de production totale d'électricité dans le monde (2,3).

D'autre part, le secteur industriel consomme 38 % de l'énergie finale mondiale (4). Or une importante quantité de chaleur est produite puis perdue au sein des procédés industriels : entre 4 000 et 15 000 TWh_{th} chaque année (5,6). Ces chaleurs fatales peuvent atteindre des niveaux de température très intéressants, au-dessus de 300°C , en vue d'une valorisation. Le secteur industriel représente donc un potentiel d'efficacité énergétique importante, encore peu exploité.

Pour le déploiement des énergies renouvelables ou des systèmes industriels efficaces et sobres énergétiquement, le recours aux moyens de stockage en particulier thermique devient une

nécessité. En effet, ces derniers permettent de réguler les intermittences liées à l'emploi des énergies renouvelables, en déphasant la disponibilité et la demande d'énergie. Ils permettent de valoriser au mieux l'énergie disponible et d'optimiser le dimensionnement des systèmes rattachés. A l'heure actuelle, les centrales CSP ont largement été équipées de dispositifs de stockage thermique, alors que le solaire PV utilise des batteries pour stocker l'électricité (2,3).

Dans le cas de la valorisation de chaleurs fatales, le même déphasage entre production de chaleur et consommation est constaté, dû à l'intermittence des gisements (7). L'intégration d'un stockage thermique dans les procédés industriels permettrait de pallier cette variabilité, et de ce fait limiter la consommation d'énergie et les émissions de GES.

Le stockage thermique de type thermocline pourrait répondre à la fois à une problématique d'efficacité énergétique des procédés industriels ainsi qu'à celle de l'intermittence et la variabilité des énergies renouvelables. Ce stockage sensible de chaleur utilise une unique cuve à l'intérieur de laquelle résident simultanément le fluide froid et le fluide chaud. La région située entre ces deux zones quasi-uniformes en température est caractérisée par un fort gradient thermique, appelé thermocline.

Du fait de la transition énergétique et écologique, l'enjeu réside dans la mise en œuvre et l'exploitation de systèmes techniquement performants, vérifiant un modèle économique viable et respectueux de l'environnement. De par ces différents aspects, il s'agit dès lors d'établir les critères de dimensionnement et d'optimisation de modules de stockage de chaleur et d'évaluer leur pertinence en termes d'éco-conception. **L'objectif** de cette thèse est de **proposer un outil d'aide à la décision et à la sélection** des différents éléments constituant un échangeur-stockeur de type thermocline **répondant aux critères exergétiques, économiques et environnementaux**. Ce système pourra être intégré dans les centrales CSP, ou sur site industriel pour la récupération de chaleurs fatales entre 100°C et 600°C.

Une étude bibliographique des travaux existants est présentée dans le **premier chapitre**. Les spécificités du stockage thermocline sont présentées. Une revue détaillée sur les solides de garnissage et les fluides caloporteurs existants, ainsi que leur compatibilité est réalisée. Par la suite, différentes approches d'éco-conception sont détaillées, comme l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), l'ACV exergétique, l'Analyse des Coûts du Cycle de vie (ACC), l'analyse des coûts des dommages sur l'environnement et l'analyse sociale du cycle de vie. Le principe d'un

problème d'optimisation multi-objectifs est également présenté, ainsi que les méthodes multi-objectifs d'aide à la décision permettant de sélectionner une solution de compromis dans un ensemble de solutions optimisées.

La **méthodologie** permettant de répondre à la problématique du sujet est décrite dans le **second chapitre**. Les trois modèles utilisés sont détaillés (physique, environnemental et économique) ainsi que les trois critères d'optimisation : rendement exergetique, impact environnemental et coût actualisé de l'énergie (LCOE : *Levelised Cost Of Energy*). Le problème d'optimisation multi-objectifs est également présenté, tout comme les variables et les paramètres d'optimisation. La méthode multi-objectifs d'aide à la décision, utilisée par la suite, est également détaillée à travers un exemple.

Dans le **troisième chapitre**, le stockage thermocline industriel **Eco-Stock®**, commercialisé par Eco-Tech Ceram, est tout d'abord **optimisé de manière mono-objectif**. Ce système permet de valoriser les chaleurs fatales industrielles jusqu'à 600°C, avec de l'air et de la bauxite. L'influence de la géométrie de la cuve et de la granulométrie des particules sur les performances exergetique, environnementale et économique du stockage est alors étudiée. Des analyses de sensibilité sont également réalisées sur différents paramètres de conception (physique et opératoire), afin de comprendre leur importance ou de montrer leur faible impact.

Le **dernier chapitre** présente des **optimisations tri-objectifs** (exergie, environnement et économie) sur ce même stockage thermocline. La géométrie de la cuve et la granulométrie des particules optimales sont déterminées. Plusieurs solides de garnissage sont également comparés. La solution optimale est alors sélectionnée par la méthode TOPSIS couplée à l'entropie de Shannon. De plus, le contexte actuel visant à limiter les émissions de GES, la prise en compte du carbone évité est intégrée aux modèles environnemental et économique. Des optimisations multi-objectifs sont alors effectuées pour comprendre l'importance de l'utilisation de systèmes efficaces et à bas carbone. Finalement, la même méthodologie est appliquée sur un second stockage thermocline, simulé pour la centrale CSP d'Andasol. Ce système, imaginé par un ancien doctorant du laboratoire PROMES-CNRS (8), utilise de l'huile synthétique et de l'alumine pour stocker de la chaleur entre 293 et 393°C. L'influence de l'utilisation d'un fluide caloporteur liquide et d'une capacité de stockage plus importante est alors étudiée. La même méthodologie est réalisée : optimisations multi-objectifs pour six couples fluide/solide, puis comparaison et sélection de la solution optimale.

Une conclusion générale clôt ce mémoire et résume les principaux résultats obtenus. Des perspectives sont proposées pour poursuivre la méthodologie développée, et intégrer une démarche d'éco-conception à d'autres procédés énergétiques.

CHAPITRE 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Connaissant l'importance du stockage pour les énergies renouvelables, en particulier les centrales solaires à concentration, et pour la valorisation des chaleurs fatales industrielles, le stockage thermique devient une nécessité. Tout d'abord, le principe de fonctionnement d'un stockage thermique de type thermocline est exposé. Les caractéristiques des composants de ce système sont données et une étude approfondie de leur compatibilité est faite. Dans un second temps, la problématique de la stratification thermique propre à ce type de stockage thermique est explicitée. Les résultats des installations expérimentales les plus significatives sont ensuite exposés. Enfin, les indicateurs de performance du stockage thermique thermocline utilisés sont formulés. La troisième partie du chapitre explique ce qu'est l'éco-conception et les outils à utiliser pour développer cette démarche lors de la conception d'un système, à travers les différentes analyses du cycle de vie (environnementale, sociale et économique). Enfin, sont présentés différents algorithmes d'optimisation multi-objectifs et méthodes multi-objectifs d'aide à la décision.

Introduction

L'état de l'art qui suit détaille le principe d'un stockage thermique de type thermocline dans le contexte des centrales solaires à concentration ou de récupération de chaleurs fatales. Ce chapitre passe en revue les différentes caractéristiques et composants d'un tel système. Quelques résultats expérimentaux de stockage thermocline existants sont présentés, tout comme les différents indicateurs de performance permettant de caractériser l'efficacité du stockage. L'analyse continue sur les outils permettant de développer une démarche d'éco-conception. Des évaluations environnementales, économiques et sociales sont proposées, puis illustrées à partir d'études sur les centrales solaires à concentration et/ou sur les stockages thermiques. Enfin, le principe des optimisations multi-objectifs est exposé, ainsi que celui des méthodes multi-objectifs d'aide à la décision. L'objectif de ce chapitre est de sélectionner les différents outils qui seront utilisés par la suite.

1.1. Contexte

1.1.1. Centrales solaires thermodynamiques à concentration

Une centrale solaire à concentration (CSP) se compose principalement d'un champ solaire, d'un absorbeur et d'un système de conversion, appelé cycle thermodynamique. Un fluide caloporteur permet de transporter l'énergie entre les différents éléments de la centrale. La Figure 1 présente le fonctionnement global d'une centrale CSP. Tout d'abord, le champ solaire, composé d'héliostats (miroirs), concentre les rayons du soleil sur un absorbeur, qui les convertit en chaleur à haute température. Un fluide caloporteur (HTF : *Heat Transfer Fluid*) est alors utilisé pour transporter cette chaleur jusqu'au cycle thermodynamique. Ce dernier peut convertir la chaleur en électricité, si l'objectif est d'en produire, par une génératrice entraînée par une turbine.

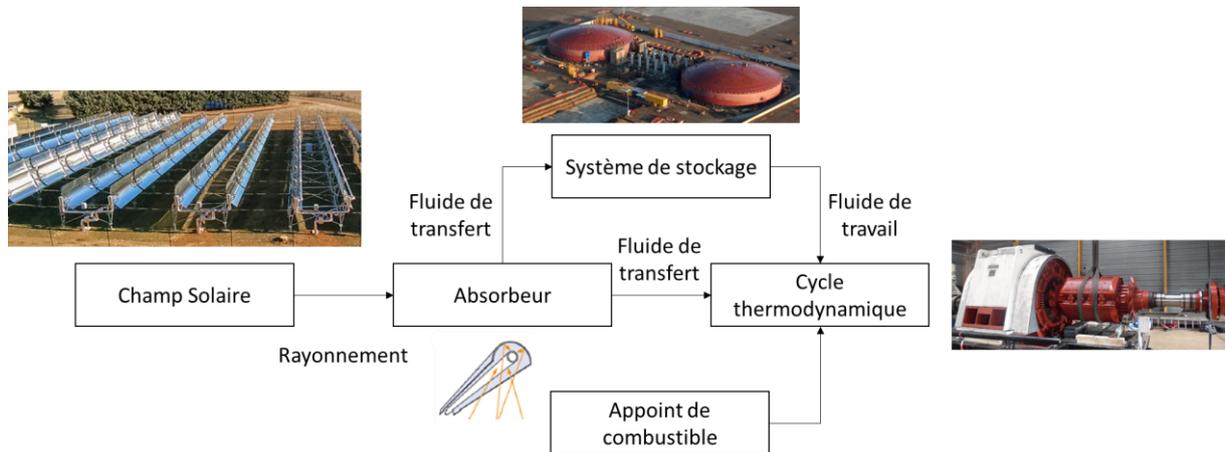


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique à concentration, modifié de (8)

Les centrales CSP peuvent se présenter sous deux configurations différentes (9) :

- La circulation est dite **directe** lorsque le fluide caloporteur est le même pour le champ solaire et le stockage. Cette configuration permet de limiter les coûts tout en augmentant l'efficacité de la centrale due à la suppression de l'échangeur thermique entre champ solaire et stockage thermique,
- La circulation est dite **indirecte** lorsque le fluide circulant dans le champ solaire est différent de celui circulant dans le stockage. Dans ce cas, le choix de chaque fluide est optimisé en fonction de son application (caloporteur ou stockage).

Quatre techniques sont actuellement utilisées dans les centrales CSP, selon le type de concentration et la mobilité des récepteurs solaires : cylindro-parabolique, Fresnel-linéaire, à tour et paraboliques (10). Les centrales cylindro-paraboliques sont les plus utilisées : plus de 90 % des centrales CSP utilisent cette technologie (11). Les centrales à tour peuvent atteindre de très hautes températures (1000°C). L'avantage des collecteurs linéaires de Fresnel est leur faible coût. Quant aux collecteurs paraboliques, leurs efficacités sont meilleures en contrepartie d'un coût plus élevé (10).

1.1.2. Gisements de chaleurs fatales

Dans l'industrie, près de 50 % de l'énergie consommée au niveau mondial est perdue sous forme de chaleur (6). Uniquement sur la Région Occitanie, le gisement de récupération de chaleurs fatales sur une gamme de température de 100 à 800°C est de 2,1 TWh_{th}, dont 34 % provenant des procédés de traitement des minéraux non-métalliques. En France, ce gisement s'élève à 52,9 TWh_{th} perdus à plus de 100°C (12). Ainsi, plus de 50 % du gisement correspond à des chaleurs fatales de moins de 100°C, comme le montre la Figure 2. Après une analyse préliminaire du gisement de chaleurs fatales en Europe, ce dernier s'élève à 370,41 TWh_{th} chaque année dans l'industrie (13). Aux États-Unis, dans le secteur industriel, 433 TWh_{th}/an sont perdues à 25°C, dont 75 TWh_{th}/an à 150°C (14). Au total, le département de l'énergie des États-Unis et l'ADEME estiment que chaque année 4 000 TWh_{th} pourraient déjà être valorisés dans le monde (5).

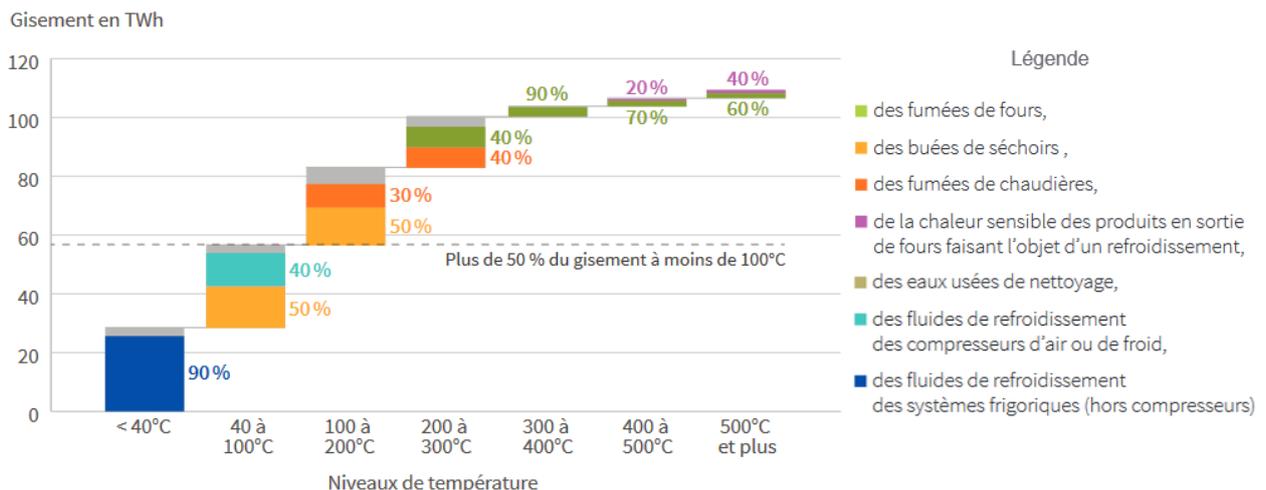


Figure 2 : Répartition du gisement en fonction du niveau de température, pour l'industrie française (12)

Au niveau mondial, plus de la moitié des chaleurs fatales industrielles sont rejetées à plus de 100°C, dont 38 % à plus de 300°C (6). D'après l'ADEME, les chaleurs fatales rejetées à haute température sont majoritairement issues des fours industriels (12). Ces fumées proviennent principalement des secteurs de la fabrication du verre, du ciment, de l'acier, de l'aluminium et de céramique (15). Ces hauts niveaux de température sont particulièrement intéressants en vue d'une valorisation. La chaleur entre 200 et 400°C est utilisée pour la génération de vapeur, alors que celle au-dessus de 400°C pour la génération d'électricité.

1.1.3. Stockage thermique

Afin d'améliorer les performances d'une centrale CSP, en adaptant la production d'énergie à la demande notamment, un stockage thermique (TES : *Thermal Energy Storage*) est installé. Le rôle de ce système est de stocker temporairement l'énergie excédentaire produite en vue d'une valorisation ultérieure, la nuit ou lors des pics de consommation. De plus, l'utilisation de cette technologie permet de compenser la variabilité de la ressource solaire pendant la journée. Le stockage thermique pallie ainsi le déphasage entre l'ensoleillement et la consommation d'énergie.

Cette technologie est de plus en plus intégrée dans les centrales CSP, notamment pour remplacer les appoints en combustible fossile (cf. Figure 1) (16). En 2018, sur les 23 centrales CSP construites, 20 accueillait également des systèmes de stockage (17). En 2021, la capacité totale de stockage installée conjointement avec les centrales CSP atteignait 23 GWh (2). De plus, pour des applications longues durées (plus de 4 heures), un TES combiné à une centrale CSP est plus compétitif que la combinaison des panneaux PV avec des batteries (18).

Le stockage thermique se présente sous trois formes : latent, thermochimique et sensible (9,19). Malgré des capacités de stockage plus faibles, ce dernier est le plus utilisé et le plus mature. Dans les centrales CSP, le stockage thermique sensible privilégié est celui à deux réservoirs de sels fondus. Ce système, considéré mature avec les nombreux retours d'expérience, consiste à stocker la chaleur dans un fluide, généralement des sels fondus. Lors de la charge, les sels provenant du réservoir froid sont chauffés via l'absorbeur, puis stockés dans le réservoir chaud. Lorsque le champ solaire n'apporte plus assez de chaleur, la phase de décharge débute. Les sels issus du réservoir chaud cèdent leur chaleur, puis sont envoyés dans la cuve froide. La chaleur récupérée alimente le cycle thermodynamique pour produire de l'électricité. Ce type de

stockage est le plus utilisé dans les installations commerciales, comme la centrale CSP d'Andasol en Espagne.

Les principaux avantages d'un stockage 2-cuves sont que la température de sortie des réservoirs est toujours constante car les fluides chaud et froid ne se mélangent jamais et leur température reste uniforme. Cette technologie conventionnelle présente cependant plusieurs contraintes. Tout d'abord, des contraintes inhérentes aux sels fondus apparaissent : il est nécessaire de maintenir la température dans le TES pour éviter leur cristallisation, ou de vidanger lors des périodes d'arrêt. Ensuite, l'utilisation de deux cuves est onéreuse et encombrante. En effet, le coût du stockage représente généralement 10 à 20 % du coût total de la centrale CSP (20,21). En combinant les deux réservoirs, ces contraintes disparaissent. La cuve unique permettrait de stocker à la fois le fluide chaud et le fluide froid. Les deux niveaux de température sont séparés par un fort gradient thermique, appelé thermocline. Dans le cas d'un stockage thermique de type thermocline, un lit de solides peut être utilisé pour remplacer une partie du fluide caloporteur. Ces derniers étant moins onéreux, le coût du stockage est réduit par rapport à celui du stockage 2-cuves. Le second et principal avantage est lié à l'encombrement. En effet, dans un système à deux réservoirs, l'équivalent du volume d'une cuve est systématiquement vide, alors que dans un stockage thermocline, la totalité du réservoir est utilisée.

En comparant ces deux systèmes de stockage pour la centrale CSP Andasol de 50 MWe, Fasquelle *et al.* (22) ont montré que la substitution d'un stockage 2-cuves par un TES thermocline provoque une diminution de seulement 3,4 % de la production d'électricité annuelle pour une capacité de stockage maximale. Cependant, les coûts sont réduits en moyenne de 30 %, essentiellement grâce à la réduction de volume du TES. Ces résultats sont comparables à ceux de Brosseau *et al.* (23) et Libby (24), qui indiquaient une diminution de 10 à 35 % des coûts, selon la capacité et la méthode considérée (stockage direct ou indirect). A même capacité de stockage effective, la diminution des coûts atteignait encore 22,3 % pour la simple cuve.

En plus des centrales CSP, le stockage thermique permettrait de valoriser les chaleurs fatales issues de procédés industriels, qui sont évacuées dans l'environnement. L'utilisation de TES permet de récupérer cette énergie perdue. La revue de Miró (7) liste les différents systèmes de stockage thermique employés pour la valorisation des chaleurs fatales. Les systèmes de stockage sont donnés en fonction des niveaux de température s'étendant de 1600°C comme pour la fabrication des métaux, à 100°C comme dans le secteur alimentaire. La plupart des TES

sont utilisés pour récupérer des gisements de chaleurs fatales à hautes températures, car ces derniers présentent des potentiels de valorisation élevés.

1.2. Stockage thermique de type thermocline

Le stockage thermique thermocline sur lit de solides étant l'objet d'étude de cette thèse, cette partie vise à exposer plus en détail son fonctionnement, ses composants (fluide et solide), son comportement thermique et en cyclage ainsi que son dimensionnement. Des résultats expérimentaux permettront par la suite d'illustrer les propos de cette partie.

1.2.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un stockage thermocline est détaillé sur la Figure 3a. Un fluide caloporteur (liquide ou gaz) circule à travers un lit fixe de particules solides appelé garnissage (TESM : *Thermal Energy Storage Material*). Il se détaille en deux phases distinctes :

- 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 (cf. Figure 3b). Un gradient thermique séparant la zone chaude de la zone froide apparaît, définissant la thermocline, dont l'épaisseur peut représenter jusqu'à un tiers de la hauteur de la cuve.
- **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. Dans ce cas, une zone froide quasi-isotherme se crée et se déplace de bas en haut, jusqu'à compléter la totalité de la cuve. Lorsque la thermocline, séparant les zones chaude (extraite) et froide (injectée), sort de la cuve, la température de sortie devient de plus en plus froide, jusqu'à atteindre la température T_L (cf. Figure 3b).

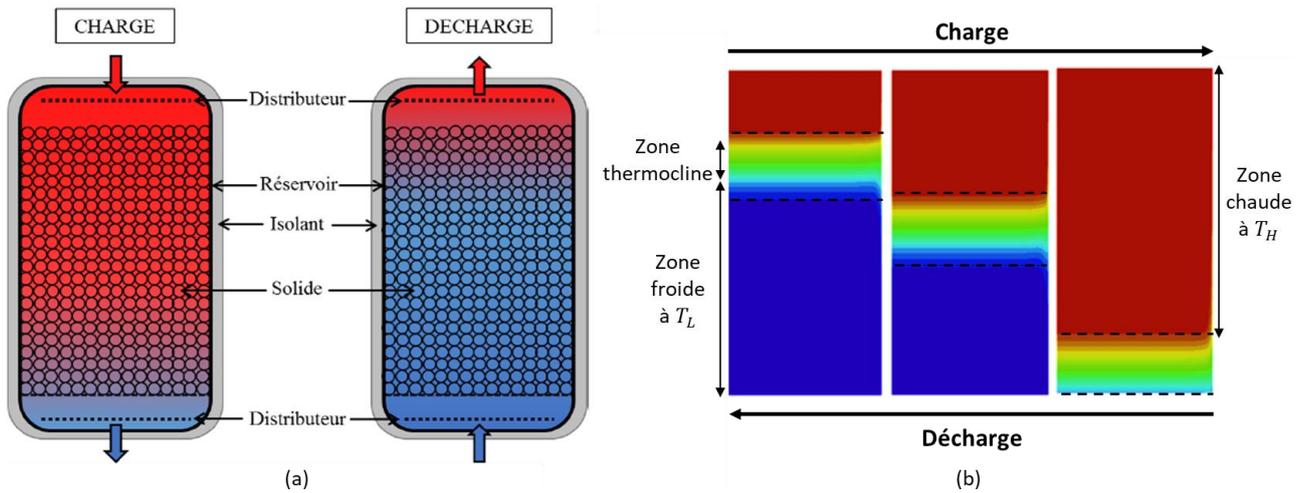


Figure 3 : Principe de fonctionnement du stockage thermocline sur lit de solides (a) (25), Schéma décrivant le déplacement de la zone thermocline dans la cuve (b)

L'utilisation d'une unique cuve fait apparaître de nouvelles contraintes. Les performances d'un TES thermocline sont étroitement liées aux phénomènes thermiques interagissant ensemble dans le réservoir, comme les échanges thermiques entre le caloporteur et le garnissage, la diffusion de la chaleur dans le lit fixe de solides, les pertes de charge vers l'extérieur ainsi que dans les solides ... Ces phénomènes physiques, décrits sur la Figure 4, perturbent les puissances des phases de charge et de décharge, ainsi que la qualité de la chaleur disponible, appelée exergie. La stratification thermique au sein du stockage thermocline, qui divise le réservoir en couches de différentes températures et densités, joue alors un rôle primordial dans les performances du système.

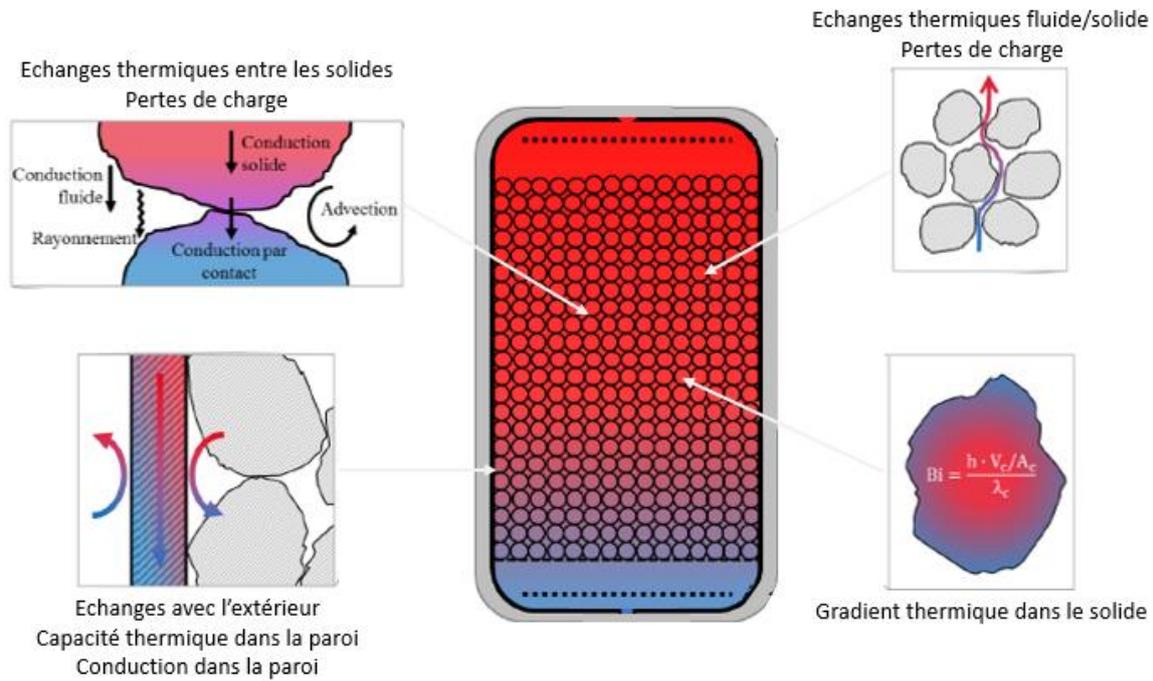


Figure 4 : Schéma des principaux phénomènes physiques impliqués dans le comportement thermique des systèmes de stockage thermochemique, modifié de (26)

1.2.2. Solide de remplissage

En substituant une partie du fluide caloporteur par un solide de remplissage, le stockage devient un stockage thermochemique sur lit de solide. L'intérêt de l'ajout d'un matériau de garnissage solide peut être triple. En effet, si la capacité volumique de stockage du solide est supérieure à celle du fluide, la taille de la cuve peut être diminuée pour une même énergie stockée. De plus, le coût du fluide étant généralement plus élevé que celui du solide, une diminution de l'investissement total pour une même énergie stockée est observée : jusqu'à 70 % du montant du fluide (27). Enfin, l'ajout de solides limite les effets de mélange des fluides, ce qui permet de garder une bonne stratification thermique dans la cuve (28). Ainsi, l'utilisation d'un solide de remplissage permet d'améliorer les performances de la cuve thermochemique, tout en diminuant son coût.

Le gradient thermique visible dans la zone thermochemique est dû à la diffusion thermique et à des phénomènes liés à l'advection, qui apparaissent au sein des solides de garnissage. Afin de limiter l'influence de la conductivité dans les solides, et donc de la diffusion thermique, il est nécessaire de choisir une taille de particules relativement petite. Néanmoins, diminuer la taille

des solides implique l'augmentation des pertes de charge dans la cuve, et donc de la puissance consommée pour la circulation du fluide (8,29,30). Un compromis doit donc être obtenu.

1.2.2.1. Critères de choix des solides de remplissage

En plus des matériaux de garnissage déjà utilisés et expérimentés, l'Agence Internationale des Énergies (AIE) recommande d'en rechercher de nouveaux selon les huit critères suivants (cf. Tableau 1) (31).

Tableau 1 : Critères de choix pour les matériaux de stockage thermique (31)

1) Faible coût commercial
2) Écobilan acceptable
3) Stable jusqu'à 1000°C
4) Capacité de stockage thermique élevée (> 2,6 MJ.m ⁻³ .K ⁻¹)
5) Disponible en quantité industrielle
6) Durée de vie importante (> 25 ans)
7) Compatibilité avec les fluides de transfert
8) Mise en œuvre facile

De plus, une conductivité thermique élevée permet de diminuer le nombre de Biot et donc de limiter le gradient thermique à l'intérieur des solides. Le choix de TESM ayant un coefficient thermique d'expansion faible limite l'effet de *Thermal Ratcheting*. Cette déformation plastique, pouvant conduire à la rupture du réservoir, peut se produire dans la cuve thermocline sur lit de solides par la succession de contractions et dilatations thermiques visibles lors des successions de charge et décharge. En effet, en charge les parois du réservoir se dilatent, ce qui peut entraîner le déplacement des solides dans les zones « libérées ». Lors de la décharge, les parois se contractent pour revenir à leur état initial. Or, le TESM bloque ce phénomène de contraction, entraînant des contraintes de pressions sur les parois (32). Jusqu'à présent, peu d'études se sont intéressées au phénomène de *Thermal Ratcheting*. Pour étudier ce phénomène, la contrainte mécanique appliquée sur les parois du stockage a été étudiée dans différentes conditions de pertes thermiques et d'isolation (32). Dans tous les scénarios, cette contrainte est toujours inférieure à la moitié de la limite d'élasticité de la paroi en acier du stockage.

1.2.2.2. Différents solides de remplissage connus

Le choix des TESM est une des étapes clés pour le stockage thermocline. De nombreux solides de garnissage ont déjà été utilisés lors d'expériences pratiques détaillées dans la littérature. Le Tableau 2 présente les propriétés physiques de certains TESM. La densité volumique de stockage des matériaux est représentée par la capacité calorifique volumique (ρc). Les valeurs sont approximatives puisqu'elles peuvent varier en fonction de la température d'utilisation, de la provenance et la qualité des matériaux.

Les métaux ou les roches naturelles sont utilisés traditionnellement dans les TES. L'avantage des métaux est leur haute capacité volumique de stockage, malgré leur coût très élevé. A l'inverse, les roches naturelles, choisies localement, sont peu onéreuses et limitent l'impact environnemental lié au transport. Néanmoins, leur géométrie ne peut pas être contrôlée. Les céramiques réfractaires, caractérisées par leurs stabilités chimique et mécanique à haute température ($> 1200^{\circ}\text{C}$), permettent de construire des lits structurés. Cependant, leur disponibilité industrielle est limitée par la disponibilité des matières premières et par les prix très élevés, et leur impact environnemental est important.

Les matériaux issus de déchets et de coproduits industriels sont de plus en plus étudiés car leur coût est très faible et leur impact environnemental est limité. L'utilisation du cofalite, déchet issu de la vitrification de l'amiante, est envisagé comme TESM jusqu'à une température de 1100°C (33). Différents types de laitiers issues de fours peuvent être utilisés en tant que matière première pour la fabrication de céramiques frittées, jusqu'à 1100°C (34). Lopez Ferber (15) met en avant l'utilisation de mâchefer d'incinérateur d'ordures ménagères pour produire de nouvelles céramiques frittées, en le combinant avec de l'argile. Ce déchet industriel semble intéressant car disponible en grande quantité aux alentours des grandes métropoles, diminuant de ce fait les impacts environnemental et économique liés au transport. Néanmoins, c'est un matériau fortement hétérogène dont les propriétés sont moins constantes dans le temps et l'espace que d'autres sous-produits issus de déchets (cofalite, laitiers...). Suite à de nombreuses expériences, une céramique frittée, composée de 30 % d'argile et du reste de mâchefer d'incinérateur cuite à 1115°C est un TESM envisageable (15). Une étude récente à démontrer que des déchets urbains de démolition peuvent également être utilisés (29). En plus de leur faible coût, ils sont disponibles en grandes quantités à proximité des villes. La revue détaillée de Gutierrez *et al.* (35) sur les solides de garnissage issus des déchets ou de sous-produits de

l'industrie liste les différents solides permettant de diminuer le coût global du stockage tout en valorisant les déchets et ainsi limitant les impacts environnementaux. D'autres déchets sont régulièrement testés : des déchets urbains (36), des déchets de différents fours (37–39), des sous-produits à base de sel (40), des scories de cuivre (41)...

Tableau 2 : Ordres de grandeur des propriétés thermophysiques et des coûts des solides de remplissage envisagés (8,15,25,29,31,35,42–47)

TESM	T_{max} (°C)	ρ (kg.m⁻³)	c (J.kg⁻¹.K⁻¹)	λ (W.m⁻¹.K⁻¹)	$\rho \cdot c$ (MJ.m⁻³.K⁻¹)	Coût (€.kg⁻¹)
Alumine	900 – 1800	3670 – 4000	900 – 1157	11 – 12	3,6 – 4,57	1,6
Bauxite	1200	3005 – 3550	900 – 1076	1,3 – 3,98	3,2	0,5 – 1
Céramique coulable	1200	3500	866	1,4	3,03	4,5
Céramique haute température	2680	900	1100	1,3	0,99	4,5
Céramique en carbure de silice	1200	3200	750	120	2,41	
Fer	1500	7200	465 – 560	29,3 – 37	2,08 – 4,03	0,9
Plomb		11300	131	35,3	1,48	1,7
Cuivre		8300	383	372	3,18	5,5
Acier	1300	7800	571	40	4,45	4,5
Béton	400	2200	850	1,5	1,87	0,08
Béton renforcé	600	2200 – 2750	850 – 916	1 – 1,5	1,87 – 2,52	
Béton à haute teneur en alumine	1500	2400	980	0,2	2,35	
Brique réfractaire en magnésie	1200	3000	1150	5,0	3,45	1,8 – 2
Briques réfractaires en silice (mullite)	700	1820	1000	1,5	1,82	0,9 – 1
Granite	700	2530 -2893	600 – 1200	2,8 – 3	1,44 – 3,47	0,03
Quartzite	600	2210 – 2770	800 – 900	2 – 5,5	1,75 – 2,5	0,01
Gabbro		2911 – 3000	650	2,05	1,89 – 1,95	0,03
Marbre	700	2510 – 2860	700 – 1000	7,7	1,76 – 2,86	0,03
Basalte	600 – 900	2610 – 3000	900 – 1500	2 – 3,2	2,35 – 4,5	0,03
Silex	400	2600	740	3,5	1,92	0,03
Gravier		2000	1840	0,5	3,68	

Cofalit	1000 – 1200	3100	1034	1,4 – 2,7	3,23	0,008
Cendres volantes	1100	2000 - 2962	714 - 1300	1,16 – 2,1	1,43 – 3,85	0,01 – 1,2
Verre sodo-calcique		2700	703	0,9	1,91	
Mâchefer d'incinérateur	1100	1600	750 (25°C) – 920 (390°C)	0,55 (25°C)	1,1 – 1,5	0 – 0,305
Scories acier issus de four à arc électrique	1000 – 1100	3500	700	1,5 – 2	2,4 (20°C) – 3,1 (800°C)	0,1 – 0,19
Scories de cuivre	800 - 1200	3500 – 4350	571 – 1500	0,8 – 2,21	2 – 6,53	
Déchets urbains de démolition	750	2855	1450	0,53	4,14	0,001

Les lits fixes de solides peuvent se présenter sous deux formes : en lit structuré, où les solides sont organisés de manière régulière, ou en lit non-structuré. La mise en place de lits structurés augmente les coûts mais permet de « choisir » la porosité, via la forme des pièces et leur orientation. La porosité, qui correspond à la fraction volumique du lit qui n'est pas occupée par le solide, fluctue en fonction de la nature du TESM et de son organisation. Dans les lits non-structurés, elle est généralement comprise entre 0,3 et 0,4 (48). En combinant deux solides de tailles différentes, comme des roches et du sable, elle peut atteindre 0,25 (49–51). Une faible porosité peut réduire les coûts du TES liquide/solide ou accroître la densité de stockage du TES gaz/solide. Cependant, la diminution de la porosité tend à augmenter la vitesse du fluide et donc les pertes de charge. L'utilisation de lits structurés permet également de limiter l'effet du *Thermal Ratcheting*. Dans ce cas, le stockage est autoportant et aucune contrainte n'est appliquée sur la paroi du réservoir. Cependant, la surface spécifique d'un lit structuré est assez faible, ce qui complique l'échange de chaleur entre le fluide et le solide, et donc réduit l'efficacité du stockage. Les principaux lits structurés sont composés uniquement de béton (52–54). D'autres solides de garnissage ont été considérés, tels que le cofalit, issu de l'amiante vitrifié (55), de la céramique (cordiérite) (56), ou des briques creuses de clinker (57,58).

Le choix de la taille des particules est également primordial. L'échange convectif étant le principal générateur d'irréversibilité (entropie), l'augmentation de la surface globale d'échange fluide/solide via une petite taille de particules améliore la stratification thermique (59–64). Dans la plupart de ces études, le plus petit diamètre de particules considéré est de l'ordre du centimètre, ce qui est habituel pour les lits fixes à porosité unique. L'utilisation de petit diamètre

permettra également de réduire les passages préférentiels du fluide caloporteur, où les solides de garnissage sont moins bien répartis (porosité plus faible). Ces zones se réchauffent plus vite que la section du centre lors de la charge, déstratifiant radialement la zone thermocline (56). En décharge, elles se refroidissent plus rapidement. Pour limiter ces passages préférentiels, tout en assurant de bonnes performances thermiques, un rapport entre le diamètre du réservoir (ou le plus petit côté de la section rectangulaire) et le diamètre des particules doit être respecté : minimum de 30 à 40 pour les réservoirs cylindriques (65,66) et supérieur à 50 pour les réservoirs rectangulaires (67).

Chaque solide possède ses propres avantages et inconvénients. Aucun n'est idéal : chaque stockage thermique présente une plage de température d'utilisation et des contraintes technico-économiques spécifiques. Une configuration optimale doit donc être trouvée en fonction du TES étudié.

1.2.3. Fluide caloporteur

1.2.3.1. Critères de choix des fluides caloporteurs

Le fluide caloporteur étant l'un des éléments les plus importants pour certifier le bon fonctionnement d'un TES, les principaux critères que doivent posséder les fluides caloporteurs ont été listés (46,68). Le Tableau 3 regroupe ces onze critères de choix.

Tableau 3 : Critères de choix pour la sélection d'un fluide de transfert de chaleur (46,68)

- 1) Température de solidification faible
- 2) Température d'utilisation élevée (évaporation et stabilité thermique)
- 3) Pression de vapeur faible (< 1 atm)
- 4) Capacité de stockage thermique élevée
- 5) Conductivité thermique élevée
- 6) Viscosité dynamique faible
- 7) Compatibilité chimique (faible corrosion) avec les TESM
- 8) Faible coût
- 9) Disponible en quantité industrielle
- 10) Écobilan acceptable
- 11) Faible toxicité, inflammabilité et explosivité

1.2.3.2. Différents fluides caloporteurs connus

Le fluide caloporteur peut se présenter sous deux phases distinctes : liquide ou gaz. Les caloporteurs liquides sont généralement des huiles synthétiques ou des sels fondus utilisables à moyennes températures, alors que l'air est préféré pour des hautes températures. A très hautes températures, il est possible d'utiliser des gaz rares ou des fumées de combustion (69). Le Tableau 4 donne une approximation des propriétés physiques des HTF qui seront envisagés par la suite, avec la plage de température sur laquelle ils peuvent être utilisés. Il est préférable de choisir des fluides dont la température de solidification est inférieure à la température ambiante, car maintenir les canalisations à une température supérieure peut entraîner d'importants surcoûts d'exploitation, tout comme une consommation importante en énergie.

Les HTF liquides présentent les meilleures propriétés physiques (produit ρc élevé notamment), permettant d'utiliser de faibles vitesses d'écoulement dans le réservoir de stockage. A l'inverse, en utilisant des HTF gazeux, les systèmes doivent fonctionner à haute vitesse pour éviter des durées de cycle trop longues, pénalisant de ce fait la stratification (63). Cependant, l'utilisation de hautes vitesses tend à accroître les pertes de charge (70), augmentant de ce fait les besoins énergétiques des pompes de circulation du caloporteur. Ces mêmes phénomènes augmentent d'autant plus que le lit fixe de solides est composé de petites particules (71).

Parmi les fluides liquides, les sels fondus sont les plus utilisés, puis les huiles synthétiques. Ces dernières présentent des coûts nettement plus élevés et doivent être pressurisées. Malgré un coût plus faible, les sels fondus présentent une température de solidification très élevée (supérieur à 200°C). La température de vaporisation de l'eau étant faible (100°C), ce fluide est généralement utilisé pour des applications à basse température. Actuellement, les métaux liquides et les nanofluides sont étudiés (72). Malgré une plage de température très large, les métaux liquides présentent des problèmes de compatibilité avec les autres matériaux d'une centrale CSP, et leur coût est très important. Les nanofluides peuvent être incorporés aux sels fondus pour augmenter leur propriété thermophysique. Cependant, ces matériaux sont très onéreux.

Pour les HTF gazeux, l'air est non-toxique, ininflammable et utilisable à pression atmosphérique. Son utilisation permet au stockage de fonctionner à haute température, ce qui augmente la densité de stockage du système. De plus, l'air présente l'avantage d'être chimiquement stable et compatible avec les solides composant le lit fixe.

Plusieurs auteurs ont testé la vitesse d'entrée du fluide dans les systèmes liquide/solide et gaz/solide. Deux phénomènes interviennent à faible vitesse de flux : la stratification thermique est favorisée mais les pertes thermiques sont plus élevées. Il existe donc une vitesse optimale qui maximise l'efficacité du stockage (73). A faible débit, les phénomènes de conduction thermique et de pertes thermiques prédominent, épaississant la zone thermocline. A débit élevé, le temps de séjour réduit dans la cuve est compensé par un meilleur coefficient d'échange fluide/solide (31,74).

Tableau 4 : Ordres de grandeur des propriétés thermophysiques et des coûts des fluides caloporteurs envisagés (8,31,42–46,75)

<i>HTF</i>	T_{min}/T_{max} (°C)	ρ (kg.m ⁻³)	c (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	μ (Pa.s)	$\rho \cdot c$ (MJ.m ⁻³ .K ⁻¹)	Coût (€.kg ⁻¹)
<i>Huiles synthétiques</i>	15 / 425	750 - 900	2000 - 2720	0,1	2.10 ⁻⁴ – 5,7.10 ⁻⁴	1,58 – 2,05	1,8 – 12,3
<i>Huiles minérales</i>	-20 / 300	800	2500	0,1	6,8.10 ⁻⁴	2,02	0,8 – 0,9
<i>Huile de colza</i>	-21 / 250	788	2492	0,143	3,2.10 ⁻³	1,963	2,2 – 10,7
<i>Sels fondus</i>	200 / 600	850 – 2100	930 - 1800	0,2 – 2	1.10 ⁻³ – 2.10 ⁻¹	1,1 – 3,78	0,76 – 1,78
<i>Solar Salt</i>	220 / 600	1720 - 1910	1495 - 1550	0,5 – 0,55	1.10 ⁻³ – 3,5.10 ⁻³	2,57 – 2,96	0,45 – 0,55
<i>Eau</i>	0 / 100	1000	4187	0,6	5,8.10 ⁻⁴	4,17	0
<i>Métaux fondus</i>	0 / 1500	800 – 10 000	100 - 1300	13 - 46	2.10 ⁻⁴ – 1,1.10 ⁻³	1 – 1,3	1,8 – 12
<i>Air (à 600°C)</i>	- / -	0.5	1075	0,05	3,4.10 ⁻⁵	0,04	0

Comme pour les solides de garnissage, aucun caloporteur n'est idéal. Son choix repose sur les propriétés du TES étudié, ainsi que du TESM envisagé. En effet, la compatibilité du fluide et du solide à long terme doit être vérifiée pour une utilisation en simultanée dans une cuve thermocline.

1.2.4. Compatibilité fluide caloporteur et solide de remplissage

Le fluide caloporteur et les solides de remplissage sont constamment en contact dans un système de stockage thermocline. Un stress thermique continu apparaît alors entre ces deux composants

suite aux charges et décharges successives. Or, la durée de vie doit être au minimum de 25 ans afin de garantir la qualité sur la durée d'un TES. Il est donc important de vérifier que les propriétés du fluide et des solides ne se dégradent pas. En effet, la dégradation des propriétés de l'une de ces entités peut diminuer les performances du stockage, voire entraîner le remplacement du fluide ou solide, augmentant de ce fait les coûts de fonctionnement. Ces études de compatibilité, réalisées en amont du développement d'un prototype de stockage, se sont multipliées ces dernières années. Le Tableau 5 présente les principaux résultats de différentes études disponibles dans la littérature.

Tableau 5 : Études de compatibilité fluide caloporteur / solides de garnissage issues de la littérature

Référence	HTF (fluide caloporteur)	TESM (solide de garnissage)	Température (°C)	Durée (h)	Type de test	Compatibilité ?
(Haller et Gervais, 1977) (76) [1]	Huile minérale (Caloria HT43)	Roches, sable, acier au carbone et acier inoxydable	288, 302 et 316	2027 à 6136	Isotherme	OUI
	Huile synthétique (Therminol 55)		288, 302 et 316	1983 à 2153		NON
	Huile synthétique (Therminol 66)		288, 302, 316, 329 et 343	1984 à 4164		
(Brosseau et al., 2004) (23) [2]	Sels fondus (nitrates ternaires HitecXL)	Quartzite	450 et 500°C	12 mois	Isotherme	OUI
		Sable de silice				
		Quartzite	450 et 500°C	10 000 cycles	Cyclage	
		Sable de silice				
(Guillot et al.) (77) [3]	Sels fondus (sulfates)	Cofalit	925	3, 27 et 75	Isotherme	NON
	Sels fondus (phosphates)		ou	ou		
	Sels fondus (carbonates)		1000	48		OUI
	Sels fondus (nitrates)					
(Calvet et al., 2013) (78) [4]	Sels fondus (Solar Salt)	Cofalit	500	500	Isotherme	OUI
	Sels fondus (nitrates ternaires)					NON
(Ortega et al., 2014) (79) [5]	Huile synthétique (Syltherm 800)	Laitiers de four arc électrique (issus de deux usines différentes)	400	500	Isotherme	OUI
	Sels fondus (Solar Salt)		500			
	Air		1000			
(Motte et al., 2015) (80) [6]	Sels fondus (Solar Salt)	Cofalit	500	500	Isotherme	OUI
		Cendres volantes de charbon				À confirmer
		Laitiers haut fourneau (industrie)				
		Laitiers haut fourneau (laboratoire)				
		Laitiers de four arc électrique				NON
Laitiers de convertisseur						

(Grirate et al., 2016) (81) [7]	Huile synthétique (Therminol 66)	Quartzite	250 et 350	500	Isotherme	OUI
		Cipolin				NON
		Basalte				
		Granite				
		Marbre				
		Roche cornéenne				
(Fasquelle et al., 2017) (82) [8]	Huile synthétique (Jarytherm DBT)	Alumine	300 et 330	500	Isotherme	OUI
		Cendres volantes de charbon				
		Cofalit				
(Bonk et al., 2017) (83) [9]	Sels fondus (Solar Salt)	Quartzite	500 et 560	500 à 5000	Isotherme	OUI
		Basalte mine de Hühnerberg				
		Basalte mine de Rossdorf				
		Diabase				NON
(Keilany et al., 2018) (84) [10]	Huile synthétique (Jarysol)	Alumine	248 à 280	1 cycle	Cyclage	OUI
		Cofalit				
(Martin et al., 2018) (85) [11]	Sels fondus (Solar Salt)	Quartzite	290 à 560	10 000 cycles	Cyclage	OUI
		Basalte mine de Hühnerberg				
		Basalte mine de Rossdorf				
		Diabase				NON
(Molina, 2018) (25) [12]	Huile synthétique (Jarytherm DBT)	Roches et sable	330 à 340	500	Isotherme	NON
		Béton classique				
		Béton où les bulles d'air ont été expulsées par vibration				
		Quartzite				
		Acier	320 à 340	500 à 3000		OUI à 320-330°C

		Verre soda-lime				NON à 340°C
		Verre borosilicate				
		Alumine haute pureté				
(Grosu et al., 2018) (38) [13]	Sels fondus (Hitec XL)	Scories d'acier de four à oxygène basique	310	500, 1000 et 1500	Isotherme	NON
		Minerai magnétique				OUI
		Roche de rivière				
		Scories d'acier de four à oxygène basique	180 à 310	47 cycles	Cyclage	NON
		Minerai magnétique				OUI
		Roche de rivière				
	Huile synthétique (Delcoterm Solar E15)	Scories d'acier de four à oxygène basique	310	500, 1000 et 1500	Isotherme	Contamination des sels fondus (à éviter)
		Minerai magnétique				
		Roche de rivière				
		Scories d'acier de four à oxygène basique	180 à 310	47 cycles	Cyclage	
		Minerai magnétique				
		Roche de rivière				
(Hoffmann et al., 2019) (86) [14]	Huiles végétales (Colza)	Quartzite				
		Cendres volantes de charbon		2160		
		Alumine				
	Huile végétale (Jatropha)	Huile végétale (Colza)	210		Isotherme	OUI
		Huile végétale (Palme)				
		Huile végétale (Soja)		720		

Les tests de compatibilité fluide/solide se présentent sous deux formes. Les tests isothermes se font à température fixe pendant une durée déterminée. Malgré leur facilité de mise en place, ces tests sont relativement éloignés du fonctionnement réel d'un TES thermocline, qui alterne des phases de charge à haute température et de décharge à température plus basse. Lors de tests de cyclage thermique, une succession de charges et de décharges est simulée pendant une durée déterminée. Suite aux tests, les propriétés thermiques, thermophysiques, chimiques ainsi que l'état de surface du fluide et des solides sont examinés.

Ces tests de compatibilité doivent être analysés avec les conditions de température car une modification pourrait conduire à une évolution de la compatibilité. En effet, augmenter la température accélère la dégradation du fluide causée par la présence des solides. L'incompatibilité du couple fluide/solide se traduit par une accélération de la dégradation du fluide en présence des solides. Pour conclure sur la compatibilité des matériaux, les auteurs doivent effectuer des analyses du fluide et/ou du solide. Ces analyses sont recensées pour les HTF et les TESM dans les Tableau 6 et Tableau 7 respectivement.

Tableau 6 : Études de compatibilité fluide/solide issues de la littérature - Analyses sur le fluide

Référence (cf. Tableau 5)	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]
Variation de masse														
Couleur														
Indice d'acidité														
Teneur en eau														
Composition														
Point éclair														
Température de stabilité thermique														
Masse volumique														
Chaleur spécifique														
Conductivité thermique														
Diffusivité thermique														
Viscosité dynamique														
Viscosité cinématique														

L'analyse de la composition du HTF permet de détecter une évolution dans la structure ou les molécules constitutives du fluide. Les propriétés de transfert sont également étudiées, ainsi que l'indice d'acidité qui permet de détecter une oxydation du fluide, lorsque ce dernier est de

l'huile. Le point éclair est important puisqu'il est un excellent indicateur de sécurité de l'installation. En effet, la température éclair correspond à la température à partir de laquelle les vapeurs produites par le fluide peuvent s'enflammer. Lorsqu'elle diminue, la sécurité de l'installation diminue avec l'augmentation d'un risque d'incendie.

Tableau 7 : Études de compatibilité fluide/solide issues de la littérature - Analyses sur le solide

Référence (cf. Tableau 5)	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]
Variation de masse														
Couleur														
Composition														
Microscopie à balayage														
Diffusion rayons X														

Peu d'analyses sont réalisées sur les solides. Généralement, les états de surface sont vérifiés avant et après la mise en contact avec l'HTF et des tests portant sur l'évolution de masse sont effectués. Pour évaluer l'imprégnation du solide par le fluide, des suivis par microscopie et/ou diffraction à rayons X peuvent être réalisés.

Les tests isothermes sont les plus souvent utilisés car ils permettent une première évaluation de la compatibilité HTF/TESM tout en présentant un faible coût. Les analyses favorisées sont la composition et le suivi de surface pour le fluide et le solide respectivement.

1.2.5. Comportement des systèmes de stockage thermocline

1.2.5.1. Comportement thermique

Un stockage thermique n'étant jamais seul, son comportement impacte directement les procédés en amont et en aval. Dans le cas d'un stockage de chaleur dans une centrale CSP, durant la phase de charge, la sortie du réservoir rejoint directement le champ solaire. Il est donc primordial de maintenir la température en-dessous d'une certaine limite pour éviter la dégradation du fluide caloporteur. La température *cut-off* en charge est alors définie comme la température maximale admissible en entrée du champ solaire, permettant d'éviter les surchauffes. Lors de la décharge, c'est le procédé nécessitant l'utilisation de la chaleur (système de conversion dans une centrale CSP) qui contraint la température de sortie du TES. La

température *cut-off* en décharge correspond donc à la température minimale admissible dans le cycle thermodynamique.

Dans un stockage thermique idéal (cf. Figure 5a), la température *cut-off* correspond à la température haute (T_H) avant de brusquement passer à T_L au temps t_{ref} . Dans une cuve thermocline, le changement de température de sortie n'est pas aussi brusque (cf. Figure 5b). En effet, après une phase pendant laquelle la température de sortie est quasi constante et proche de T_H , la zone thermocline atteint la partie supérieure du TES et se trouve en partie extraite du système, ce qui conduit à une diminution progressive de la température du fluide, jusqu'à la température basse (T_L) (87).

Pour assurer une température de sortie constante, il faudrait stopper la décharge avant que la zone thermocline "sorte" de la cuve. Un tel fonctionnement est irréalisable en pratique car l'épaisseur de cette zone augmenterait jusqu'à atteindre l'intégralité du réservoir (88).

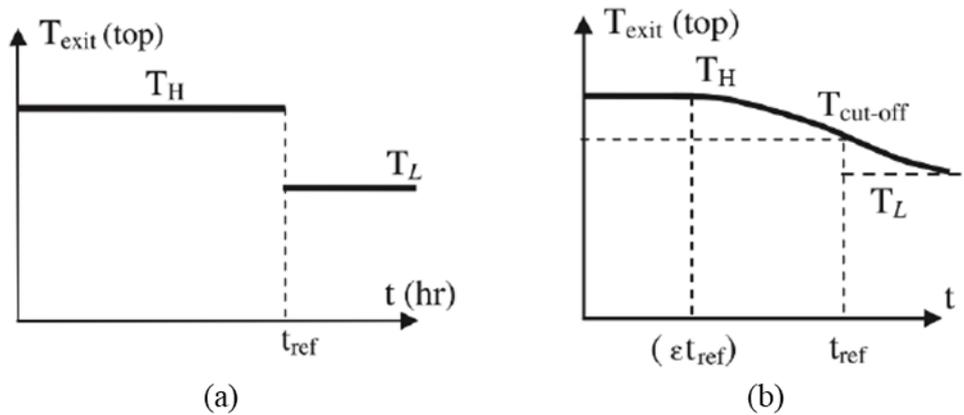


Figure 5 : Schéma de la température de *cut-off* lors d'une décharge pour la configuration idéale (a) et celle d'une thermocline sur lit de solides (b) (87)

Les températures de *cut-off* en charge (eq (1.1)) et en décharge (eq (1.2)) correspondent à un compromis entre capacité énergétique du stockage et niveaux acceptables des températures de sortie pour les procédés amont et aval.

$$T_{cutoff_ch} = T_L + x \cdot (T_H - T_L) \quad (1.1)$$

$$T_{cutoff_dech} = T_H - x \cdot (T_H - T_L) \quad (1.2)$$

où x représente le pourcentage de *cut-off* ($0 < x < 1$). En l'absence de contexte technologique précis, le pourcentage de *cut-off* est usuellement fixé à 20 % de l'écart de température.

Le choix des taux de *cut-off* affecte également la stratification thermique au sein du réservoir, principal problème de l'utilisation d'une unique cuve. Une forte stratification thermique doit être conservée dans le réservoir pour des raisons d'efficacité. En effet, les zones chaude et froide doivent être bien distinctes et séparées par un fort gradient thermique, donc une thermocline fine (89). Cette configuration limite le fluide « tiède » disponible dans la zone thermocline (cf. Figure 6), ce qui augmente la durée de fonctionnement aux températures nominales (T_H et T_L). La chaleur utilisable est donc de meilleure qualité, entraînant une augmentation de l'efficacité exergétique du système.

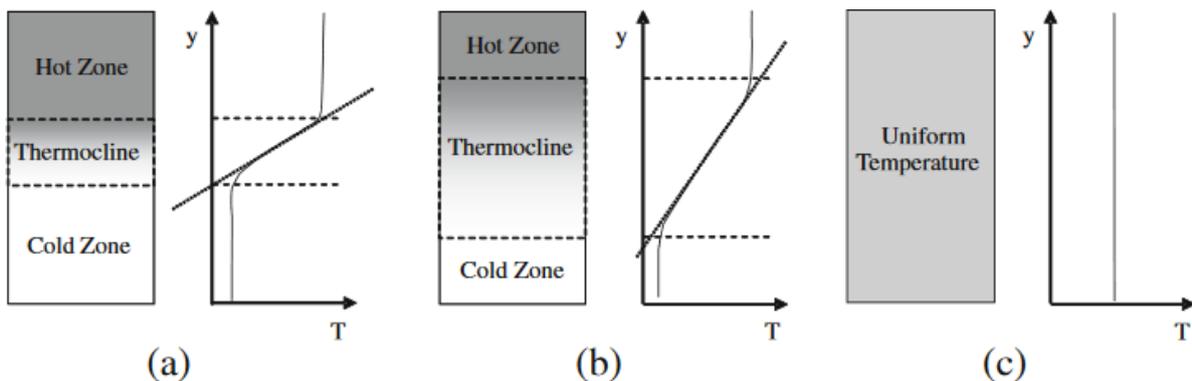


Figure 6 : Différents degrés de stratification thermique pour une même quantité d'énergie stockée dans une cuve thermocline : stratification forte (a), stratification modérée (b) et diffusion de la thermocline ayant conduit à la disparition du gradient (89)

Pour conserver une bonne stratification, il est important d'utiliser des vitesses de charge et de décharge relativement faibles (vitesse interstitielle du fluide de l'ordre de $0,5$ à 3 mm.s^{-1}) (42). Cependant, cette limitation affecte les puissances de l'installation, ce qui peut devenir problématique pour des procédés nécessitant des puissances importantes.

Le maintien de la stratification thermique passe également par le sens de circulation du fluide. Afin de respecter la stratification naturelle due à la variation de masse volumique avec la température, le fluide chaud est préférablement injecté par le haut de la cuve alors que le froid l'est par le bas lors des phases de charge et de décharge respectivement.

1.2.5.2. Comportement en cyclage

Peu d'études présentes dans la littérature se sont penchées sur le comportement en cyclage (succession de charges et de décharges) des systèmes thermocline, malgré son importance. Après plusieurs cycles de charge/décharge, le TES atteint un régime périodique stationnaire

(74,90). Ce nombre de cycle est directement lié aux conditions de cyclage. Leur choix est donc primordial pour atteindre un état stabilisé. La Figure 7 présente les profils de température en fin de cycle pour deux cas (sur la Figure 7, le fluide chaud est injecté à droite et le fluide froid à gauche), où les débits et amplitudes thermiques sont constantes :

- **Pour des conditions de stockage fortement contraintes (taux de *cut-off* faibles)** : une petite partie de la zone thermocline est extraite de la cuve à la fin de la décharge car les températures de *cut-off* sont rapidement atteintes. La température en sortie de la cuve est quasi-constante et proche de la températures haute (en décharge) ou basse (en charge), ce qui rapproche qualitativement son fonctionnement de celui d'un stockage 2-cuves. Aucune zone quasi-isotherme chaude ou froide n'a donc le temps de se développer. Cependant, la capacité de stockage reste médiocre du fait de cycles courts,
- **Pour des conditions sont moins contraignantes (taux de *cut-off* élevés)** (cf. Figure 7b) : une grande partie de la thermocline est évacuée en fin de décharge. Des zones quasi-isothermes à haute et basse température se forment, permettant d'augmenter le volume de la zone active participant aux processus de stockage/destockage (zones grisées sur la Figure 7). Dans ce cas, les durées de charge et décharge sont plus longues puisque les écarts de températures tolérés en fin de charge et de décharge sont plus élevés.

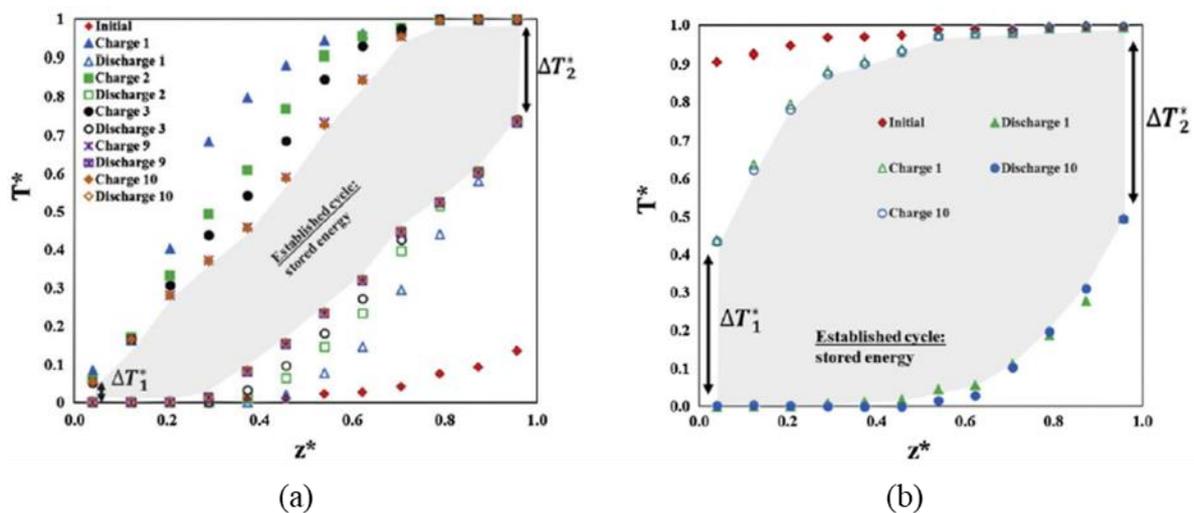


Figure 7 : Profils de température en fin de cycle pour un cycle court (a) et un cycle long (b) (74)

Modi et Pérez-Segarra (91) ont également évalué les performances du stockage thermocline selon son comportement en cyclage et le temps requis pour atteindre l'état stabilisé. Leurs simulations démontrent que le régime stationnaire est atteint plus rapidement lorsque la

différence entre les températures chaude et froide est faible. Selon les différentes études, lorsque la zone thermique est extraite de la cuve, les performances et le comportement du TES sont rapidement stabilisés. En effet, la stabilisation est d'autant plus rapide qu'une large part de la thermocline est sortie du réservoir (92). Cette caractéristique est très intéressante lorsque les conditions opératoires fluctuent, puisque ces dernières sont compensées par l'inertie du système, acquis durant les cycles précédents (8,93,94). De plus, l'épaisseur de la zone thermocline augmente avec l'enchaînement de cycles, réduisant de ce fait la zone utile dans le stockage.

1.2.6. Dimensionnement du réservoir

La forme privilégiée des réservoirs est cylindrique, car elle supporte relativement bien la pression générée sur les parois (95), et en évitant les effets de bord, favorise une répartition homogène du débit. Par ailleurs, l'orientation verticale présente l'avantage de limiter les effets de la convection naturelle puisque son action contribue à limiter le transfert de masse entre la zone basse et froide, et la zone haute et chaude. Cependant, plusieurs études ont porté sur des réservoirs de section rectangulaire (57,58,90,96). Lopez Ferber *et al.* (96) ont réalisé des tests sur un prototype de cuve thermocline air/bauxite horizontale. Ils constatent que la cuve horizontale ne génère ni gradient thermique ni stratification thermique dans la direction normale à l'écoulement. En effet, les auteurs ont démontré que les températures étaient presque uniformes pour une même coordonnée axiale. La cuve de taille horizontale a par la suite subi les mêmes tests, dévoilant un gradient thermique radial modéré (90). De plus, les besoins en isolation sont réduits car la surface de contact entre le sol et la cuve horizontale est plus grande que dans le cas d'une cuve verticale. Enfin, une cuve de forme tronconique peut être utilisée afin de limiter les effets de *Thermal Ratcheting* (92,97). En effet, l'utilisation d'une cuve conique permettrait de réduire de 20 % le stress mécanique appliqué sur les parois par rapport à une cuve cylindrique (98). Cependant, le coût de ce type de réservoir devrait être plus élevé, et sa mise en œuvre plus complexe.

Le facteur de forme de la cuve, défini comme le rapport entre les dimensions longitudinales et transversales (L/D), est un paramètre important. Une valeur proche de l'unité (géométrie dite carrée) est souvent privilégiée car les pertes thermiques sont limitées dans un tel cas (23,92). Cependant, l'épaisseur de la zone thermocline est directement liée à ce facteur de forme. Plus le rapport hauteur sur diamètre est élevé, meilleure est la stratification et les performances

thermiques du stockage (51,63). Toutefois, un facteur de forme trop élevé peut accroître les pertes de charge du système, et augmenter le risque de *Thermal Ratcheting* (99). L'augmentation du facteur de forme favorise donc la stratification thermique, mais peut pénaliser le rendement global par l'augmentation conjointe des pertes thermiques et de l'énergie de pompage. Un optimum doit ainsi être trouvé. A l'échelle industrielle, le diamètre du réservoir doit être élevé pour respecter la contrainte de hauteur maximale pouvant être supportée par des fondations. L'unique stockage thermocline construit à l'échelle industrielle présentait ainsi un facteur de forme (L/D) inférieur à 1 (100). A l'échelle du laboratoire, ce facteur est nettement plus grand (entre 2 et 4) (cf. Figure 8).

Pour garder une bonne stratification et limiter les pertes de charge, il est nécessaire de choisir des vitesses de fluide limitées, comme le montrent plusieurs études numériques (55,59,63). En effet, un temps de résidence réduit conduit à un épaississement de la zone thermocline. Cependant, la diminution de la vitesse entraîne l'augmentation du temps de séjour du fluide dans le réservoir, ce qui accroît les pertes thermiques et la diffusion entre les zones chaude et froide. De plus, le choix de vitesse faible induit des puissances de charge et de décharge plus faibles. Pour les augmenter, il est possible d'augmenter la section du réservoir. D'autre part, Xu *et al.* (101) montrent que la vitesse du fluide a un impact négligeable sur l'efficacité du stockage. En effet, l'augmentation de la distance nécessaire au transfert de chaleur entre le fluide et le solide, due à un temps de séjour faible, est compensée par la diminution de la diffusion thermique de la zone thermocline. Plusieurs études ont, quant à elles, montré l'existence d'une vitesse optimale (102–104).

L'isolation du réservoir est primordiale pour limiter les pertes thermiques vers l'extérieur (50,51). En effet, lorsque le réservoir stocke de la chaleur, toute la surface est chaude. Ainsi, ces pertes sont importantes dues à la différence de température plus élevée avec l'extérieur.

Pour dimensionner au mieux un stockage de type thermocline, de nombreux compromis doivent ainsi être trouvés entre les différentes problématiques exposées ci-dessus. Selon les constatations détaillées dans la littérature, il est préférable de choisir un réservoir cylindrique possédant un rapport hauteur sur diamètre supérieur à l'unité, avec de petites particules sphériques et une faible porosité pour un matériau de garnissage de capacité thermique volumique supérieure à celle du fluide caloporteur.

1.2.7. Résultats expérimentaux

Les principaux systèmes de stockage thermique de type thermocline sont présentés dans une revue détaillée (42). La Figure 8 répartit les différentes expériences réalisées depuis les années 70 selon leur taille. Le seul système de stockage thermique thermocline de taille commerciale, dont les résultats ont été publiés dans la littérature, a été installé en 1982 sur la centrale Solar One en Californie (50), et mis hors service en 1986 suite à des dommages irréversibles sur la cuve. La cuve thermocline, qui présentait une capacité de stockage de 182 MWh_{th}, se composait d'un lit de roches et de sable (TESM) avec de l'huile minérale (HTF) et fonctionnait entre 200 et 290°C. A ce jour, cette cuve thermocline est la seule de cette taille à avoir jamais été utilisée, démontrant la viabilité de la technologie. Une autre cuve thermocline a largement été citée et utilisée dans la littérature pour valider des modèles numériques notamment. Il s'agit du prototype expérimental développé par Pacheco (51). Beaucoup plus petite (capacité de stockage de 2,3 MWh_{th}), le stockage thermocline était composé d'un lit de roches et de sable, avec des sels fondus atteignant 390°C.

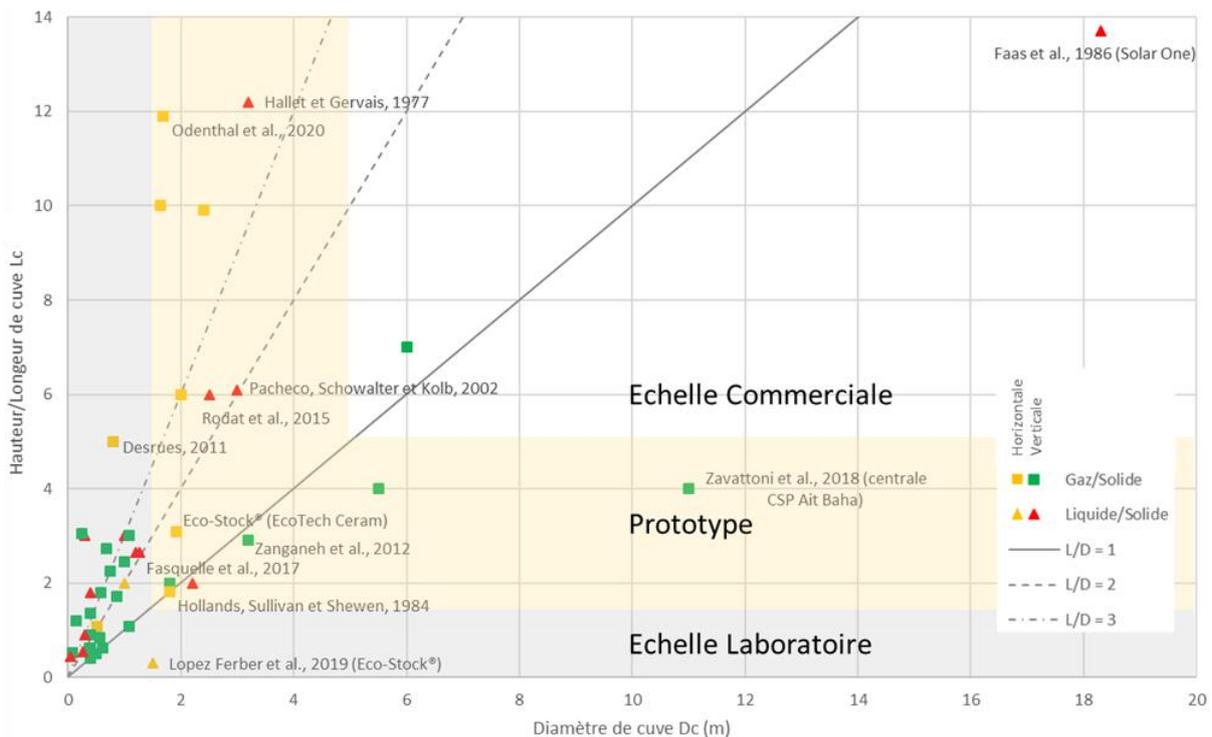


Figure 8 : Dimensions des systèmes de stockage thermique de type thermocline référencés

En plus des deux principaux stockages thermoclines décrits ci-dessus, de nombreux autres systèmes ont été testés. Cependant, la plupart d'entre eux était à l'échelle du laboratoire, soit des dimensions inférieures au mètre (cf. Figure 8). Malgré l'étude de certains phénomènes, ils

sont peu représentatifs du fonctionnement des systèmes de taille commerciale (26). En effet, plusieurs phénomènes sont décuplés dans le cas de cuve de petite taille. Les pertes thermiques sont proportionnellement plus importantes tout comme les effets de bord. La stratification et les profils de vitesse du fluide sont également affectés par les dimensions du réservoir. L'épaisseur de la zone thermocline est également plus importante et peu atteindre la quasi-totalité du réservoir (61).

Récemment, l'entreprise Eco-Tech Ceram a commercialisé un TES mobile, l'Eco-Stock®. Ce système permet de récupérer les chaleurs fatales entre 20 et 600°C issues de l'industrie, et de les stocker dans une cuve horizontale de section carrée, travaillant avec de l'air et un lit de billes de bauxite en vrac (90). Un modèle réduit de l'Eco-Stock® a été testé (15). Les résultats obtenus suite à différents essais démontrent la robustesse et la flexibilité – capacité d'un stockage à décharger à différentes puissances sans diminution de ses performances – du système de stockage thermocline fluide/solide. Des tests similaires ont été réalisés sur une unité industrielle et prouve la capacité de l'Eco-Stock® à restituer efficacement des chaleurs issues de gisements de chaleurs fatales (variation de température et/ou de débit) (94,103). Cette caractéristique a également été démontrée dans un autre article (74). En effet, la modification de l'état initial de la cuve et de la gamme de température de fonctionnement n'a pas impacté les profils de températures stabilisés. Quant à la présence de perturbations (comme l'interruption en cours de charge), elles n'ont qu'un impact local puisque l'état stabilisé est retrouvé au cycle suivant. Une cuve permettant de valoriser les chaleurs fatales issus d'industries métallurgiques a également été étudiée à la fin des années 2010 (projet RESlag) (105). De plus petit volume (3 m³), ce stockage utilise un lit air/scories de four à arc électrique jusqu'à 700°C. Il permet des cycles très courts (45 minutes de charge et 1h de décharge) afin de se synchroniser avec l'utilisation des fours à arc électrique. Ce projet a été étudié uniquement en simulation et aucun prototype n'existe actuellement.

Peu des prototypes présents dans la littérature sont intégrés dans une centrale CSP. Leur conception ne permet donc pas de vérifier l'influence des fluctuations des paramètres extérieurs sur les systèmes, comme l'ensoleillement. Les conditions de cyclage sont alors contraintes par les procédés placés en amont et en aval de la cuve de stockage, et les paramètres d'entrée (température et débit) sont variables. Fasquelle (8) a étudié la variation de la température d'entrée dans le temps, qui survient au démarrage de la centrale CSP. Cette fluctuation constante pendant la charge empêche la création d'une zone chaude. Un tel cas voit alors la

cuve occupée uniquement par la zone thermocline. Dans leur thèse, Lopez Ferber (15) et Touzo (94) ont prouvé que l'utilisation d'une ressource thermique dégradée en charge, en température ou en débit, ne conduit pas à une modification significative des performances du système. Ainsi, le stockage thermocline présente l'avantage d'être robuste – la robustesse étant la capacité d'un stockage à utiliser une ressource dégradée comme source de chaleur durant la charge, sans diminution de ses performances.

1.2.8. Indicateurs de performance

Il existe de nombreux indicateurs pour évaluer les performances d'un système de stockage de type thermocline. La Figure 9 présente différentes méthodes d'évaluation des performances et de l'efficacité d'un stockage thermocline d'eau(89).

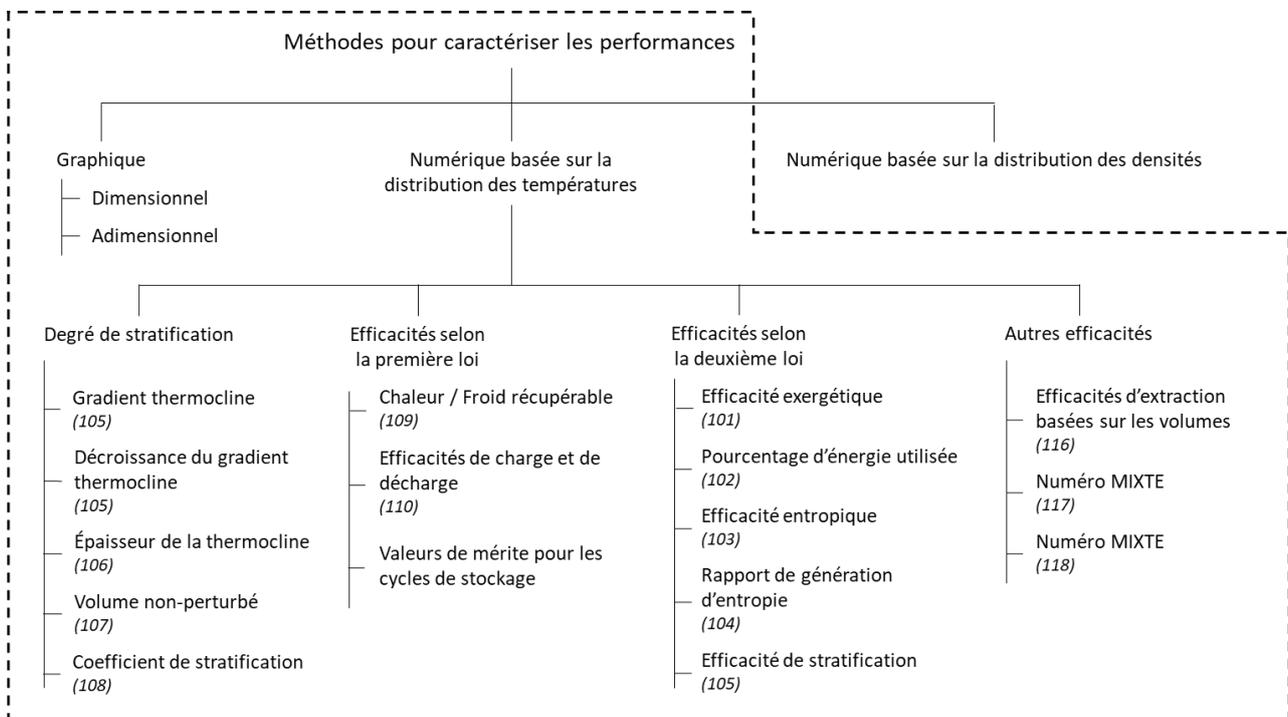


Figure 9 : Différentes méthodes proposées pour déterminer les performances et l'efficacité d'un stockage d'eau, traduit de (89)

Les différentes méthodes numériques présentées sur la Figure 9 sont classées en quatre catégories :

- **Degré de stratification** : ces méthodes s'attachent à quantifier le degré de stratification et s'intéressent principalement à la forme du profil de température dans la zone thermocline, et à son évolution au cours du temps (106–109),

- **Premier principe de la thermodynamique** : plusieurs indicateurs issus du premier principe permettent de quantifier la qualité du TES en terme d'efficacité énergétique, soit sur l'une des phases, soit sur un cycle complet (110,111),
- **Deuxième principe de la thermodynamique** : afin de tenir compte de la qualité de l'énergie thermique restituée, le second principe est également utilisé, au travers de l'analyse 2nd principe ou exergétique (112–116),
- **Méthodes annexes** : utilisant d'autres type d'efficacité, comme celle basée sur les volumes ou sur le degré de mélange. L'efficacité d'extraction est la fraction du volume qui peut être déchargée à une température initialement uniforme, avec une différence de température minimale de 90 % de la différence entre la température de stockage initiale et la température d'entrée (117). Le numéro MIXTE définit le degré de mélange à l'intérieur du réservoir. Il correspond à la différence de moment d'énergie entre un TES parfaitement stratifié et le TES étudié, divisée par la différence de moment d'énergie entre un TES parfaitement stratifié et un stockage entièrement mélangé. Le moment d'énergie équivaut à l'énergie de chaque couche dans la cuve, pondérée par la distance verticale entre le fond du réservoir et le centre de chaque couche (118,119).

Dans la suite de cette thèse, seules les indicateurs énergétiques et exergétiques de cyclage seront utilisés, car les autres critères font appel à des notions subjectives, difficilement généralisables à tous les cas d'étude. Ces indicateurs seront détaillés dans le CHAPITRE 2.

1.3. Éco-conception

Cette partie explique le principe de l'éco-conception et les outils permettant de mener une telle démarche. Sont présentées les analyses environnementales, économiques et sociales, qui seront par la suite utilisées dans les travaux de cette thèse. Chacune des analyses est expliquée et des références disponibles dans la littérature sont présentées pour les illustrer.

Par définition, l'éco-conception désigne l'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits. C'est une démarche préventive, qui peut intervenir dans les processus décisionnaires. Elle vise à déterminer les problèmes environnementaux sur l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit. Plus l'éco-conception est intégrée tôt dans la conception d'un produit, meilleures sont les performances environnementales du produit. Il

n'existe pas de solution « clé en main », mais une panoplie de concepts, de méthodes et d'outils permettent de mener à bien une démarche d'éco-conception.

Quatre niveaux d'éco-conception permettent de traduire la maturité de la démarche, illustrés par un exemple de brique de lait en plastique disponible en grande surface, selon les degrés d'éco-efficacité et d'innovation produit (120) :

- **Niveau 1 : Amélioration environnementale progressive et incrémentale** de produits existants : réduction des matières premières et/ou des déchets, ou réduction des consommations d'énergie et/ou d'eau. Le produit est alors plus respectueux de l'environnement, pour de faibles modifications, et répond toujours à un même besoin et un même usage,

Dans le cas d'une brique de lait en plastique, cette étape peut permettre de changer l'emballage, en optant pour moins de produits toxiques dans sa composition.

- **Niveau 2 : Re-conception de produits**, basée sur une technologie existante mais améliorée du point de vue environnemental : le critère environnemental est intégré dès la conception du produit, ce qui permet d'éviter les « transferts de pollution » d'une étape du cycle de vie à une autre,

Durant cette étape, la brique de lait peut voir son épaisseur en carton diminuer.

- **Niveau 3 : Innovation des fonctions** : nouveau concept de produit. Projection dans l'avenir pour répondre à de futures tendances. Le produit répond ainsi à de nouveaux besoins,

Le bouchon peut également être modifié. Par exemple, l'opercule peut être supprimé et dans ce cas, de nouveaux bouchons plus étanches doivent être mis en place.

- **Niveau 4 : Innovation du système** : créer une rupture totale avec l'existant en passant d'une logique produit à une logique service. Le produit répond ainsi à de nouveaux besoins et de nouveaux usages.

Dans le cas d'une innovation du système, la brique en carton peut être remplacée par une bouteille de verre, intégrant la consigne et donc de nouveaux emplois dans le cycle de vie de ce produit.

En fonction du niveau d'éco-conception choisi, deux grands types d'outils peuvent être utilisés :

- Les **outils d'évaluation** se destinent à établir le profil environnemental d'un produit. Les performances écologiques du produit peuvent par la suite être améliorées, à travers la (re-)conception. Ce sont plutôt des outils à postériori, qui n'interviennent qu'après le

processus d'innovation. Par exemple, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est l'outil le plus reconnue en termes d'évaluation des impacts environnementaux,

- Les **outils de préconisation** aident le concepteur à apporter des pistes d'amélioration pour le produit à concevoir, dès la phase de conception. Par exemple, les normes permettent de donner des recommandations au concepteur.

Ces deux catégories sont les principales, mais il existe également des outils de communication, pour sensibiliser les différents publics, et des outils organisationnels, qui donnent des pistes pour mettre en pratique une démarche d'éco-conception au sein d'une entreprise.

Le Tableau 8 donne différents outils, classés selon les étapes du cycle de vie qu'ils prennent en compte ainsi que le nombre d'indicateurs environnementaux utilisés (121). L'empreinte carbone est une approche mono-objectif qui donne les équivalences en émissions de carbone d'un produit. Les listes de contrôle permettent d'aider le fabricant à développer une stratégie d'éco-conception en vue de l'obtention d'un label ou de la notation d'un produit. L'indice écologique est calculé par rapport à des indicateurs sélectionnés avec attribution de pénalités. L'ACV simplifiée, notamment au niveau de la modélisation, permet à l'opérateur d'évaluer l'ordre de grandeur des contributions des différentes phases. L'ACV complète (cf. section 1.3.1) est une étude plus approfondie.

Tableau 8 : Outils de l'éco-conception et leurs caractéristiques, d'après (121)

<i>Exemple d'outils</i>	<i>Type d'évaluation</i>	<i>Nombre d'étapes du cycle de vie</i>	<i>Nombre d'indicateurs environnementaux</i>
<i>Empreinte carbone</i>	<i>Qualitative</i>	1 ou plusieurs	Un
<i>Listes de contrôle (Eco-Estimator, EcoDesign ...)</i>	<i>Qualitative</i>	1 ou plusieurs	Plusieurs
<i>Indice écologique</i>	<i>Qualitative</i>	Cycle de vie complet	Plusieurs
<i>ACV approche simplifiée</i>	<i>Quantitative</i>	1, plusieurs ou cycle de vie complet	Un ou plusieurs
<i>ACV approche complète</i>	<i>Quantitative</i>	Cycle de vie complet	Plusieurs

1.3.1. Analyse du cycle de vie

L'ACV est définie comme « l'évaluation de l'impact environnemental d'un produit (service ou système) en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie », du berceau à la tombe (122). Cet outil permet donc d'évaluer les effets quantifiables (consommation des ressources naturelles et d'énergie, rejets vers

l'environnement) sur l'environnement. L'ACV suit les normes ISO 14040 et 14044, qui décrivent les quatre étapes à suivre (cf. Figure 10) :

- Définition des objectifs et du système,
- Inventaire des polluants et des matières premières,
- Analyse de l'impact environnemental,
- Interprétation des résultats.

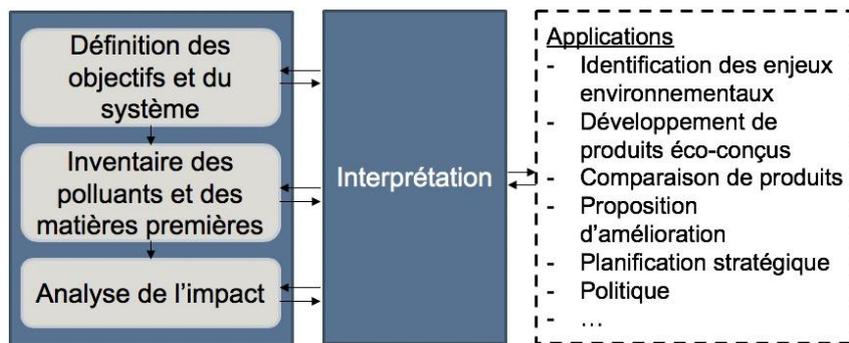


Figure 10 : Étapes de l'ACV et ses applications, d'après (122)

L'étude de Lalau *et al.* (123), est utilisée pour illustrer les différentes étapes de l'ACV. Elle compare un stockage d'énergie thermique à deux cuves de sels fondus pour la centrale solaire Andasol, et un alternatif de type thermocline utilisant du cofalit, une céramique réfractaire issue de la récupération de déchets contenant de l'amiante, en tant que solide de garnissage, permettra d'illustrer chaque phase de l'ACV.

1.3.1.1. Phase 1 : Définition des objectifs et du système

La première étape de l'ACV consiste à définir les frontières du système, en posant le problème, définissant le type d'application de l'ACV effectuée, le public visé, les acteurs et le champ d'étude. Les rapports et échanges (processus élémentaires) entre le système étudié et l'environnement peuvent alors être analysés (cf. Figure 11).

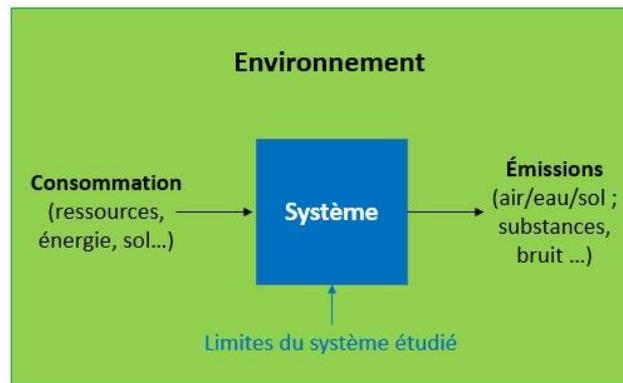


Figure 11 : Rapports et échanges entre le système étudié et l'environnement

En partant de la fonction du système, l'unité fonctionnelle est déterminée. Selon la norme ISO 14 044, elle est définie comme : « la performance quantifiée d'un système de produits, utilisée comme unité de référence » (124). Cette dernière permet d'exprimer les résultats d'une ACV par rapport à un service rendu pendant une durée définie. Elle fournit une référence par rapport à laquelle les intrants et les extrants seront définis et normalisés. Ensuite, les processus amenant à la réalisation de l'unité fonctionnelle sont identifiés. Après avoir subdivisé l'ensemble en processus unitaires répondant à une activité unique (ou un groupe d'opérations), ces derniers sont reliés par des flux de produits intermédiaires et/ou de déchets à traiter. Tous les processus unitaires étant connectés entre eux, à l'environnement par des flux élémentaires (en vert sur la Figure 12). L'arbre des processus est alors créé.

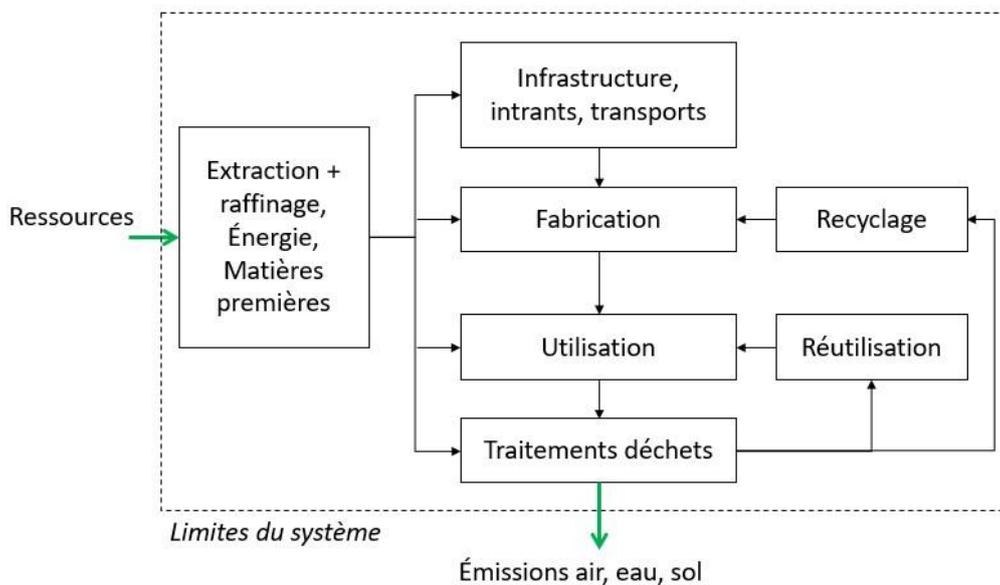


Figure 12 : Arbre des processus et principales étapes du cycle de vie d'un produit, d'après (122)

Dans l'article de Lalau *et al.* (123), l'unité fonctionnelle est définie par : « fournir une capacité équivalente à 7,5 h de stockage à puissance nominale pour une centrale CSP de 50 MW_e pendant 25 ans ». Les frontières du champ d'étude sont délicates à choisir car le cofalit est issue de la récupération de déchets dangereux d'amiante. Dans ce cas, le cofalit est considéré comme une matière première secondaire, i.e. le processus de vitrification de l'amiante n'est pas inclus dans l'ACV sur le stockage thermocline (ce processus est affecté au cycle de vie de l'amiante). Pour la fin de vie, le cofalit est réutilisé localement la plupart du temps comme ballast de route. Le transport et l'élimination des déchets correspondants sont inclus au périmètre de l'ACV. Cependant, le processus de recyclage tout comme les éventuels crédits environnementaux ne sont pas inclus. Le périmètre de l'ACV comprend la fabrication des réservoirs, les matériaux de stockage, la consommation en chauffage et en énergie de pompage, et l'énergie utilisée pour la construction et le démantèlement de la cuve thermocline.

1.3.1.2. Phase 2 : Inventaire des émissions et des extractions

Cette étape est la plus longue à réaliser, puisqu'elle quantifie tous les flux de matière (intrants, polluants, produits intermédiaires) et d'énergie qui traversent le système, en s'appuyant sur les bases de données existantes (cf. ANNEXE A.1). Deux approches sont possibles pour établir l'inventaire (122). L'approche processus établit les flux physiques, i.e. elle répertorie tous les intrants et toutes les émissions directes pour chaque processus unitaire. L'inventaire des émissions et extractions est calculé en multipliant l'inventaire de production par des facteurs d'émissions ou d'extraction disponibles dans les bases de données. La seconde approche est la méthode Input/Output, qui est principalement utilisée dans le cas de services.

Dans l'article de Lalau *et al.* (123), comparant un TES 2-cuves et un TES thermocline, plusieurs remplacements sont effectués sur la durée de vie du stockage : 50 % des conduites, 3 % des sels fondus et 1 % d'acier inoxydable. Enfin, les étapes de construction et de démantèlement nécessitent 1 % de la demande énergétique de l'usine. Les auteurs détaillent les différentes quantités de matériau utilisé et leur taux de recyclage, ainsi que les processus d'élimination. De plus, sont présentées les réductions entre le stockage 2-cuves et le stockage thermocline. En moyenne, l'utilisation d'une unique cuve permet d'économiser 42 % de tous les composants du réservoir. La quantité de sels fondus diminue jusqu'à 80 %. Quant aux consommations d'énergie, elles diminuent de 46 %. La base de données EcoInvent est utilisée (123).

1.3.1.3. Phase 3 : Analyse de l'impact environnemental

La Phase 3 de l'ACV évalue l'impact environnemental des émissions et extractions inventoriées dans la phase précédente, en les reliant à une série de catégories de dommages environnementaux potentiels (122). Dans un premier temps, les impacts sont classifiés dans des catégories d'impacts intermédiaires (cf. Figure 13), définies en fonction du produit étudié. Il est ensuite possible de relier les impacts des catégories intermédiaires à des dommages potentiels plus généraux (cf. Figure 13). Chaque émission/extraction est associée à un facteur de caractérisation intermédiaire, qui permet de les pondérer au sein de chaque catégorie d'impacts intermédiaire. Les résultats sont ainsi plus rapidement lisibles. Cependant, la valeur quantitative d'indicateurs spécifiques tels que l'équivalent CO₂ ou la demande en énergie n'est plus accessible.

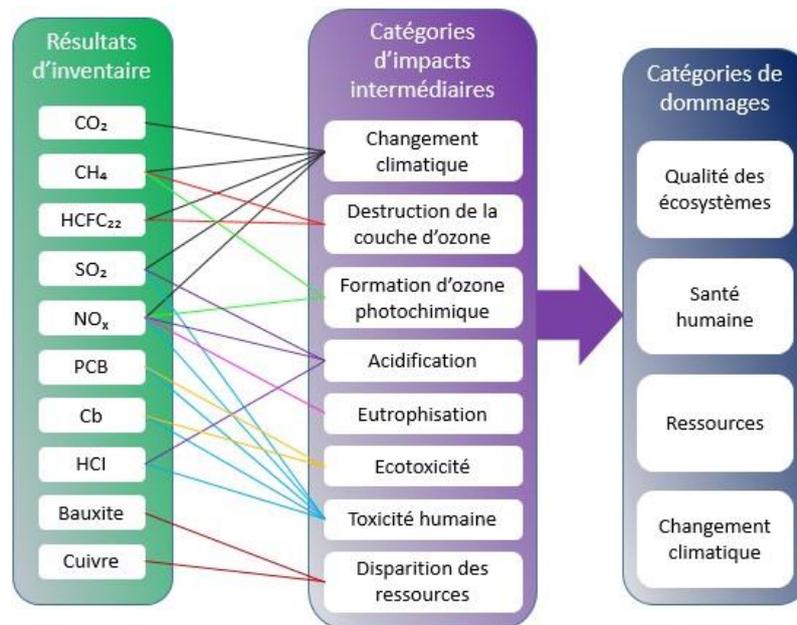


Figure 13 : Classification des résultats d'inventaire dans des catégories intermédiaires ou de dommages

En réalisant des ACV sur les centrales CSP et/ou les stockages thermiques, les principaux indicateurs utilisés sont la demande énergétique cumulée (CED : *Cumulative Energy Demand*) et le potentiel de réchauffement climatique (GWP : *Global Warming Potential*) (123,125,126). Étant donné que les TES thermocline utilise des solides de garnissage en remplacement partiel du fluide caloporteur, il peut également être intéressant de regarder des indicateurs comme la déplétion des ressources abiotiques, minéraux notamment (ADP : *Abiotic Depletion Potential*) et l'émission de matières particulaires (PM : *Particulate Matter*) (127).

Des étapes optionnelles peuvent également intervenir dans l'analyse de l'impact (122). La normalisation permet de représenter la totalité des impacts sur un même graphique, afin de comparer l'importance relative des différents indicateurs. Chaque catégorie de dommages peut être rapportée aux impacts de la qualité de vie annuelle moyenne d'un européen, soient les impacts des consommations et déchets annuels d'un européen (128). Le JRC *Institute for Environment and Sustainability* propose des facteurs de normalisation pour l'ensemble des indicateurs obtenus avec la méthode ILCD 2011 (*International reference Life Cycle Data system*) (cf. Tableau 9).

Tableau 9 : Coefficients de normalisation des indicateurs d'impacts, d'après (128)

Catégorie d'impact	Unité	Normalisation
<i>Changement climatique (GWP)</i>	kg CO ₂ eq.	9,22.10 ³
<i>Déplétion de l'ozone</i>	kg CFC-11 eq.	2,16.10 ⁻²
<i>Toxicité humaine – Effets cancéreux</i>	CTUh	3,69.10 ⁻⁵
<i>Toxicité humaine – Effets non-cancéreux</i>	CTUh	5,33.10 ⁻⁴
<i>Acidification</i>	mol H ⁺ eq.	4,73.10
<i>Écotoxicité de l'eau aquatique</i>	kg PM2.5 eq.	3,80
<i>Matières particulaires respiratoires (PM)</i>	CTUe	8,74.10 ³
<i>Radiations ionisantes – Effets sur la santé humaine</i>	kBq U ²³⁵ eq.	1,13.10 ³
<i>Formation d'ozone photochimique</i>	kg NMVOC eq.	3,17.10
<i>Eutrophisation – Terrestre</i>	mol N eq.	1,76.10 ²
<i>Eutrophisation – Eau douce</i>	kg P eq.	1,48
<i>Eutrophisation – Marine</i>	kg N eq.	1,69.10
<i>Utilisation des terres</i>	kg C déficit	7,48.10 ⁴
<i>Épuisement des ressources –Eau</i>	m ³ d'eau eq.	8,14.10
<i>Épuisement des ressources – Minéraux fossiles et renouvelables (ADP)</i>	kg Sb eq.	1,01.10 ⁻¹
<i>Consommation d'énergie (CED)</i>	MJ eq.	1,53.10 ⁵

Dans l'article de Lalau *et al.* (123), trois indicateurs d'impacts sont utilisés : le potentiel de réchauffement climatique, la demande énergétique cumulée et la consommation en eau. Dans le cas du stockage thermocline, ces indicateurs valent respectivement : 2,4 g CO_{2eq}/kWh_e, 0,046 MJ_{eq}/kWh_e et 0,058 L_{eq}/kWh_e. Ils conduisent, après normalisation (cf. Tableau 9) à un impact équivalent à 5 967 hab.an sur la durée de vie du système.

1.3.1.4. Phase 4 : Interprétation

La dernière étape de l'ACV consiste à interpréter les résultats de façon approfondie à tous les niveaux possibles, que ce soit sur chaque niveau de l'ACV, sur chaque étape du cycle de vie, sur chaque composant du système et, sur chaque polluant et substance extraite. Cette étape permet de vérifier la cohérence des résultats avec les objectifs et le champ d'étude. Un contrôle de qualité est mené à chaque phase de l'ACV : contrôle des unités, bilans de masse, bilans énergétique et de CO₂, comparaison CO₂/énergie, vérification sur la toxicité, comparaison des résultats d'inventaire avec d'autres études similaires...

Dans un premier temps, l'opérateur se concentre sur les étapes du cycle de vie qui génèrent le plus grand impact. À terme, ce sera sur celles qui offrent de faibles surcoûts pour réduire l'impact. Il faut donc identifier les priorités d'action qui permettront de réduire l'empreinte écologique du système. Par la suite, des améliorations environnementales sont définies pour réduire la consommation des ressources, la demande énergétique ou les émissions et extractions.

En revenant à l'ACV réalisée par Lalau et al. (123), les résultats de l'étude comparative démontrent que les impacts environnementaux de l'unité de stockage diminuent considérablement en utilisant le stockage thermocline. En effet, les changements climatiques sont réduits de 40 % (9 % pour le passage de deux à un réservoir et 25 % pour le changement de matériaux de stockage), la demande en énergie primaire de 30 % (10 % pour le passage de deux à un réservoir et 3 % pour le changement de matériaux de stockage) et la consommation en eau de 60 % (5 % pour le passage de deux à un réservoir et 60 % pour le changement de matériaux de stockage). En appliquant les facteurs de normalisation aux résultats de Lalau *et al.*, on obtient 11 265 hab.an pour le stockage 2-cuves et 5 967 hab.an pour le thermocline, soit un gain de 47 %.

1.3.1.5. Logiciels et bases de données

L'utilisation de logiciels en ACV est recommandée car beaucoup de substances sont à prendre en compte. Les principaux logiciels actuellement disponibles sont SimaPro®, GaBi® et OpenLCA (122). Le premier nommé est le plus utilisé car il propose une présentation simplifiée

des résultats de l'ACV pour les phases 2 (Inventaire des émissions et extractions) et 3 (Analyse de l'impact environnemental). Cet affichage permet à l'opérateur d'examiner rapidement les contributions détaillées de chaque processus. Quant à GaBi®, ce logiciel est plus axé sur des applications industrielles, dans le domaine de l'automobile et de l'électronique. Les logiciels OpenLCA et GaBi® utilisent un algorithme séquentiel, qui demande plus de temps de calcul que l'algorithme de SimaPro® (basé sur un calcul matriciel), mais offrent plus de flexibilité. OpenLCA ne permet pas de normaliser les impacts calculés. Cependant, cette étape peut être réalisée hors du logiciel, grâce aux valeurs de normalisation préconisées par l'ILCD (129). L'ANNEXE A.1 présente un tableau des différents logiciels en ACV qui existent actuellement (130). Le logiciel OpenLCA étant gratuit, offrant beaucoup de flexibilité et très bien documenté sur internet, il sera préféré dans cette étude.

Lors des Phases 2 (Inventaire des émissions et des extractions) et 3 (Analyse de l'impact environnemental), les bases de données sont essentielles pour calculer les impacts environnementaux potentiels de l'objet d'étude. En effet, chaque flux (cf. flèches Figure 12) est relié à un composant issu de la base de données choisie. Il en existe trois principales : les matériaux, les procédés de production et le transport. Par exemple, sur la Figure 12, les flux de produits reliant les étapes de fabrication et d'utilisation font appel au transport de mise à disposition des produits. Les bases de données recensent donc par localité les divers modes de transport qui peuvent être utilisés et leurs consommations énergétiques. De nouvelles bases de données sont constamment mises sur le marché et sont de plus en plus spécifiques, puisqu'elles peuvent être appliquées à un seul secteur d'activité, comme les bases de données en construction (131). L'une des meilleures et des plus connues est EcoInvent, qui regroupe les données pour effectuer des analyses environnementales et de coûts. Quant à PSILCA (*Product Social Impact Life Cycle Assessment database*), cette base de données recense un certain nombre d'indicateurs pour des analyses sociales. Un tableau détaillant les différentes bases de données disponibles à ce jour est présenté en ANNEXE A.1.

1.3.1.6. Limites pratiques et conceptuelles

Même si l'ACV est la principale méthode pour déterminer l'impact environnemental d'un produit (ou système), il subsiste des limites telles que :

- Les disponibilités et qualités des données, le niveau de détails requis, l'influence de la personne réalisant l'ACV,

- Les dimensions spatiale et temporelle ne sont pas différenciées : cet outil d'évaluation est donc propre à un lieu et un instant donné. Une ACV réalisée en 2000 ne sera pas valable pour l'année 2020 car les bases de données ont été mises à jour avec de nouvelles valeurs de consommations, d'émissions ... De plus, une ACV réalisée en Californie utilise des données relatives à cette localité. Ainsi, les impacts environnementaux qui en découlent ne seront pas valables en Europe, notamment car l'énergie n'est pas produite de la même manière,
- Les effets sociaux et économiques non-évalués : il faut donc évaluer ces paramètres avec des outils complémentaires à l'ACV,
- L'environnement est supposé ne pas être modifié par le système évalué, les impacts locaux réels ne sont donc pas pris en compte. Par exemple, en implantant un parc d'éoliennes sur un site, l'ACV ne tient pas compte des bruits pouvant gêner les populations environnantes, tout comme le paysage qui se trouve impacter.

1.3.1.7. Analyse du cycle de vie exergétique

D'autres outils peuvent être utilisés pour répondre aux limites de l'ACV. Cette dernière n'intervenant pas dans le processus d'innovation du produit, l'ACV exergétique peut palier cette limite en améliorant un produit dès sa phase de conception.

Cette méthode combine l'ACV et l'exergie. Outil de conception, elle permet d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles et de calculer leur épuisement (132). Ainsi, l'ACV exergétique donne une valeur à la qualité de l'énergie, à l'aide d'un bilan exergétique, alors que l'ACV la quantifie seulement, à travers un bilan de matière.

L'ACV exergétique suit le même cheminement que l'ACV avec les quatre étapes. La seule différence intervient lors de la seconde étape. A la place de détailler les flux énergétiques lors de l'inventaire, ce sont les flux exergétiques qui sont considérés, notamment à travers les destructions d'exergie, et l'efficacité exergétique des sous-processus et du processus global. Connaître l'exergie détruite permet ainsi de déterminer l'étape du cycle de vie du procédé la plus nocive du point de vue de la déplétion des ressources naturelles.

Afin de calculer l'épuisement des ressources naturelles, il est nécessaire d'utiliser le concept de consommation d'exergie cumulée et, de convertir les données exprimées en unités énergétique

et massique de la base de données, en unité exergétique. Szargut *et al.* (133) ont proposé d'utiliser les valeurs β , qui correspondent au rapport de l'exergie chimique standard (134) sur le pouvoir calorifique inférieur des combustibles. Pour ce faire, il est nécessaire de bien détailler l'état mort, soit un état parfaitement relâché du système qui est en équilibre thermodynamique. Pour s'affranchir de cet état mort, le modèle de la planète dégradée Thanatia, où toutes les ressources ont été extraites et dispersées, et tous les combustibles fossiles consommés est créé (135). Des exemples d'analyse exergo-écologique de deux chaînes industrielles sont données par Valero et Valero (136) : transformation de la bauxite en alumine puis aluminium, et du calcaire en calcite puis en chaux.

L'une des premières études en ACV exergétique a été réalisée sur une centrale électrique (132). Les auteurs cherchent à déterminer dans quelle phase du cycle de vie du produit se produisent les pertes de ressources naturelles. Une ACV exergétique sur usine de traitement des déchets de bois a prouvé que remplacer le charbon par du bois « neuf » entraîne la consommation de plus de ressources naturelles mais diminue la déplétion des ressources naturelles (137).

1.3.1.8. Études environnementales des centrales solaires à concentration et des stockages thermiques

Les différentes applications environnementales appliquées au domaine de l'énergie ont été listées dans la revue de Lamnatou et Chemisana (138). L'une des premières ACV réalisée sur les centrales CSP a pour objectif d'évaluer l'impact environnemental de la production d'électricité d'une centrale solaire thermique de 1 MW_e, avec des collecteurs paraboliques (*dish*). Les principaux résultats indiquent que la phase la plus critique en termes d'impact environnemental est la construction de la centrale solaire, suivie du transport des paraboles solaires de l'Australie à la Sicile (139).

Une autre ACV a été réalisée sur une centrale CSP à collecteurs cylindro-paraboliques de 50 MW_e et sur une centrale à tour de 17 MW_e en Espagne. L'unité fonctionnelle est définie comme la production de 1 kWh_e. Les résultats indiquent que pour chacune des technologies, les impacts environnementaux sont moins importants que les technologies utilisées en 2006 pour produire de l'électricité en Espagne. L'indicateur de potentiel de réchauffement climatique s'élève à 200 gCO₂/kWh_e (dû principalement à l'utilisation de combustibles fossiles pendant le fonctionnement), ce qui est largement plus faible que les technologies utilisant les énergies

fossiles. De plus, les impacts environnementaux sont relativement proches entre les deux centrales CSP étudiées (140).

L'une des premières ACV réalisée sur le stockage thermique est celle de Heath *et al.* (126). Dans cette analyse, deux TES sont évalués : le premier est composé de deux cuves ; le second est une cuve thermocline. L'ACV indique que les émissions du stockeur de type thermocline sont deux fois inférieures à celle du double réservoir. De plus, la réduction du stock de sels fondus dans le stockage thermique réduit les coûts de stockage et les émissions de GES.

L'ACV de Burkhardt *et al.* (125) sur une centrale solaire cylindro-parabolique de 103 MW_e et son système de stockage à Daggett (États-Unis) est l'une des plus complète. En effet, quatre indicateurs environnementaux sont étudiés selon trois scénarios différents, dont l'un inclus un TES thermocline. Le scénario de référence qui utilise deux cuves de stockage et un refroidissement humide émet 26 gCO₂/kWh_e. Alors qu'en préférant un refroidissement sec, la consommation en eau est réduite de 77 % mais les émissions de GES et la consommation d'énergie augmentent de 8 %. Quant à changer le stockage 2-cuves en une unique cuve, la consommation en eau diminue de 2 % et les émissions de GES de 7 %.

Kuenlin *et al.* (141) ont comparé quatre types de centrale CSP, situées en Espagne et aux États-Unis, du point de vue environnemental : Andasol (cylindro-parabolique), Gemasolar (tour), PE2 (Fresnel) et Maricopa (*dish*). La comparaison des CSP avec leurs concurrents fossiles montre que les impacts de ces centrales solaires sont beaucoup plus faibles pour la plupart des catégories d'impacts considérées. La phase de construction est la plus impactante pour toutes les centrales CSP (85 à 99 %). La centrale avec des collecteurs paraboliques (Maricopa) présente les meilleures performances environnementales, grâce à son efficacité élevée et la quantité réduite de matériaux utilisés, alors qu'Andasol présente les pires, notamment à cause du fluide caloporteur et des sels fondus du stockage.

L'article de Hertwich *et al.* trouve une solution à la limite temporelle de l'ACV (142). Dans leur modèle d'inventaire du cycle de vie, les auteurs incluent le retour d'informations sur l'évolution du mix électrique et les effets des améliorations apportées sur la production des technologies énergétiques.

Un récent article étudie l'impact environnemental de quatre stockages différents : un à deux cuves de sels fondus, et trois thermoclines utilisant des sels fondus et du cofalit, des sels fondus et du basalte, et des sels fondus et de la mullite (roche naturelle). Les indicateurs ACV utilisés sont le potentiel de réchauffement climatique, la consommation d'eau et la demande d'énergie. Par rapport au TES 2-cuves, l'utilisation d'une unique cuve diminue de 65 % l'indicateur d'énergie, de 60 % les émissions de GES et de 80 % la consommation d'eau, pour une production de 1 kW_e. En englobant la centrale CSP à l'ACV, les diminutions sont moins importantes : 13 % pour l'énergie, 12 % pour les GES et 16 % pour l'eau. La combinaison d'un TES thermocline avec du basalte entraîne des diminutions encore plus importantes (93 %, 86 % et 99 % respectivement pour chacun des indicateurs) (143).

La Figure 14 reprend l'indicateur ACV sur le potentiel de réchauffement climatique de différentes études sur les centrales CSP (125,139,140,144–148) et les stockages thermiques (123,125) issues de la littérature.

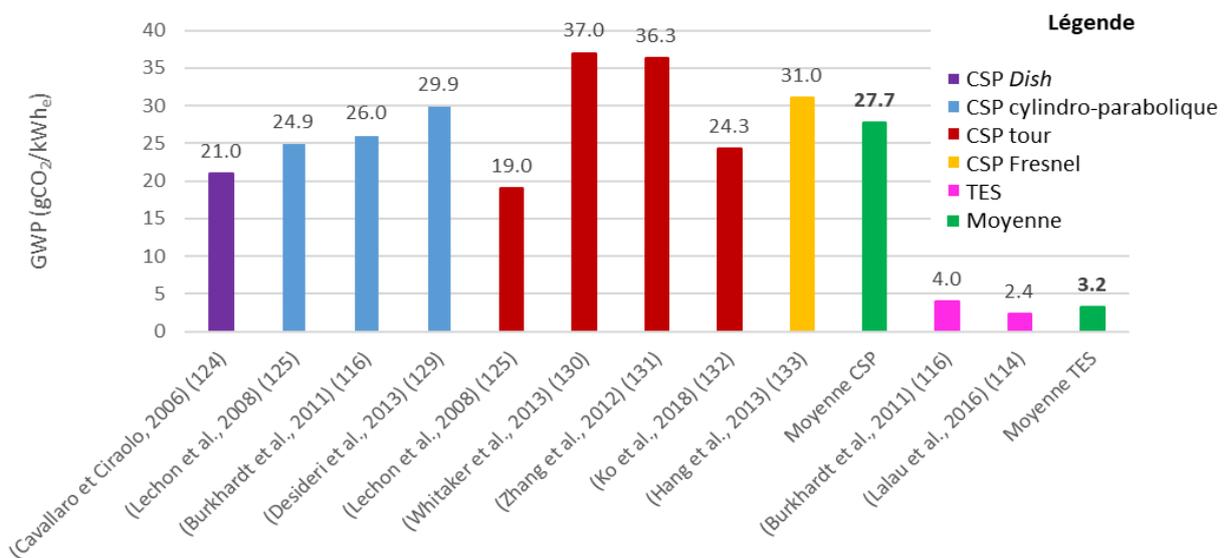


Figure 14 : Comparaison de l'indicateur des changements climatiques de l'ACV pour plusieurs centrales CSP et TES

1.3.2. Analyses économiques

Afin de déterminer les impacts économiques des produits/services étudiés, il est possible d'utiliser plusieurs outils. Le plus connu est l'Analyse des Coûts du Cycle de vie (ACC), qui se base sur le même principe que l'ACV.

1.3.2.1. Analyse des coûts du cycle de vie

L'ACC est analogue à l'ACV, mais en déterminant l'impact économique plutôt qu'environnemental d'un produit sur tout son cycle de vie. « L'analyse du coût du cycle de vie se réfère à l'ensemble des coûts associés au système pour le cycle de vie défini » (149). La Figure 15 présente les étapes du cycle de vie économique d'un produit. La phase de conception est primordiale puisqu'elle influence entre 70 et 85 % les coûts totaux du produit. En effet, il est plus facile de modifier les coûts totaux dans ce processus (150). Généralement, les coûts de maintenance sont choisis comme un pourcentage du coût d'investissement.

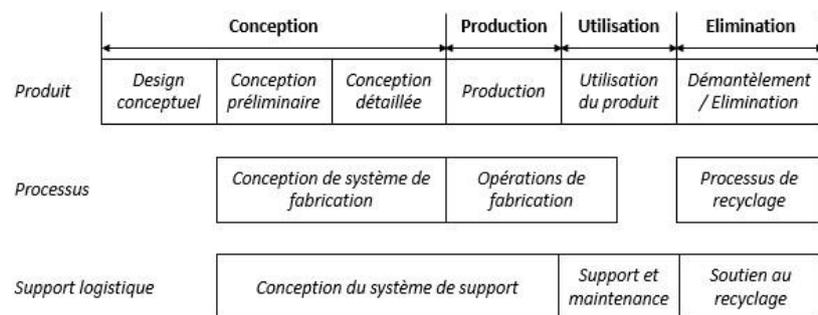


Figure 15 : Cycle de vie économique d'un produit, d'après (150)

Créée par une association américaine dans les années 1960, l'ACC tient compte de tous les coûts intervenant durant le cycle de vie d'un produit : coûts initiaux (investissement, achat et installation), et coûts futurs (énergie, exploitation, maintenance, remplacement des immobilisations, financement), coûts d'élimination/de démantèlement. (151). L'arbre de l'ACC permet de classer les coûts dans les différentes phases du cycle de vie du produit (cf. Figure 16).

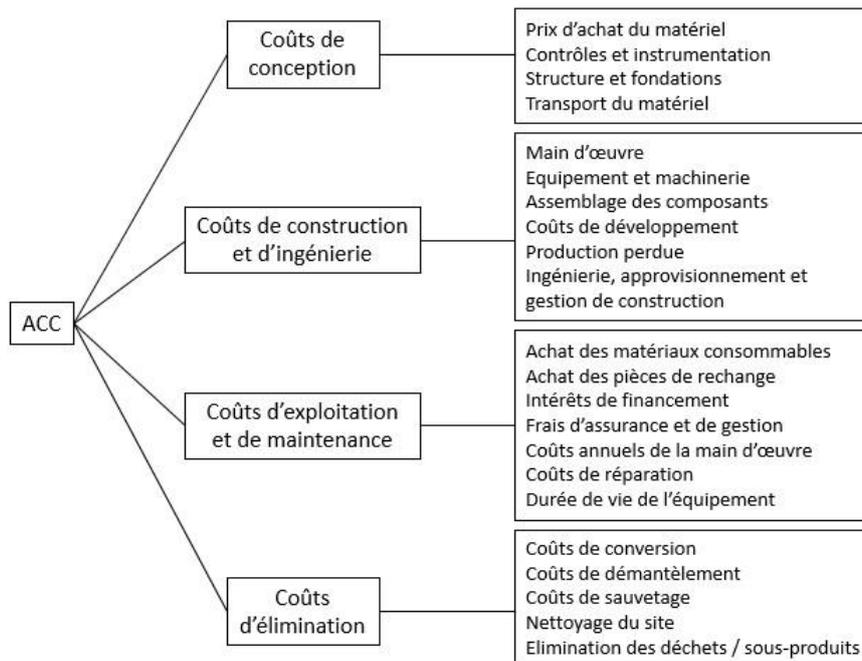


Figure 16 : Arbre des coûts intervenant dans l'ACC

Il existe différents indicateurs, utilisant différentes méthodologies, pour réaliser une ACC : la Valeur Actualisée Nette (VAN), le coût actualisé de l'énergie (LCOE : *Levelised Cost Of Energy*), le taux de rentabilité interne et les temps de retour (actualisé et conventionnel). Celles basées sur l'évaluation de la VAN sont les plus utilisées pour les projets liés à l'énergie. Cette méthode économique permet de ramener les différents flux financiers considérés à la valeur actualisée qu'ils auraient à la date de début du projet. Pour minimiser les coûts totaux, il suffit de maximiser la VAN (152,153). La méthode d'évaluation de la VAN sera détaillée dans la partie 2.3. Les autres indicateurs économiques sont des seuils de rentabilité, définis à partir de la VAN. Le LCOE correspond au prix de vente de l'électricité qui annule la VAN. Le taux de rentabilité interne est le taux d'intérêt qui annule la VAN. Le temps de retour actualisé est, quant à lui, défini par la durée d'exploitation qui annule la VAN.

Tout comme l'ACV, l'ACC présente des limites, notamment le manque de précision et la difficulté de mesurer les erreurs. De plus, les inexactitudes dans le modèle d'estimation des coûts peuvent augmenter considérablement les coûts totaux du produit étudié. Il est donc important d'inclure un calcul d'incertitudes dans l'ACC (150).

Les analyses économique et environnementale de cycle de vie sont relativement proches puisque les étapes du cycle de vie d'un produit permettent de définir les impacts économiques

et environnementaux à l'aide de bases de données. Il existe néanmoins des différences méthodologiques entre ces deux analyses. L'analyse du cycle des coûts compare les coûts effectifs de différents produits du point de vue d'une industrie ou d'un consommateur, alors que l'ACV évalue la performance environnementale relative des différents produits fournissant la même fonction. Ainsi, l'ACC identifie les flux monétaires (*cashflow*) et l'ACV les flux physiques, de polluants et de ressources (154).

1.3.2.2. Analyse des coûts des dommages sur l'environnement

La Commission Européenne a lancé dans les années 2000 le projet CASES (*Cost Assessment of Sustainable Energy Systems*) qui cherche à établir des estimations des coûts externes et internes de la production d'énergie pour différentes sources d'énergie au niveau national pour les pays européens (UE-27), et pour certains hors-Europe selon des scénarios énergétiques jusqu'en 2030 (155). De nombreuses recherches ont permis de déterminer les coûts totaux des dommages sur l'environnement par catégories intermédiaires (définies dans l'ACV) pour différentes sources d'énergie, telles que les combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et quelques sources d'énergie renouvelables. Les centrales CSP de type cylindro-paraboliques représentent la seule source d'énergie solaire thermique étudiée dans le projet CASES. En Europe (UE 27), les coûts des dommages sur l'environnement d'une centrale CSP sont estimés à 10,41 c€/kWh_e, soit 2 fois moins que le solaire PV, et 1,5 c€/kWh_e de plus que le gaz naturel (155).

1.3.2.3. Études économiques des centrales solaires à concentration et des stockages thermiques

Différentes études économiques ont été réalisées sur des centrales CSP. En 2012, les simulations de trois types de centrales (cylindro-parabolique et tour avec TES 2-cuves de 6 h, et *dish*) de 100 MW_e en Algérie ont montré que le LCOE varie entre 11 (CSP cylindro-parabolique) et 14,5 c\$/kWh_e (CSP *dish*) (156). Dans cette étude, le LCOE inclus les coûts d'investissement totaux, les coûts d'exploitation et de maintenance et le coût environnemental selon le CO₂ émis.

Wagner et Rubin (157) ont étudié la fluctuation du LCOE avec le temps de stockage sur une centrale cylindro-parabolique de 110 MW_e en Californie. Cette étude a permis de montrer que

plus le temps de stockage est grand, et plus le LCOE augmente. De plus, dans ce cas, les coûts d'investissement augmentent et les coûts d'exploitation et de maintenance diminuent.

Parrado *et al.* (158) ont cherché à prévoir l'évolution du LCOE entre 2014 et 2050 d'un CSP cylindro-parabolique de 50 MW_e utilisant différents types de TES composés de sels fondus. Les auteurs ont indiqué que cet indicateur économique allait diminuer dans le temps, avec une forte diminution dans les premières années. Pour des sels fondus *Solar Salt*, le LCOE d'un TES 2-cuves s'élève à 14,3 (Chili), 18,6 (USA) et 21 c\$/kWh_{th} (Espagne) en 2014. En fonction des scénarios de projection de la puissance installée cumulée entre 2014 et 2050, les résultats diffèrent légèrement : en 2050, les projections indiquent que le LCOE atteindra 7.87 (Chili), 11.58 (USA) et 10.25 c\$/kWh_{th} (Espagne).

L'article de Gonzalez-Boudau *et al.* (159) compare différentes configurations de centrales CSP (100 MW_e), avec différentes tailles et durées de stockage. La remarque de Wagner et Rubin (157) indiquant que plus le temps de stockage est long, meilleur est le LCOE, est vérifiée. De plus, les résultats indiquent également que le choix d'un TES rempli d'huile présente un LCOE plus élevé qu'un TES de sels fondus.

La Figure 17 représente le LCOE de différentes études sur les centrales CSP et les stockages thermiques (156,160–162) issues de la littérature.

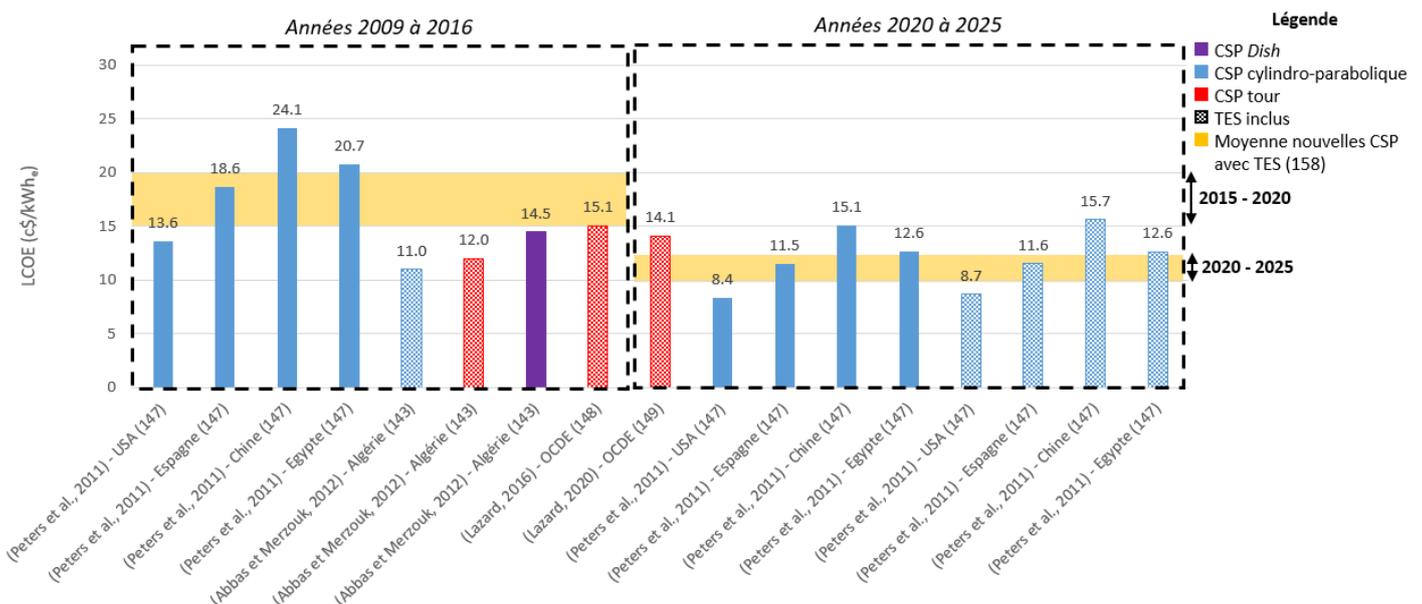


Figure 17 : Comparaison du coût actualisé de l'énergie pour plusieurs centrales CSP et TES (les barres jaunes correspondent aux évaluations d'ESTELA (163))

Chaque année ESTELA (*European Solar Thermal Electricity Association*) (163) écrit un rapport sur les centrales CSP. Le coût total du champ solaire s'élève à 160-250 €/m² en 2016 et pourrait atteindre 100–160 €/m² en 2025. Pour un stockage thermique à deux cuves, le coût total était de 26-30 €/kWh_{th} en 2016 et sera de 18-21 €/kWh_{th} en 2025.

L'étude récente d'une centrale CSP en Afrique-du-Sud a établi les coûts des dommages sur l'environnement entre 1,4 et 2,2 €/MWh_e. Les coûts globaux des dommages peuvent être réduits si la fabrication des principaux composants est localisée. En effet, un tel changement permettrait de réduire les émissions liées au transport, et également d'augmenter les avantages des communautés et industries locales (164).

1.3.3. Analyses sociales

Les analyses sociales sont les plus compliquées à mettre en place, car elles sont encore peu documentées dans la littérature. En effet, l'aspect économique d'un produit est primordial. L'ACV est de plus en plus utilisée avec la volonté des entreprises d'intégrer une politique de transition énergétique à travers le développement durable. Cependant, les impacts sociaux d'un produit sont souvent relégués à l'arrière-plan. L'Analyse Sociale du Cycle de Vie (ASCV) est l'analyse la plus complète pour déterminer les impacts sociaux d'un produit (ou service), et par la suite améliorer les conditions sociales et socio-économiques.

1.3.3.1. Analyse sociale du cycle de vie

Comme son nom l'indique, l'ASCV se définit de la même façon que l'ACV, sauf qu'elle cherche à promouvoir l'amélioration des conditions sociales tout au long du cycle de vie d'un produit. Les impacts sociaux déterminés dans cette analyse sont les conséquences de relations sociales tissées dans une activité, et/ou engendrées par celle-ci ou par des actions préventives. Ces impacts sont généralement causés par des comportements spécifiques, des décisions socio-économiques ou des capitaux (humains, sociaux et culturels). De plus, ils sont une fonction complexe de plusieurs facteurs, comme la politique, l'éthique, l'économie, la culture (165)...

Lors de l'inventaire, les flux sociaux remplacent les flux de produits entre chaque étape du cycle de vie. Durant la phase d'évaluation, les impacts sociaux peuvent être classés de deux façons :

- **Catégorisation par partie prenante** : travailleurs, consommateurs, communauté locale, société, acteurs de la chaîne de valeur,
- **Catégorisation par impact** : droits du travail et travail décent, conditions de travail, santé et sécurité, héritage culturel et naturel, équité des relations, gouvernance et répercussions socio-économiques...

Différents indicateurs sociaux peuvent être évalués : l'association libre et la négociation collective, la survenue d'accidents létaux et non létaux, la discrimination, le travail des enfants, les salaires justes, la corruption, l'emploi local, le respect des droits de propriété intellectuelle (165)... Cette étape diffère légèrement de celle de l'ACV car la conversion des données sociales en une seule catégorie d'impact n'est pas simple. C'est pourquoi la pondération, la normalisation et la caractérisation se font simultanément. Les impacts sociaux peuvent être évalués de différentes manières. Corona *et al.* (166) proposent de leur donner des valeurs entre -2 (impacts négatifs) et +2 (impacts positifs) en faisant la moyenne de chaque catégorie d'impact. Benoit-Norris *et al.* (167) définissent une échelle de risque allant de 0 à 4 : 0 (pas de valeur ou pas d'évidence), 1 (faible), 2 (risque), 3 (risque) et 4 (très élevé). L'interprétation des résultats se fait de manière analogue à l'ACV, en identifiant les sous-catégories sociales où les risques sont les plus élevés.

Par la suite, au lieu d'utiliser une base de données regroupant les données économiques et environnementales, il est nécessaire de faire appel à une base de données spécifique aux impacts sociaux. Il en existe deux : SHDB (*Social Hotspot Database*) et PSILCA, la plus fournie (168).

L'ASCV donne des informations sur l'organisation tout au long du cycle de vie, avec notamment le niveau d'engagement des différentes parties prenantes. Elle tient compte des impacts positifs et négatifs, alors que l'ACV ne prend pas en compte les positifs, comme le CO₂ absorbé par les plantes (165). Cependant, les données sont difficilement accessibles et cette analyse est peu mature et très complexe à cause des interdépendances entre enjeux sociaux et économiques (169).

1.3.3.2. Études des impacts sociaux des centrales solaires à concentration et des stockages thermiques

La première analyse sociale sur une centrale CSP avec un système de stockage 2-cuves a été réalisée sur la centrale Andasol en Espagne (166). Les auteurs classent les impacts sociaux entre

négatifs (détériorent le bien-être) et positifs (améliorent le bien-être). Un impact nul correspond à un impact neutre, qui est équivalent aux impacts sociaux moyens de la référence. Les résultats de cette étude montrent que la phase d'opération et de maintenance présente les plus hauts risques sociaux. En effet, durant cette phase, du gaz naturel importé est consommé. La catégorie sociale avec le plus de risque est la santé et la sécurité, les pays les plus touchés étant les pays exportateurs de gaz naturel (Algérie, Égypte et Pérou) et l'Espagne. Le champ solaire concentre 34 % des impacts sociaux et le stockage thermique 31 %. Finalement, les auteurs expliquent que les points chauds sont la corruption et l'inégalité des genres et que les impacts sociaux peuvent être améliorés en travaillant sur les salaires équitables, la concurrence loyale, la légalité des influences et des comptes bancaires et le genre.

1.3.3.3. Étude d'éco-conception sur les centrales solaires à concentration et les systèmes de stockage thermique

Ko *et al.* (147) ont évalué la durabilité d'un système sur les trois piliers du développement durable. Les auteurs ont combiné trois analyses : l'ACV (impacts environnementaux), l'ACC (impacts économiques) et l'environnement du travail du cycle de vie (impacts sociaux). Cette analyse sociale se penche uniquement sur quelques indicateurs quantitatifs, comme le temps de travail et la distribution d'accidents létaux et non-létaux. Dans leur article, les auteurs cherchent à améliorer le cadre de la durabilité en incorporant de meilleurs indicateurs de la durabilité économique et, en élargissant la perspective des impacts écologiques et sociaux. Ils s'intéressent à une tour solaire combinée avec un stockage 2-cuves de sels fondus de 12 heures. Les résultats indiquent que le champ solaire, les sels fondus (en phase de fabrication) et l'usage du réseau électrique (en phase d'utilisation) entraînent des impacts majeurs sur l'environnement. En étudiant la répartition du temps de travail dans les pays touchés par la centrale solaire, les auteurs expliquent que les deux tiers du temps de travail sont effectués dans le pays où est située l'usine. Quant aux accidents, ils surviennent principalement durant la construction de la centrale. Le reste est réparti dans les principaux pays qui contribuent à la phase de fabrication de la tour solaire. Quant à l'ACC, elle indique que la majorité des coûts surviennent dans le pays où est située la centrale solaire. Quelques autres sont présents dans les lieux d'extraction des sels fondus et de fabrication du bloc de puissance.

Afin de répondre à l'objectif de cette thèse qui est d'optimiser un stockage thermocline sur plusieurs critères, la prochaine partie vise à exposer le principe des optimisations multi-objectifs et quelque outils permettant de résoudre un tel problème.

1.4. Optimisation multi-objectifs

Les outils présentés précédemment conduisent à des solutions optimales différentes. Il est donc important de les combiner pour trouver la solution présentant le meilleur compromis entre chaque optimum. L'optimisation multi-objectifs est tout indiquée pour trouver la « solution la plus adéquate » répondant aux critères exergétiques, environnementaux, économiques et sociaux. Dans cette partie, une présentation rapide des différentes méthodes d'optimisation multi-objectifs sera faite. Ces méthodes donnant un ensemble de solutions envisageables, il est nécessaire d'utiliser une méthode multi-objectifs d'aide à la décision pour trouver la solution préférable selon les critères envisagés.

1.4.1. Principe d'un problème d'optimisation multi-objectifs

Par définition, un problème multi-objectifs est un problème dont l'action recherchée doit satisfaire un ensemble de contraintes et optimiser un vecteur fonction objectif. En effet, un critère ne peut pas être amélioré sans détériorer, en général, au moins un des autres critères. Il n'existe donc pas de solution optimale, meilleure que toutes les autres, mais une solution préférable à une autre (170).

L'utilisation de méthodes d'optimisation multi-objectifs conduit à un ensemble de solutions efficaces, appelé l'ensemble de Pareto, représenté graphiquement par le front de Pareto. Les points appartenant à cet ensemble ne sont dominés par aucun autre, i.e. un ou plusieurs des critères est optimisé (minimisé ou maximisé) pour ces solutions. La notion de dominance est représentée sur la Figure 18. Les points rouges sont dominés par les points bleus, qui eux ne sont dominés par aucun point et constituent donc le front de Pareto.

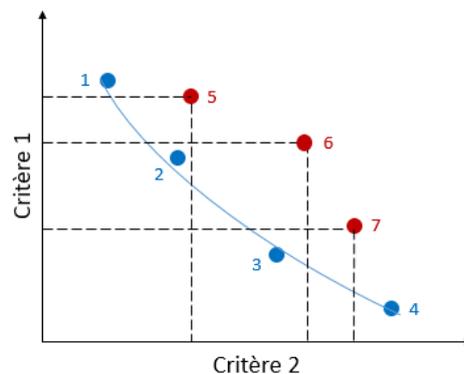


Figure 18 : Schéma d'une frontière de Pareto en deux dimensions

Connaissant l'ensemble des solutions satisfaisantes pour les critères choisis, l'étape suivante consiste à sélectionner l'une des solutions optimales, à l'aide d'une méthode multi-objectifs d'aide à la décision.

1.4.2. Méthodes d'optimisation multi-objectifs

Les méthodes d'optimisation multi-objectifs peuvent être regroupées dans deux grandes familles :

- **Les méthodes déterministes** qui transforment un problème multi-objectifs en un mono-objectif. Les algorithmes exacts et les heuristiques spécifiques en font parties,
- **Les méthodes stochastiques** qui prospectent aléatoirement l'espace des solutions à l'aide de règles de transition probabilistes. Les méthodes métaheuristiques en font parties, dont les algorithmes évolutionnaires, composés des algorithmes génétiques et d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) (171). Ces deux algorithmes seront détaillés et comparés dans cette section.

Les méthodes stochastiques étant adaptées pour de grandes populations, à l'inverse des méthodes déterministes qui trient l'ensemble de la population et donc présentent des temps de simulation longs, un algorithme métaheuristique sera choisi pour résoudre le problème d'optimisation de cette étude. Ces types d'algorithme résolvent des problèmes d'optimisation difficiles, pour lesquels les méthodes classiques ne sont pas efficaces. Ils donnent une approximation de l'optimum global très rapidement (171).

1.4.2.1. Algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires se basent sur le principe de Darwin, avec la sélection naturelle et les théories de l'évolution. Les stratégies d'évolution, la programmation évolutionnaire, l'évolution différentielle, la programmation génétique et les algorithmes génétiques et d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) sont des exemples d'algorithmes évolutionnaires.

Le principe de fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire est représenté sur la Figure 19. L'initialisation génère de manière aléatoire la population sur tout l'espace de recherche. S'en suit le calcul des performances des individus, soit l'évaluation de la qualité des individus basée

sur la fonction objectif de l'optimisation. La phase de sélection permet de choisir des individus pour la reproduction selon leur performance. Les opérateurs stochastiques, que sont le croisement et la mutation, génèrent des enfants qui seront par la suite évalués, puis remplaceront une partie de la population parentale. Plusieurs itérations, appelées générations, sont réalisées jusqu'à valider le ou l'un des critère(s) d'arrêt et déterminer la population de meilleurs individus. Ce critère permet de stopper l'algorithme évolutionnaire, soit après un certain nombre fixé d'itérations, soit dès que la valeur de la performance du meilleur individu a atteint un certain seuil, soit après qu'un certain nombre d'itérations ont été faites sans amélioration (172).

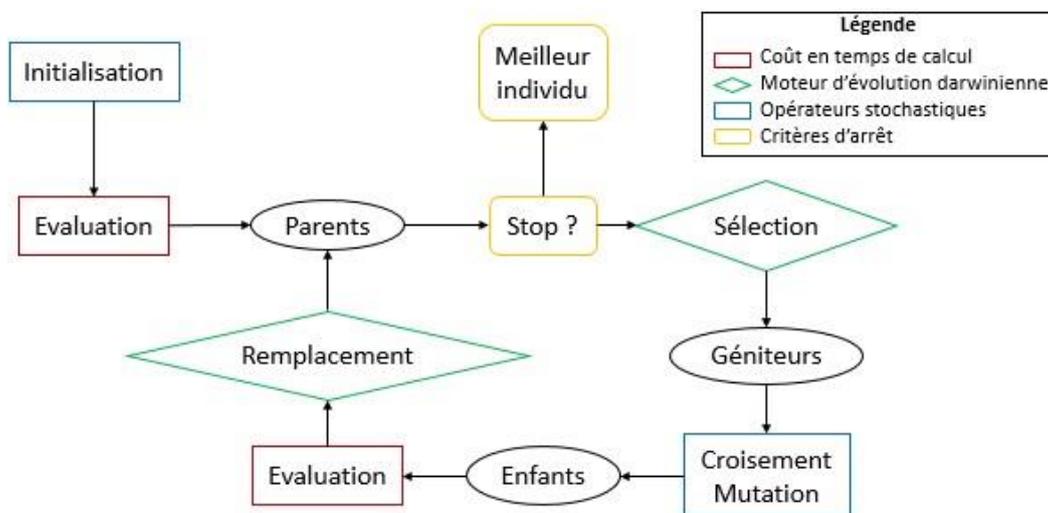


Figure 19 : Principe de fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire

Les algorithmes évolutionnaires disposent de trois opérateurs principaux : un opérateur de sélection, un de croisement et le dernier de mutation. Durant l'étape de sélection, l'opérateur maintient une diversité génétique dans la population et propage les meilleures solutions (173). L'opérateur de croisement échange les gènes des différents parents pour créer les enfants de la future génération. Enfin, l'opérateur de mutation consiste à sortir aléatoirement un gène du parent et le remplacer par une valeur aléatoire. Cette étape permet de maintenir une certaine diversité dans la population, ce qui est primordial pour éviter la convergence prématurée vers un optimum local (171).

Les algorithmes génétiques sont les plus connus (174), notamment avec la méthode NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) (175). Très robustes à l'initialisation, malgré un temps de convergence long par rapport à l'OEP, ces algorithmes peuvent résoudre des

problèmes présentant des variables continues et discrètes simultanément. L'algorithme OEP, développé plus récemment, est quant à lui plus rapide et facile à mettre en œuvre (176).

1.4.2.2. Algorithme génétique NSGA-II

L'algorithme NSGA-II utilise un mécanisme d'estimateur de densité (distance de *crowding*), afin de diminuer la complexité de calcul et d'ajouter de l'élitisme, qui accélère les performances de l'algorithme génétique et aide à prévenir la perte des bonnes solutions (177).

Le principe de fonctionnement de l'algorithme NSGA-II est représenté sur la Figure 20. Dans un premier temps, les individus de la population de parents P_t et ceux de la nouvelle génération Q_t sont assemblés, puis triés par front de Pareto. La valeur un est attribuée au rang des solutions non-dominées. La nouvelle population P_{t+1} est formée en ajoutant les fronts, tant que le nombre d'individus ajoutés ne dépasse pas la taille limite de l'archive. La distance de *crowding* permet de trier les solutions appartenant au premier front F_i non-inclus en totalité dans P_{t+1} . Les meilleurs individus de F_i sont alors insérés dans la nouvelle population par troncation pour atteindre la taille limite de l'archive. Une nouvelle population d'enfant Q_{t+1} est ensuite créée par sélection, croisement et mutation. L'algorithme NSGA-II est itéré plusieurs fois jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié.

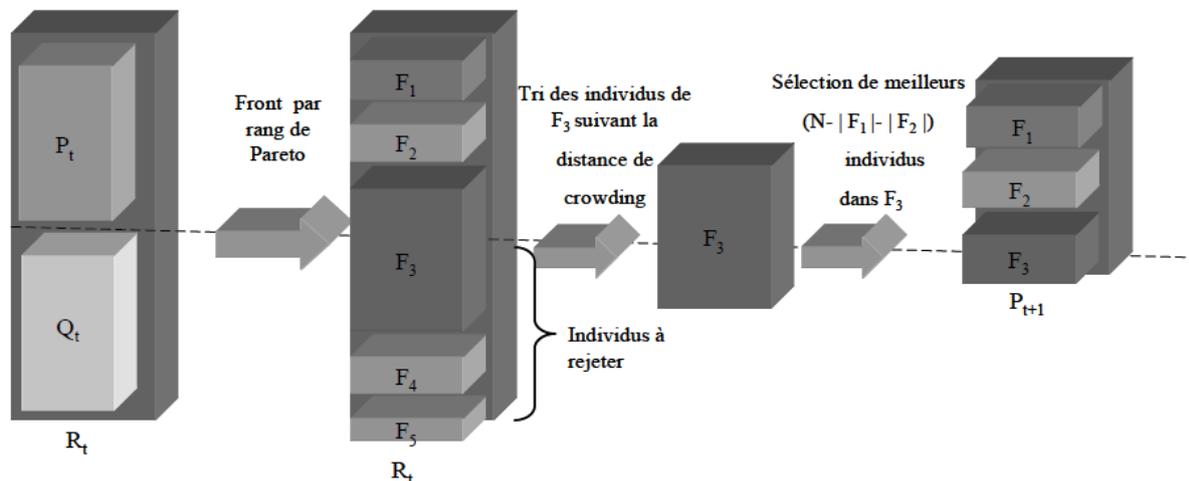


Figure 20 : Principe de l'algorithme NSGA-II (177)

1.4.2.3. Algorithmes d'optimisation par essaim particulaire

Appartenant aux algorithmes évolutionnaires, l'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) s'inspire également du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant

en essaim. Les notions de coopération et compétition entre les individus de l'essaim les font évoluer pour créer de nouvelles générations. L'essaim survole l'espace de recherche pour trouver l'optimum global du problème. Chaque particule représente une solution ayant une position et une vitesse (171). Le déplacement d'une particule est calculé par la combinaison linéaire de trois informations, représentées sur la Figure 21 :

- La vitesse actuelle de la particule (**composante d'inertie**) ;
- La meilleure performance atteinte par la particule précédemment p_i (**composante cognitive**), qui fait appel à sa mémoire ;
- La meilleure performance des voisines de la particule p_g (**composante sociale**).

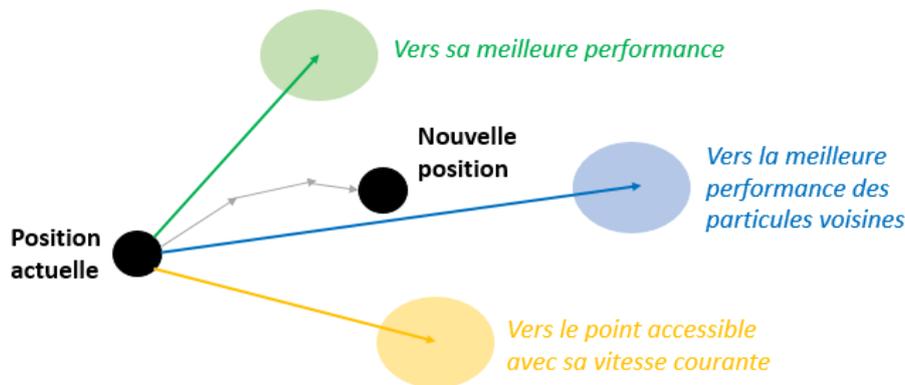


Figure 21 : Déplacement d'une particule dans un algorithme d'OEP

L'un des principaux avantages de cette méthode d'optimisation multi-objectifs est son efficacité et sa robustesse pour des problèmes non-linéaires, faisant appel à des variables continues et/ou discrètes. Malgré sa rapidité d'exécution et sa facilité de programmation, l'OEP a tendance à converger prématurément, en stagnant sur un optimum (178). Pour vérifier que l'algorithme ne s'est pas arrêté sur un optimum local, il est judicieux de lancer une seconde optimisation multi-objectifs en initialisant l'OEP sur l'optimum déterminé précédemment.

1.4.2.4. Comparaison entre NSGA-II et optimisation par essaim particulaire

Chaque problème d'optimisation étant spécifique, les résultats d'une méthode d'optimisation peuvent être meilleurs dans un cas précis par rapport à une autre méthode, et moins bon dans un autre cas. En effet, en fonction du nombre de variables à optimiser, du nombre de critères à minimiser (ou maximiser), du choix des paramètres d'initialisation et du critère d'arrêt, les résultats de la comparaison entre les méthodes NSGA-II et OEP sont différents (179–181). Ces deux algorithmes seront utilisés par la suite dans cette étude.

1.4.3. Méthodes d'aide à la décision multi-objectifs

Lorsque l'algorithme génétique multi-objectifs est terminé, un ensemble de solutions non-dominées est obtenu. Il s'agit d'une approximation du front de Pareto, où chaque solution possède au moins un des critères minimisés (cf. Figure 18). Les solutions de cet ensemble étant proches les unes des autres, il est difficile de choisir une solution surpassant toutes les autres, et de les classer de façon incontestables de la meilleure à la moins bonne (182). L'utilisation d'une méthode multi-objectifs d'aide à la décision permet de choisir une solution unique de compromis appartenant au front de Pareto.

Après avoir choisi la ou les méthodes multi-objectifs d'aide à la décision à appliquer, trois étapes successives sont suivies par le décideur :

1. **Étape 1 : normalisation.** Après avoir représenté l'ensemble des solutions de Pareto en fonction des critères d'optimisation, ces critères sont normalisés.
2. **Étape 2 : pondération.** Une pondération est attribuée à chacun des critères de manière subjective ou objective.
3. **Étape 3 : application de la méthode multi-objectifs d'aide à la décision.** La méthode sélectionnée est finalement appliquée sur les solutions normalisées et pondérées.

Dans cette étude, la méthode TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) (183) sera utilisée. Elle utilise des facteurs de pondération pour chaque critère, afin de déterminer les distances par rapport aux solutions idéale et non-idéale. La Figure 22 présente le principe de cette méthode pour deux critères à minimiser (C_1 et C_2) Dans ce cas, la solution idéale est définie par le point I de coordonnées $(C_{1,min}, C_{2,min})$, et la solution non-idéale par le point N de coordonnées $(C_{1,max}, C_{2,max})$. La solution de compromis correspond alors au point qui minimise la distance à la solution idéale et qui maximise celle à la solution non-idéale.

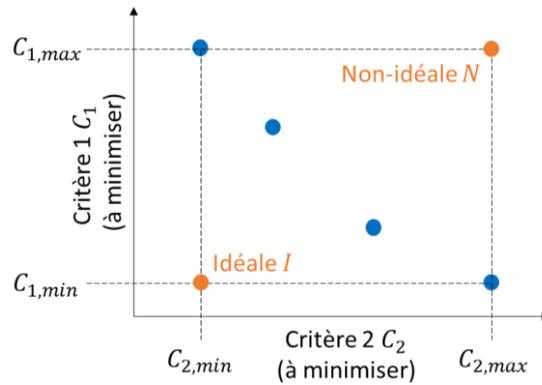


Figure 22 : Solutions idéale et non-idéale d'un ensemble de Pareto

La pondération utilisée dans TOPSIS est choisie subjectivement par un ou plusieurs décideurs. Pour éviter les incertitudes liées à ce choix subjectif et difficile, il est intéressant d'utiliser une méthode de choix des pondérations pour la sélection finale de la solution de compromis : la pondération déduite de l'entropie de Shannon (184,185) ou les poids subjectifs stochastiques (186) par exemple. La méthode de l'entropie de Shannon est basée sur la théorie de Shannon qui quantifie l'incertitude de la source d'information (185). En utilisant des probabilités, cette technique pondère chaque critère en fonction de la valeur de l'entropie de Shannon qui lui est associée. Ainsi, la combinaison de la méthode TOPSIS et de l'entropie de Shannon peut être utilisée pour déterminer la solution de compromis d'un ensemble de Pareto (186,187). L'ANNEXE A.3 détaille ces deux méthodes en multidimensionnel. Dans le CHAPITRE 2, un exemple simple en 2D permettra d'illustrer la méthode TOPSIS/Shannon.

1.5. Synthèse

Dans ce chapitre, une étude bibliographique a été réalisée sur trois notions : le stockage thermocline, les outils d'éco-conception et les optimisations multi-objectifs. L'étude sur le stockage thermique de type thermocline a permis de montrer que les performances du système sont régies par la zone thermocline séparant la zone chaude de la zone froide. Plus cette zone est fine, meilleures sont les performances de la cuve. En effet, une forte stratification permet de charger et décharger le TES aux températures chaude et froide nominales. Pour s'assurer d'une faible épaisseur de la zone thermocline, des solides de petites tailles sont à privilégier, tout comme une hauteur de cuve élevée.

La seconde partie a permis de décrire quelques outils permettant de réaliser une démarche d'éco-conception. Le principe de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été présenté de manière détaillée. Cette méthode se décompose en quatre phases : 1) Définition des objectifs et du système, 2) Inventaire des polluants et des matières premières, 3) Analyse de l'impact, et 4) Interprétation. Quelques analyses économiques ont également été décrites : l'Analyse du Coût du Cycle de vie (ACC), et l'étude des coûts des dommages sur l'environnement. Afin d'améliorer les conditions sociales tout au long du cycle de vie d'un produit, l'Analyse Sociale du Cycle de Vie (ASCV) peut être utilisée.

Différentes méthodes d'optimisation ont été présentées dans la dernière partie du chapitre. Les algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) et génétique, qui seront utilisés par la suite, ont rapidement été présentés. Un ensemble de solutions optimisées, appelé Pareto, est obtenu après application d'un algorithme d'optimisation. Des méthodes multi-objectifs d'aide à la décision permettent, par la suite, de classer ces solutions de la meilleure à la moins bonne.

1.6. Conclusion

Les nouveaux systèmes énergétiques doivent être éco-conçus afin de réussir la transition énergétique et écologique. Les optimisations de stockage thermocline identifiées dans la littérature, utilisant un algorithme mathématique de résolution, sont détaillées dans le Tableau 10. Ces travaux sont relativement rares. Généralement, des études de sensibilité sont réalisées (cf. ANNEXE A.4). A notre connaissance, aucune optimisation environnementale d'un stockage thermique de type thermocline n'a été réalisée jusqu'à présent. De plus, la plupart des optimisations visent à maximiser le rendement énergétique, sans tenir compte du niveau de chaleur en sortie de réservoir. Sur les sept travaux d'optimisations recensés, cinq optimisent le système technico-économiquement. Cependant, aucune étude ne réalise une optimisation tri-objectifs sur des aspects exergetique, environnemental et économique.

Tableau 10 : Récapitulatif des différentes études cherchant à optimiser un stockage thermocline

Référence	Lit	Type d'analyse	Outil d'optimisation			Principaux résultats
			Algorithme	Paramètres étudiés	Critères	
Torab et Beasley (188)	Air / Roches	1 ^{er} principe	Méthode de monotonie	Géométriques (hauteur du stockage, diamètre des particules, ratio du diamètre du stockage sur celui des particules)	Rapport entre l'énergie disponible à la fin de la charge et la consommation d'énergie opérationnelle totale	L'augmentation de la hauteur du réservoir combinée à la diminution du diamètre des particules conduit à une amélioration du rendement énergétique. L'augmentation du diamètre des particules dégrade la stratification thermique mais diminue les pertes de charge.
Ammar et Ghoneim (60)	Air / Argile égyptienne	1 ^{er} principe	Méthode de recherche directe	Géométriques (hauteur et diamètre du stockage, diamètre des particules), opérationnels (débit massique, temps de charge)	Rendement énergétique et revenu économique net	Les coûts de pompage limitent la hauteur du réservoir, ce qui réduit l'énergie thermique stockée.
Maaliou et McCoy (189)	Air / Roche ou acier	Technico-économique (multi-critère)	Méthode de recherche itérative	Géométriques (hauteur et diamètre du stockage, diamètre des particules) et opérationnels (débit massique, temps de charge)	Énergie thermique stockée et coûts solides de garnissage	La porosité et le diamètre de particules ont peu d'influence. Le débit massique et le diamètre du stockage doivent être choisis en fonction de l'application.
Choudhury et al. (190)	Air / Roche	Technico-économique (multi-critère)	-	Géométriques (hauteur et diamètre du réservoir, diamètre des particules, porosité) et opérationnels (temps de charge, débit massique)	Rendement énergétique et coûts d'investissement	La segmentation de la thermocline est bénéfique pour maximiser le rendement énergétique et réduire les coûts.
White et al. (191)	Air ou argon / Magnétite	Technico-économique (multi-critère)	Algorithme génétique	Géométriques (rapport d'aspect, diamètre des particules) et opérationnels (nombre de segments de lit emballé)	Coûts des matériaux et rendement exergetique	Le réservoir tronqué avec la plus petite surface de section transversale au sommet a un meilleur rendement exergetique que le réservoir cylindrique. Cependant, cette dernière forme est recommandée pour réduire les coûts.
Marti et al. (192)	Air / Roche	2 ^{er} principe et économie (multi-critère)	Méthode de programmation quadratique séquentielle	Géométriques (hauteur du stockage, épaisseur de la couche d'isolation, diamètre des particules, rayons supérieur et inférieur)	Efficacité thermique globale, coût actualisé du stockage et coûts d'investissement	Les coûts d'investissement minimaux sont obtenus pour une forme de réservoir carrée (rapport d'aspect égal à 1). Un nombre élevé de réservoirs coniques avec des particules de taille moyenne à grande a permis d'obtenir les meilleures efficacités thermiques.
Trevisan et al. (193)	Air / Roche	Technico-économique (multi-critère)	Algorithme génétique de Matlab®	Géométriques (rapport d'aspect, diamètre des particules) et opérationnels (débit massique de décharge, nombre d'unités de stockage, efficacité du dimensionnement préliminaire)		

A notre connaissance, toutes les optimisations réalisées jusqu'à présent ont principalement utilisé la géométrie du stockage et la granulométrie des matériaux comme variables d'optimisation. Néanmoins, dans aucune de ces études l'influence du fluide caloporteur et du solide de garnissage sur les performances du stockage n'a été testée. Quelques études de sensibilités ont étudié l'influence des propriétés thermophysiques, sans comparer deux fluides caloporteurs ou matériaux de garnissage. L'objectif de cette thèse est donc de développer une méthodologie traitant à la fois des aspects exergetique, environnemental et économique, et d'intégrer des variables d'optimisations géométriques, mais également le choix du couple fluide caloporteur / solide de garnissage dans le problème d'optimisation multi-objectifs à résoudre. Pour ce faire, trois modèles seront utilisés.

Le modèle physique qualifiera les performances exergetiques du stockage thermocline en résolvant les bilans transitoires de masse, d'énergie et d'entropie. Il est basé sur les travaux de Rebouillat (30,194).

Le modèle environnemental (ACV) permettra de quantifier l'impact écologique du stockage thermocline sur l'environnement au cours de l'ensemble des étapes de son cycle de vie. Pour ce faire, quatre indicateurs environnementaux seront calculés : le potentiel de réchauffement climatique (GWP), la demande énergétique cumulée (CED), la dépletion des ressources abiotiques (ADP) et l'émission de matière particulaire (PM).

Le modèle économique (ACC) se basera sur la méthode d'évaluation de la Valeur Actualisée nette (VAN). Cette méthode recensera les différents flux financiers actualisés impliqués sur la durée de vie du stockage, de la conception au démantèlement du système en passant par la fabrication, l'exploitation et la maintenance.

Pour optimiser un stockage thermocline de manière tri-objectifs sur des critères exergetique, environnemental et économique, un algorithme d'optimisation est utilisé. Dans cette étude un algorithme génétique et un d'OEP seront employés pour obtenir un ensemble de Pareto. Pour sélectionner une solution de compromis parmi celles déterminées par l'algorithme d'optimisation, et afin de s'assurer de la fiabilité et de la robustesse des résultats, la méthode TOPSIS, avec une pondération issue de l'entropie de Shannon sera développée.

Le choix et détail des trois modèles (physique, environnemental et économique) fait l'objet du CHAPITRE 2, tout comme la description du problème d'optimisation et la présentation de la méthode TOPSIS/Shannon.

CHAPITRE 2

METHODOLOGIE

Ce chapitre expose le problème d'optimisation multi-objectifs que l'on cherche à résoudre ainsi que toute la méthodologie qui va permettre de le résoudre, étape par étape. Tout d'abord, le modèle physique d'une cuve thermocline est présenté, ainsi que les paramètres de conception d'un réservoir thermocline. Les modèles environnemental et économique sont ensuite détaillés. Les différents indicateurs de performances et d'éco-conception utilisés dans cette étude sont également décrits. S'en suivent la définition de l'algorithme d'optimisation multi-objectifs, avec notamment le calcul de la fonction objectif combinant les trois modèles, et les méthodes d'aide à la décision utilisées pour sélectionner une solution. La cuve de référence Eco-Stock® est utilisée en fil rouge pour illustrer les différents modèles et la méthodologie générale de ces travaux.

Introduction

Comme souligné par l'état de l'art, seules quelques optimisations énergétiques, exergétiques, économiques et technico-économiques ont été réalisées jusqu'à présent sur des stockages thermiques de type thermocline. A ce jour, aucune optimisation multi-objectifs incluant des critères exergétique, environnemental et économique d'un tel système n'a été effectuée. Afin de répondre aux défis actuels, il est nécessaire d'inclure ces trois critères pour concevoir des systèmes durables. L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents modèles (physique, environnemental et économique) et les critères qui seront utilisés pour optimiser un tel système, à partir des outils présentés dans l'étude bibliographique. Pour illustrer la méthodologie développée, chaque modèle sera appliqué à la cuve de référence Eco-Stock®, utilisant un lit air/bauxite entre 20 et 600°C. Pour finir, le problème d'optimisation à résoudre dans cette thèse sera défini, et sa structure générale de résolution sera présentée.

Ce chapitre est structuré de la manière suivante. Le modèle physique décrivant le comportement dynamique du stockage thermocline sera tout d'abord détaillé. Des indicateurs de performances énergétiques et exergétiques seront choisis afin d'évaluer les performances du stockage. Un modèle environnemental sera ensuite proposé, basé sur une Analyse du Cycle de Vie (ACV).

A partir de la définition de l'unité fonctionnelle, l'inventaire du cycle de vie sera réalisé et les différents flux environnementaux seront déterminés. Un critère environnemental global sera proposé à partir de plusieurs indicateurs environnementaux. Par la suite, l'Analyse des Coûts du Cycle de vie (ACC) d'un stockage thermocline sera détaillée. Trois indicateurs économiques seront définis pour déterminer si le système est rentable et intéressant d'un point de vue économique. Finalement, le problème d'optimisation multi-objectifs, incluant les critères exergétique, environnemental et économique proposés, sera détaillé dans la fin de ce chapitre. Pour ce faire, l'algorithme d'optimisation sera choisi parmi les deux proposés dans le CHAPITRE 1. Les méthodes d'aide à la décision TOPSIS et Shannon seront illustrées à partir d'un exemple simple.

2.1. Modèle physique de la cuve thermocline

Pour modéliser une cuve thermocline, plusieurs modèles existent : monodimensionnels (1D) et bidimensionnels (2D), des modèles à une phase (gaz ou liquide) (1P), le modèle de Schumann avec deux phases (liquide et solide) (2P), des modèles avec trois phases (3P) tenant compte de la paroi, pour arriver jusqu'au modèle tenant compte de la conductivité intra-particulaire. Des phénomènes physiques de plus en plus complexes sont introduits d'un modèle à l'autre, tels que la conduction effective du fluide caloporteur et du solide de garnissage, la conductivité de la paroi, l'advection du fluide, les différents phénomènes de convection (fluide/solide, fluide/paroi, paroi/environnement), et le transfert radiatif. Tous ces modèles de stockage thermique de type thermocline sont bien détaillés dans la thèse de Esence (26). Les différentes hypothèses inhérentes à chaque modèle y sont données.

Plusieurs études comparent différents modèles entre eux (26,42,195). Afin de limiter les temps de simulation tout en gardant une erreur de température faible, le modèle à une dimension et deux phases (1D-2P) sera utilisé pour cette étude. En effet, en comparant les modèles 1D-1P, 1D-2P et un modèle monodimensionnel considérant le milieu granulaire comme composé de particules indépendantes (1D-SP), Hoffmann *et al.* (195) indiquent que le second modèle est un bon compromis entre précision (erreur moyenne est de 1,32°C pour les températures à l'intérieur de la cuve) et temps de calcul. Il comprend une équation pour le fluide et une pour le solide.

Plusieurs hypothèses doivent être posées pour utiliser les équations décrites dans la section 2.1.1. Le modèle 1D-2P néglige le gradient thermique dans les solides (température de surface des solides égale à leur température moyenne), i.e. la résistance de conduction à l'intérieur des particules solides est négligeable devant la résistance de convection du fluide. Cette hypothèse est validée par un nombre de Biot $Bi \leq 0,1$, défini par l'éq (2.1) (196).

$$Bi = \frac{h \cdot L_{carac}}{\lambda_s} \quad (2.1)$$

où L_{carac} est la longueur caractéristique du solide, soit le ratio entre son volume et sa surface extérieure. Elle est égale au diamètre des solides D_s dans le cas de solides sphériques, ou au diamètre des sphères de volume équivalent $D_{eq,V}$ dans le cas de solides irréguliers (26).

Ensuite, la porosité du lit de solides est isotrope. L'influence des parois sur le champ des températures est négligeable, ce qui est valable pour des grandes cuves (l'influence des parois est plus importante et non-négligeable dans le cas de petites cuves à facteur de forme D/L faible). Enfin, l'écoulement du fluide dans le système est de type piston, i.e. la cuve est remplie de façon homogène sur une section (la température et la vitesse sont uniformes), et la vitesse interstitielle u du fluide est définie par l'éq (2.2).

$$u = \frac{\dot{m}_f}{\varepsilon \cdot \rho_f \cdot A_c} \quad (2.2)$$

où A_c est la section de la cuve de stockage (m^2).

Plusieurs études ont vérifié cette hypothèse d'uniformité radiale en réalisant des mesures de température dans des cuves thermoclines. Pour chaque test, l'hypothèse de l'écoulement piston a été validée, permettant de considérer un comportement monodimensionnel du stockage (74,197,198).

Afin de réduire le temps de calcul, Rebouillat (30) a montré que les propriétés thermophysiques du fluide caloporteur et du solide de garnissage peuvent être considérées constantes à la température moyenne sans trop de pertes de précision.

2.1.1. Modèle monodimensionnel à deux équations de type « Schumann »

Le modèle développé par Schuman (199) est le modèle de référence sur lequel nombre d'auteurs se sont appuyés (74,195,200–205). Ce modèle monodimensionnel considère que les valeurs des

températures, pressions et vitesses sont uniformes dans une section perpendiculaire à l'écoulement. De plus, il modélise séparément le fluide (eq (2.3)) et le solide (eq (2.4)), et permet ainsi de considérer les échanges convectifs entre ces deux phases.

$$\varepsilon \cdot (\rho \cdot c)_f \cdot \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda_{eff,f} \cdot \frac{\partial T_f}{\partial z} \right) + h \cdot a_s \cdot (T_s - T_f) + U \cdot a_c \cdot (T_\infty - T_f) \quad (2.3)$$

$$(1 - \varepsilon) \cdot (\rho \cdot c)_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda_{eff,s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + h \cdot a_s \cdot (T_f - T_s) \quad (2.4)$$

avec ρ_s : masse volumique du solide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),

c_s : capacité thermique massique du solide ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

ρ_f : masse volumique du fluide caloporteur ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),

c_f : capacité thermique massique du fluide caloporteur ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

ε : porosité du garnissage (-),

a_c : surface d'échange externe au fluide ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$),

a_s : surface d'échange externe de solide ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$).

Dans le modèle 1D-2P, les termes à gauche de l'égalité rendent compte de l'évolution de l'énergie interne dans le fluide et le solide, ainsi que **l'advection au sein du fluide**. Le premier terme de droite représente la **diffusion thermique dans le fluide et le solide** à l'aide des conductivités effectives λ_{eff} (cf. eq (2.5) et (2.6)). Le second terme de droite fait intervenir le coefficient de transfert h , qui définit **l'échange convectif entre le lit de solides et le fluide le parcourant**. Enfin, dans l'eq (2.3) interviennent les échanges thermiques entre le fluide et la paroi du réservoir, au travers du coefficient global U , donc les **pertes thermiques par les parois**.

2.1.1.1. Diffusion thermique dans le fluide et le solide

Les conductivités thermiques effectives du fluide, et du solide (206) sont données par :

$$\lambda_{eff,f} = \varepsilon \cdot \lambda_f \quad (2.5)$$

$$\lambda_{eff,s} = (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_s \quad (2.6)$$

2.1.1.2. Échange convectif entre le fluide et le solide

Le terme a_s représente la surface totale des solides par unité de volume ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$). Dans le cas de solides sphériques de diamètre D_s , ou de solides irréguliers ramenés à un diamètre de sphères de volume équivalent $D_{eq,V}$, cette surface est donnée par (207) :

$$a_s = \frac{A_{s,tot}}{V_s} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{D_s \text{ ou } D_{eq,V}} \quad (2.7)$$

Le coefficient de transfert convectif h entre le fluide et le solide s'exprime au travers du nombre de Nusselt Nu , défini pour la longueur caractéristique du solide (208) :

$$Nu = 2 + 1,1 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \quad (2.8)$$

où Re et Pr représentent respectivement les nombres adimensionnels de Reynolds et de Prandtl.

2.1.1.3. Pertes thermiques entre le fluide et l'extérieur

La surface d'échange externe au fluide a_c , s'exprime, pour une cuve cylindrique de diamètre interne D_c , par :

$$a_c = \frac{4}{D_c} \quad (2.9)$$

Des dissipations thermiques vers l'extérieur surviennent durant les différentes phases de fonctionnement du stockage, au travers des parois du réservoir (cf. dernier terme de l'éq (2.3)). Le coefficient global de pertes de chaleur entre le fluide et l'extérieur U est essentiel pour déterminer l'influence de la paroi sur le comportement thermique du stockage, et donc l'épaisseur de l'isolant nécessaire pour éviter trop de pertes thermiques.

$$\frac{1}{U \cdot A_c} = \frac{1}{\alpha_{int} \cdot A_c} + R_{th,cyl} + \frac{1}{\alpha_{ext} \cdot A_{c+isol}} \quad (2.10)$$

$$R_{th,cyl} = \frac{\ln\left(\frac{2 \cdot e_{isol} + D_c}{D_c}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{isol} \cdot L_c} \quad (2.11)$$

où e_{isol} est l'épaisseur de l'isolant (m), D_c et L_c respectivement le diamètre et la hauteur de la cuve (m).

Le coefficient de convection externe α_{ext} est calculé à partir de la corrélation pour une cuve cylindrique exposée à l'environnement extérieur (8). Il est déterminé par l'eq (2.12), en considérant une vitesse de vent de 5 m.s^{-1} pour le calcul de Re_{air} .

$$\alpha_{ext} = \frac{0,644 \cdot Re_{air}^{0,6} \cdot Pr_{air}^{0,5} \cdot \lambda_{air}}{L_c} \quad (2.12)$$

Quant au coefficient de convection interne α_{int} , il peut être calculé à partir du nombre de Nusselt des parois de la cuve Nu_p (209) :

$$Nu_p = \frac{\alpha_{int} \cdot D_s}{\lambda_f} = \left(1 - 1,5 \cdot \left(\frac{D_s}{D_c} \right)^{1,5} \right) \cdot Re^{0,59} \cdot Pr^{1/3} \quad (2.13)$$

2.1.1.4. Pertes de charge

Il est nécessaire de déterminer les pertes de charge ΔP pour connaître les coûts de pompage, qui sont plus importants pour les caloporteurs gazeux que pour des liquides. Ces pertes affectent le rendement global du stockage thermique.

La loi d'Ergun est le modèle de référence pour les déterminer à travers un milieu poreux (210) :

$$\frac{\Delta P}{L_c} = A_E \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu_f \cdot u_{sup}}{D_s^2} + B_E \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_f \cdot u_{sup}^2}{D_s} \quad (2.14)$$

où A_E et B_E sont des constantes empiriques d'Ergun, égales à 150 et 1,75 respectivement, et u_{sup} la vitesse superficielle (ou de débit) définie par :

$$u_{sup} = \frac{\dot{m}_f}{\rho_f A_c} \quad (2.15)$$

Le premier terme à droite de l'eq (2.14) correspond à la [loi de Carman-Kozeny](#) (évolution linéaire de ΔP en fonction de la vitesse superficielle) et le second terme est appelé **terme inertiel** (évolution du ΔP en fonction du carré de la vitesse).

2.1.1.5. Résolution numérique et conditions aux limites

Pour résoudre le champ de température établi au travers des équations du modèle 1D-2P, la méthode des différences finies est utilisée. La discrétisation est réalisée par une formulation centrée premier ordre en espace et discrétisation premier ordre de temps (cf. eq (2.16) à (2.18)). La hauteur de stockage (ou longueur pour une cuve horizontale) est divisée en N volumes de

contrôle, dans lesquels la température de fluide est supposée uniforme. La température au pas de temps « $n + 1$ » dans la maille « i » est ensuite calculée sur la base des températures dans cette maille au temps « n », et des propriétés correspondantes.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2 \cdot \Delta z} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta z^2} \quad (2.18)$$

Les conditions initiales sont une température uniforme imposée en entrée du fluide : $T_{\varphi,i}^{n=1} = T_L$ en charge, et $T_{\varphi,i}^{n=1} = T_H$ en décharge (avec φ la phase considérée, fluide ou solide). Pour les conditions aux frontières, la température du fluide au point d'injection est imposée à chaque instant, et est égale à la température d'alimentation du système : $T_{f,i=1}^n = T_H$ en charge, et $T_{f,i=i_{tot}}^n = T_L$ en décharge. De plus, une condition de dérivée seconde nulle est appliquée sur la température en sortie de cuve pour le fluide et le solide.

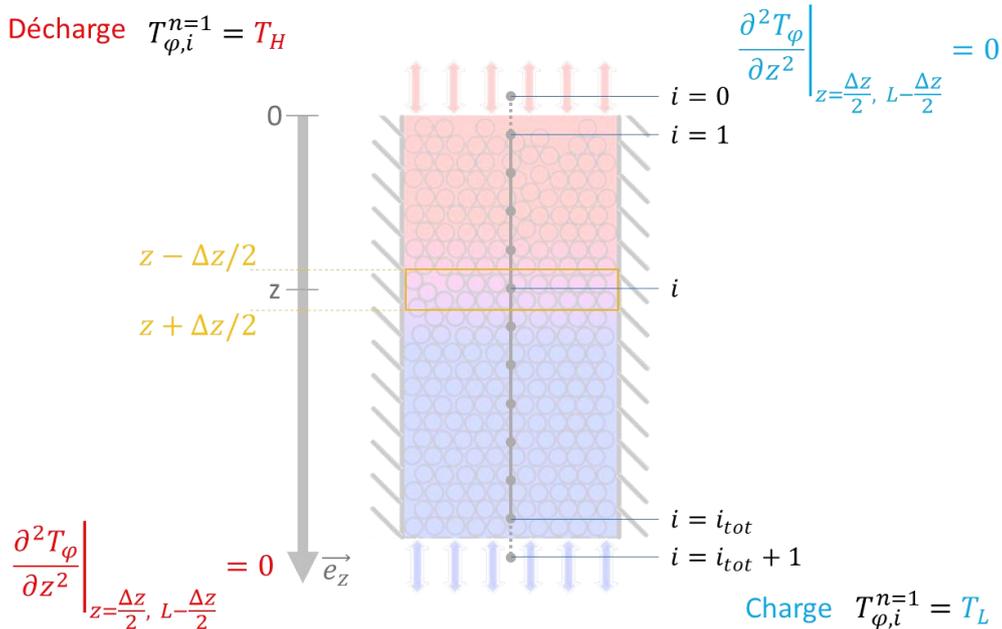


Figure 23 : Maillage du système et conditions aux limites, complété de (194)

2.1.2. Paramètres de description d'une cuve thermocline

Connaissant les différentes équations permettant de modéliser un stockage thermocline, il est possible de décrire le fonctionnement dynamique d'un tel système. Pour cela, il faut définir les sept paramètres suivants (30) :

- **Paramètres physiques** : la porosité ε (-),
la capacité énergétique théorique maximale Q_{theo} (J),
la géométrie de la cuve (longueur L_c , diamètre D_c) et la granulométrie des particules solides (diamètre équivalent D_s).
- **Paramètres opératoires** : les temps de décharge t_{dech} ou de charge t_{ch} cibles (s),
les températures opérationnelle de la cuve : haute T_H et basse T_L (K),
le fluide caloporteur ainsi que le ou les matériaux de garnissage pour connaître les grandeurs thermophysiques des matériaux,
les taux de *cut-off* en charge et en décharge (eq (1.1) et (1.2)).

Plusieurs de ces paramètres sont spécifiés par la source d'énergie valorisée (solaire, chaleur fatale industrielle) et la demande énergétique du procédé aval, comme les températures opérationnelles du système, le temps de cycle et les taux de *cut-off*. Par la suite, le choix du fluide caloporteur (cf. 1.2.3) et du ou des matériaux de garnissage (cf. 1.2.2) est laissé au concepteur du système de stockage.

Ainsi, pour un couple fluide/solide, et une capacité de stockage cible fixée, Rebouillat (30) a montré que seulement deux variables d'optimisation adimensionnelles sont nécessaires pour décrire le comportement dynamique du système, les facteurs de forme interne et externe définis par :

$$F_e = \frac{D_c}{L_c} \quad (2.19)$$

$$F_i = \frac{D_s}{D_c} \quad (2.20)$$

Ces deux facteurs de forme rendent compte de la géométrie de la cuve et de la granulométrie des particules. A partir de ces deux ratios et du volume théorique de la cuve, les dimensions de la cuve thermocline, ainsi que la taille des solides du garnissage peuvent être déterminées.

2.1.3. Indicateurs de performances énergétiques et exergetiques

Comme indiqué dans la section 1.2.8, les performances d'un système peuvent être déterminées selon le premier (énergie) ou second principe (exergie). Les analyses énergétique et exergetique sont réalisées sur un cycle de charge/décharge. Les performances sont alors déterminées lorsque le système a atteint le régime stationnaire périodique.

2.1.3.1. Indicateurs énergétiques

De nombreuses définitions d'efficacité et/ou de rendement énergétique apparaissent dans la littérature, qui se différencient soit par la phase de fonctionnement considérée (charge, décharge ou cyclage), soit par la forme de l'énergie prise en compte : stockée/déstockée dans le TES, fournie/restituée par le fluide caloporteur. Toutes sont issues du bilan transitoire d'énergie appliqué au TES, système ouvert échangeant chaleur (pertes thermiques \dot{q}_p) et matière (HTF) avec l'extérieur. Sur chacune des étapes de charge et de décharge, en supposant un débit massique \dot{m}_f constant pour le HTF, et en négligeant les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle, le bilan transitoire d'énergie s'écrit :

$$\frac{dU_k}{dt} = \dot{q}_{p,k} + \dot{m}_f \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (2.21)$$

où l'indice k indique l'étape concernée ($k = ch$ ou $dech$), h_{in} et h_{out} étant respectivement l'enthalpie spécifique du fluide caloporteur ($J.kg^{-1}$) à l'entrée et à la sortie du TES. En introduisant le flux advectif enthalpique $\dot{H} = \dot{m}_f \cdot (h_{in} - h_{out})$, l'eq (2.22) est obtenue après intégration sur la durée des étapes t_k .

$$\Delta U_k = q_{p,k} + H_k \quad (2.22)$$

avec $\Delta U_k = \int_{t_k} \frac{dU_k}{dt} \cdot dt$: variation d'énergie interne du TES sur la phase k (J),

$q_{p,k} = \int_{t_k} \dot{q}_{p,k} \cdot dt$: énergie thermique perdue pendant la phase k (J),

$H_k = \int_{t_k} \dot{m}_f \cdot (h_{in} - h_{out}) \cdot dt$: énergie échangée entre HTF et TES au cours de la phase k (J).

Toutes ces quantités sont des grandeurs algébriques, dont le signe est donné dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Signe des différentes quantités d'énergie apparaissant dans le 1^{er} principe

	ΔU_k	H_k	$q_{p,k}$
Charge	> 0	> 0	< 0
Décharge	< 0	< 0	< 0

Comme un système de stockage opère intrinsèquement de façon périodique, les variations d'énergie ΔU_{ch} et ΔU_{dech} sont égales et opposées :

$$\Delta U_{ch} = -\Delta U_{dech} = \Delta U \quad (2.23)$$

L'eq (2.24) est alors déduite des eq (2.22) et (2.23) :

$$\begin{aligned} q_{p,ch} + H_{ch} &= -(q_{p,dech} + H_{dech}) \\ \Rightarrow |H_{dech}| &= H_{ch} + q_{p,ch} + q_{p,dech} \end{aligned} \quad (2.24)$$

- **Rendement énergétique :**

Dans la plupart des études disponibles dans la littérature, le rendement énergétique est utilisé pour déterminer les performances du système de stockage. Le rendement global est défini par le rapport entre l'énergie restituée au fluide caloporteur froid lors de la phase de décharge et l'énergie transférée par le fluide caloporteur chaud lors de la phase de charge :

$$\eta_{en} = \frac{|H_{dech}|}{H_{ch}} = \frac{-\int_0^{t_{dech}} \dot{m} \cdot \Delta h \cdot dt}{\int_0^{t_{ch}} \dot{m} \cdot \Delta h \cdot dt} \quad (2.25)$$

où la variation d'enthalpie Δh subie par le fluide caloporteur lorsqu'il traverse le réservoir s'écrit, en faisant l'hypothèse d'un fluide incompressible pour le HTF :

$$\Delta h = c_f \cdot (T_{out} - T_{in}) + \frac{1}{\rho_f} \cdot (P_{out} - P_{in}) \quad (2.26)$$

avec P_{in} et P_{out} : pression en entrée et en sortie de cuve (Pa).

Remarquons que le rendement énergétique ne tient pas compte de la qualité thermodynamique de la chaleur stockée puis récupérée, mais de la qualité de l'isolation thermique de la cuve, puisque d'après les eq (2.24) et (2.25), et en se rappelant que les pertes thermiques sont comptées négativement, le rendement énergétique peut s'écrire :

$$\eta_{en} = 1 - \frac{|q_{p,ch} + q_{p,dech}|}{H_{ch}} \quad (2.27)$$

Certains auteurs définissent également un rendement énergétique de charge (cf. eq (2.28)) et de décharge (cf. eq (2.29)), comparant l'énergie stockée/déstockée dans le TES et l'énergie fournie/extraite par le fluide caloporteur.

$$\eta_{en,ch} = \frac{\Delta U}{H_{ch}} = \frac{\Delta U}{\int_0^{t_{ch}} \dot{m} \cdot \Delta h \cdot dt} \quad (2.28)$$

$$\eta_{en,dech} = \frac{|H_{dech}|}{\Delta U} = \frac{-\int_0^{t_{dech}} \dot{m} \cdot \Delta h \cdot dt}{\Delta U} \quad (2.29)$$

où la variation d'énergie stockée dans la cuve est déterminée par :

$$\Delta U = \int_{L_c} [\varepsilon \cdot (\rho c)_f \cdot (T_{f,1} - T_{f,0}) + (1 - \varepsilon) \cdot (\rho c)_s \cdot (T_{s,1} - T_{s,0})] \cdot A_c \cdot dz \quad (2.30)$$

La détermination de ΔU nécessite la connaissance des profils de température dans le TES, en fin de charge ($T_{f,0}(z)$ et $T_{s,0}(z)$) et de décharge ($T_{f,1}(z)$ et $T_{s,1}(z)$). Elle correspond à l'énergie thermique stockée dans le volume grisé de la Figure 7. Expérimentalement, il est difficile de distinguer les températures du fluide et du solide, et la plupart des auteurs considèrent ces deux températures égales. Numériquement, la distinction reste possible.

Remarquons que le rendement énergétique global peut s'exprimer en fonction des deux rendements en charge (cf. eq (2.28)) et en décharge (cf. eq (2.29)) :

$$\eta_{en} = \eta_{en,ch} \cdot \eta_{en,dech} \quad (2.31)$$

- **Taux d'utilisation énergétique**

Le taux d'utilisation de la cuve représente la fraction de l'énergie théoriquement chargée/déchargée dans le TES qui est réellement chargée/déchargée :

$$\tau_{u,en} = \frac{\Delta U}{\Delta U_{theo}} \quad (2.32)$$

L'énergie théoriquement chargée/déchargée correspond à un cycle théorique dans lequel la totalité du TES est à la température basse T_L en fin de décharge et à la température haute T_H en fin de charge :

$$\Delta U_{theo} = U(T_H) - U(T_L) \quad (2.33)$$

En faisant l'hypothèse d'un solide de garnissage incompressible pour le TESM et d'un fluide incompressible pour le HTF, l'énergie théoriquement stockable peut s'exprimer, d'après (2.30), par :

$$\Delta U_{theo} = V_c \cdot [\varepsilon \cdot (\rho c)_f + (1 - \varepsilon) \cdot (\rho c)_s] (T_H - T_L) \quad (2.34)$$

2.1.3.2. Indicateurs exergetiques

D'une manière analogue au paragraphe 2.1.3.1, le bilan transitoire d'entropie appliqué au stockage thermocline s'écrit :

$$\frac{dS_k}{dt} = \frac{\dot{q}_{p,k}}{T_k} + \dot{m}_f \cdot (s_{in} - s_{out}) + \dot{s}_{irr,k} \quad (2.35)$$

avec s_{in} et s_{out} respectivement l'entropie spécifique du fluide caloporteur ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) à l'entrée et à la sortie du TES, et $\dot{s}_{irr} (> 0)$ la production d'entropie ($W \cdot K^{-1}$). En introduisant le flux entropique $\dot{S} = \dot{m}_f \cdot (s_{in} - s_{out})$, on obtient, après intégration sur la durée des étapes t_k :

$$\Delta S_k = \frac{q_{p,k}}{T_\infty} + S_k + S_{irr,k} \quad (2.36)$$

avec $\Delta S_k = \int_{t_k} \frac{dS_k}{dt} \cdot dt$: variation d'entropie du TES au cours la phase k ($J \cdot K^{-1}$),

$S_k = \int_{t_k} (\dot{m}_f \cdot (s_{in} - s_{out})) \cdot dt$: entropie échangée entre HTF et TES au cours de la phase k ($J \cdot K^{-1}$),

$S_{irr,k} = \oint_{t_k} \dot{s}_{irr} \cdot dt$: production d'entropie du TES ($J \cdot K^{-1}$) de la phase k ,

T_∞ : la température ambiante, extérieure au TES (K).

Le bilan exergetique consiste à remplacer le second principe par une combinaison linéaire des deux principes, permettant en particulier d'éliminer les quantités de chaleur échangée avec l'extérieur : $\frac{dU_k}{dt} + T_\infty \frac{dS_k}{dt} = 0$. Après intégration, on déduit des eq (2.22) et (2.36) :

$$\Delta Ex_k = \Delta U_k - T_\infty \cdot \Delta S_k = Ex_k + Ex_{d,k} \quad (2.37)$$

avec $\Delta Ex_k = \int_{t_k} \frac{dEx_k}{dt} \cdot dt$: variation d'exergie du TES sur la phase k (J),

$Ex_k = \int_0^{t_k} \dot{m}_f \cdot \Delta ex_k \cdot dt$: flux d'exergie échangé entre le TES et le fluide caloporteur sur la phase k (J),

$Ex_{d,k} = T_\infty \cdot S_{irr,k}$: exergie détruite sur la phase k (J).

La variation d'exergie stockée dans la cuve est déterminée par :

$$\begin{aligned} \Delta Ex = \int_{L_c} (1 - \varepsilon) \cdot (\rho c)_s \cdot (T_{s,1} - T_{s,0} - T_\infty \cdot \ln(T_{s,1}/T_{s,0})) \\ + \varepsilon \cdot (\rho c)_f \cdot (T_{f,1} - T_{f,0} - T_\infty \cdot \ln(T_{f,1}/T_{f,0})) \cdot A_c \cdot dz \end{aligned} \quad (2.38)$$

À un instant t donné, la variation d'exergie massique du fluide caloporteur lors de la traversée de la cuve Δex (J.kg^{-1}) s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta ex_k &= (\Delta h_k - T_\infty \cdot \Delta s_k) \\ &= \left(c_f \cdot (T_{out} - T_{in} - T_\infty \cdot \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right)) + \frac{1}{\rho_f} \cdot (P_{out} - P_{in}) \right) \end{aligned} \quad (2.39)$$

- **Rendement exergetique**

D'une manière analogue au rendement énergétique, le rendement exergetique est défini comme le rapport entre l'exergie restituée au fluide caloporteur froid lors de la phase de décharge et l'exergie transférée par le fluide caloporteur chaud lors de la phase de charge.

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{dech}}{Ex_{ch}} = \frac{-\int_0^{t_{dech}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt}{\int_0^{t_{ch}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt} \quad (2.40)$$

Certains auteurs définissent également un rendement exergetique de charge (cf. eq (2.41)) et de décharge (cf. eq (2.42)), à partir de l'exergie stockée dans tout le réservoir (J.kg^{-1}).

$$\eta_{ex,ch} = \frac{\Delta Ex}{Ex_{ch}} = \frac{\Delta Ex}{\int_0^{t_{ch}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt} \quad (2.41)$$

$$\eta_{ex,dech} = \frac{Ex_{dech}}{\Delta Ex} = \frac{-\int_0^{t_{dech}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt}{\Delta Ex} \quad (2.42)$$

- **Taux d'utilisation exergetique**

Comme pour le taux d'utilisation énergétique, le taux d'utilisation exergetique représente la fraction de volume réellement chargée/déchargée dans le stockage thermocline du point de vue de l'exergie. Il s'exprime par :

$$\tau_{u,ex} = \frac{\Delta Ex}{\Delta Ex_{theo}} = \frac{\Delta U - T_\infty \cdot \Delta S}{\Delta U_{theo} - T_\infty \cdot \Delta S_{theo}} \quad (2.43)$$

où ΔS correspond au changement réel d'entropie du système, qui peut être déduit de la variation de l'énergie interne ΔU , de la pression et des profils de température obtenus au début et à la fin d'un cycle :

$$\Delta S = S_{fin} - S_{init} \quad (2.44)$$

L'exergie théoriquement chargée/déchargée ΔEx_{theo} (J.kg^{-1}) correspond à un cycle théorique, dans lequel la totalité du TES est à la température basse en fin de décharge, et à la température haute en fin de charge :

$$\Delta Ex_{theo} = Ex(T_H) - Ex(T_L) \quad (2.45)$$

En émettant les mêmes hypothèses que pour le rendement énergétique, l'exergie théoriquement stockable peut s'exprimer par :

$$\Delta Ex_{theo} = V_c \cdot [\varepsilon \cdot (\rho c)_f + (1 - \varepsilon) \cdot (\rho c)_s] \left[T_H - T_L - T_\infty \cdot \ln \left(\frac{T_H}{T_L} \right) \right] \quad (2.46)$$

2.1.4. Application du modèle physique sur l'Eco-Stock®

Le stockage thermocline industriel Eco-Stock® (cf. Figure 24a), développé et commercialisé par Eco-Tech Ceram¹, permet d'illustrer les différentes notions abordées dans ce chapitre, et sera par la suite optimisé dans les CHAPITRE 3 et CHAPITRE 4.

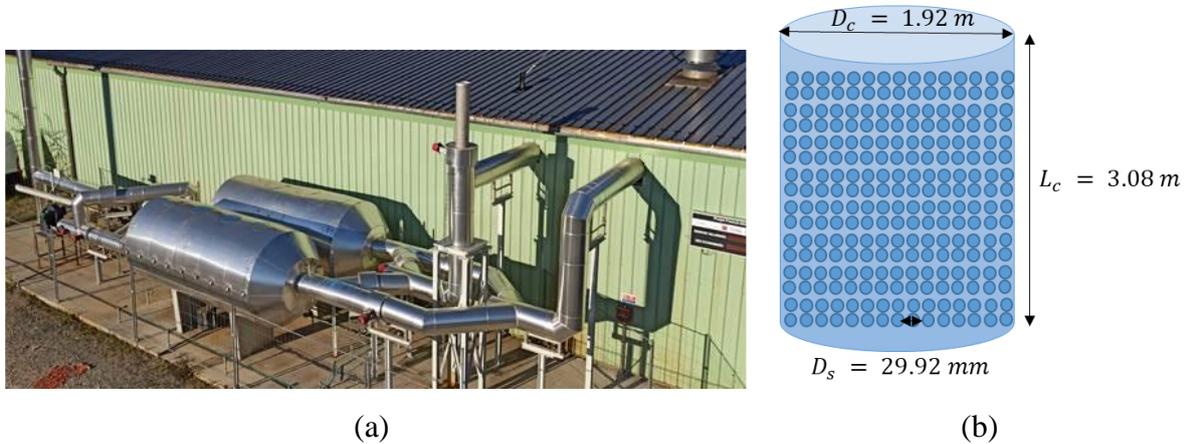


Figure 24 : Installation industrielle (a) (90), Dimensions (b) de l'Eco-Stock®

L'Eco-Stock® permet de valoriser les chaleurs fatales jusqu'à 600°C, et produit 1567 kWh_{th}/cycle d'énergie (et 707 kWh/cycle d'exergie). Il utilise de l'air comme fluide caloporteur et de la bauxite comme solide de garnissage. Leurs propriétés thermophysiques sont évaluées à la moyenne des températures opérationnelles (310°C). Le Tableau 12 présente les différents paramètres de conception de ce stockage et ses dimensions sont illustrées sur la Figure 24b (90).

Tableau 12 : Spécifications de la cuve thermocline industrielle Eco-Stock® (90)

Capacité énergétique théorique maximale Q_{theo}	$10^{10} J$
Temps cibles de charge ou t_{ch} ou de décharge t_{dech}	7,05 h

¹ <https://www.ecotechceram.com/>

Porosité ϵ	40 %
Température chaude T_H	600°C
Température basse T_L	20°C
Température ambiante T_∞	15°C
Taux de cut-off $\tau_{cut-off}$	20 %
Diamètre de cuve D_c	1,92 m
Longueur de cuve L_c	3,08 m
Diamètre des solides D_s	29,9 mm
Propriétés thermophysiques du fluide caloporteur (air)	$c_f = 1047,6 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
	$\rho_f = 0,595 kg \cdot m^{-3}$
	$\lambda_f = 0,045 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
	$\mu_f = 2,1 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$
Propriétés thermophysiques du solide de garnissage (bauxite)	$c_s = 1076 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
	$\rho_s = 3005 g \cdot m^{-3}$
	$\lambda_s = 3,982 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Le modèle physique est appliqué sur l'Eco-Stock® afin de simuler des cycles de charge/décharge successifs. La Figure 25a présente les profils limites de température à la fin de la charge et de la décharge pour six cycles successifs. Les profils en pointillés donnent l'évolution de la température au sein des particules solides, alors que les profils en trait plein correspondent à ceux du fluide caloporteur. Comme indiqué précédemment, les températures des phases liquide et solide peuvent se distinguer numériquement. En effet, les profils en trait plein (fluide) et pointillés (solide) ne sont pas totalement superposés. Cette différence est négligeable : c'est pourquoi expérimentalement les températures de ces deux phases sont considérées égales. En commençant par une décharge complète (cycle 1), les profils de température deviennent de moins en moins pentus, cycle après cycle, impliquant un épaississement de la zone thermocline et donc une diminution de l'énergie thermique entrant et sortant du réservoir (cf. Figure 25b). Un régime stationnaire périodique est atteint après six cycles de charge/décharge, avec un temps de cycle de 8,3 h. Les performances du stockage sont évaluées à partir de ce cycle.

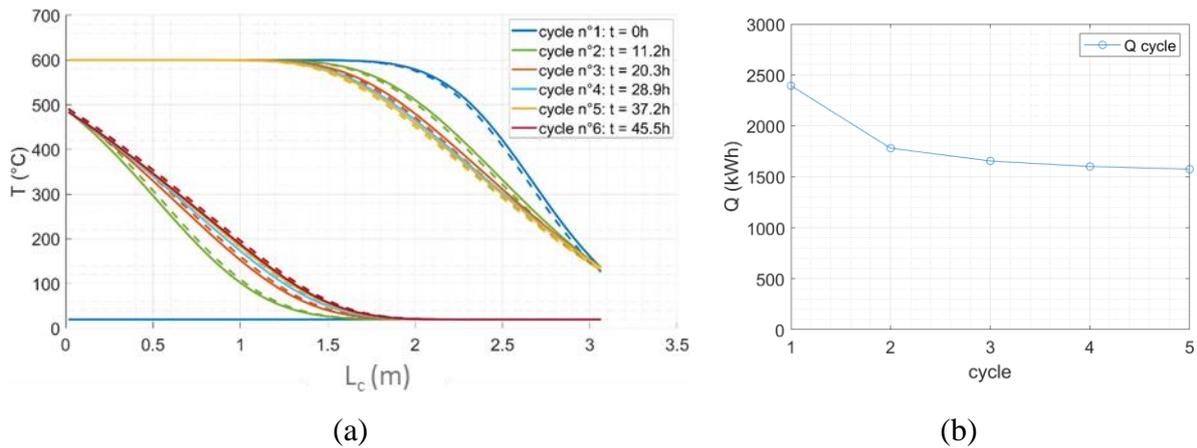


Figure 25 : Profils limites de température (a), Énergie interne (b) de l'Eco-Stock®

Les performances physiques sont très élevées avec un rendement exergetique de 95,5 %. Le rendement énergétique est légèrement inférieur à l'unité (99,5 %) car le stockage n'est pas totalement isolé aux extrémités. Des pertes apparaissent donc en entrée et sortie de cuve, diminuant le rendement énergétique malgré l'hypothèse faite d'aucune perte thermique par les parois latérales. Les taux d'utilisation énergétique et exergetique sont, quant à eux, très proches : 56,3 et 56,8 % respectivement.

2.2. Modèle environnemental

L'ACV (Analyse du Cycle de Vie) est réalisée à la suite de l'analyse exergetique. Les performances du système étudié et les propriétés de cyclage sont nécessaires pour calculer l'impact environnemental du produit. La méthode *mid-point* 2016 ILCD est utilisée pour calculer les indicateurs environnementaux, à l'aide de la base de données EcoInvent v3.7.1² et du logiciel OpenLCA v1.10³.

2.2.1. Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle choisie permet de comparer équitablement le stockage thermocline de référence (désigné par l'indice ref), qui existe actuellement, avec celui qui sera optimisé dans la suite (désigné par l'exposant *). Selon le type de valorisation faite en sortie de stockage, le

² <https://www.ecoinvent.org/>

³ <https://www.openlca.org/>

même service rendu pendant une période donnée change (cf. section 2.4.3). Dans le cas d'une valorisation sous forme de chaleur (*heat-to-heat*), l'unité fonctionnelle est :

« Fournir une énergie thermique restituée égale à celle de la cuve de référence ($(Q_{dech})^* = (Q_{dech})_{ref}$), pendant sa durée de vie (25 ans), en considérant 2 cycles par jour et 15 jours d'arrêt par an pour la maintenance. »

Une opération de maintenance est incluse : il s'agit d'une opération de précaution arbitrairement imposée dans le cadre de cette étude pour dérisquer l'hypothèse de durée de vie.

2.2.2. Périmètre de l'étude

Le périmètre considéré dans cette étude est l'analyse « du berceau à la tombe » (cf. Figure 26). Il comprend toutes les étapes allant de l'extraction des matières premières à la fin de vie et le démantèlement du stockage thermocline, en passant par la fabrication, le transport, la construction et l'utilisation. Toute les entrées et sorties de matériaux et d'énergies, vers et depuis le TES, tout au long de son cycle de vie, sont prises en compte.

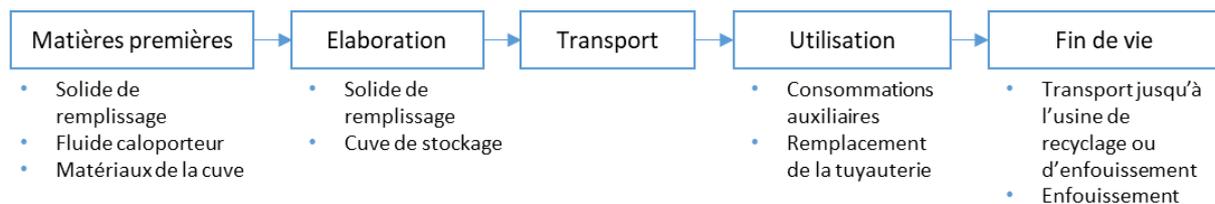


Figure 26 : Périmètre du « berceau à la tombe »

L'étape de production (matières premières et élaboration) comprend le transport des matériaux vers le site de production. Le périmètre du système se termine par la mise en décharge ou le transport des déchets recyclés jusqu'à la porte de l'usine de recyclage. La base de données EcoInvent v3.7.1 est utilisée pour déterminer les différents flux de matières. Le mix énergétique considéré correspond à celui du pays où est installé le stockage thermocline.

L'inventaire des différentes phases du cycle de vie est proportionnel aux variables d'optimisation. Si les dimensions du réservoir et/ou le fluide ou le matériau de remplissage changent, la quantité de matières premières et les pertes de charge évoluent également.

2.2.3. Indicateurs environnementaux

Avant de réaliser l'ACV, il est nécessaire de définir les différents indicateurs qui seront utilisés. Comme spécifié dans le paragraphe 1.3.1.3, quatre indicateurs sont privilégiés :

- Le potentiel de réchauffement climatique (GWP : *Global Warming Potential*),
- La demande énergétique cumulée (CED : *Cumulative Energy Demand*),
- La déplétion des ressources abiotiques (ADP : *Abiotic Depletion Potential*),
- L'émission de particules respiratoires (PM : *Particulate Matter*).

Chaque indicateur représente une catégorie d'impact qui évalue les effets sur le changement climatique (GWP), l'énergie (CED), la déplétion des ressources (ADP) et la santé humaine (PM). Pour comparer l'importance relative de chaque indicateur, il est nécessaire de les normaliser selon les coefficients de l'ILCD, donnés dans le Tableau 9. Cette normalisation donne les impacts environnementaux du système en habitant équivalent sur une année (211). L'ajout de ces indicateurs normalisés donne l'empreinte environnementale totale du TES considéré :

$$ACV = GWP_{norm} + CED_{norm} + ADP_{norm} + PM_{norm} \quad (2.47)$$

où $Indicateur_{norm}$ correspond à l'indicateur normalisé selon l'ILCD (hab.an).

En plus de ces indicateurs environnementaux, il peut être intéressant de définir le temps de retour environnemental (PBT : *PayBack Time*) et le taux de retour énergétique (EROI : *Energy Return On Investment*).

2.2.3.1. Temps de retour environnemental

Au cours de sa vie, un système acquiert une dette écologique. Le PBT permet de définir le nombre d'années qu'il faut pour amortir les impacts environnementaux du produit considéré. En d'autres termes, cet indicateur vérifie si le bénéfice environnemental du produit permet de « rembourser » cette dette écologique, durant la durée de vie du système ($N = 25$ ans pour les TES). Il est déterminé pour chaque indicateur en ACV considéré (127,212) :

$$PBT = \frac{Indicateur_{tot} - Indicateur_{utilisation}}{Indicateur_{MWh\ conventionnel} \cdot H - \frac{Indicateur_{utilisation}}{N}} \quad (2.48)$$

où $Indicateur$ est l'indicateur de l'impact environnemental considéré, $Indicateur_{utilisation}$ donne la valeur de cet indicateur durant l'étape d'utilisation du cycle de vie du TES et H

correspond à la production annuelle de chaleur (en MWh_{th}/an). Dans cette étude, la production de chaleur se substitue au gaz naturel. Par conséquent, $Indicateur_{MWh\ conventionnel}$ représente l'indicateur environnemental du gaz naturel brûlé dans un four industriel.

2.2.3.2. Taux de retour énergétique

L'EROI traduit l'effort nécessaire pour que l'énergie consommée par l'utilisateur soit « remboursée ». C'est le ratio entre l'énergie produite à partir d'une source d'énergie et l'énergie consommée lors de la livraison (213) :

$$EROI = \frac{H \cdot N}{CED_{tot}} \quad (2.49)$$

Cet indicateur est très utile pour juger la viabilité énergétique d'un système : si la part d'énergie rendue à la société est trop faible devant celle investie pour aller la chercher, alors le système n'est pas viable. Cependant, contrairement à l'ACV, le périmètre de l'EROI n'inclut pas l'épuisement des ressources, comme le montre la Figure 27 avec l'exemple du pétrole.

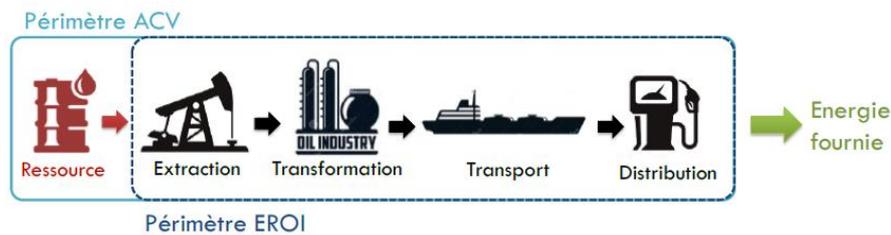


Figure 27 : Différence des périmètres d'analyse pour les calculs d'ACV et de EROI – Exemple du pétrole (127)

Ces deux indicateurs permettent de déterminer si le système étudié est rentable du point de vue environnemental (PBT) ainsi que du point de vue énergétique (EROI).

2.2.4. Application du modèle environnemental sur l'Eco-Stock®

La cuve Eco-Stock® est utilisée en France. Le mix énergétique français (électricité et gaz) est donc considéré pour déterminer l'impact environnemental du système. Lors de la phase d'utilisation, pour s'assurer une bonne maintenance du système, le cuve de stockage est en arrêt 15 jours par an et en repos une heure par jour, comme spécifiée par l'unité fonctionnelle.

L'inventaire du cycle de vie est basé sur les travaux de Lalau *et al.* (127,212). Chaque composant de la cuve de stockage Eco-Stock® est assemblé sur site. Les impacts associés à cet assemblage sont considérés comme suffisamment négligeables. Durant la phase d'utilisation de l'Eco-Stock®, de l'air étant utilisé comme fluide caloporteur, un ventilateur est employé pour disséminer l'air au travers du lit de particules solides. Sa consommation est fonction de la durée d'utilisation et de sa puissance pour vaincre les pertes de charges proportionnelles à $\frac{L_c}{D_c^2}$ et $\frac{1}{D_c^3}$. Une armoire électrique est également installée. De plus, l'ensemble de la tuyauterie est remplacé au bout de 15 ans d'opération pour garantir une durée de vie de 25 ans au système (127,212). En fin de vie, une partie des matériaux est recyclée et l'autre est enfouie. Dans le cas d'un recyclage, les matériaux sont acheminés jusqu'au centre de traitement puis plus aucun impact ni gain environnemental n'est considéré. Les billes sont entièrement recyclées (127,212).

Les quatre indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie sont représentés sur la Figure 28 pour la cuve de référence Eco-Stock®. La courbe verte présente les valeurs des quatre mêmes indicateurs pour la combustion du gaz naturel (réseau français) dans un four de cuisson industriel pour la même quantité d'énergie fournie sur 25 ans (27 422 MWh_{th}). L'impact total du gaz naturel est 25 fois plus élevé que celui de l'Eco-Stock®, car les indicateurs GWP et CED sont 134 et 95 fois supérieurs. L'indicateur PM est 8 fois plus grand alors que l'ADP est légèrement plus grand pour le gaz naturel. Concernant l'Eco-Stock®, l'indicateur ADP est le plus impactant, avec plus de 60 % de l'impact total, qui s'élève à 67 hab.an. En effet, beaucoup de ressources sont nécessaires pour élaborer la cuve de stockage. Les phases d'élaboration des billes de garnissage et d'utilisation du stockage représentent en moyenne 20 % de l'impact total, puisque beaucoup d'énergie (électricité et/ou gaz) est consommée (cf. section 3.1.3). Finalement, l'utilisation de l'Eco-Stock® permet d'éviter l'impact environnemental de 1 622 hab.an.

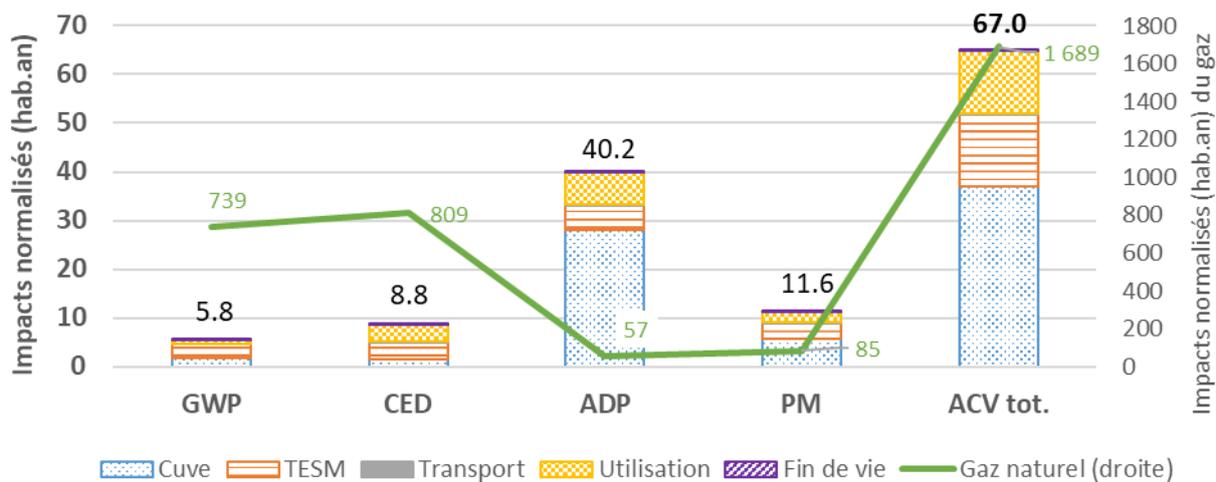


Figure 28 : Comparaison des indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie de l'Eco-Stock® et de ceux issus de la combustion du gaz naturel dans un four industriel en France

D'après l'unité fonctionnelle, l'Eco-Stock® produit chaque année 1 097 MWh_{th} d'énergie. A partir de cette valeur, les PBT et l'EROI peuvent être déterminés (cf. Figure 29) pour vérifier que le bénéfice environnemental apporté par l'Eco-Stock® permette de « rembourser » les dettes écologique et énergétique. Etant donné que l'indicateur de la déplétion des ressources est le plus impactant environnementalement, son PBT est également le plus élevé, avec près de 17 ans. Concernant l'émission de particules, le PBT est aux alentours de 3 ans. Les temps de retour des indicateurs CED et GWP sont très faibles, avec environ 3 mois. Ces temps demeurent inférieurs à la durée de vie du système, ce qui signifie que la dette écologique contractée par l'Eco-Stock® est remboursée.

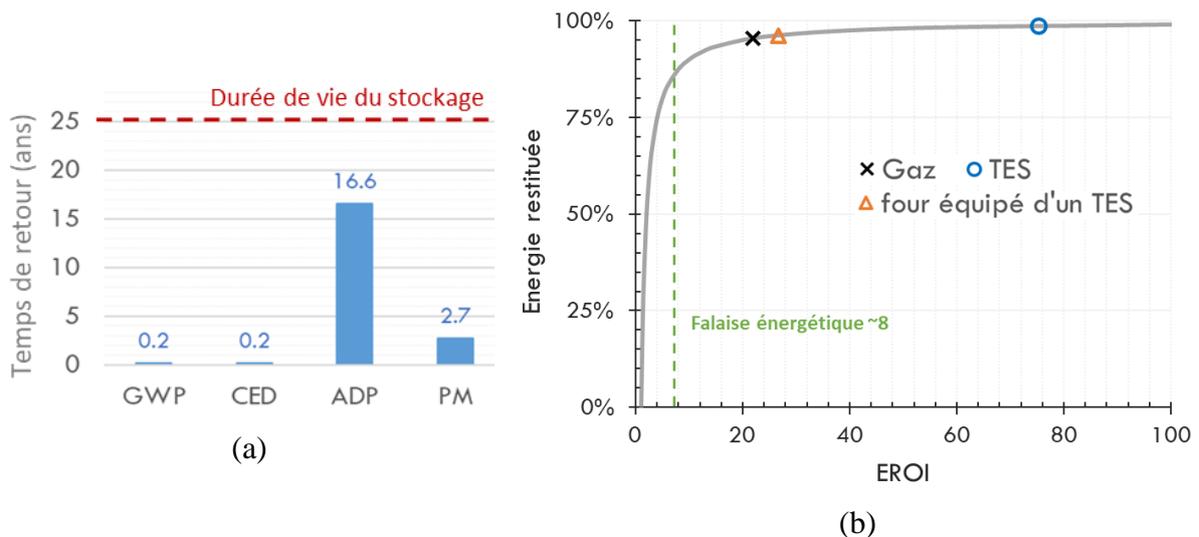


Figure 29 : Temps de retour des différents indicateurs environnementaux (par rapport à une chaleur issue du gaz naturel) (a), Énergie fournie par un four traditionnel, valorisée par l'Eco-Stock® ou par un four équipé d'un Eco-Stock® (b)

Le dernier indicateur environnemental calculé pour la cuve de référence Eco-Stock® est l'EROI (cf. Figure 29b). Deux configurations sont comparées à la chaleur issue du gaz naturel (croix noire) : énergie valorisée par l'Eco-Stock® seulement (rond bleu) et énergie restituée par un four équipé d'un Eco-Stock® (triangle orange) (cf. Figure 27). L'EROI de ces deux configurations est supérieur à celui du gaz naturel. L'intégration d'un Eco-Stock® à un four de cuisson conventionnel permet d'améliorer l'EROI de la chaleur fournie de 20 %. L'EROI de l'Eco-Stock® seul est quant à lui très élevé. Ces deux valeurs sont suffisamment loin de la « falaise énergétique » pour assurer la rentabilité énergétique de la chaleur fournie. Pour comprendre ce concept, l'exemple simple suivant expose le principe de l'énergie restituée à la société. Si l'EROI du pétrole vaut 100, il faut dépenser un baril pour en récupérer 100. Si l'EROI vaut 2, cela signifie que 2 barils sont obtenus pour en utiliser 1. La part d'énergie fournie à la société passe donc de 99 % dans le premier cas, à 50 % dans le second. Cette diminution n'est pas linéaire, comme l'illustre la Figure 29b (courbe grise). En effet, une variation de l'EROI supérieure à 20 est peu perceptible alors qu'en-dessous d'un EROI de 8, la variation est critique.

2.3. Modèle économique

L'ACC (Analyse des Coûts du Cycle de vie) s'effectue à la suite du calcul des performances exergétiques et environnementales. En effet, pour déterminer les coûts du système de stockage

thermocline étudié, il est nécessaire de connaître les dimensions de la cuve ainsi que les quantités de matériaux utilisés, et la consommation énergétique de la phase d'utilisation. Avant de définir les différents coûts intervenant dans l'ACC, les indicateurs de performances doivent être définis.

2.3.1. Indicateurs économiques

Trois indicateurs économiques sont considérés dans cette étude : le Coût du Cycle de Vie (CCV), la Valeur Actualisée Nette (VAN) et le coût actualisé de l'énergie (LCOE).

2.3.1.1. Coût du cycle de vie

Le CCV représente le montant total des coûts impliqués pendant la durée de vie d'un projet (214) :

$$CCV = C_I + C_M + C_O + C_R - C_{Res} + C_D \quad (2.50)$$

où C_I , C_M , C_O , C_R et C_D sont respectivement les coûts d'investissement, de maintenance, d'opération, de remplacement et de démantèlement, et C_{Res} , la valeur résiduelle du système. Tous les coûts inclus dans la définition du CCV sont détaillés dans les paragraphes suivants.

2.3.1.2. Valeur actualisée nette

La VAN correspond à la somme des différents flux financiers CF considérés à la valeur actualisée qu'ils auraient à la date de début du projet (152) :

$$VAN = \sum_{j=1}^N \frac{CF_j}{(1+a^*)^j} - C_D + C_{Res} = I \cdot US_f(N, a^*) - CCV \quad (2.51)$$

où I représente les revenus annuels du TES (en €/an). Pour qu'un investissement soit rentable, la VAN doit être positive à la fin du cycle de vie du produit et plus elle est grande, meilleure est la rentabilité du système. Le facteur d'actualisation US_f (*Uniform Series factor*) permet de sommer et d'actualiser les revenus annuels sur la durée de vie (N années) du système, selon le taux d'intérêt a et le taux d'inflation i . Il est défini par (152,215) :

$$US_f(N, a^*) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{1+i}{1+a} \right)^j = \frac{(1+a^*)^N - 1}{a^* \cdot (1+a^*)^N} \quad (2.52)$$

où a^* est le taux d'intérêt réel, déduit de l'équation de Fisher :

$$1 + a^* = \frac{1 + a}{1 + i} \quad (2.53)$$

2.3.1.3. Coût actualisé de l'énergie

Connaissant le CCV et la VAN, le LCOE peut être déterminé. Par définition, c'est le prix de vente minimal de l'énergie produite qui permet d'être à l'équilibre financier sur la durée de vie du projet. En reprenant l'éq (2.51), le LCOE correspond au prix de vente de l'énergie qui annule la VAN. Cet indicateur peut également s'exprimer à partir du CCV (eq (2.50)) :

$$LCOE = \frac{CCV}{US_f(N, a^*) \cdot H} \quad (2.54)$$

où H correspond à la production annuelle de chaleur (en kWh_{th}/an).

D'autres indicateurs économiques peuvent être utilisés : le taux de rentabilité interne, le temps de retour actualisé et le temps de retour conventionnel. Le premier correspond au taux d'actualisation réel qui annule la VAN, le second indicateur correspond au temps qui annule la VAN pour le taux d'actualisation réel et le dernier correspond au temps qui annule la VAN pour le taux d'intérêt uniquement (sans tenir compte de l'inflation). Plus le taux de rentabilité interne est élevé et les temps de retour sont faibles, meilleur est l'investissement.

2.3.2. Méthode de la valeur actualisée nette

La méthode du calcul de la valeur actualisée nette est choisie pour réaliser l'ACC. Six différents coûts sont considérés dans ce modèle économique : investissement, maintenance, opération, remplacement, démantèlement et valeur résiduelle du système (214).

2.3.2.1. Évaluation des coûts

Les coûts d'investissement tiennent compte des coûts des principaux équipements, d'installation, d'ingénierie et des aléas. Pour un stockage thermique de type thermocline, quatre principaux équipements sont pris en compte : le **réservoir**, **l'isolation**, les **matériaux** et le **ventilateur** (45,216–218). Le coût du réservoir de stockage est défini par :

$$C_c = 557.5 \cdot \left(\frac{V_c}{0,0038} \right)^{0.512} \cdot f_{mat} \cdot f_{M\&S(2021,1998)} \quad (2.55)$$

avec f_{mat} , le facteur de correction lié au matériau de la cuve (–), de l'acier inoxydable 310S (217),

$f_{M\&S}$, l'indice de Marshall & Swift (–) qui permet d'actualiser les coûts en fonction de l'inflation, le facteur de correction f_{mat} étant déterminé en 1998 (216).

Le **coût d'isolation** est évalué avec une expression similaire, en fonction du volume de matériau isolant V_{isol} (45,216) :

$$C_{isol} = C_{ref,isol} \cdot V_{isol} \cdot f_{M\&S(2021,1985)} \quad (2.56)$$

avec $C_{ref,isol}$, le coût spécifique de référence de l'isolant ($\text{€}/\text{m}^3$) (218),

$f_{M\&S}$, l'indice de Marshall & Swift (–), le coût spécifique de l'isolant $C_{ref,isol}$ étant défini en 1985,

V_{isol} , le volume de la couche d'isolation (m^3).

Le volume d'isolation dépend de la longueur et du diamètre du réservoir et de l'épaisseur de la couche d'isolation e_{isol} :

$$V_{isol} = \left(\frac{\pi(e_{isol}^2 + 2 \cdot D_c \cdot e_{isol})}{4} \right) L_c + 2 \left(\frac{\pi(D_c + 2 \cdot e_{isol})^2}{4} e_{isol} \right) \quad (2.57)$$

Le coût du matériel dépend du **matériau de garnissage** utilisé et du volume de la cuve :

$$C_s = C_{ref,s} \cdot m_s = C_{ref,s} \cdot \rho_s \cdot V_s = C_{ref,s} \cdot \rho_s \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot \frac{D_c^2}{4} \cdot L_c \quad (2.58)$$

avec $C_{ref,s}$, le coût spécifique de référence du matériau de remplissage ($\text{€}/\text{kg}$),

m_s , la masse du matériau de garnissage (kg).

Le dernier équipement principal dépend de la cuve de référence considérée. Si le fluide caloporteur est un gaz, un ventilateur est utilisé pour le disséminer dans le réservoir. Si c'est un liquide, une pompe est préférée. Dans le cas de la cuve de référence Eco-Stock®, un **ventilateur** est employé. Son coût est déterminé à partir des pertes de charge et du débit volumique \dot{v} :

$$C_{circ} = 10^{(3,5391 - 0,3533 \cdot \log(\dot{v}_f) + 0,4477 \cdot (\log(\dot{v}_f))^2)} \cdot f_{\Delta P,circ} \cdot f_{mat} \cdot f_{M\&S(2021,2001)} \quad (2.59)$$

avec f_{mat} , le facteur de correction lié au matériau du ventilateur (–), de l'acier inoxydable 310S (217),

$f_{M\&S}$, l'indice de Marshall & Swift (–), les facteurs de correction étant définis en 2001,

$f_{\Delta P, circ}$, le facteur de correction du ventilateur lié aux pertes de charge (–) (cf. eq (2.60)) (45,217),

$$\begin{aligned} f_{\Delta P, circ} &= 10^{(0,20899 \cdot \log(\Delta P) - 0,0328 \cdot (\log(\Delta P))^2)} && \text{pour } 1 < \Delta P < 16 \text{ kPa} \\ f_{\Delta P, circ} &= 1 && \text{pour } \Delta P < 1 \text{ kPa} \end{aligned} \quad (2.60)$$

avec ΔP , en kPa (217).

L'indice de Marshall & Swift permet d'actualiser les coûts en tenant compte de l'inflation, puisque les équations (2.55) à (2.60) ont été définies en 1985 et 1998. Cet indice, publié chaque année dans la revue Chemical Engineering, est donné dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Valeurs des indices de Marshall & Swift utilisés dans l'étude économique

<i>Années</i>	<i>Index de Marshall & Swift</i>
1985	787.9
1991	930.6
1998	1061.8
2001	1094.5
2021	1773.4

Le facteur de Marshall & Swift s'exprime par :

$$f_{M\&S(2021,X)} = \frac{f_{M\&S(2021)}}{f_{M\&S(X)}} \quad (2.61)$$

avec $f_{M\&S(X)}$ l'indice de Marshall & Swift de l'année X (cf. Tableau 13).

Les coûts d'installation sont généralement inclus entre 25 et 55 % du coût des équipements (219). Le système étudié n'étant pas de grande ampleur, la valeur de 25 % sera retenue pour la suite de cette étude.

$$C_{inst} = 0,25 \cdot \sum C_{eqp} = 0,25 \cdot (C_c + C_{isol} + C_s + C_{circ}) \quad (2.62)$$

Les coûts d'ingénierie (cf. eq (2.63)) et des imprévus (cf. eq (2.64)) sont définis comme une majoration des coûts des équipement et d'installation. Les budgéter permet de couvrir des imprévus qui surviendraient durant la phase de conception du stockage (45,216).

$$C_{ing} = 0,05 \cdot \left(\sum C_{eqp} + C_{inst} \right) \quad (2.63)$$

$$C_{aleas} = 0,1 \cdot \left(\sum C_{eqp} + C_{inst} \right) \quad (2.64)$$

Les coûts d'investissement correspondent ainsi à la somme des différents coûts présentés dans les eq (2.55) à (2.64) : **réservoir**, **isolant**, **matériau**, **circulation** (ventilateur pour l'Eco-Stock®), installation, ingénierie et aléas.

$$C_I = C_c + C_{isol} + C_s + C_{circ} + C_{inst} + C_{ing} + C_{aleas} \quad (2.65)$$

Les coûts annuels de maintenance représentent généralement un pourcentage (entre 2 et 5 %) des coûts d'investissement (cf. eq (2.66)). Dans cette étude, le stockage thermocline étant une technologie peu mature, un pourcentage de 4 % sera considéré (219). Ce coût est estimé à l'année 0 et doit donc être actualisé pour chaque année j en fonction du taux d'intérêt réel. Sur la durée de vie de l'installation, les coûts totaux de maintenance sont déterminés par :

$$C_M = 0,04 \cdot C_I \cdot US_f(N, a^*) \quad (2.66)$$

Les coûts annuels d'opération correspondent à l'énergie électrique consommée annuellement par les auxiliaires : l'armoire électrique et le ventilateur pour l'Eco-Stock®. L'énergie de pompage E_{circ} s'exprime par cycle à partir du modèle physique (cf. eq (2.67)) et l'énergie de l'armoire électrique $E_{arm e}$ est de 0,2 kWh/cycle.

$$E_{circ} = t_{cycle} \cdot n_{cycle} \cdot W_{circ} = t_{cycle} \cdot n_{cycle} \cdot \frac{\dot{m}_f \cdot \Delta P}{\eta_{circ}} \quad (2.67)$$

avec η_{circ} , l'efficacité du ventilateur (77 %), W_{circ} , la puissance du ventilateur (kW) et n_{cycle} , le nombre de cycle effectué par jour.

Après actualisation et sommation sur la durée de vie de l'installation, les coûts totaux d'opération s'expriment par :

$$C_O = (E_{circ} + E_{arm e}) \cdot n_{cycle} \cdot N \cdot P_e \cdot US_f(N, a^*) \quad (2.68)$$

avec P_e , le prix de l'électricité (€/kWh_e).

Les coûts de remplacement (ou coûts périodiques) correspondent aux prix des différents composants remplacés durant la durée de vie du système, actualisés à l'année de remplacement (214). Pour un stockage de type thermocline, toute la tuyauterie et les gaines sont remplacées après 15 ans d'utilisation.

$$C_R = \sum \left(Nbre_j \cdot C_j \cdot \sum_{t=1}^{r_j} \left(\frac{1}{1+a^*} \right)^{t \cdot N_j} \right) \quad (2.69)$$

où $Nbre_j$ est le nombre d'équipement j , C_j le coût unitaire de l'équipement j , r_j le nombre de remplacement de l'équipement j (cf. eq (2.70)) et N_j la durée de vie de l'équipement j .

$$r_j = \text{entier} \left(\frac{N-1}{N_j} \right) \quad (2.70)$$

On peut montrer que le coût C_R peut s'exprimer plus simplement en fonction du facteur de série uniforme US_f (152) :

$$C_R = \sum (Nbre_j \cdot C_j \cdot US_f(r_j \cdot N_j, a_{Rj})) \quad (2.71)$$

où a_{Rj} est le taux d'intérêt réel, corrigé pour les coûts de remplacement de l'équipement j :

$$1 + a_{Rj} = \frac{(1+a)^{N_j}}{(1+i)^{N_j-1}} \quad (2.72)$$

La valeur résiduelle de l'équipement à la fin du projet correspond à la somme de la valeur résiduelle de chaque composant du système. **Le coût de démantèlement** du système est supposé égal à ce coût (214).

$$C_{Res} = \sum \left(\frac{N - (N_j \cdot r_j)}{N_j} \cdot Nbre_j \cdot C_j \cdot \frac{1}{(1+a^*)^N} \right) = C_D \quad (2.73)$$

2.3.2.2. Évaluation des revenus

Le revenu induit par un TES thermocline correspond à la vente de chaleur. C'est le produit de la production annuelle de chaleur (H en kWh_{th}/an) par le prix de vente de la chaleur (P_{th} en €/kWh_{th}) :

$$I = H \cdot P_{th} \quad (2.74)$$

où P_{th} est considéré égal au prix du gaz naturel. Selon l'Eco-Stock® (cf. section 2.1.4) et l'unité fonctionnelle définie en ACV (cf. section 2.2.1), l'énergie déchargée est constante pour chaque cycle et égale à 1 567 kWh_{th}, soit une production de chaleur annuelle de 1 097 MWh_{th}. Par conséquent, pour maximiser la VAN et minimiser le LCOE, le CCV doit être minimisé (152).

Le Tableau 14 donne les paramètres économiques, les facteurs de correction considérés dans les coûts d'investissement, et les autres paramètres utilisés dans l'ACC. Deux facteurs de correction dépendent du matériau utilisé pour le réservoir et le ventilateur : l'acier inoxydable

pour ces deux équipements. Le dernier facteur de correction tient compte des pertes de charge du système.

Tableau 14 : Paramètres et facteurs économiques impliqués dans l'ACC

	Paramètres	Valeur
Economique	Taux d'intérêt a	0,10
	Taux d'inflation i	0,03
	Taux d'intérêt réel a^*	0,068
	Durée de vie du TES N	25 ans
Investissement	f_{mat} lié au réservoir (–)	3,3 pour l'acier inoxydable (217)
	f_{mat} lié au ventilateur (–)	5,8 pour l'acier inoxydable (217)
	$f_{\Delta P}$ lié aux pertes de charge (–)	$10^{(0,20899 \cdot \log(\Delta P) - 0,0328 \cdot (\log(\Delta P))^2)}$ pour $\Delta P < 16 \text{ kPa}$ (217)
	$C_{ref,s}$ (€/kg)	cf. Tableau 2
	$C_{ref,isol}$ (€/m ³)	255 (218)
Revenus	Prix de l'électricité en France P_e (€/kWh _e)	0,1580 *
	Prix de vente de la chaleur (égal au prix du gaz naturel en France P_{th} (€/kWh _{th}))	0,0602 *

* Prix donnés pour l'année 2021

2.3.3. Application du modèle économique sur l'Eco-Stock®

Le modèle économique a été appliqué sur la cuve de référence Eco-Stock®. La proportion des coûts impliqués dans les coûts d'investissement est représentée sur la Figure 30a. Les autres coûts sont donnés sur la Figure 30b. Le coût de la cuve est le plus important, avec plus de la moitié des coûts d'investissement (par analogie, l'élaboration du réservoir est la phase la plus impactante environnementalement). Le coût du ventilateur représente, quant à lui, 12 % des coûts d'investissement, alors que le coût des solides de garnissage et de l'isolant sont petits en regard du coût du réservoir (5 et 1 % respectivement des coûts d'investissement).

La comparaison des coûts d'investissement avec les différents coûts impliqués sur la durée de vie du TES (cf. Figure 30b) montre que ces derniers sont négligeables devant les coûts en début de projet. En effet, la maintenance, l'opération, le remplacement et le démantèlement représentent moins de 5 % des coûts totaux.

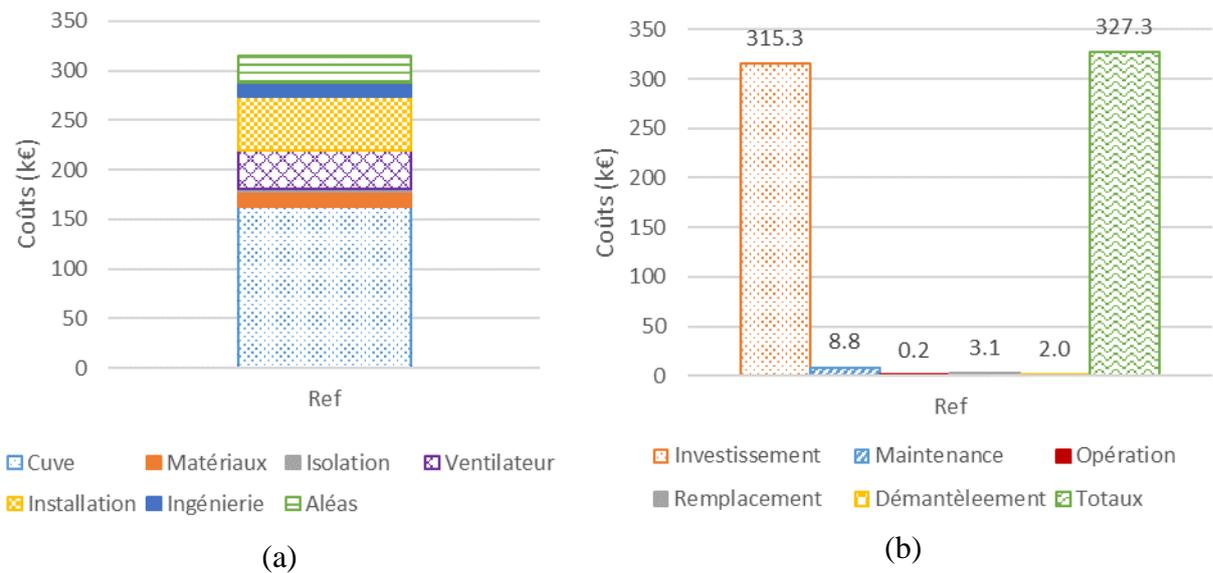


Figure 30 : Comparaison des différents coûts composant les coûts d’investissement (a) et des coûts par étape (b) de l’Eco-Stock®

Concernant les indicateurs économiques de l’Eco-Stock®, ils montrent que le système est actuellement rentable. En effet, le LCOE est 1.8 fois plus faible que le prix du gaz naturel en France (3,3 c€/kWh_{th} vs 6,0 c€/kWh_{th}). En supposant un prix de vente de la chaleur égal au prix de vente du gaz, la VAN vaut 360 k€. Le CCV, quant à lui, atteint 424 k€.

Les temps de retour actualisé et conventionnel restent faibles par rapport à la durée de vie du système, avec respectivement 7,4 et 8,7 ans. Quant au taux de rentabilité interne, il est plus grand que le taux d’actualisation réel (16,4 % vs 6,8 %). Ces trois valeurs prouvent que le stockage industriel Eco-Stock® représente un bon investissement.

Les modèles physique (30) et environnemental (127) ont été précédemment testés et validés sur la cuve Eco-Stock®. Le modèle économique doit être validé. Le LCOE de l’Eco-Stock® s’élève à 3,3 c€/kWh_{th}. D’après l’étude de Parrado *et al.* (158), le LCOE d’une centrale CSP cylindro-parabolique avec TES s’élevait à 14,74 c€/kWh_{th} en 2014. Sachant qu’un système de stockage représente environ 20 % des coûts d’une telle centrale (20,21), le LCOE d’un TES était d’environ 2,9 c€/kWh_{th} cette même année. Celui de l’Eco-Stock® est 12 % plus élevé que cette dernière valeur. Sachant qu’un stockage thermique est plus onéreux pour de petites capacités énergétiques, on peut considérer le modèle économique comme validé.

2.4. Apport aux modèles

Les modèles présentés précédemment sont les principaux utilisés pour les simulations à venir. Cependant, quelques extensions ont été apportées au cours de la thèse pour prendre en compte de nouveaux paramètres.

2.4.1. Prise en compte du carbone évité

Pour compléter l'ACV et l'ACC, il peut être intéressant de prendre en compte le coût du carbone évité. En effet, le système considéré permet de stocker de la chaleur pour la restituer plus tard. De ce fait, il remplace une partie du gaz naturel nécessaire pour produire de la chaleur ou directement de l'électricité.

2.4.1.1. Influence sur le modèle environnemental

L'utilisation d'un stockage thermique permet d'éviter la consommation de gaz naturel. Ainsi, l'impact environnemental du gaz naturel évité doit être ôté à l'impact total du TES. Afin de déterminer l'impact évité par la cuve de référence Eco-Stock®, il suffit de reprendre l'impact d'un MWh_{th} de gaz naturel en France (cf. Tableau 15) et le multiplier par la chaleur produite chaque année.

Tableau 15 : Impact environnemental d'un MWh_{th} de gaz naturel en France

<i>Indicateur environnemental</i>	<i>GWP</i> <i>(kg CO₂ eq)</i>	<i>CED</i> <i>(MJ_{eq})</i>	<i>ADP</i> <i>(kg Sb_{eq})</i>	<i>PM</i> <i>(kg PM2.5_{eq})</i>
<i>Gaz naturel en France</i>	$2,48 \cdot 10^2$	$4,53 \cdot 10^3$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$

2.4.1.2. Influence sur le modèle économique

La taxe carbone (45,216) est une taxe sur les émissions de CO₂, pour les systèmes impliquant une combustion. En France, elle s'élevait à 56 €/t_{CO₂} en 2020 (C_{ref,CO_2}). Le coût du carbone représente un gain économique car le TES thermocline évite de consommer du gaz naturel. Il est déterminé avec :

$$C_{CO_2} = C_{ref,CO_2} \cdot m_{CO_2} \quad (2.75)$$

où m_{CO_2} représente les tonnes de CO_2 évitées annuellement (t_{CO_2}) grâce à la valorisation de la chaleur réalisée par le TES. D'après la base de données EcoInvent, le gaz naturel du réseau français émet $0,248 \text{ kg}_{CO_2}/\text{kWh}_{th}$ (cf. Tableau 15). En considérant la production totale du TES considéré, m_{CO_2} peut être déterminée par :

$$m_{CO_2} = (H \cdot n_{cycle}) \cdot 0,248 \quad (2.76)$$

Cette masse est similaire à l'impact environnemental du gaz naturel sur l'indicateur GWP pour la production annuelle de chaleur H considérée.

Lorsque cette taxe est intégrée au modèle économique, les revenus totaux du système évoluent, ainsi que le LCOE. Les eq (2.74) et (2.54) changent avec l'ajout de la taxe carbone évitée.

$$I = C_{CO_2} + H \cdot P_{th} \quad (2.77)$$

Le LCOE doit également tenir compte de la taxe carbone, soit :

$$LCOE = \frac{CCV - US_f(N, a^*) \cdot C_{CO_2}}{US_f(N, a^*) \cdot H} \quad (2.78)$$

2.4.2. Application de la taxe carbone sur l'Eco-Stock®

En ajoutant la taxe carbone, l'impact environnemental du TES atteint une valeur négative (- 1 623 hab.an), ce qui signifie que l'utilisation de l'Eco-Stock® permet d'éviter le rejet dans l'atmosphère de CO_2 , de particules nocives pour la santé humaine, et de diminuer la consommation d'énergie et de ressources abiotiques. Le bénéfice environnemental du système est ainsi largement démontré. Quant au modèle économique, l'ajout de la taxe carbone permet d'augmenter les revenus du TES, et donc de diminuer le LCOE, qui vaut $1,9 \text{ c€/kWh}_{th}$, i.e. 3 fois moins que le prix du gaz naturel en France.

2.4.3. Changement d'unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle, définie dans la section 2.2.1, permet de valoriser la chaleur du stockage directement sous forme de chaleur (*heat-to-heat*). Il est également possible de la valoriser sous forme d'électricité (*heat-to-power*), directement à partir de l'exergie. Dans cette section, la nouvelle unité fonctionnelle est définie et les changements apportés dans les différents modèles sont donnés.

2.4.3.1. Influence sur le modèle environnemental

Dans le cas d'une valorisation de chaleur sous forme d'électricité, l'unité fonctionnelle est définie par :

« Fournir une exergie restituée égale à celle de la cuve de référence ($(Ex_{dech})^* = (Ex_{dech})_{ref}$), pendant sa durée de vie (25 ans), en considérant 2 cycles par jour et 15 jours d'arrêt par an pour la maintenance. »

2.4.3.2. Influence sur le modèle économique

- **Évaluation des coûts**

Lorsqu'une valorisation est effectuée sous forme d'électricité, un groupe de puissance est inclus dans le système. Dans ce cas, les eq (2.61) à (2.65), doivent tenir compte du coût du bloc de puissance, $C_{ref,BP}$ généralement exprimé en €/kWh_e. Ce dernier s'élève à environ 1 000 €/kWh_e (220). La puissance électrique du convertisseur peut être déduite de la puissance exergétique déstockée :

$$\dot{Ex} = Ex_{ref}/t_{dech} \quad (2.79)$$

où t_{dech} correspond au temps de décharge, car l'exergie stockée est restituée de manière régulière durant la phase de décharge.

La puissance du convertisseur est évaluée en considérant un rendement exergétique de conversion η_{conv} . Son coût s'exprime finalement par :

$$C_{BP} = C_{ref,BP} \cdot \dot{Ex} \cdot \eta_{conv} \quad (2.80)$$

où η_{conv} est de l'ordre de 70 %.

- **Évaluation des revenus**

Pour une valorisation sous forme d'électricité, le revenu est le produit de la production d'électricité annuelle (en kWh_e/an) par le prix de l'électricité (P_e de 0,158 €/kWh_e) :

$$I = H_{ex} \cdot \eta_{conv} \cdot P_e \quad (2.81)$$

où H_{ex} correspond à la production exergétique annuelle (en kWh/an). Selon la cuve de référence Eco-Stock® (cf. section 2.1.4) et l'unité fonctionnelle définie en ACV (cf. paragraphe 2.4.3.1), l'exergie déchargée est constante et égale à 707 kWh/cycle, soit 495 MWh/an.

2.4.4. Application du changement d'unité fonctionnelle sur l'Eco-Stock®

En raisonnant à exergie constante ($(Ex_{dech})^* = (Ex_{dech})_{ref} = 707 \text{ kWh/cycle}$ pour l'Eco-Stock®), les modèles physique et environnemental ne sont pas impactés. Seul le modèle économique est modifié. Le coût du bloc de puissance s'élève à 26 k€, faisant augmenter les coûts totaux à 364 k€. Ainsi, les indicateurs économiques se détériorent légèrement. Le CCV augmente de 9 %. La vente d'électricité annuelle étant moins importante que la vente de chaleur (dans le cas de l'unité fonctionnelle à énergie restituée constante), les revenus sont moins bons, malgré un prix de vente plus élevé. De ce fait, la VAN diminue de moitié et le LCOE atteint 10,5 c€/kWh_e.

2.5. Optimisation multi-objectifs

Les indicateurs exergétiques, environnementaux et économiques ainsi que les modèles permettant leur détermination ayant été présentés, il faut maintenant définir une stratégie d'optimisation conduisant à l'éco-conception du TES. Un problème d'optimisation est défini par un espace de recherche, une ou plusieurs fonction(s) objectif(s) et un ensemble de contraintes. L'ensemble de définition des variables d'optimisation du problème compose l'espace de recherche. Ces variables sont évaluées à travers différents critères, à minimiser ou maximiser, composant la ou les fonction(s) objectif(s). Un ensemble de contraintes permet de définir des conditions sur les variables d'optimisation, afin de limiter l'espace de recherche aux solutions réalisables. La résolution optimale du problème consiste alors à trouver le point appartenant à l'ensemble des solutions qui minimise la ou les fonction(s) objectif(s).

Dans cette partie sont présentés le problème d'optimisation, l'algorithme d'optimisation et les méthodes multi-objectifs d'aide à la décision utilisées dans ces travaux.

2.5.1. Définition du problème d'optimisation

Dans cette étude, des stockages thermoclines de tailles différentes, présentant des temps de charge et décharge variés ainsi que des températures chaude et froide en fonctionnement fluctuant entre 20 et 600°C (basse à haute température) sont optimisés. Selon leur application, cinq des paramètres permettant de décrire un stockage thermocline (cf. section 2.1.2) sont ainsi fixés par le choix du système à optimiser. Restent les facteurs de forme externe et interne, qui

sont les variables d'optimisation continues du problème. Le fluide et le solide étant des paramètres discrets, leurs propriétés n'évoluent pas toutes de la même façon d'un matériau à un autre. Il est donc nécessaire de résoudre plusieurs fois le problème d'optimisation en changeant le couple fluide/solide. En effet, intégrer les variables discrètes directement dans le problème d'optimisation pourrait amener à des résultats aberrants.

Le problème d'optimisation consiste ainsi à trouver les valeurs optimales des deux facteurs de forme selon les paramètres de conception donnés. Le type de variables d'optimisation et leur intervalle de recherche sont également indiqués dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Définition du problème d'optimisation

Contraintes et paramètres de conception	Variables	Type	Intervalle
<i>Porosité</i>			
<i>Températures opérationnelles</i>	Facteur de forme externe	Continu	[0,1; 3]
<i>Taux de cut-off</i>	Facteur de forme interne	Continu	[0,00001; 0,1]
<i>Énergie restituée constante</i>			

Les taux de *cut-off* sont fixés par les procédés en amont (source d'énergie thermique) et en aval (bloc de puissance ...) et par l'application du TES. Dans le cas du stockage industriel haute température Eco-Stock® récupérant les chaleurs fatales industrielles, les taux de *cut-off* peuvent plus facilement varier en fonction du type de valorisation faite. Dans le cas d'une valorisation sous forme de chaleur (*heat-to-heat*), les taux de *cut-off* pourront atteindre 80 à 90 %. Dans le cas d'une valorisation sous forme d'électricité (*heat-to-power*), ces taux devront rester faibles (10 à 20 %) pour ne pas dépasser la température minimale admissible dans le bloc de puissance.

2.5.2. Algorithme d'optimisation

Pour résoudre ce problème d'optimisation, deux algorithmes, développés par Matlab®, ont été testés : l'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP cf. paragraphe 1.4.2.3) et l'algorithme génétique multi-objectifs (NSGA-II cf. paragraphe 1.4.2.2). Le premier (OEP) présente le principal inconvénient d'utiliser un critère unique d'optimisation avec des pondérations subjectives (cf. ANNEXE A.5). A contrario, la définition d'une fonction objectif vectorielle (cf. eq (2.83) à (2.85)) est possible dans l'algorithme génétique, permettant d'éviter l'emploi de

pondérations subjectives. Ces deux algorithmes ont été testés et comparés. Pour des temps de calcul similaires et les mêmes optimisations, des solutions similaires ont été obtenues (ensembles de Pareto confondus). Seul l’algorithme génétique multi-objectifs est détaillé dans cette section, car le plus utilisé pour ces travaux. L’algorithme OEP est néanmoins explicité en ANNEXE A.5.

Le problème d’optimisation consiste à trouver les valeurs optimales des deux facteurs de forme, pour une cuve de référence, un fluide caloporteur et un solide de garnissage choisis, permettant de minimiser le vecteur fonction objectif f_{obj} soumis à la contrainte définissant l’unité fonctionnelle (ACV), pour des paramètres de conception fixés ($\varepsilon, \tau_{cutoff}, T_H$ et T_L) :

$$Inf(f_{obj}) \text{ avec } (Q_{dech})^* = (Q_{dech})_{ref} \quad (2.82)$$

Le vecteur fonction objectif de ce problème d’optimisation multi-objectifs incluent les trois critères présentés dans les sections précédentes : le rendement exergetique (eq (2.40)), les impacts environnementaux normalisés (eq (2.47)) et le LCOE (eq (2.54)).

$$f_{obj}(1) = 1 - \eta_{ex} = N_{ex} \quad (2.83)$$

$$f_{obj}(2) = ACV \quad (2.84)$$

$$f_{obj}(3) = LCOE \quad (2.85)$$

Un signe négatif est ajouté devant le critère exergetique car la fonction objectif doit être minimisée pour obtenir la meilleure optimisation possible. Le critère N_{ex} est également appelé nombre de destruction d’exergie (221,222) ou facteur dissipatif.

L’algorithme génétique multi-objectifs disponible sur le logiciel Matlab® est utilisé. Les paramètres par défaut sont conservés (cf. Tableau 17). En effet, après plusieurs simulations en faisant varier la taille de la population de 25 à 200 individus, le nombre de génération de 100 à 1000 et les probabilités de croisement et de mutation de $\pm 0,1$, des résultats similaires ont été obtenus.

Tableau 17 : Paramètres d’ajustement et réglages pour l’algorithme génétique multi-objectifs

Paramètres	Valeur
<i>Variables d’optimisation</i>	2
<i>Fonctions objectifs</i>	3
<i>Taille de la population</i>	50

<i>Nombre de générations</i>	400
<i>Mode d'initialisation</i>	Aléatoire
<i>Processus de sélection</i>	Tournoi (taille de 4)
<i>Probabilité de croisement</i>	0,8
<i>Probabilité de mutation</i>	0,2
<i>Indice de distribution des mutations</i>	20

Les variables fluide et solide étant discrètes, elles ne sont pas intégrées directement au problème d'optimisation multi-objectifs. En changeant le fluide caloporteur et le solide de garnissage à chaque nouvelle résolution du problème, d'autres configurations seront optimisées, donnant des solutions potentielles au problème.

La contrainte d'égalité des chaleurs restituées, apparaissant dans le problème d'optimisation (cf. eq (2.82)), est traitée en amont :

- Pour chaque couple (F_e, F_i) , l'évolution d'une cuve de même volume que la cuve de référence $(V_c)_{ref}$ est tout d'abord simulée,
- Le taux d'utilisation énergétique et le rendement énergétique de décharge sont déterminés une fois le régime stationnaire périodique atteint (cf. section 2.1.3),
- Le volume réel requis pour assurer le service demandé (même chaleur restituée que la cuve de référence) est alors déterminé de la façon suivante :

D'après les eq (2.29) et (2.32), l'énergie interne déchargée du réservoir peut s'écrire :

$$Q_{dech} = - \int_0^{t_{dech}} \dot{m} \cdot \Delta h \cdot dt = \eta_{en,dech} \cdot \Delta U = \eta_{en,dech} \cdot \tau_{u,en} \cdot \Delta U_{theo} \quad (2.86)$$

Dans le cas d'une valorisation sous forme de chaleur, la cuve thermocline doit produire la même énergie restituée que celle de la cuve de référence $((Q_{dech})^* = (Q_{dech})_{ref})$ ce qui implique, d'après (2.86) :

$$V_c^* = (V_c)_{ref} \cdot \frac{(\eta_{en,dech} \cdot \tau_{u,en})_{ref}}{(\eta_{en,dech} \cdot \tau_{u,en})^*} \quad (2.87)$$

De manière analogue, dans le cas d'une valorisation sous forme d'électricité, les indicateurs de performance exergetique sont utilisés pour produire la même exergie restituée $((Ex_{dech})^* = (Ex_{dech})_{ref})$. D'après les eq (2.42) et (2.43), l'exergie de décharge s'écrit :

$$Ex_{dech} = - \int_0^{t_{dech}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt = \eta_{ex,dech} \cdot \Delta Ex = \eta_{ex,dech} \cdot \tau_{u,ex} \cdot \Delta Ex_{theo} \quad (2.88)$$

On en déduit :

$$V_c^* = (V_c)_{ref} \cdot \frac{(\eta_{ex,dech} \cdot \tau_{u,ex})_{ref}}{(\eta_{ex,dech} \cdot \tau_{u,ex})^*} \quad (2.89)$$

Le volume réel V_c^* étant connu, les indicateurs environnementaux et économiques peuvent alors être déterminés.

A titre d'exemple, la Figure 31 présente l'ensemble de Pareto obtenu pour une optimisation bi-objectifs (N_{ex} et ACV) de l'Eco-Stock®, réalisée avec l'algorithme génétique multi-objectifs de Matlab®. L'ensemble de Pareto obtenu comprend 18 solutions optimales parmi la population de 50 individus générés initialement. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans *Energy Conversion and Management* (223).

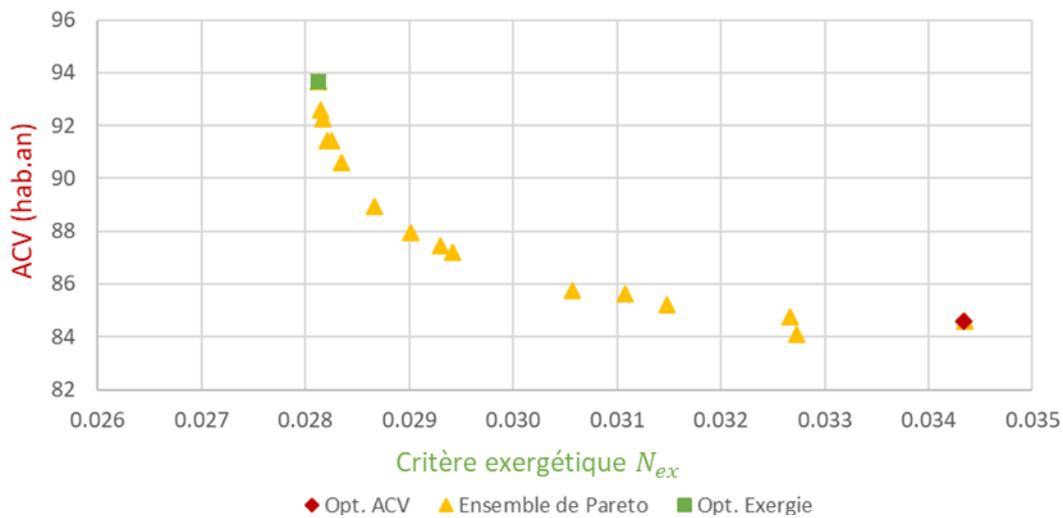


Figure 31 : Ensemble de Pareto de l'optimisation bi-objectifs exergie/ACV de l'Eco-Stock®

2.5.3. Sélection d'une solution de compromis

Pour sélectionner une solution de compromis dans l'ensemble de Pareto obtenu par l'algorithme d'optimisation, il est courant d'utiliser des méthodes multi-objectifs d'aide à la décision. Trois étapes successives sont appliquées : normalisation, pondération et application de la méthode d'aide à la décision. Dans cette thèse, la méthode TOPSIS est utilisée, avec une pondération issue de l'entropie de Shannon, pour déterminer une solution préférable parmi celles trouvées

par l'algorithme d'optimisation (cf. section 1.4.3). Le principe de ces deux méthodes est illustré sur l'ensemble de Pareto présenté Figure 31.

2.5.3.1. Méthode TOPSIS

La première étape consiste à normaliser l'ensemble des solutions $(N_{ex,i}, ACV_i)$ entre 0 et 1. Dans cette étude, les critères sont normalisés par rapport à leurs valeurs maximales et minimales :

$$\tilde{N}_{ex,i} = \frac{N_{ex,i} - N_{ex,min}}{N_{ex,max} - N_{ex,min}} \quad \text{et} \quad \widetilde{ACV}_i = \frac{ACV_i - ACV_{min}}{ACV_i - ACV_{min}} \quad (2.90)$$

L'application de cette normalisation sur les critères d'optimisation conduit à la Figure 32.

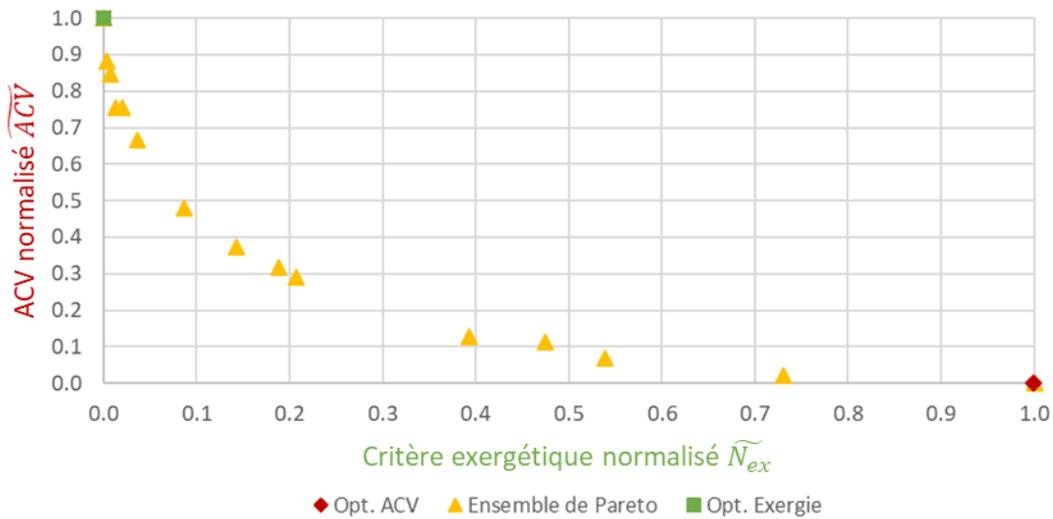


Figure 32 : Étape 1 – Normalisation de l'ensemble de Pareto

Une pondération subjective est ensuite appliquée à chacun des critères normalisés (1/2 pour chacun des critères d'optimisation) :

$$\hat{N}_{ex,i} = \tilde{N}_{ex,i}/2 \quad \text{et} \quad \widehat{ACV}_i = \widetilde{ACV}_i/2$$

La Figure 33 présente le front de Pareto normalisé et pondéré obtenu.

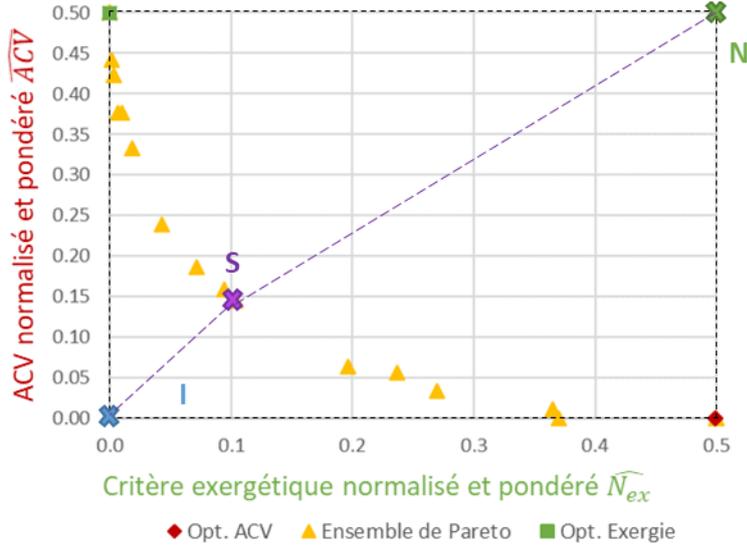


Figure 33 : Principe de la sélection de la solution de compromis avec la méthode TOPSIS pour une pondération subjective (0.5 / 0.5)

Les deux premières étapes (normalisation et pondération) étant réalisées, la méthode TOPSIS peut désormais être appliquée (cf. Figure 33). La solution S sélectionnée par cette méthode est celle présentant le plus grand ratio $\frac{SN}{SI+SN}$, I et N tant respectivement les solutions idéale ($\widehat{N}_{ex,min}, \widehat{ACV}_{min}$) et non-idéale ($\widehat{N}_{ex,max}, \widehat{ACV}_{max}$).

2.5.3.2. Pondération issue de l'entropie de Shannon

Pour éviter le choix subjectif du décideur, l'entropie de Shannon peut être utilisée pour déterminer les pondérations de ces deux critères d'optimisation (185). Tout d'abord, une normalisation dite linéaire (224) est appliquée aux deux critères :

$$\widetilde{N}_{ex,i} = \frac{N_{ex,i}}{\sum_{i=1}^{18} N_{ex,i}} \quad \text{et} \quad \widetilde{ACV}_i = \frac{ACV_i}{\sum_{i=1}^{18} ACV_i}$$

Cette méthode de normalisation donne aux deux ensembles $\widetilde{N}_{ex,i}$ et \widetilde{ACV}_i les propriétés d'une probabilité ($\sum_{i=1}^{18} \widetilde{N}_{ex,i} = 1$ et $\sum_{i=1}^{18} \widetilde{ACV}_i = 1$). L'entropie de Shannon associée à chaque critère est alors déterminée (cf. ANNEXE A.3.2) :

$$S_{ex} = -\frac{1}{\ln 18} \cdot \sum_{i=1}^{18} \widetilde{N}_{ex,i} \cdot \ln \widetilde{N}_{ex,i} \quad \text{et} \quad S_{ACV} = -\frac{1}{\ln 18} \cdot \sum_{i=1}^{18} \widetilde{ACV}_i \cdot \ln \widetilde{ACV}_i \quad (2.91)$$

Les entropies de Shannon calculées valent : $S_{ex} = 0,9991$ et $S_{ACV} = 0,9998$ (cf. ANNEXE A.3.4). La valeur de l'entropie de Shannon rend compte de l'étendue de la variation propre à chaque critère. D'après la définition (eq (2.91)), remarquons que si toutes les valeurs d'un même critère c_i étaient identiques, les valeurs normalisées vaudraient $\tilde{c}_i = 1/18$ pour toutes les solutions, ce qui amènerait à $S_c = 1$. Cette valeur correspond à l'entropie de Shannon maximale, puisqu'elle est relative à une distribution uniforme (toutes les solutions c_i sont équiprobables, leur probabilité d'apparition étant égale à $1/18$). Une valeur inférieure à 1 signifie donc que l'ensemble des solutions est réparti sur un certain intervalle, comme le montre la Figure 34 suivante, pour l'exemple de l'optimisation bi-objectifs exergie/ACV :

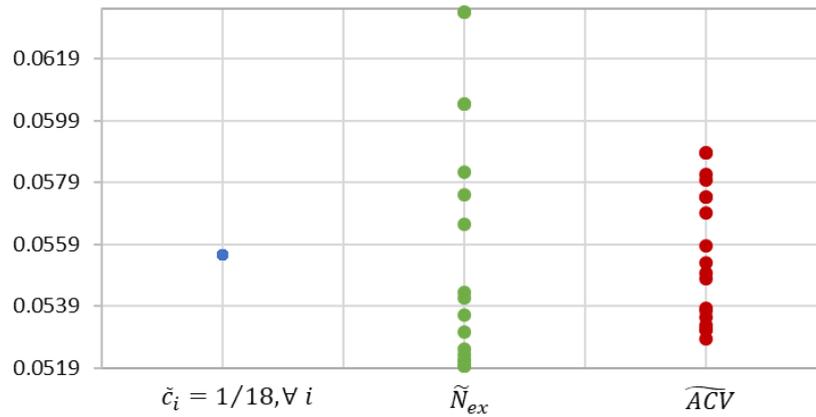


Figure 34 : Solutions normalisées optimales comparées à une solution équiprobable $\tilde{c}_i =$ constante

Une valeur s'éloignant de l'unité traduit donc un élargissement du domaine de variation des critères. Dans cet exemple, $S_{ex} < S_{ACV}$. Il est donc logique d'attribuer au critère exergétique N_{ex} un facteur de pondération plus élevé, puisque sa variation est plus grande. Les pondérations de chacun des critères sont déterminées alors par les expressions suivantes :

$$\omega_{ex} = \frac{1 - S_{ex}}{2 - (S_{ex} + S_{ACV})} \quad \text{et} \quad \omega_{ACV} = \frac{1 - S_{ACV}}{2 - (S_{ex} + S_{ACV})} \quad (2.92)$$

qui conduisent à :

$$\omega_{ex} = 0.78 \quad \text{et} \quad \omega_{ACV} = 0.22$$

La pondération issue de l'entropie de Shannon donne donc moins de poids aux critères dont les solutions sont regroupées autour d'une valeur moyenne (par exemple, $1/18$ dans le cas du critère c sur la Figure 34). Les solutions normalisées et pondérées ($\widehat{N}_{ex,i} = \omega_{ex} \cdot \widetilde{N}_{ex,i}$ et $\widehat{ACV}_i = \omega_{ACV} \cdot \widetilde{ACV}_i$) par cette méthode sont représentées sur la Figure 35.

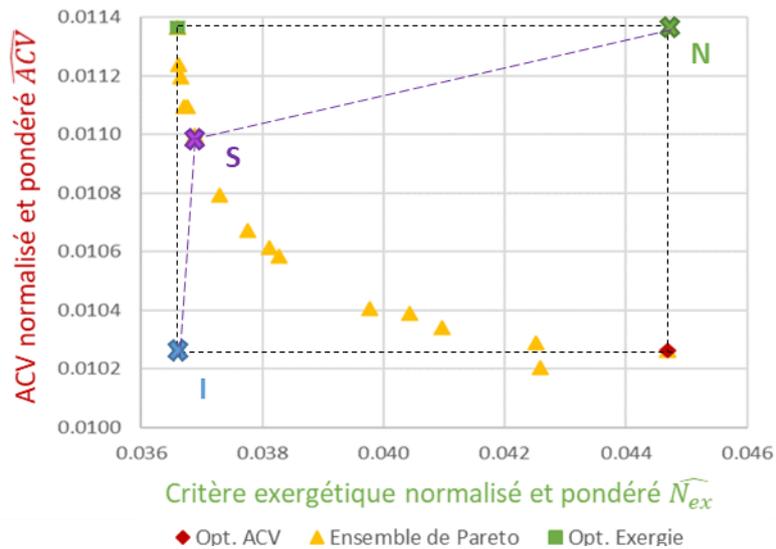


Figure 35 : Principe de la sélection de la solution de compromis avec la méthode TOPSIS pour une pondération objective (entropie de Shannon)

Les deux pondérations utilisées, subjective (cf. Figure 33) et objective (cf. Figure 35), conduisent ici à sélectionner deux solutions différentes. Les solutions sont néanmoins proches l'une de l'autre, avec moins de 3 % de différence entre les deux solutions : 0,0008 points sur le critère exergetique et 1,70 hab.an sur le critère environnemental. L'ensemble des étapes et les valeurs des critères normalisés et pondérés (avec l'entropie de Shannon) sont donnés en ANNEXE A.3.4.

2.6. Structure générale de l'optimisation d'un stockage thermocline

La Figure 36 montre les liens entre les modèles physique, environnemental et économique, et affiche les différentes entrées et sorties de chaque modèle, décrits précédemment. Sur la base des paramètres de conception et des deux facteurs de forme, pour un couple HTF/TESM, le modèle physique détermine le rendement exergetique, l'énergie de pompage, le volume et la masse de matériaux de garnissage nécessaire pour assurer l'énergie ou l'exergie de décharge cible en fonction du type de valorisation. L'empreinte environnementale est ensuite déterminée à l'aide des quatre indicateurs environnementaux. Enfin, l'ACC est réalisée pour évaluer le LCOE du système.

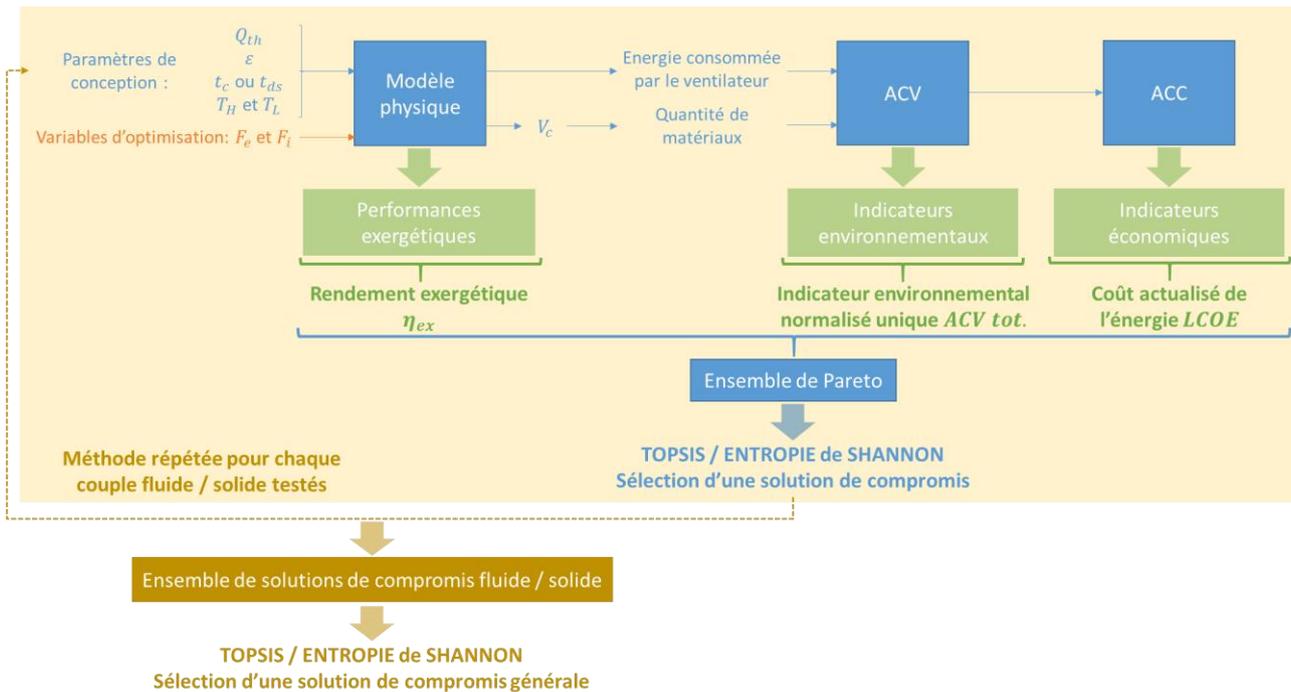


Figure 36 : Structure générale du problème d'optimisation multi-objectifs avec les entrées et sorties de chaque modèle

Lorsque l'algorithme d'optimisation a déterminé l'ensemble de Pareto à partir de ces trois modèles, une méthode multi-objectifs d'aide à la décision est appliquée (TOPSIS combiné à l'entropie de Shannon) pour sélectionner la solution de compromis. Toute cette partie (en jaune sur la Figure 36) est répétée pour chaque couple fluide caloporteur / solide de garnissage testé. Enfin, la même méthode d'aide à la décision est appliquée sur l'ensemble des solutions de compromis déterminées précédemment. La solution de compromis générale permet de déterminer le meilleur couple fluide/solide pour la cuve de référence, ainsi que la géométrie de cuve et la granulométrie des particules optimales.

2.7. Synthèse

Dans ce chapitre a été présentée toute la méthodologie permettant d'optimiser sur trois critères un stockage thermique de type thermocline. Le modèle physique a tout d'abord été détaillé. Ce modèle permet de résoudre les bilans transitoires de masse, d'énergie et d'entropie. Ces bilans sont réalisés sur les deux phases principales du système que sont le fluide caloporteur et les solides de garnissage. Leurs propriétés thermophysiques, assumées constantes, sont évaluées à la moyenne des températures opérationnelles. Pour un couple fluide/solide fixé, cinq paramètres de conception et deux variables d'optimisation décrivent le comportement du stockage

thermocline. Ces dernières rendent compte de la géométrie du réservoir et de la granulométrie des particules. Ce modèle monodimensionnel à deux phases a été validé à partir des données expérimentales (30). A partir de cette analyse, les performances exergetiques et énergétiques sont calculées, avec le rendement exergetique comme premier critère du problème d'optimisation à résoudre

Une analyse du cycle de vie est ensuite réalisée du berceau à la tombe, à partir des résultats du modèle physique. L'unité fonctionnelle choisie pour comparer équitablement des stockages entre eux, est définie par : « fournir une énergie thermique de décharge constante et égale à celle de la cuve de référence sur toute la durée de vie du système ». Quatre indicateurs environnementaux sont sélectionnés et normalisés selon l'impact d'un habitant européen sur une année : le potentiel de réchauffement climatique, la demande énergétique cumulée, la déplétion des ressources abiotiques et les émissions de particules nocives à la santé humaine. Leur somme correspond au second critère d'optimisation. Deux indicateurs supplémentaires sont définis, les temps de retour et le taux de retour énergétiques, permettant de déterminer le nombre d'années nécessaires pour rembourser les dettes écologique et énergétique contractées par le système.

Enfin, le modèle économique est défini. Il tient compte des différents coûts et revenus impliqués dans un stockage thermocline. Six coûts sont considérés : investissement, maintenance, opération, remplacement, démantèlement et valeur résiduelle. Le seul revenu correspond à la vente de la chaleur produite. Enfin, trois indicateurs économiques sont définis : le CCV, la VAN et le LCOE. Ce dernier est considéré comme dernier critère du problème d'optimisation.

Deux variantes aux modèles sont détaillées par la suite : la prise en compte de la taxe carbone comme second revenu économique, et un second type de valorisation de la chaleur (*heat-to-power*), utilisant des taux de *cut-off* différents.

La dernière partie de ce chapitre présente le problème d'optimisation tri-objectifs à résoudre dans cette étude. Le vecteur fonction objectif à minimiser contient trois critères d'optimisation : le rendement exergetique, un indicateur environnemental normalisé et le LCOE. Deux variables d'optimisation adimensionnées, décrivant la géométrie de la cuve et la granulométrie des particules, sont utilisées. Ce problème d'optimisation sera répété autant de fois que de couples

fluide caloporteur / solide de garnissage testés. L'algorithme génétique multi-objectifs disponible dans Matlab® est utilisé, avec les paramètres par défaut. Pour finir, la méthode d'aide à la décision TOPSIS, avec une pondération issue de l'entropie de Shannon, est illustrée à travers un exemple, pour sélectionner une solution de compromis dans l'ensemble de Pareto obtenu.

2.8. Conclusion

Ce chapitre a permis de définir le problème d'optimisation multi-objectifs et la méthodologie pour le résoudre. Deux cas d'étude seront étudiés par la suite : un stockage thermocline permettant de valoriser les chaleurs fatales industrielles, l'Eco-Stock®, et un système intégré dans une centrale solaire à concentration, la cuve type Andasol. Pour ce faire, les optimisations ont été séparées de la manière suivante. Dans le CHAPITRE 3, des optimisations mono-objectifs seront réalisées sur l'Eco-Stock®, afin de comprendre l'influence des différents critères sur les deux variables d'optimisation de notre problème. Par la suite, des optimisations multi-objectifs seront effectuées dans le CHAPITRE 4 sur deux cas d'étude : l'Eco-Stock®; et la cuve type Andasol.

CHAPITRE 3

OPTIMISATIONS MONO-CRITERES

Ce chapitre expose les résultats obtenus suite aux différentes optimisations mono-critères de la cuve industrielle Eco-Stock®. Il se décompose en deux parties. Dans un premier temps, des optimisations exergétique, environnementale et économique sont réalisées, afin de comprendre l'influence des critères d'optimisation sur chacune des variables d'optimisation. Les optimisations environnementale et économique tendent vers des géométries de cuve trapues, alors que celle exergétique privilégie une géométrie effilée. Par la suite, quelques études de sensibilité sont effectuées sur des paramètres de conception (porosité et taux de cut-off). Un lit de solides en vrac est plus poreux qu'un lit structuré. L'augmentation de l'espace entre les solides de garnissage permet d'améliorer les performances environnementales et économiques, pour un rendement exergétique similaire. Il est donc préférable d'opter pour des lits en vrac, avec une seule granulométrie de particules.

Introduction

L'état de l'art du CHAPITRE 1 a permis de d'expliquer l'intérêt de cette étude, à travers l'optimisation multi-objectifs de stockages thermiques de type thermocline. Suite à cette constatation, la méthodologie, incluant des modèles physique, environnemental et économique, a été décrite dans le CHAPITRE 2. Ce chapitre a pour but d'appliquer cette méthodologie sur la cuve de référence Eco-Stock®, qui valorise les chaleurs fatales entre 20 et 600°C avec un lit air/bauxite. Deux variables d'optimisation adimensionnelles, caractérisant la géométrie de la cuve et la granulométrie des matériaux, sont considérées.

Ce chapitre vise à optimiser de manière mono-objectif l'Eco-Stock®, afin de comprendre l'influence de chacun des critères décrits précédemment sur les deux variables d'optimisation sélectionnées. L'objectif est alors de déterminer la meilleure géométrie de cuve et la granulométrie idéale des particules optimisant au mieux un des trois critères (exergétique, environnemental ou économique). Les dimensions des cuves optimisées seront données et leurs performances seront discutées.

De par sa polyvalence, le stockage thermique est susceptible d'être utilisé dans plusieurs applications. Il peut soit être utilisé pour restituer directement la chaleur, soit être intégré dans un cycle thermodynamique pour produire de l'électricité. La température consigne de sortie du fluide étant variable, il est intéressant d'étudier l'influence des taux de *cut-off* sur les performances du stockage. A notre connaissance, aucune étude de ce type existe dans la littérature. De plus, certains systèmes utilisent deux solides de garnissage, ou un lit structuré pour diminuer la porosité du lit. L'impact de ces technologies sera étudié sur les performances du stockage. Deux études paramétriques seront donc menées. La première aura pour but de quantifier l'influence du taux de *cut-off*, et la seconde d'analyser les effets de la combinaison de deux solides de granulométries différentes ou d'un lit structuré. Pour chacune de ces études de sensibilité, les résultats des trois optimisations mono-objectifs seront présentés.

3.1. Géométries optimales et performances

Dans cette partie, les optimisations mono-objectifs (rendement exergetique, impacts environnementaux normalisés et LCOE) de l'Eco-Stock®, utilisant un lit air/bauxite, sont effectuées. Les taux de *cut-off* sont fixés à 20 % et la porosité à 40 %. L'influence de la géométrie des cuves de stockage obtenues et de la granulométrie des particules sur les performances exergetiques, environnementales et économiques sont évaluées pour chacune des optimisations. Ces résultats sont comparés avec les quelques optimisations (cf. Tableau 10) et études de sensibilités (cf. ANNEXE A.4) disponibles dans la littérature.

3.1.1. Dimensions des cuves optimisées

Avant d'étudier les performances des cuves optimisées de manière mono-objectif, leur géométrie et la granulométrie de leurs particules solides sont présentées sur la Figure 37. Les couleurs bleu, vert, rouge et violet se réfèrent respectivement à la cuve de référence Eco-Stock® et aux optimisations exergetique, environnementale et économique. Le même code couleur sera utilisé par la suite.

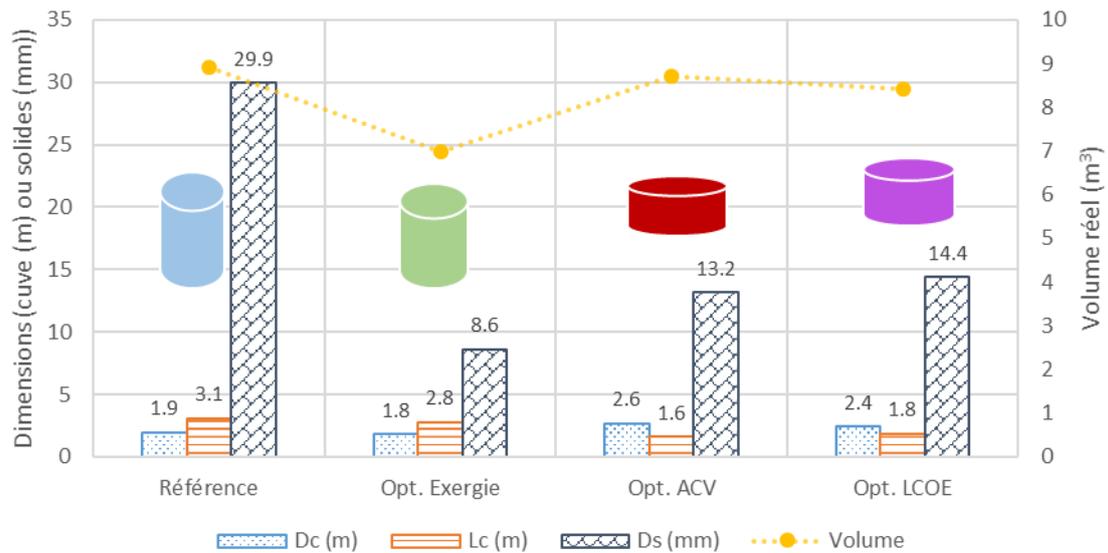


Figure 37 : Dimensions de l'Eco-Stock® et des cuves optimisées air/bauxite

Les trois optimisations conduisent à des géométries différentes. L'optimisation exergetique mène à une forme effilée de cuve ($D_c < L_c$), tout comme l'Eco-Stock®, alors que les optimisations environnementale (ACV) et économique (LCOE) présentent des cuves trapues ($D_c > L_c$). Le diamètre des solides de garnissage est proche du centimètre pour les trois optimisations, alors que pour l'Eco-Stock® il est de 30 mm. Toutes les optimisations aboutissent à la réduction du volume du stockage, lu sur l'axe secondaire du graphique. L'optimisation exergetique conduit à la diminution de volume la plus importante (- 21 %). Pour les optimisations environnementale et économique, le volume de la cuve est respectivement réduit de 2 et 5 %.

3.1.2. Performances exergetiques

Connaissant l'évolution des géométries de cuve et des granulométries de particules en fonction des optimisations mono-objectifs réalisées, leur influence est étudiée sur les performances exergetiques et énergétiques des stockages. La Figure 38 illustre les profils limites de température des cuves optimisées et de l'Eco-Stock® pour le régime stationnaire périodique. Les profils de température de l'optimisation exergetique sont plus pentus que ceux obtenus dans les autres cas. Par conséquent, la stratification est meilleure pour cette optimisation et l'épaisseur de la zone thermocline est réduite. Les trois autres profils de température semblent se superposer. En effet, leurs performances exergetiques sont similaires : rendements exergetiques de 95,5, 95,8 et 96,0 % respectivement pour la référence et les optimisations ACV

et LCOE, vs 97,0 % pour l'optimisation exergetique. En observant les profils de temperature, l'optimisation LCOE semble être un compromis entre l'optimisation exergetique et la cuve de reference.

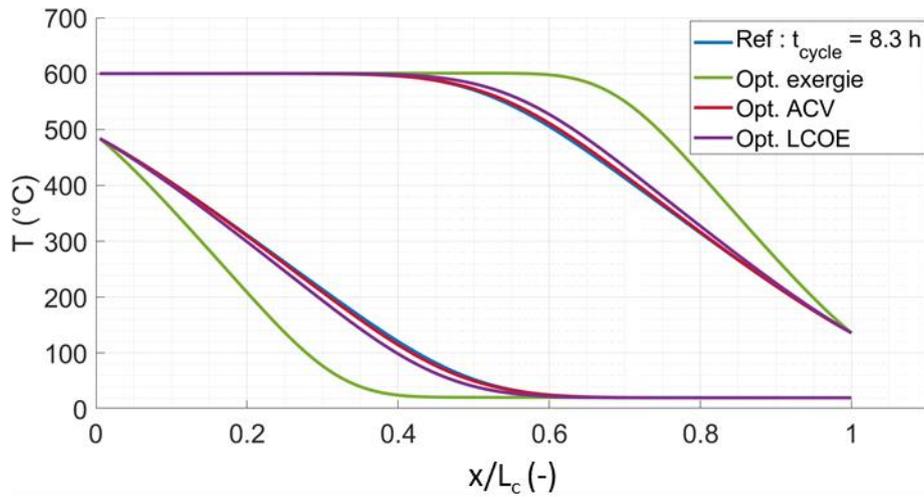


Figure 38 : Profils limites de temperature de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite

Une autre observation peut être faite sur le taux d'utilisation énergetique (eq (2.32)), representé par la zone active qui est delimitée par les deux profils de temperature obtenus à la fin des phases de charge et de décharge. Cet indicateur est bien plus grand dans le cas de l'optimisation exergetique (71,9 %) que pour les optimisations environnementale et économique (57,6 et 59,6 % respectivement). Le taux d'utilisation énergetique est plus élevé pour les trois optimisations que pour la cuve de reference (56,3 %). Étant donné que la même quantité d'énergie est restituée par cycle (d'après l'unité fonctionnelle définie en ACV), un meilleur taux d'utilisation énergetique conduit à un volume de stockage plus petit, comme illustré sur la Figure 37 (axe de droite).

En guise de première conclusion, les trois optimisations entraînent une réduction du volume du stockage. Le volume de la cuve optimisée exergetiquement est plus faible que celui des autres réservoirs optimisés, grâce à un taux d'utilisation énergetique plus élevé. Afin de maximiser le rendement exergetique, une géométrie de cuve effilée avec un faible diamètre de particules doit être privilégiée. Ces conclusions sont confirmées par les résultats issus de la littérature (62,101,225).

3.1.3. Impacts environnementaux

Cette section a pour but d'étudier les impacts environnementaux de chacune de ces optimisations. Pour cela, quatre indicateurs environnementaux sont utilisés, illustrés sur la Figure 39 pour l'Eco-Stock® et les optimisations exergetique, environnementale et économique. Dans cette figure, chaque bloc de quatre histogrammes correspond à un indicateur, et dans un bloc, chaque barre représente l'une des quatre cuves analysées : Eco-Stock® (Ref) et les trois cuves optimisées selon les critères exergetique (η_{ex}), environnemental (ACV) ou économique (LCOE). Pour chaque indicateur, l'empreinte des différentes phases du cycle de vie est donnée, tout comme pour l'impact environnemental total (ACV, à droite du graphique). Les phases de transport et de fin de vie ne sont pas significatives avec moins de 1,3 % de l'empreinte totale. La conception du réservoir représente approximativement la moitié de l'impact total, alors que l'élaboration des solides de garnissage et l'utilisation du stockage représentent en moyenne 23 % de l'empreinte totale pour les trois optimisations. La phase d'utilisation est beaucoup plus impactante pour l'optimisation exergetique (41 % de l'empreinte totale), que pour les optimisations environnementale (17 %) et économique (18 %). Pour la conception des TESM, l'opposé est observé avec 14 % de l'impact total pour l'optimisation exergetique, vs 24 et 23 % pour les optimisations ACV et LCOE. Finalement, l'empreinte écologique des cuves optimisées environnementalement et économiquement atteint 61 hab.an, et celle de la cuve optimisée exergetiquement est 20 hab.an plus élevée.

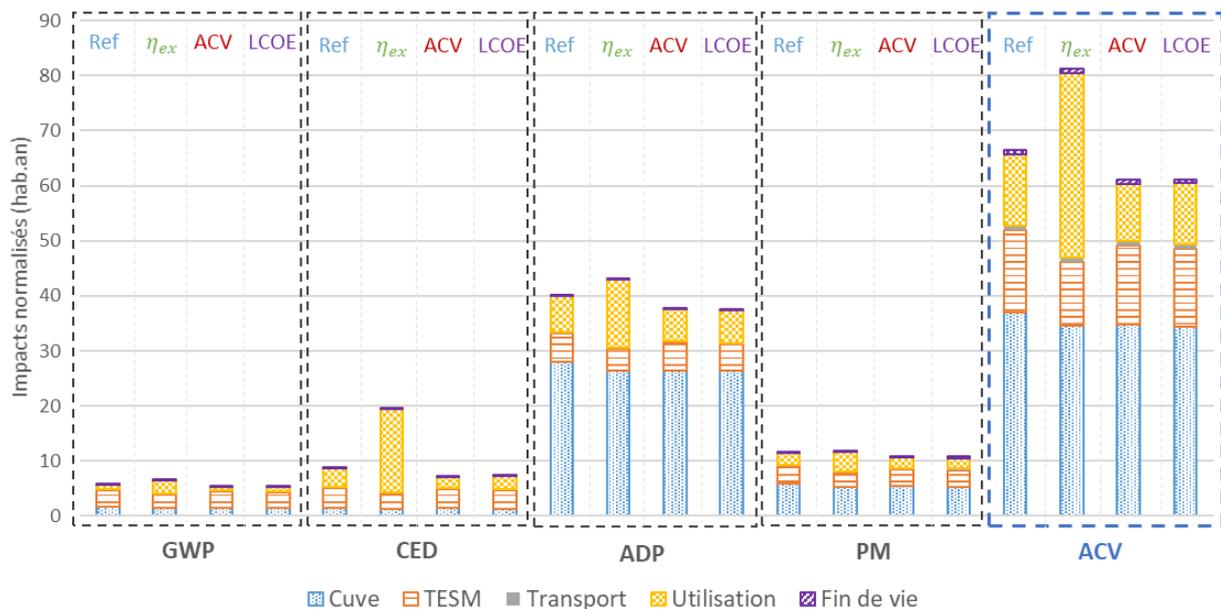


Figure 39 : Indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite

Afin de comprendre la répartition de l'impact environnemental sur les différentes phases du cycle de vie, l'indicateur de la déplétion des ressources (ADP) est étudié plus en détail. En effet, cet indicateur environnemental est le plus impactant avec près de 60 % de l'empreinte totale. Le stockage utilise de nombreux matériaux (acier, laine de roche, aluminium, bauxite ...), composants (conduites, pompe, ventilateur ...) pendant la phase de conception, et de l'énergie pour fonctionner sur toute sa durée de vie. Les impacts environnementaux de l'indicateur ADP sont détaillés sur les Figure 40 (phases de conception de la cuve et des matériaux de garnissage) et Figure 41a (phase d'utilisation). Les masses du réservoir et des matériaux de garnissage sont comparées aux impacts environnementaux des phases de conception sur la Figure 40. Les empreintes environnementales normalisées des phases de conception du réservoir et des TESM sont approximativement proportionnelles aux masses des différents composants. La masse de la cuve de stockage est égale dans les trois optimisations. A contrario, celle des particules solides est largement plus faible dans le cas de l'optimisation exergetique, car le volume réel de cette cuve est plus petit, comme expliqué précédemment. Par conséquent, la production des TESM de la cuve optimisée exergetiquement utilise moins de ressources (cf. Figure 40).

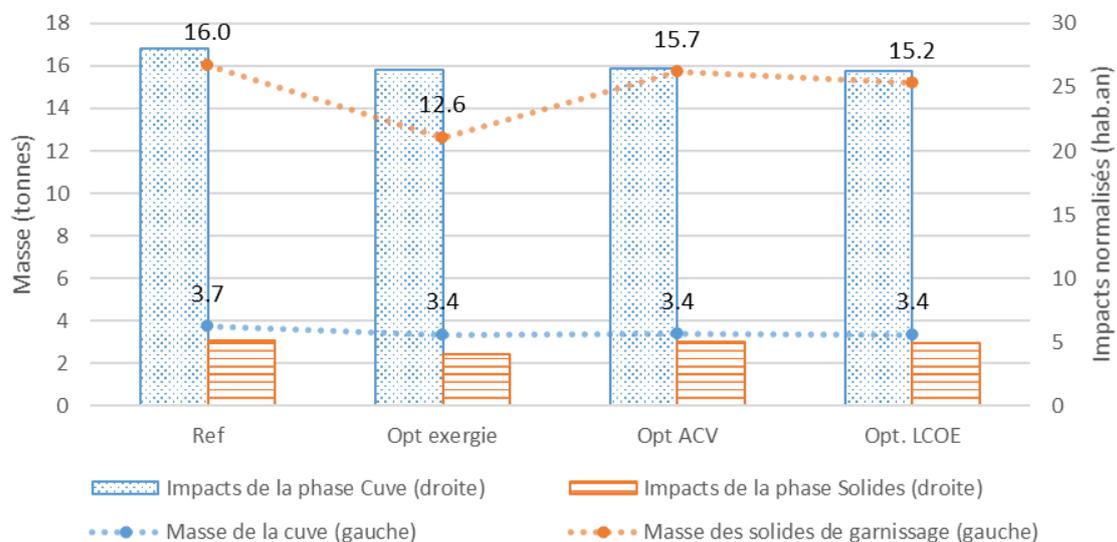


Figure 40 : Impacts environnementaux des phases de conception (cuve et solide de garnissage) pour l'indicateur ADP de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite

La déplétion des ressources induite par la phase d'utilisation montre des différences conséquentes entre les trois optimisations, comme l'illustre la Figure 41a. Cet indicateur est deux fois plus grand pour la cuve optimisée exergetiquement que pour les trois autres configurations. Ceci s'explique par une plus grande énergie de pompage consommée par le

réservoir optimisé exergetiquement (cf. Figure 41b). Ce fait est mis en évidence par l'analyse de l'indicateur CED (cf. Figure 39). En effet, l'impact de cet indicateur semble fortement dépendant de la phase d'utilisation du système. Dans le cas de l'optimisation exergetique, il est deux fois plus élevé que pour les autres optimisations. L'optimisation exergetique présente un diamètre de particules petit (9 mm vs 13 et 14 mm pour les optimisations environnementale et économique) et une hauteur de réservoir plus grande (2,8 m vs 1,6 et 1,8 m pour les optimisations ACV et LCOE). Ainsi, cette géométrie implique des pertes de charge beaucoup plus importantes (jusqu'à 11 fois supérieures à celles de la cuve optimisée environnementalement), et donc une énergie consommée par le ventilateur, pour faire circuler l'air à travers la cuve, plus élevée. La Figure 41b montre l'évolution de la masse (en bleu) et du volume réel (en jaune) du réservoir, et l'énergie consommée par le ventilateur (en vert). La réduction de la masse et du volume liée à l'optimisation exergetique ne permet pas de compenser la forte augmentation de l'énergie de pompage. Par conséquent, l'indicateur CED est 1,7 fois plus élevé par rapport aux optimisations ACV et LCOE.

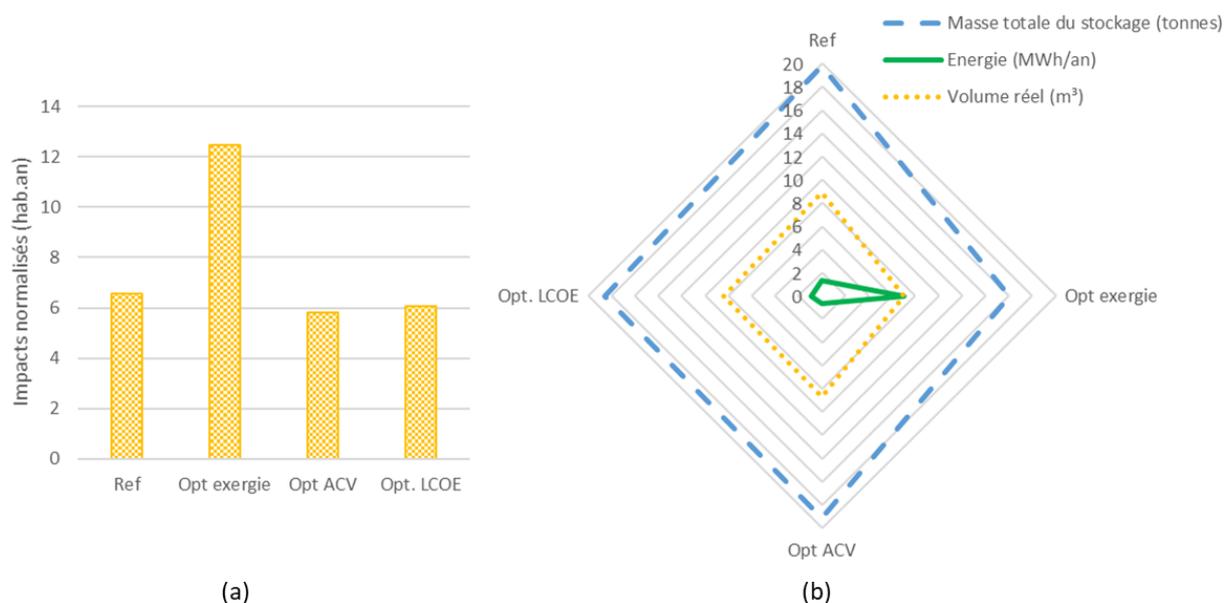


Figure 41 : Impacts environnementaux de la phase d'utilisation pour l'indicateur ADP (a) et Paramètres influençant l'ACV (b) de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite

Pour résumer, la granulométrie et la géométrie du réservoir optimisé exergetiquement entraînent plus de pertes de charge. Ce résultat est confirmé par plusieurs études (60,188,207). Les pertes de charge plus élevées doivent être compensées par une énergie de pompage plus grande. L'impact de la « surconsommation » d'énergie n'est pas compensé par la diminution

du volume du réservoir, et donc la réduction de l’empreinte écologique des phases de conception de la cuve et des solides de garnissage.

3.1.4. Indicateurs économiques

La géométrie de la cuve et la granulométrie des particules influencent grandement les performances exergetiques et environnementales d’un stockage thermocline. L’influence de ces paramètres est désormais étudiée sur les coûts d’investissement et les indicateurs économiques. La Figure 42 présente les différents coûts impliqués dans les coûts d’investissement. Les coûts des quatre équipements principaux (cuve, matériaux de garnissage, isolation et ventilateur), ainsi que les coûts d’ingénierie, d’installation et des aléas sont donnés. L’analyse des coûts montre des similarités avec les résultats présentés dans l’ACV concernant la cuve optimisée exergetiquement : coût de la cuve plus faible, grâce à la réduction de volume, mais augmentation des pertes de charge, qui induit une augmentation du coût du ventilateur (cf. eq (2.59) et (2.60)). Le coût du ventilateur atteint 19 % du coût total d’investissement pour cette optimisation, alors qu’il est de 11 % pour les autres configurations. Le coût de la cuve représente plus de 50 % de l’investissement pour chaque configuration (en analogie avec l’impact de la phase de conception du réservoir sur la Figure 39). Finalement, le coût total d’investissement est 5 % plus élevé pour la cuve de référence et celle optimisée exergetiquement (315 k€) que pour les deux autres stockages (300 k€).

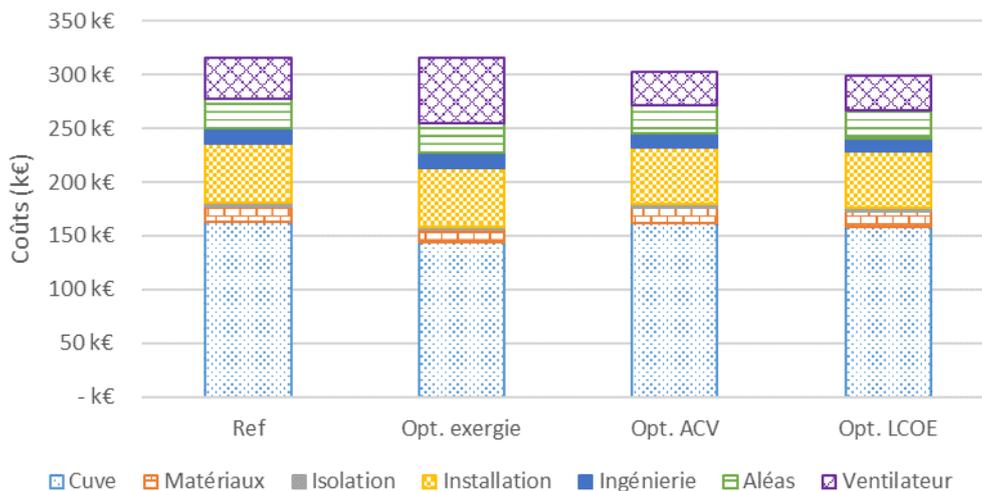


Figure 42 : Coût d’investissement de l’Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite

La Figure 43 permet de comparer les trois indicateurs économiques pour l'Eco-Stock® et les trois optimisations mono-objectifs. Les indicateurs CCV et VAN sont donnés à gauche en k€, et la valeur du LCOE est indiquée à droite en c€/kWh_{th}. Une hiérarchie est visible entre les trois optimisations : la cuve optimisée économiquement présente logiquement les meilleurs indicateurs, et celle optimisée exergetiquement les moins bons. Les stockages optimisés environnementalement et économiquement sont plus rentables que celui de référence : leur VAN est 1,1 fois plus grande. Quant au LCOE, il atteint 3,1 c€/kWh_{th} pour l'optimisation économique, soit une valeur deux fois inférieure à celle du prix du gaz naturel en France (6,0 c€/kWh_{th} en 2021).

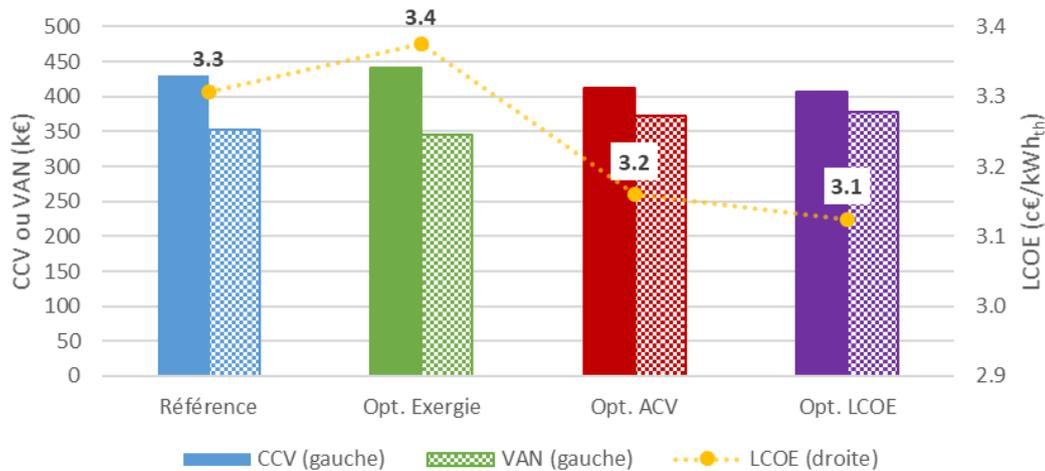


Figure 43 : Indicateurs économiques de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite

En guise de conclusion sur la partie économique, l'énergie de pompage plus importante pour faire fonctionner le ventilateur entraîne des surcoûts dans le cas de l'optimisation exergetique. Malgré la diminution du volume du stockage et donc des coûts des matériaux de garnissage, de la cuve et de l'isolation, le LCOE est moins bon pour cette optimisation que pour les deux autres.

Cette section a permis de comprendre l'influence des deux variables d'optimisation (facteurs de forme externe et interne) sur les trois critères d'optimisation considérés, de manière individuelle. Les résultats montrent que l'optimisation exergetique présente un réservoir effilé avec un faible diamètre de particules solides. Cette géométrie augmente les pertes de charge et donc l'énergie de pompage consommée par le ventilateur. Les optimisations ACV et LCOE

ont, quant à elles, des géométries trapues proches. Par conséquent, elles présentent des performances exergetique, environnementale et économique similaires.

La géométrie de la cuve optimisée économiquement est relativement éloignée de celle de la cuve de référence. Pourtant, l'Eco-Stock® a été optimisé technico-économiquement, mais avec un diamètre de particules solides fixe. Afin de valider le modèle économique, une optimisation économique a été réalisée avec le diamètre des particules fixé à 29,9 mm, comme pour la référence. La géométrie obtenue est très proche de celle de référence, tout comme ses performances (LCOE de la cuve optimisée de 3,2 vs 3,3 c€/kWh_{th} pour l'Eco-Stock®). Le modèle économique choisi semble donc concorder avec les coûts réels de l'Eco-Stock®, fournis par le constructeur.

L'influence de chacun des critères d'optimisation sur la géométrie de la cuve et la granulométrie des particules vient d'être étudiée. Comme expliqué dans la section 2.1.2, un stockage thermocline est décrit par d'autres paramètres physiques, tels que la porosité, et opératoires, comme les taux de *cut-off*. Afin de comprendre l'influence de ces paramètres sur les performances de l'Eco-Stock®, des études de sensibilité sont effectuées sur la porosité et les taux de *cut-off* dans la partie suivante.

3.2. Études de sensibilité

Les paramètres de conception dépendent de la source d'énergie fournie en amont (solaire, chaleur résiduelle industrielle) et de la demande énergétique du procédé alimenté en aval. En fonction du type de valorisation faite (*heat-to-heat* ou *heat-to-power*), les taux de *cut-off* peuvent varier. De plus, en modifiant la structure du lit (structuré ou en vrac) et en utilisant des solides de garnissage de granulométries différentes, la porosité du stockage peut changer. Les deux prochaines sections ont pour but d'étudier l'influence du taux de *cut-off* et de la porosité sur les performances exergetique, environnementale et économique de l'Eco-Stock®.

3.2.1. Influence des taux de *cut-off*

Habituellement, les taux de *cut-off* en charge et en décharge sont définis à 20 % de l'écart entre les températures opérationnelles (22,195). Afin d'étudier l'évolution des performances de

l'Eco-Stock® en fonction des taux de *cut-off* et donc du type de valorisation faite, plusieurs simulations sont effectuées avec des taux en charge et en décharge égaux à 10 et 20 % (valorisation sous forme d'électricité), ou 80 et 90 % (valorisation sous forme de chaleur) pour un même couple fluide/solide. Dans les deux paragraphes suivants, les optimisations mono-objectifs de ce stockage sont effectuées avec un lit air/bauxite. L'objectif de ce paragraphe est d'étudier l'influence des taux de *cut-off* sur la géométrie des cuves de stockage obtenues ainsi que les performances exergetique, environnementale et économique.

3.2.1.1. Valorisation sous forme de chaleur

Lorsque la chaleur récupérée par l'Eco-Stock® est valorisée sous forme de chaleur (*heat-to-heat*), les taux de *cut-off* en charge et en décharge peuvent atteindre 80 et 90 %. Des optimisations mono-objectifs sont donc réalisées pour ces deux taux. Les dimensions des cuves optimisées et des particules pour ces taux de *cut-off* sont données sur la Figure 44. Deux géométries se détachent : des cuves effilées sont obtenues pour les optimisations exergetiques, alors qu'elles sont trapues pour les optimisations environnementales et économiques ($D_c > L_c$). La forme de la cuve optimisée exergetiquement est moins effilée lorsque le taux de *cut-off* est fixé à 90 %. La cuve optimisée économiquement est, quant à elle, légèrement moins trapue. Lorsque le taux de *cut-off* augmente, le volume des réservoirs diminue en moyenne de 2 %, et le diamètre des particules augmente de 38 %. La cuve de référence est définie à 20 % de *cut-off*. Elle possède un diamètre de 1,9 m pour une hauteur de 3,1 m, soit un volume de 8,90 m³. Les particules à l'intérieur du réservoir ont un diamètre de 30 mm. A 80 et 90 % de *cut-off*, les différences de volume entre les trois optimisations et l'Eco-Stock® sont grandes (- 42 % en moyenne).

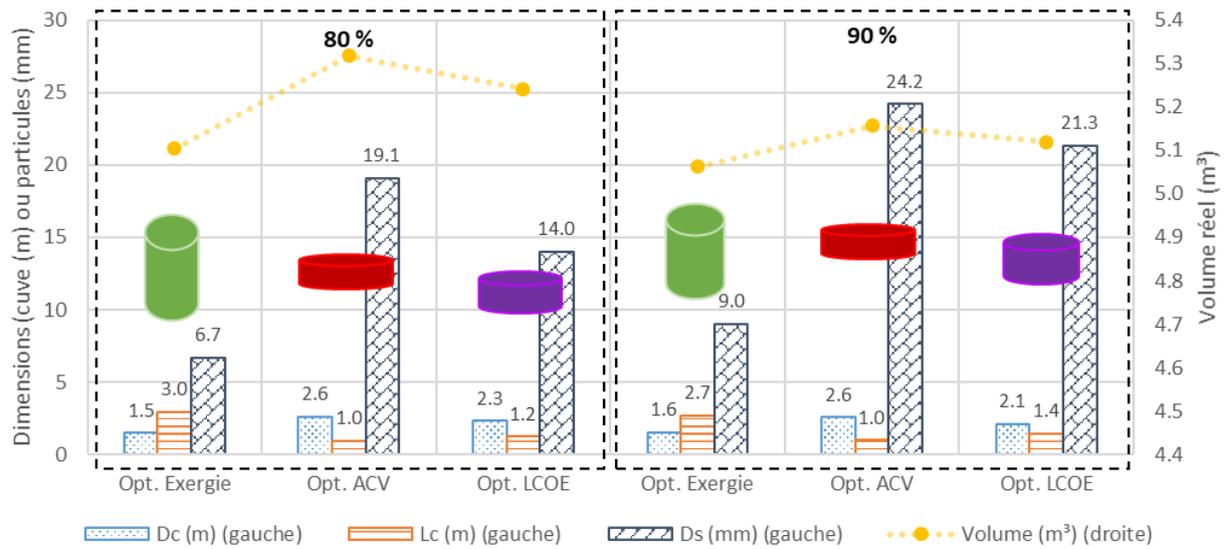


Figure 44 : Évolution des dimensions des cuves optimisées air/bauxite en fonction des taux de *cut-off* pour une valorisation sous forme de chaleur

Plus les taux de *cut-off* augmentent et plus le volume du stockage diminue. En effet, avec des taux de *cut-off* de 90 %, les taux d'utilisation énergétique se rapprochent de 1 (0,991, 0,973 et 0,980 respectivement pour les optimisations exergetique, ACV et LCOE), permettant une utilisation optimale du volume du stockage. Ces tendances sont illustrées sur la Figure 45a, qui présente les profils de température limites obtenus pour les six configurations étudiées, selon leur longueur normalisée. Les profils de température sont en traits pleins pour des taux de *cut-off* de 80 %, et en tirets pour des taux de 90 %. Pour rappel, les couleurs vert, rouge et violet représentent respectivement les optimisations exergetique, environnementale et économique. Plus le taux de *cut-off* est élevé et plus les températures d'arrêt des phases de charge et de décharge sont proches des températures opérationnelles (haute pour la décharge et basse pour la charge). Dans ce cas, la zone thermocline est de plus en plus extraite de la cuve, permettant d'utiliser la quasi-intégralité du stockage. Les taux d'utilisation énergétique et exergetique s'améliorent donc, de 2 % en moyenne (cf. Figure 45b). Par conséquent, des volumes plus petits sont nécessaires pour fournir la même quantité d'énergie, comme l'illustre la Figure 44.

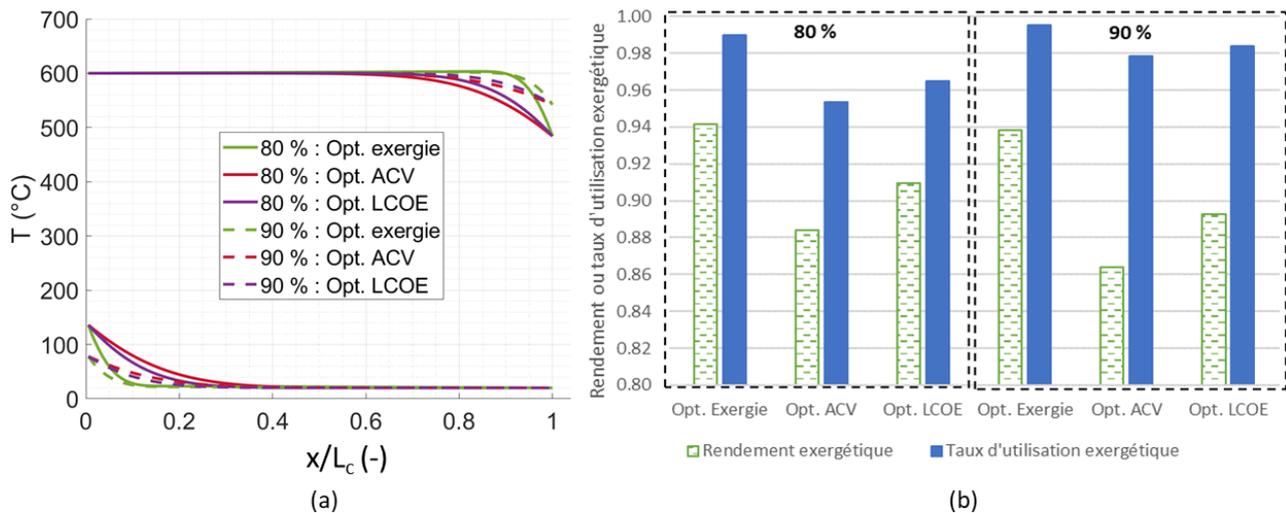


Figure 45 : Évolution des profils de température (a) et des performances exergetiques (b) en fonction des taux de *cut-off*, pour une valorisation sous forme de chaleur

L'augmentation des taux de *cut-off* tend à diminuer la qualité de la chaleur en sortie de stockage, en permettant de décharger une énergie à plus faible température, et donc une plus faible exergie. Ces tendances sont illustrées sur la Figure 45b, qui présentent les rendements et taux d'utilisation exergetiques des différentes optimisations. Le rendement exergetique à 90 % de *cut-off* est moins élevé qu'à 80 % de *cut-off* (diminution de 2 % en moyenne). En effet, les profils de température sont légèrement plus raides à un taux de 80 % (cf. Figure 45a). En comparant avec la cuve de référence, les taux d'utilisation exergetique sont nettement supérieurs (plus de 94,7 % vs 56,8 % pour l'Eco-Stock®) pour des rendements moins bons (plus de 86,0 % vs 95,5 % pour l'Eco-Stock®).

L'extraction de la quasi-totalité de la chaleur dans la cuve tend à diminuer le volume du stockage pour restituer la même quantité d'énergie. Cette réduction volumique permet de réduire l'empreinte écologique des systèmes, comme l'illustre la Figure 46. Cette figure présente l'empreinte environnementale des différentes optimisations mono-objectifs à 80 et 90 % de *cut-off*, par phase du cycle de vie et par indicateur. De manière générale, les impacts environnementaux diminuent lorsque le taux de *cut-off* augmente : -28 % pour l'optimisation exergetique et -1 % pour les optimisations ACV et LCOE. 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 des cuves optimisées diminue. Pour les optimisations exergetiques, le changement léger de la forme de la cuve permet de diminuer par

deux les pertes de charge et donc l'énergie consommée par le ventilateur. La phase d'utilisation diminue donc de 41 % entre 80 et 90 % de *cut-off*, d'où une réduction considérable de l'empreinte écologique totale, malgré des impacts similaires pour les autres phases du cycle de vie. Tous les indicateurs environnementaux sont réduits, notamment le CED avec une diminution de 41 %. Par rapport à la cuve de référence, l'impact environnemental total des optimisations ACV et LCOE à des *cut-off* élevés est 41 % plus petit.

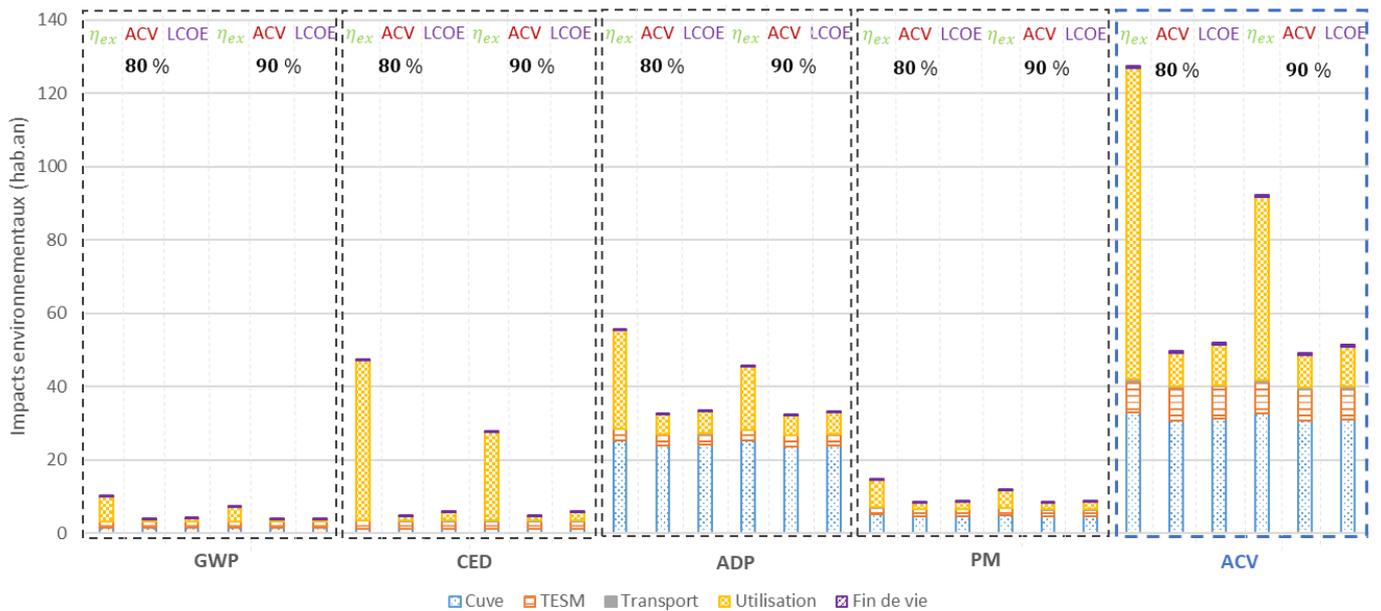


Figure 46 : Évolution des indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie en fonction des taux de *cut-off* pour une valorisation sous forme de chaleur

Afin de voir si la légère réduction du volume du réservoir influe les performances économiques des systèmes, les indicateurs économiques des six optimisations mono-objectifs sont donnés sur la Figure 47. Lorsque le taux de *cut-off* augmente, le CCV diminue de plus d'un tiers en moyenne. En effet, la réduction du volume de stockage permet de légèrement diminuer les coûts d'investissement. De ce fait, la VAN augmente de 6 % pour l'optimisation exergetique et 1 % pour les optimisations économique et environnementale pour un *cut-off* de 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 indicateurs économiques des optimisations exergetiques sont moins bons que ceux des autres optimisations. En effet, les pertes de charge plus élevées entraînent des surcoûts d'utilisation d'électricité par le ventilateur. Finalement, le LCOE est très faible pour des 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}). Par rapport à la cuve de référence, le LCOE et le CCV des optimisations ACV et LCOE à 80 et 90 % de *cut-off* s'améliorent de 40 %, et la VAN de 85 %.

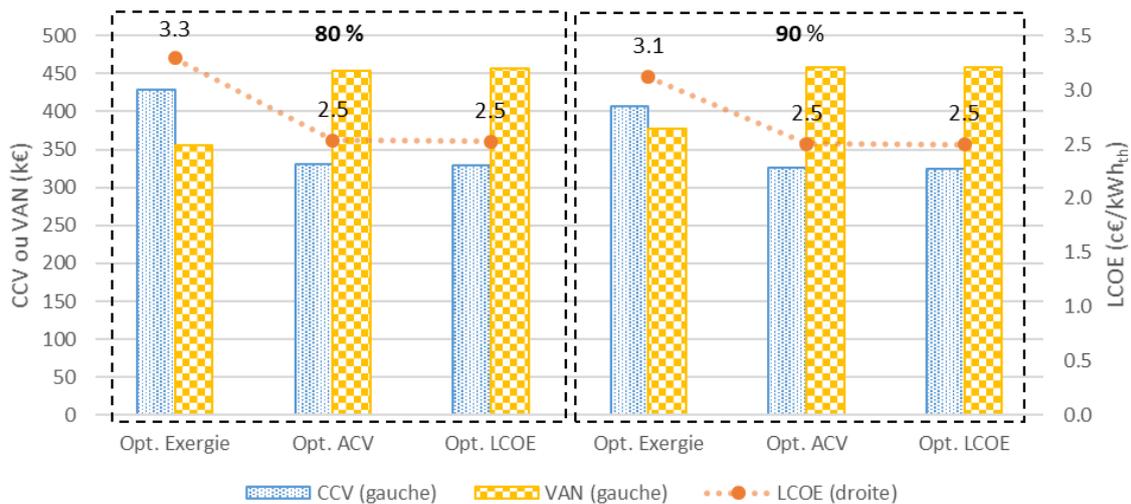


Figure 47 : Évolution des indicateurs économiques en fonction des taux de *cut-off* pour une valorisation sous forme de chaleur

Pour résumer, l'augmentation des taux de *cut-off* permet de maximiser les taux d'utilisation énergétique, et de ce fait réduire le volume nécessaire pour décharger la même quantité d'énergie. Néanmoins, le rendement exergetique diminue légèrement. La diminution du volume du réservoir permet de limiter la masse totale des composants nécessaires à la conception et à l'utilisation du système. L'empreinte environnementale est donc réduite pour des taux de *cut-off* plus élevés. Moins de matériaux étant nécessaires à l'élaboration du stockage thermocline, les coûts d'investissement diminuent. Par conséquent, les indicateurs économiques s'améliorent avec l'augmentation des taux de *cut-off*.

3.2.1.2. Valorisation sous forme d'électricité

Connaissant l'influence de taux de *cut-off* élevés (valorisation sous forme de chaleur) sur la géométrie et les performances du stockage, une autre étude de sensibilité est effectuée pour des taux de *cut-off* plus faibles, utilisés lors d'une valorisation sous forme d'électricité. Pour ce type de valorisation, les taux de *cut-off* en charge et en décharge peuvent être limités à 10 et 20 %. Dans ce cas, l'unité fonctionnelle considère la restitution d'une même exergie de décharge (cf. section 2.4.3). La Figure 48 présente les dimensions du réservoir et des particules pour ces deux taux de *cut-off*. Les formes de cuve sont plus trapues lorsque le taux de *cut-off* augmente. Les diamètres de particules sont similaires pour toutes les optimisations mono-objectifs. Comme

pour la valorisation sous forme de chaleur, le volume diminue (27 % en moyenne) lorsque le taux de *cut-off* augmente.

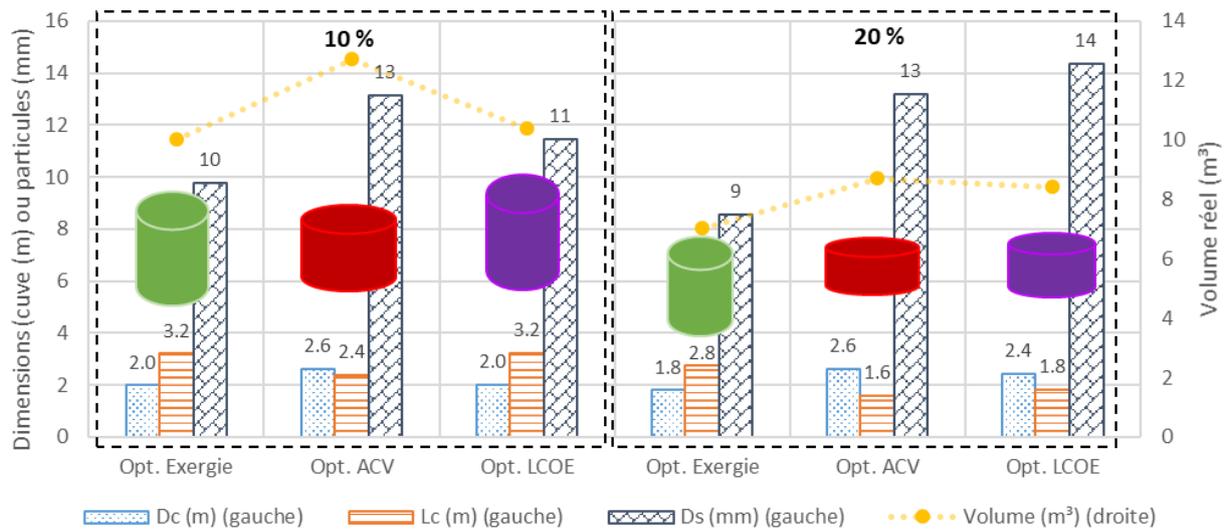


Figure 48 : Évolution des dimensions des cuves optimisées air/bauxite en fonction des taux de *cut-off* pour une valorisation sous forme d'électricité

La réduction du volume pour des taux de *cut-off* plus grands est possible grâce à une meilleure utilisation du stockage, comme l'illustre les profils limites de température et les performances exergetiques représentées sur la Figure 49. Les profils de température sont en traits pleins pour des taux de *cut-off* de 10 %, et en tirets pour des taux de 20 %. A 20 % de *cut-off*, ils sont plus pentus qu'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 cette zone 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 20 % de *cut-off*, cette zone est plus grande (72,3, 58,1 et 60,0 % respectivement pour les optimisations exergetique, ACV et LCOE), alors qu'elle est largement plus faible à 10 % (49,4, 39,6 et 48,7 % respectivement pour les mêmes optimisations). Par conséquent, des volumes plus petits sont nécessaires pour fournir la même quantité d'exergie (cf. Figure 48). Malgré de meilleurs taux d'utilisation exergetique, les rendements exergetiques sont légèrement moins bons à 20 % de *cut-off* (-1%).

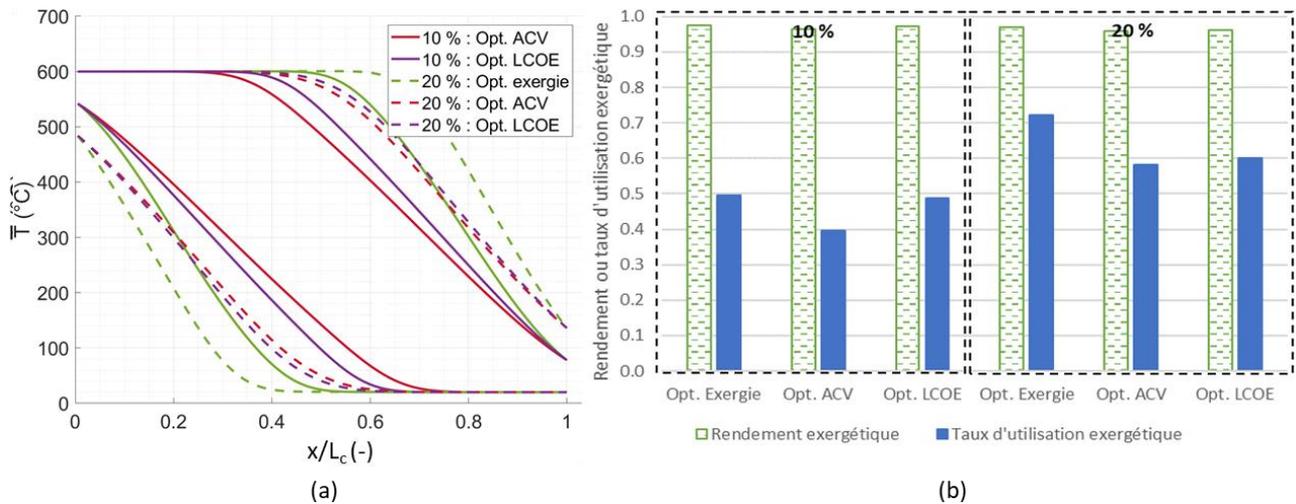


Figure 49 : Évolution des profils de température (a) et des performances exergetiques (b) en fonction des taux de *cut-off* pour une valorisation sous forme d'électricité

Comme pour la valorisation sous forme de chaleur, l'extraction plus importante de la chaleur dans la cuve permet de diminuer le volume du système. Cette baisse tend à réduire les impacts environnementaux. Cette tendance est illustrée par la Figure 50, qui donne l'empreinte écologique des différentes optimisations mono-objectifs à 10 et 20 % de *cut-off* par phase du cycle de vie et par indicateur. L'empreinte environnementale des optimisations ACV et LCOE est réduite en moyenne de 20 %, alors que celle de l'optimisation exergetique est similaire lorsque le taux de *cut-off* augmente. Le volume du réservoir diminuant lorsque le taux de *cut-off* augmente, moins de matériaux sont nécessaires pour fournir la même exergie de décharge. Par conséquent, l'indicateur ADP diminue de 11 % en moyenne. L'impact des phases de conception de la cuve et des matériaux de garnissage est également réduit (respectivement de 11 et 27 % en moyenne). Malgré une diminution considérable de l'impact sur ces deux phases du cycle de vie, l'optimisation exergetique présente des pertes de charge plus importantes (+45 :% par rapport à 10 % de *cut-off*). De ce fait, la phase d'utilisation est 33 % plus impactante pour cette optimisation à 20 % de *cut-off*, et l'indicateur CED augmente de 20 %.

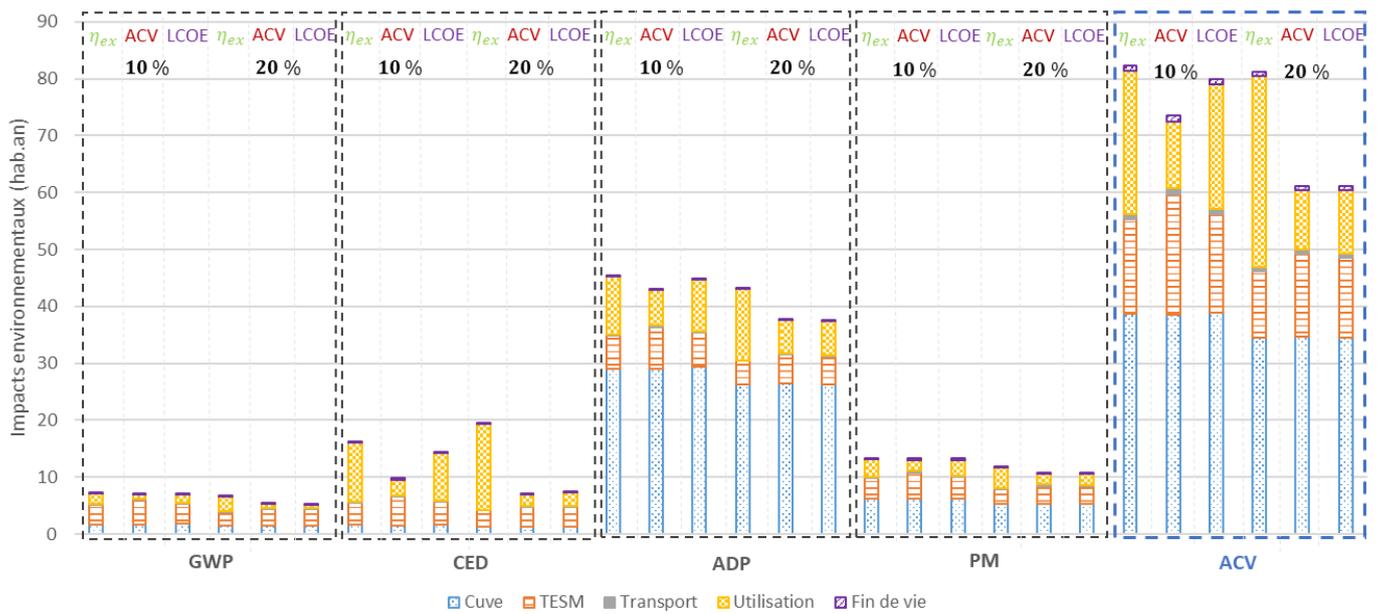


Figure 50 : Évolution des indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie en fonction des taux de *cut-off* pour une valorisation sous forme d'électricité

Afin de voir si la réduction du volume du réservoir influe les performances économiques des systèmes, les indicateurs économiques des six optimisations étudiées sont présentées sur la Figure 51. Comme démontré avec une valorisation sous forme de chaleur, la rentabilité économique est meilleure lorsque le taux de *cut-off* augmente : la VAN est triplée. Le CCV diminue de 20 % en moyenne grâce à des coûts d'investissement plus faibles (- 24 %), puisque les coûts de la cuve et des matériaux sont réduits. La diminution des coûts pour un revenu identique permet de réduire le LCOE de 21 % en moyenne à 20 % de *cut-off*. Cet indicateur est légèrement plus grand pour l'optimisation exergetique à cause d'un surcoût du ventilateur (60 k€ vs 30 k€ pour les optimisations ACV et LCOE).

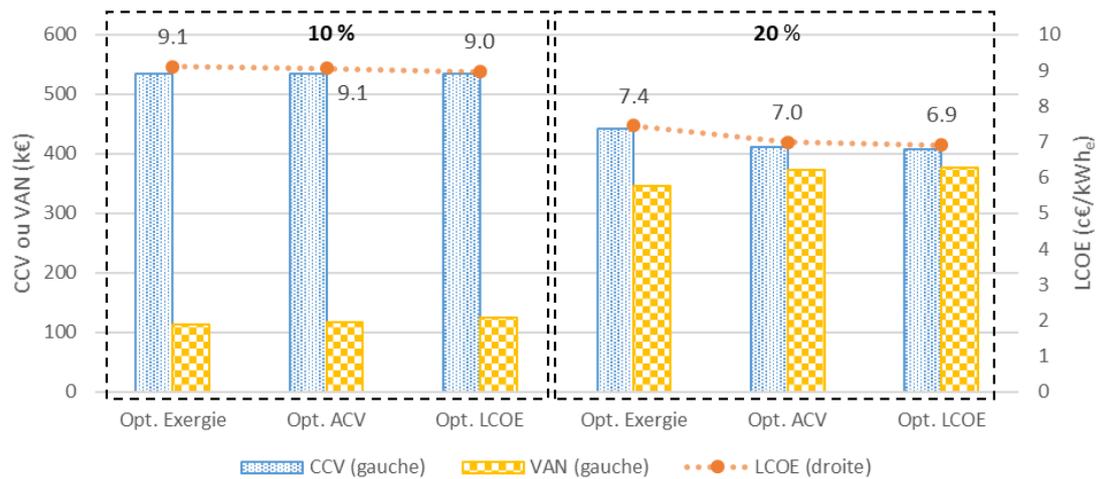


Figure 51 : Évolution des indicateurs économiques en fonction des taux de cut-off pour une valorisation sous forme d'électricité

Par rapport à des taux de *cut-off* de 80 et 90 % pour une valorisation sous forme de chaleur, les mêmes tendances sont visibles lors d'une valorisation sous forme d'électricité. En effet, les volumes de stockage sont réduits grâce à une utilisation plus optimale du réservoir. La masse des composants du stockage étant réduite, l'empreinte environnementale et les coûts d'investissement le sont également. Pour de faibles taux de *cut-off*, des géométries effilées sont privilégiées, alors qu'elles deviennent plus trapues pour des taux élevés. De plus, 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.

3.2.2. Influence de la porosité

Lors de la fabrication d'un stockage thermocline, la porosité du lit fixe de matériau de garnissage peut être contrôlée par les concepteurs. Un lit structuré permet de diminuer la porosité, tout comme l'utilisation de deux matériaux de garnissage de granulométries différentes (sable et roches, comme dans le cas du stockage thermocline industriel Solar One (50)). Dans le prochain chapitre, le meilleur matériau de garnissage sera sélectionné, notamment parmi des céramiques issues des déchets, comme le cofalite. Dans le cas de ce matériau de remplissage, la porosité peut varier car sa mise en forme sous forme de brique présente un degré de liberté de plus que celle de la bauxite sous forme de bille. Dans ce paragraphe, une étude de sensibilité sur la porosité d'un TES air/cofalite est donc réalisée sur les optimisations mono-objectifs. Les valeurs de 0,2 (deux solides de remplissage de tailles différentes), 0,3 (un solide en lit structuré) et 0,4 (un solide en vrac) sont considérées.

La Figure 52 présente les dimensions des cuves optimisées selon chaque critère pour les trois porosités considérées. De manière générale, lorsque la porosité augmente, la cuve est de moins en moins trapue. Elle est même effilée dans le cas de l'optimisation exergetique. Le volume de stockage optimisé exergetiquement augmente avec la porosité, alors que celui des cuves optimisées environnementalement et économiquement reste similaire (voire légèrement inférieur).

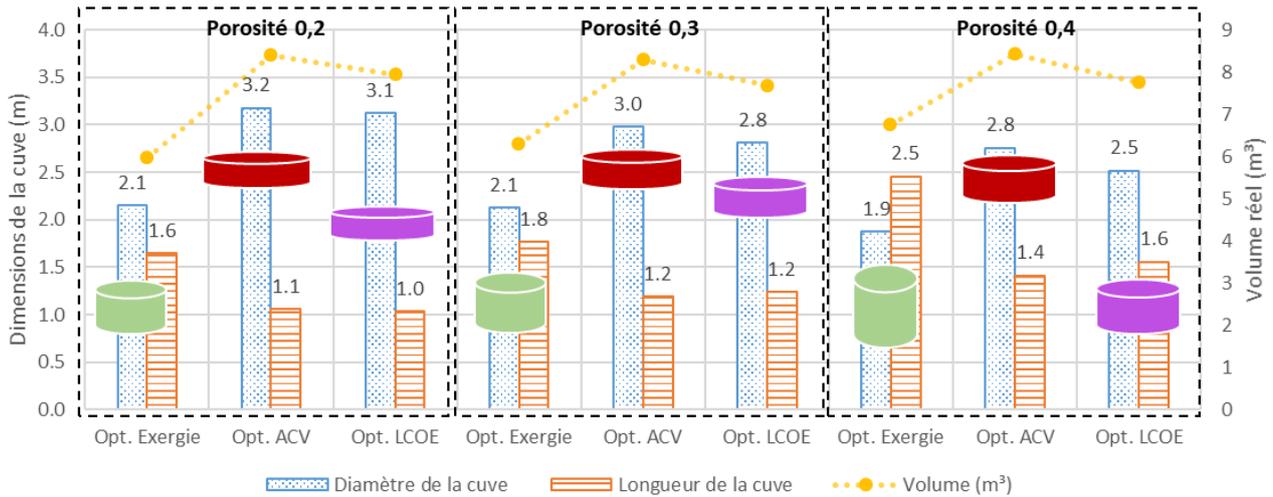


Figure 52 : Évolution des dimensions des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité

Quel que soit l'optimisation mono-objectif, les profils limites de température sont de plus en plus raides, comme l'illustre la Figure 53 pour les optimisations exergetiques. Les couleurs vert, rouge et violet se réfèrent aux porosités de 0,2, 0,3 et 0,4 respectivement. La zone active entre les profils en charge et décharge est donc plus large. L'augmentation du taux d'utilisation devrait impliquer une diminution du volume. Cependant, lorsque la porosité augmente, la capacité thermique volumique équivalente diminue ($(\rho c)_{eq} = (\rho c)_s \cdot (1 - \varepsilon) + (\rho c)_f \cdot \varepsilon$). Dans le cas des optimisations environnementale et économique, l'augmentation importante du taux d'utilisation compense l'effet de la porosité. Par contre, pour l'optimisation exergetique, ces deux effets antagonistes ne se compensent pas, d'où l'augmentation du volume du stockage (cf. Figure 52).

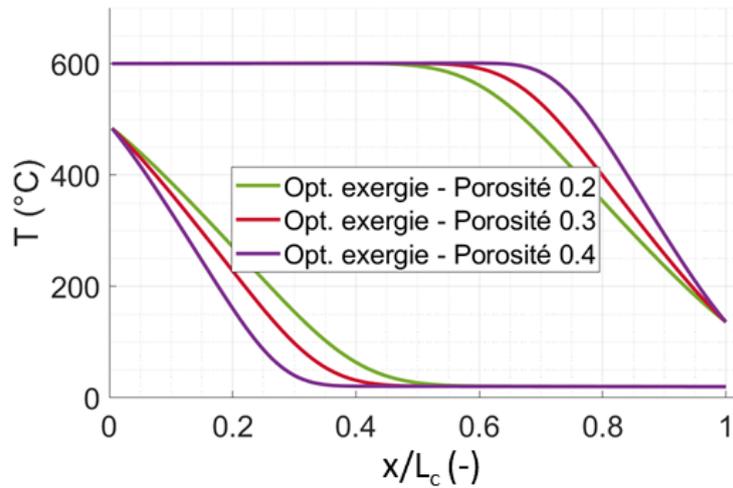


Figure 53 : Évolution des profils de température des optimisations exergétiques air/cofalit en fonction de la porosité

La Figure 54 présente les rendements et les taux d'utilisation exergétiques pour les différentes optimisations mono-objectifs et les trois porosités considérées. Les performances exergétiques s'améliorent pour tous les cas considérés lorsque la porosité augmente. Les rendements exergétiques augmentent légèrement, de 96,8 à 97,6 % pour les optimisations exergétiques, soient une amélioration de 2 %. Ces mêmes tendances sont visibles pour les optimisations ACV et LCOE, avec 3 % d'augmentation. Quant aux taux d'utilisation exergétique, leur amélioration est nettement plus importante (en moyenne 29 % entre 0,2 et 0,4 de porosité).

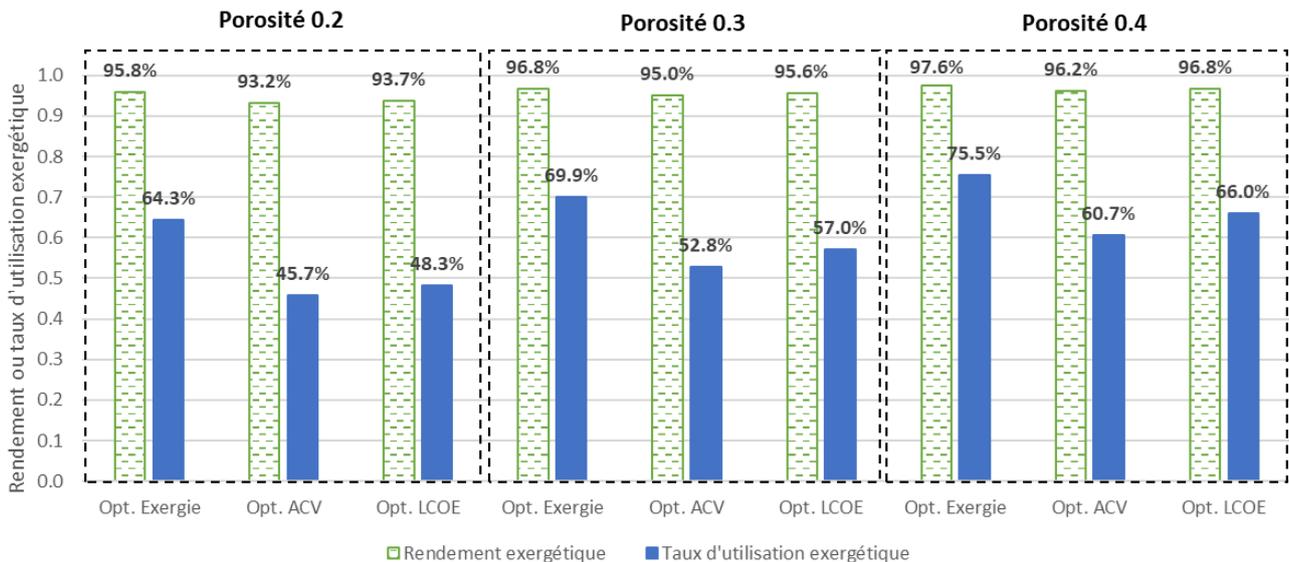


Figure 54 : Évolution des performances exergétiques des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité

L'influence de la porosité sur les performances écologiques des stockages est désormais étudiée. L'impact environnemental par indicateur est donné sur la Figure 55. Il diminue lorsque la porosité augmente, de 26 % pour l'optimisation exergetique et 6 % pour les optimisations ACV et LCOE. Cette grande différence est due essentiellement aux indicateurs CED et GWP : -28 %, -15 % et -9 % en moyenne pour les optimisations exergetique, ACV et LCOE respectivement. En effet, la phase d'utilisation est moins impactante lorsque la porosité augmente, notamment pour l'optimisation exergetique.

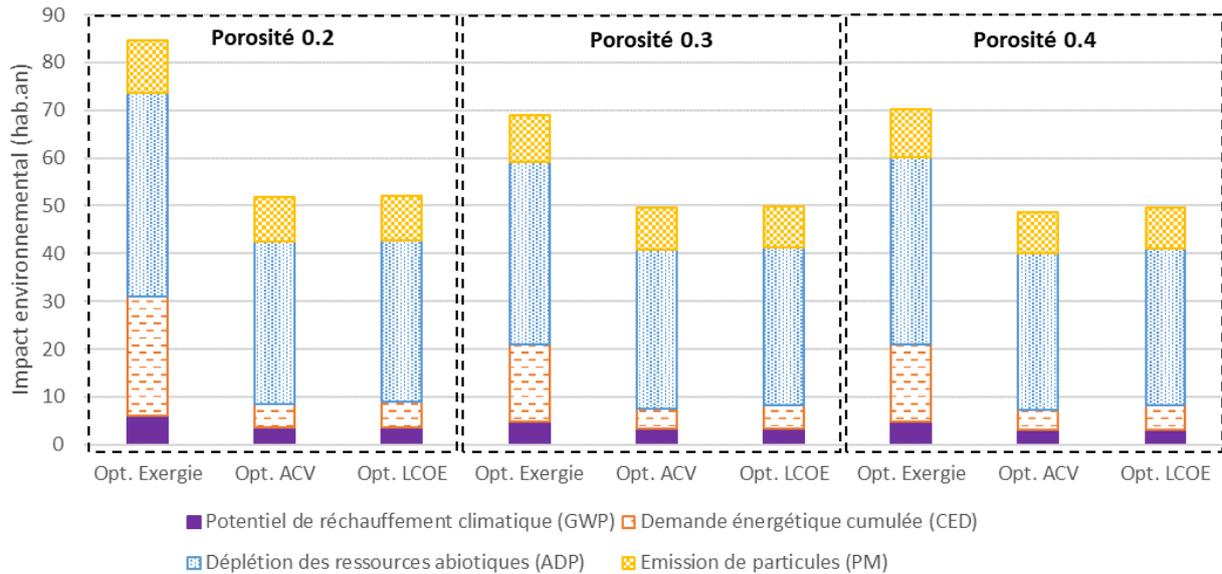


Figure 55 : Évolution de l'impact environnemental par indicateur des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité

La Figure 56 montre l'évolution de la masse du réservoir, du volume réel du stockage, et de l'énergie consommée par le ventilateur pour les neuf cuves optimisées pour 0,2, 0,3 et 0,4 de porosité. Pour l'optimisation exergetique, l'énergie consommée par le ventilateur diminue avec la porosité, malgré une forme de réservoir plus effilée. L'augmentation de la porosité implique une augmentation importante de la perméabilité du milieu, et diminue donc les pertes de charge (cf. (2.14)). L'augmentation du volume du stockage étant faible d'une porosité à l'autre, la masse de la cuve reste similaire pour une optimisation donnée (3,1, 3,3 et 3,2 tonnes respectivement pour les optimisations exergetiques, ACV et LCOE). Par conséquent, l'impact environnemental de la phase d'élaboration du réservoir est proche pour toutes les optimisations (cf. Figure 55).

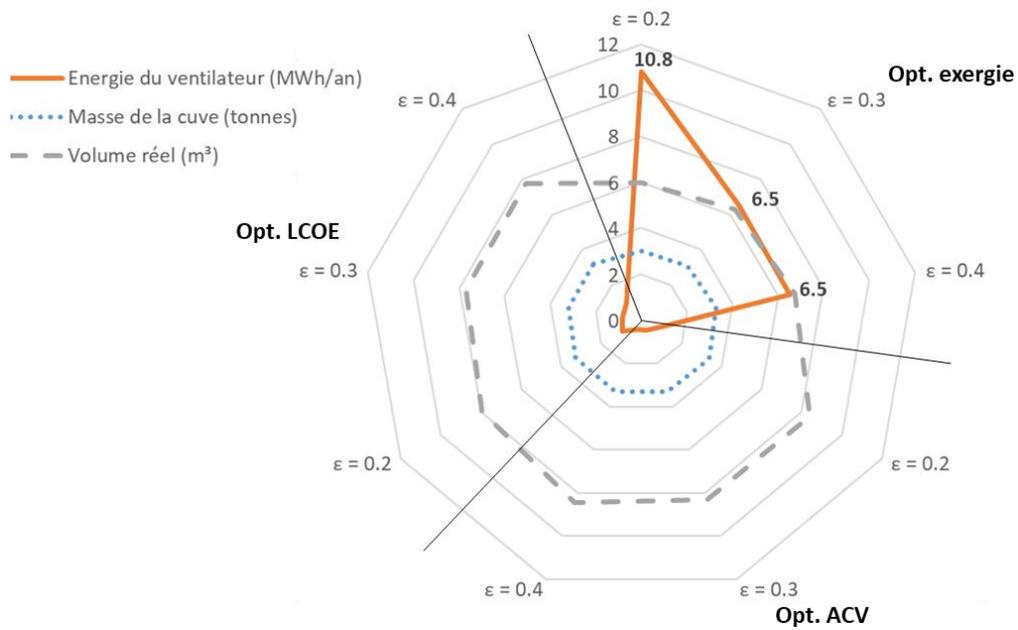


Figure 56 : Évolution de 3 paramètres impactant l'empreinte environnementale des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité

Afin de comprendre l'influence de la porosité sur les performances économiques du stockage thermocline, les indicateurs économiques des neuf cuves optimisées entre 0,2 et 0,4 de porosité sont présentés sur la Figure 57. Ces derniers semblent optimisés pour une porosité de 0,3, avec une détérioration des performances économiques à plus haute ou plus basse porosité. En effet, la VAN est 3 % meilleure qu'à 0,2 et 0,4 de porosité, alors que le CCV et le LCOE sont réduits de 2 % en moyenne. Néanmoins, les coûts de la main d'œuvre pour structurer le lit de solides ne sont pas inclus dans le modèle économique. De ce fait, les indicateurs économiques optimaux semblent se situer entre 0,3 et 0,4 de porosité.

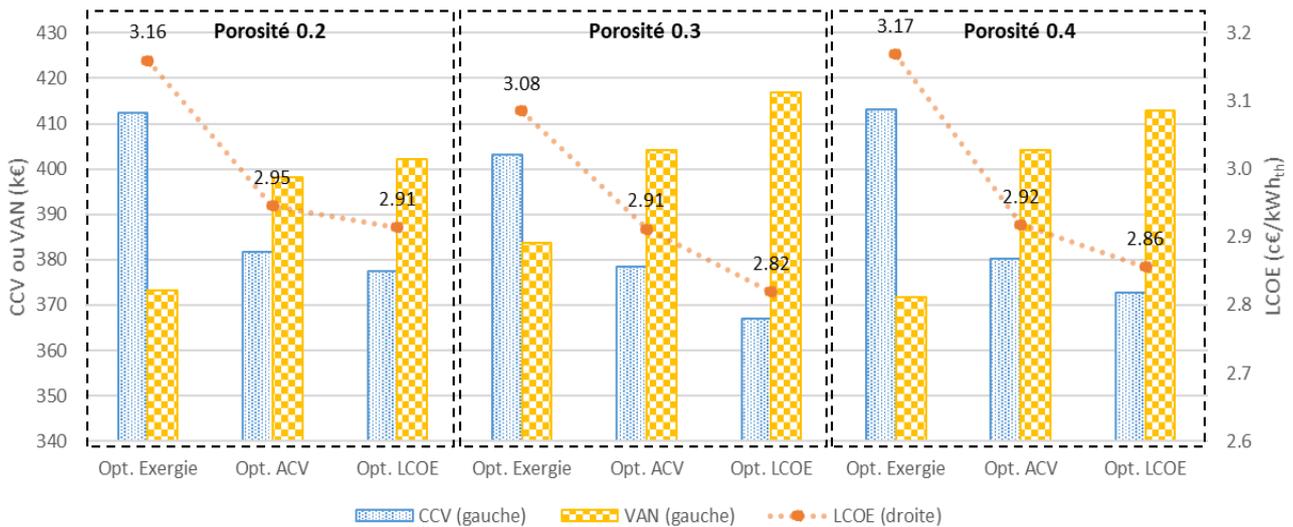


Figure 57 : Évolution des indicateurs économiques des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité

En guise de conclusion, l'étude de sensibilité sur la porosité des matériaux de garnissage a permis de montrer que des porosités élevées, réalisées à partir de billes en vrac semble être un meilleur choix que des porosités faibles. En effet, lorsque ce paramètre augmente, les performances exergetiques du stockage s'améliorent légèrement. De plus, l'empreinte environnementale des cuves diminue lorsque la porosité augmente. Finalement, les indicateurs économiques semblent être optimaux entre 0,3 et 0,4 de porosité. Par conséquent, les garnissages présentant deux solides différents (sable et roches par exemple) ou des lits structurés, demandant plus de main d'œuvre et de temps de fabrication, ne semblent pas pertinents dans le cadre de l'éco-conception d'un stockage thermocline air/cofalit.

3.1. Conclusion

La méthodologie présentée dans le chapitre précédent a été appliquée sur la cuve industrielle haute température Eco-Stock®. Plusieurs simulations mono-objectifs ont été effectuées. Tout d'abord, l'influence des trois critères sur la géométrie des cuves et la granulométrie des particules a été étudiée. Les performances exergetiques sont maximisées pour une cuve effilée ($F_e < 1$) et un faible diamètre de particules ($D_s < 1 \text{ cm}$). Ces résultats sont confirmés par ceux de la littérature (62,101,225). Cependant, plus un réservoir est effilé, plus ses pertes de charge sont élevées, comme indiqué dans plusieurs articles (60,188,207), ce qui entraîne une surconsommation du ventilateur. Par conséquent, l'impact environnemental de la phase

d'utilisation est plus grand, tout comme les coûts d'opération. Afin de minimiser l'empreinte environnementale et le LCOE, des réservoirs de forme trapue doivent être choisis.

Des études de sensibilité sur d'autres paramètres de conception du stockage thermocline ont également été analysés. La porosité, un paramètre physique, et les taux de *cut-off*, un paramètre opératoire, ont été étudiés. Les taux de *cut-off* sont choisis en fonction du type de valorisation souhaitée : *heat-to-heat* ou *heat-to-power*. Plus ces taux sont élevés et meilleure est l'utilisation du volume du stockage. Par conséquent, l'empreinte environnementale et les coûts du système sont réduits. Néanmoins, le rendement exergetique diminue, dû à la décharge de chaleur à des niveaux de température moins élevés. Par la suite, une étude de sensibilité sur la porosité a été effectuée. En structurant un lit de particules ou en mélangeant deux solides de granulométries différentes, des porosités plus faibles peuvent être obtenues. Plus ce paramètre est élevé, meilleurs sont le rendement exergetique et l'impact environnemental. Le LCOE optimal est obtenu pour une porosité entre 0,3 et 0,4. Par conséquent, chercher à diminuer la porosité du lit de solides dans un stockage thermocline ne semble pas être un choix optimal pour maximiser les performances exergetiques, tout en limitant l'empreinte écologique et les coûts. L'utilisation de lits en vrac doit donc être privilégiée.

Ce chapitre a permis d'étudier et d'optimiser de manière mono-objectif l'Eco-Stock®, permettant de valoriser les chaleurs fatales industrielles. Or ce type d'optimisation n'est pas pertinent dans le cas d'une analyse multi-objectifs, puisque les solutions obtenues diffèrent d'une optimisation à l'autre. En effet, le critère exergetique est antagoniste aux critères environnemental et économique. Le CHAPITRE 4 aura donc pour but d'optimiser de manière multi-objectifs ce même stockage thermocline. La meilleure géométrie de cuve et la granulométrie idéale des particules seront sélectionnées, tout comme le couple fluide caloporteur / solide de garnissage, ce qui, à notre connaissance, n'a jamais été réalisé jusqu'à présent. De plus, dans le contexte actuel de limitation des émissions de GES, le carbone évité sera intégré au problème d'optimisation, comme expliquée dans le CHAPITRE 2. Finalement, cette méthodologie sera appliquée à un autre stockage thermocline, intégré dans une centrale CSP.

CHAPITRE 4

OPTIMISATIONS MULTI-CRITERES

Ayant optimisé de manière mono-critère la cuve Eco-Stock® dans le chapitre précédent, des optimisations multi-objectifs sont réalisées dans ce chapitre. Dans un premier temps, l'optimisation tri-objectifs du stockage Eco-Stock® est effectuée. Une solution de compromis est alors sélectionnée par la méthode TOPSIS/Shannon, présentant la géométrie de cuve et la granulométrie des particules idéales. La suite du chapitre a pour but de comparer différents couples fluide caloporteur / solide de garnissage, afin de déterminer le plus performant pour le système de stockage. Les résultats montrent que les cendres de foyer sont le matériau de remplissage le plus performant, suivi de près par les cendres volantes, le basalte et le cofalit. Ensuite, l'étude est menée une seconde fois, en tenant compte du carbone évité. Pour finir, l'optimisation multi-objectifs de la cuve type Andasol, intégrée dans la centrale solaire à concentration Andasol, est réalisée. Dans ce cas, le cofalit devient plus intéressant.

Introduction

Les optimisations mono-objectifs réalisées dans le chapitre précédent n'étant que partielles et donnant des résultats différents, des optimisations multi-objectifs seront effectuées. Deux stockages thermoclines de référence seront optimisés : l'Eco-Stock®, valorisant les chaleurs fatales, et la cuve type Andasol, intégrée dans la centrale solaire à concentration Andasol.

Dans un premier temps, une optimisation tri-objectifs sur l'Eco-Stock®, avec un lit air/bauxite, sera menée. L'objectif sera d'appliquer la méthode TOPSIS/Shannon et de sélectionner la meilleure géométrie de cuve et la granulométrie idéale des particules. Par la suite, la même méthodologie sera effectuée sur différents couples fluide/solide, et le meilleur matériau de garnissage sera finalement sélectionné par la méthode TOPSIS/Shannon. Dans la fin de la première partie du chapitre, le carbone évité sera inclus dans les modèles environnemental et économique (cf. section 2.4.1), et l'étude sera reconduite.

La seconde partie du chapitre se focalisera sur un autre stockage thermocline, type Andasol, beaucoup plus volumineux, et utilisant une huile synthétique comme fluide caloporteur. L'objectif sera d'appliquer la même méthodologie et ainsi de sélectionner la meilleure géométrie de cuve, la granulométrie idéale des particules et le meilleur matériau de garnissage.

L'Eco-Stock® fonctionne entre 20 et 600°C, avec un lit air/bauxite. Le second stockage a été imaginé par Fasquelle (8) pour remplacer le stockage 2-cuves de la centrale solaire à concentration Andasol. De plus grande taille que l'Eco-Stock®, il fonctionne à plus basse température, entre 293 et 393°C, avec un lit huile synthétique/alumine. L'étude de ces deux stockages thermoclines permettra de comparer l'influence de l'air et de l'huile synthétique sur les différentes performances du système.

4.1. Optimisation de la cuve Eco-Stock®

Connaissant l'évolution des géométries de cuve et des granulométries de particules pour les différentes optimisations mono-objectifs réalisées dans le CHAPITRE 3, cette partie s'intéresse à l'optimisation combinée des trois objectifs (rendement exergetique, empreinte environnementale et LCOE). Dans un premier temps, l'optimisation est réalisée sur le lit air/bauxite. Cette section permet d'appliquer la méthode TOPSIS/Shannon sur un problème en 3D pour sélectionner la meilleure géométrie de cuve et la granulométrie idéale des particules solides. Plusieurs matériaux de garnissage sont ensuite testés. Leur mise en forme est explicitée et leurs propriétés thermophysiques, impact environnemental et coût sont comparés. Par la suite, ces mêmes matériaux de remplissage sont classés du meilleur au moins bon dans le cas de la cuve Eco-Stock®. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans *Journal of Energy Storage* (103). Pour finir, la prise en compte du carbone évité dans les modèles environnemental et économique est étudiée pour les mêmes matériaux de remplissage. La même méthodologie est alors appliquée pour sélectionner le meilleur.

4.1.1. Détermination de la géométrie optimale sur un lit air/bauxite

Le but de cette section est de trouver une solution de compromis permettant d'optimiser la géométrie de cuve et la granulométrie des particules solides pour le lit air/bauxite, en appliquant la méthode TOPSIS/Shannon sur l'ensemble de solutions tri-objectifs obtenues.

La Figure 58 présente l'ensemble de Pareto en trois dimensions (3D) obtenu avec l'algorithme génétique multi-objectifs, dans lequel se trouvent les trois optimisations mono-objectifs. Cet ensemble comprend 18 solutions optimales, issues d'une population de 50 individus générée initialement. Le front de Pareto est borné par les optimisations exergetique, environnementale et économique. Les optimisations ACV et LCOE sont proches.

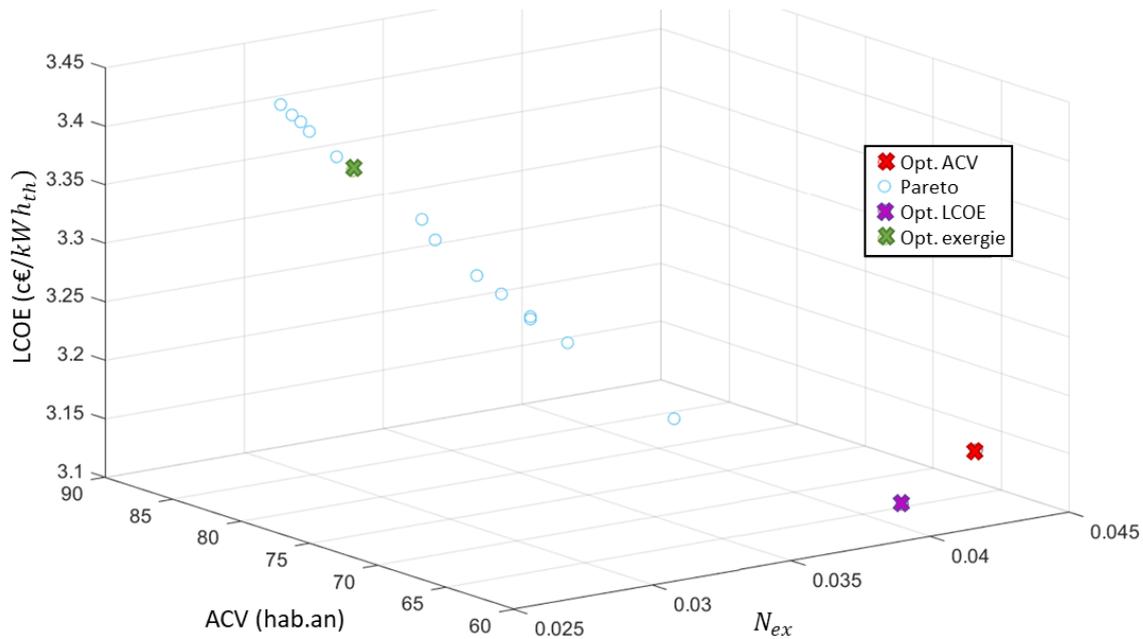


Figure 58 : Ensemble de Pareto en 3D de l'optimisation multi-objectifs air/bauxite

Afin d'analyser l'ensemble de Pareto en 3D, ces mêmes solutions optimales sont représentées en deux dimensions (2D) sur la Figure 59 : les critères exergetique et économique en haut, exergetique et environnemental en bas à gauche, environnemental et économique en bas à droite. Le rendement exergetique semble aller à l'encontre des critères ACV et LCOE, comme montré dans le CHAPITRE 3 pour les optimisation mono-objectifs : 70 % des solutions possèdent des rendements exergetiques très élevées ($N_{ex} \approx 3\%$ soit $\eta_{ex} \approx 97\%$), mais présentent des indicateurs ACV et le LCOE les plus élevés de l'ensemble de Pareto ($ACV > 68$ hab.an, et $LCOE > 3,26$ c€/kWh_{th}).

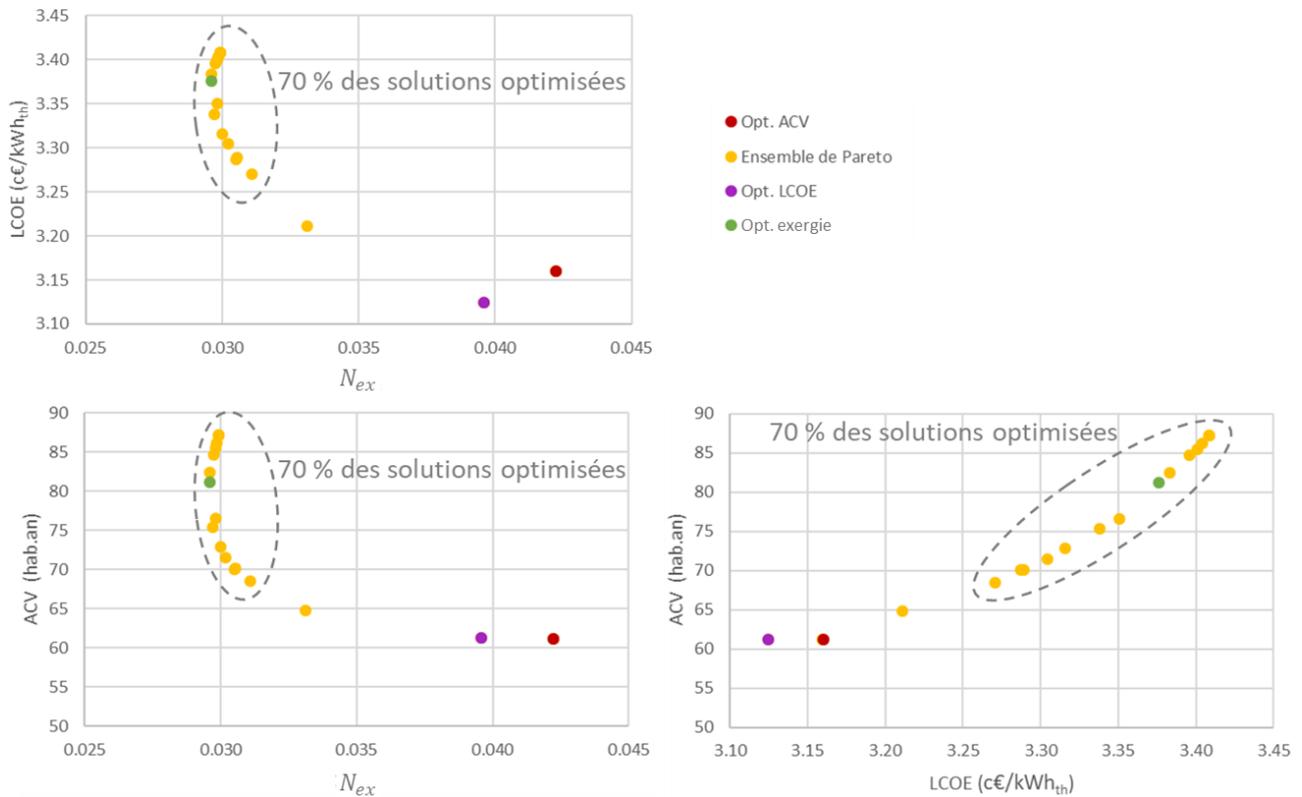


Figure 59 : Ensemble de Pareto en 2D de l'optimisation multi-objectifs air/bauxite

L'ensemble de Pareto des critères ayant été présenté, les facteurs de forme des solutions étudiées doivent être analysés pour comprendre l'évolution des géométries de cuve. La Figure 60 montre les différents facteurs de forme relatifs à l'ensemble de Pareto. Les résultats montrent que le facteur de forme interne reste proche de 0,005 sur tout le front de Pareto. En revanche, le facteur de forme externe varie. Il est compris entre 0,6 (optimisation exergétique) et 1,6 environ (optimisation ACV). Cette variation montre que la géométrie de la cuve de stockage change d'une optimisation à une autre, comme illustré sur la Figure 60 pour les optimisations mono-objectifs. La plupart des solutions des ensembles de Pareto se situent entre un facteur de forme de 0,6 et 0,85, soit une géométrie de cuve effilée. Au vu des facteurs de forme externe des solutions, les diamètres de particules restent proches pour toutes les solutions (entre 8 et 15 mm).

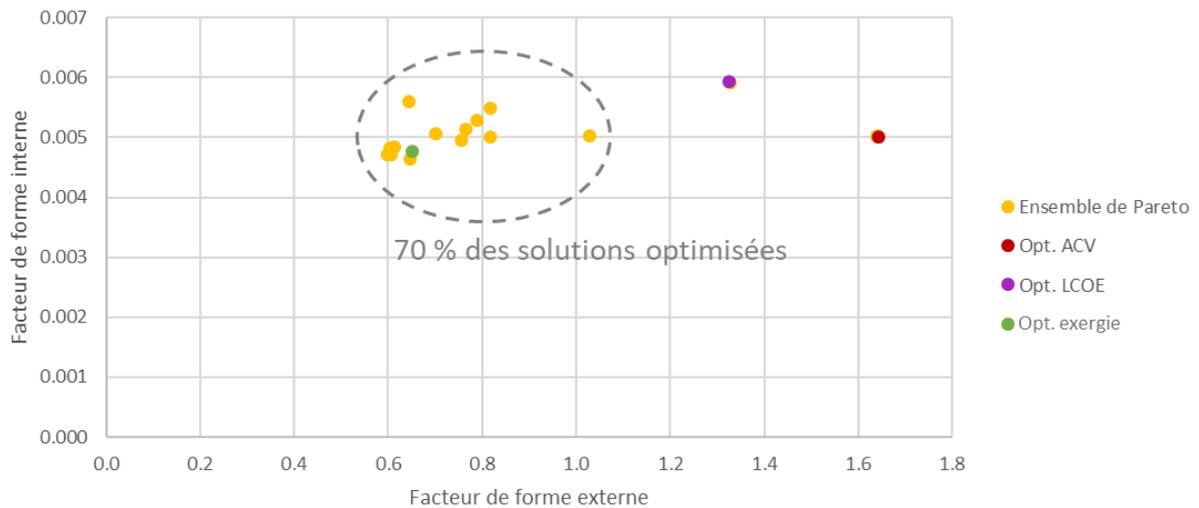


Figure 60 : Facteurs de forme des solutions de l'optimisation multi-objectifs air/bauxite

Revenons à l'ensemble de Pareto en 3D, en fonction des critères, représenté sur la Figure 58. Avant d'appliquer la méthode TOPSIS/Shannon pour déterminer la solution de compromis dans ce front de Pareto, les critères sont tout d'abord normalisés de manière linéaire selon l'éq (A.9) :

$$\widetilde{N}_{ex,t} = \frac{N_{ex,i}}{\sum_{i=1}^n N_{ex,i}} = \frac{\eta_{ex,i}}{\sum_{i=1}^n \eta_{ex,i}}$$

$$\widetilde{ACV}_i = \frac{ACV_i}{\sum_{i=1}^n ACV_i}$$

$$\widetilde{LCOE}_i = \frac{LCOE_i}{\sum_{i=1}^n LCOE_i}$$

L'ensemble de Pareto obtenu après normalisation est donné sur la Figure 61.

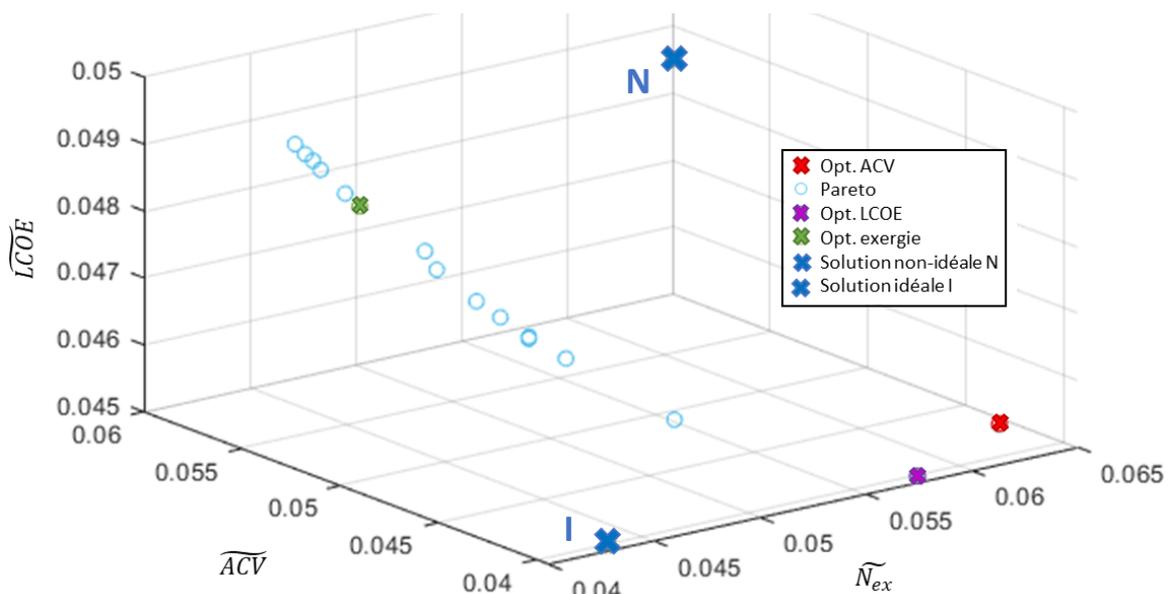


Figure 61 : Ensemble de Pareto normalisé des solutions air/bauxite en 3D

Pour le front de Pareto normalisé, les solution idéale I et non-idéale N sont respectivement de coordonnées $(\widetilde{N}_{ex,min}, \widetilde{ACV}_{min}, \widetilde{LCOE}_{min})$ et $(\widetilde{N}_{ex,max}, \widetilde{ACV}_{max}, \widetilde{LCOE}_{max})$. L'entropie de Shannon est ensuite calculée sur l'ensemble des solutions normalisées, d'après les eq (A.8) et (A.9) :

$$S_{ex} = -\frac{1}{\ln 18} \cdot \sum_{i=1}^{18} \widetilde{N}_{ex,i} \cdot \ln \widetilde{N}_{ex,i} = 0,9967$$

$$S_{ACV} = -\frac{1}{\ln 18} \cdot \sum_{i=1}^{18} \widetilde{ACV}_i \cdot \ln \widetilde{ACV}_i = 0,9971$$

$$S_{LCOE} = -\frac{1}{\ln 18} \cdot \sum_{i=1}^{18} \widetilde{LCOE}_i \cdot \ln \widetilde{LCOE}_i = 0,9998$$

Le critère économique présente l'entropie la plus élevée, rendant compte d'une distribution uniforme du LCOE sur l'ensemble des solutions, comme l'illustre la Figure 62. Les solutions sont donc presque équiprobables sur ce critère, comme expliqué dans le paragraphe 2.5.3.2. Les critères exergétique et environnemental présentent des entropies proches et plus faibles que celle du critère économique, traduisant une plus grande disparité des solutions sur ces deux critères (cf. Figure 62). Par conséquent, leurs pondérations doivent être plus élevées que celle du LCOE, comme le montre les calculs suivants.

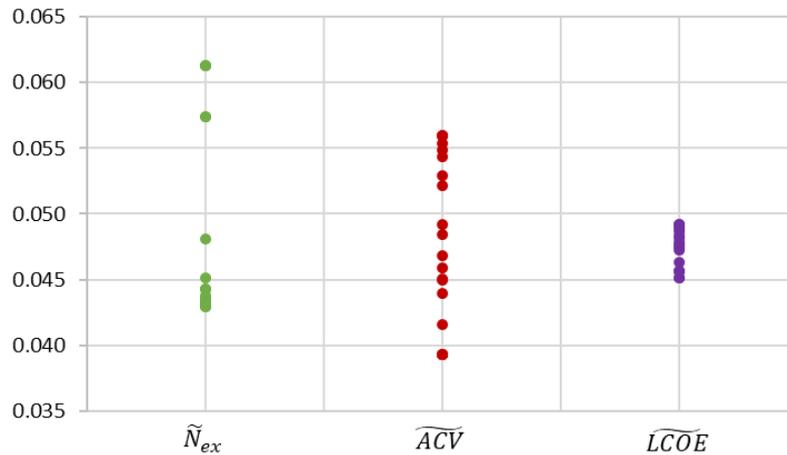


Figure 62 : Solutions normalisées optimales air/bauxite

Les pondérations des critères sont déterminées selon l'eq (A.7) :

$$\omega_{ex} = \frac{1 - S_{ex}}{3 - S_{ex} - S_{ACV} - S_{LCOE}} = 0,520$$

$$\omega_{ACV} = \frac{1 - S_{ACV}}{3 - S_{ex} - S_{ACV} - S_{LCOE}} = 0,456$$

$$\omega_{LCOE} = \frac{1 - S_{LCOE}}{3 - S_{ex} - S_{ACV} - S_{LCOE}} = 0,024$$

La pondération issue de l'entropie de Shannon donne nettement moins de poids au critère économique. En effet, les solutions sont regroupées autour d'une valeur moyenne (0,048 sur la Figure 62) sur le LCOE. A contrario, les pondérations exergétique et environnementale sont proches de 0,5. Ces pondérations sont ensuite appliquées aux solutions normalisées :

$$\widehat{N}_{ex,i} = \omega_{ex} \cdot \widetilde{N}_{ex,i}, \quad \widehat{ACV}_i = \omega_{ACV} \cdot \widetilde{ACV}_i, \quad \widehat{LCOE}_i = \omega_{LCOE} \cdot \widetilde{LCOE}_i$$

et conduisent au front de Pareto normalisé et pondéré de la Figure 63, sur laquelle les solutions idéale I et non idéale N sont respectivement de coordonnées $(\widehat{N}_{ex,min}, \widehat{ACV}_{min}, \widehat{LCOE}_{min})$ et $(\widehat{N}_{ex,max}, \widehat{ACV}_{max}, \widehat{LCOE}_{max})$.

L'application de la méthode TOPSIS conduit à rechercher la solution S qui minimise le rapport des distances euclidiennes $\frac{SN}{SI+SN}$ (cf. Figure 63). La solution sélectionnée comme meilleur compromis est située au milieu de l'ensemble de Pareto, entre les optimisations économique et exergétique ($\eta_{ex} = 0,9689$; $ACV = 68$; $LCOE = 3,3$). En observant l'ensemble de Pareto en 2D (cf. Figure 59), cette solution est située avant les fortes dégradations des critères ACV et LCOE, tout en étant à 0,0015 points du rendement exergétique maximal.

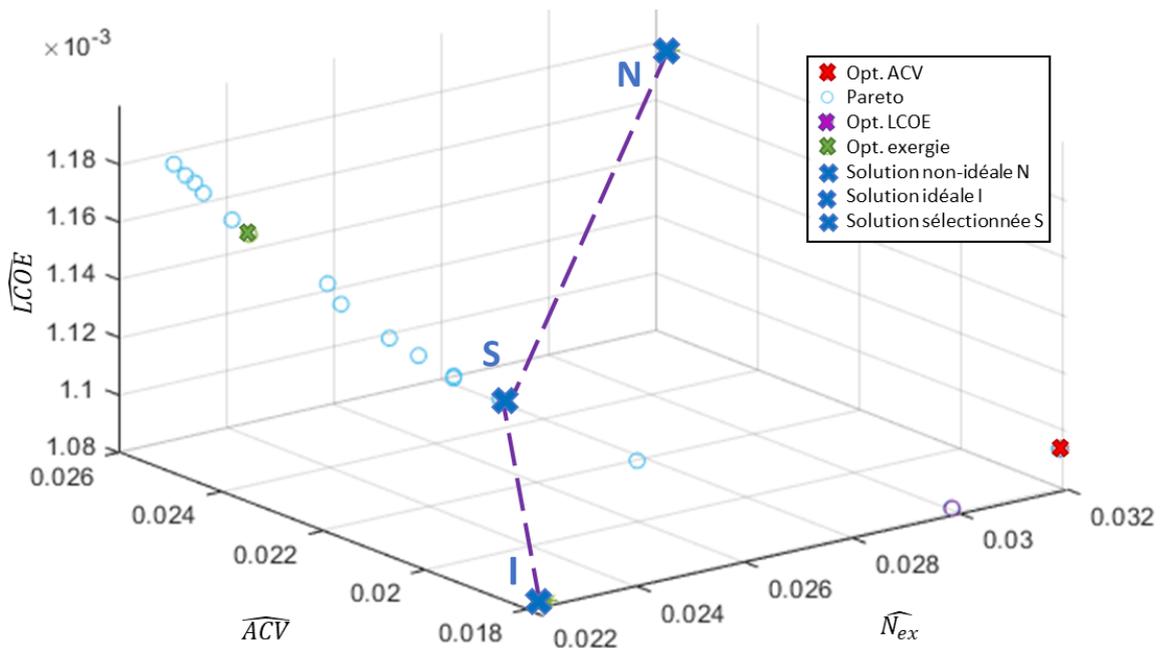


Figure 63 : Ensemble de Pareto normalisé et pondéré des solutions air/bauxite en 3D et sélection de la solution de compromis via la méthode TOPSIS

4.1.2. Sélection du matériau de garnissage optimal et de sa géométrie associée

Dans cette section sont comparés différents lits de solides de remplissage pour un même fluide caloporteur : de l'air car l'Eco-Stock® fonctionne jusqu'à 600°C. Dans un premier temps, les propriétés thermophysiques et le coût des sept matériaux de garnissage considérés sont évalués. Afin de comparer l'impact environnemental de ces matériaux, les différentes manières de les fabriquer sont détaillées. Ensuite, à partir des propriétés thermophysiques, du coût et de l'empreinte écologique, les solides de remplissage sont classés par la méthode TOPSIS/Shannon. Pour finir, des optimisations multi-objectifs sont effectuées pour chacun des couples fluide/solide. Les performances exergétique, environnementale et économique des solutions sont analysées pour déterminer le meilleur solide de garnissage à utiliser pour optimiser le stockage thermocline industriel Eco-Stock®.

4.1.2.1. Comparaison des matériaux de garnissage testés

Dans ce paragraphe, sept solides de remplissage sont comparés :

- Des matériaux usinés (bauxite et alumine),
- Des matériaux issus des déchets (cendres volantes, cendres de foyer et cofalit),
- Des roches naturelles (basalte et quartzite).

L'utilisation de matériaux issus des déchets ou de roches naturelles devrait réduire l'empreinte environnementale et le coût du stockage, par rapport à des matériaux usinés. L'objectif de ce paragraphe est de comparer puis classer, avec la méthode TOPSIS/Shannon, les TESM selon leurs propriétés thermophysiques, leur impact environnemental et leur coût.

L'effusivité ($\epsilon = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$), qui caractérise la vitesse à laquelle un matériau peut absorber la chaleur, est déterminée. Le coût du solide est représenté en fonction de l'effusivité sur la Figure 64. Les matériaux usinés présentent les meilleures effusivités. Néanmoins, leur coût est relativement important par rapport aux autres matériaux considérés. En effet, la bauxite et l'alumine sont respectivement 30 et 53 fois plus chères que les roches naturelles et matériaux issus des déchets. Ces derniers présentent les moins bonnes effusivités. Par rapport à la bauxite (matériau de référence de l'Eco-Stock®), l'effusivité des matériaux issus des déchets est en

moyenne 44 % plus petite, et celle des roches naturelles 20 % plus faible. L'effusivité et le coût des cendres volantes, du cofalit et du basalte sont proches.

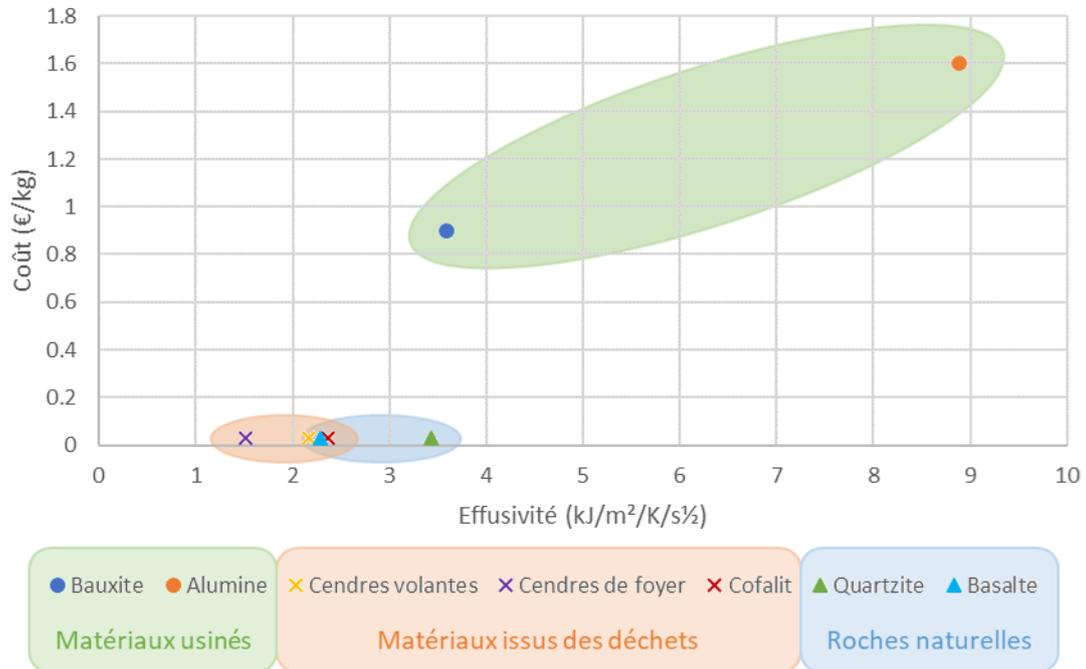


Figure 64 : Évolution du coût en fonction de l'effusivité des sept matériaux de remplissage

Pour déterminer l'empreinte environnementale de chaque matériau de garnissage, leur phase d'élaboration doit être explicitée. Dans ce paragraphe est détaillée la phase de conception des sept matériaux de remplissage considérés. L'inventaire du cycle de vie de l'Eco-Stock®, basé sur les travaux de Lalau *et al.* (127,212), est le même pour tous les solides de garnissage testés. L'ANNEXE A.6 présente la liste des différents composants considérés, en relation avec la base de données EcoInvent v.3.7.1.

Lalau *et al.* (127,212) ont détaillé les phases d'élaboration des billes de bauxite, de cendres volantes et de foyer. La même méthode est utilisée dans cette étude. La mise en forme des céramiques obtenues à partir de ces trois matériaux inclut la formation des billes, leur séchage et leur cuisson (cf. ANNEXE A.7).

L'élaboration des billes d'alumine, présentée sur la Figure 65, est similaire à celle des particules de bauxite, avec leur formation, leur séchage et leur cuisson. La seule différence se situe au niveau de la composition des billes, provenant de l'entreprise Xieta⁴.

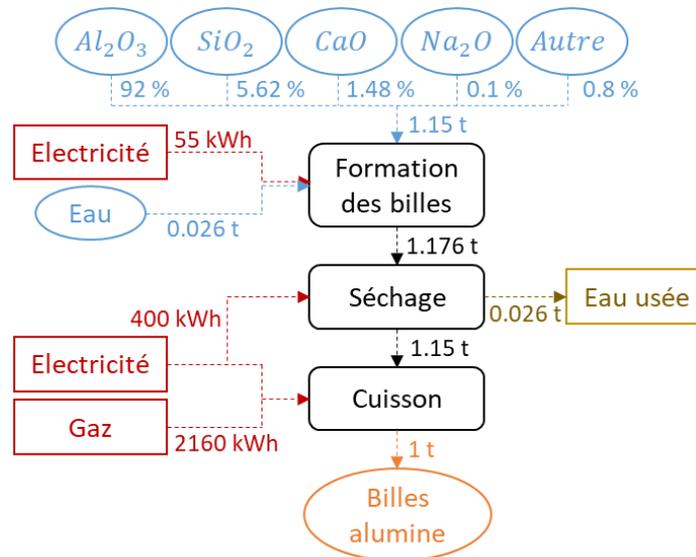


Figure 65 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes d'alumine

La mise en forme de briques de cofalit, une céramique recyclée obtenue par inertage de déchets amiantés, a également été explicitée par Lalau *et al.* (123). Le scénario le plus crédible est préféré (scénario 2 réaliste : refroidissement passif dans des moules de sables isolés). Dans les travaux présentés ici, le diamètre des particules étant considéré comme variable d'optimisation (à travers le facteur de forme interne), les moules seront donc confectionnés afin de créer des briques de cofalit de diamètre équivalent. La Figure 66 présente les dimensions de ces moules. De ce fait, l'ACV réalisée pour la mise en forme de ce matériau de garnissage diffère légèrement de celle présentée par Lalau *et al.* (123). Les briques réfractaires poreuses et l'épaisseur de sable de moulage dépendent du diamètre équivalent des briques de cofalit (appelé D_s , comme l'illustre la Figure 66). La consommation électrique des équipements de moulage reste inchangée (123).

⁴ <https://xieta.com/index.php/fr/produits/billes-d-alumine-d-haute-densite-xieta-92>

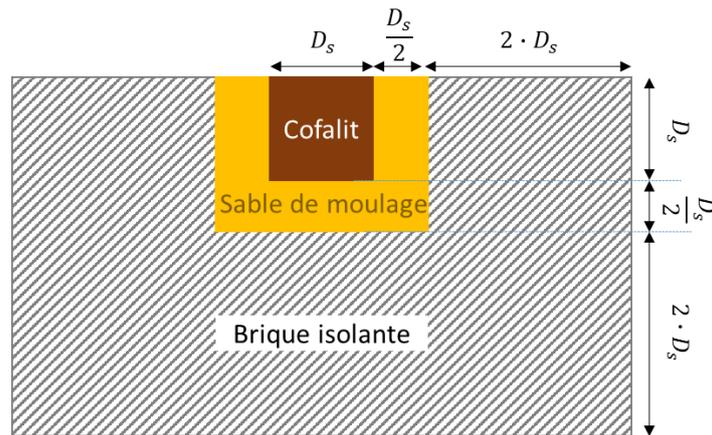


Figure 66 : Dimensions des moules pour confectionner des briques de cofalit

Enfin, pour ce qui est des roches naturelles, seul le concassage est pris en compte dans la phase d'élaboration des solides. Selon Shahriar *et al.* (226), la plupart des exploitations à ciel ouvert nécessitent 5 à 10 kWh d'énergie équivalente par tonne de roche manipulée. La première valeur est utilisée dans cette étude. De plus, des pertes de 5 % sont considérées lors du concassage des roches naturelles. La Figure 67 illustre les étapes pour élaborer des billes de roches naturelles.

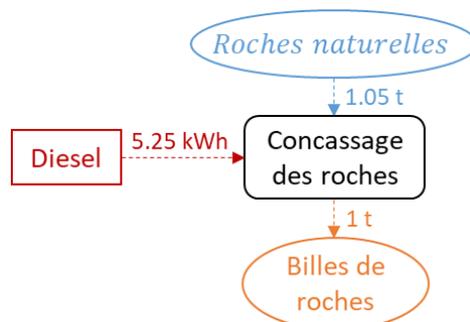


Figure 67 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes de roches naturelles

Les sept solides de remplissage sont conçus de manière différente. Leur impact environnemental normalisé par tonne est donné sur la Figure 68. L'empreinte écologique totale d'une tonne de bauxite et d'alumine s'élève à 0,95 hab.an, de cendres volantes et de foyer à 0,12 hab.an, de cofalit à 0,23 hab.an, et du basalte et du quartzite à 0,01 hab.an. Par rapport aux matériaux usinés, les matériaux issus des déchets ont un impact environnemental 83 % plus faible, alors que celui des roches naturelles est quasi nul. La Figure 68 met ainsi en évidence l'intérêt d'utiliser des matériaux issus des déchets ou des roches naturelles pour limiter l'empreinte écologique du stockage.

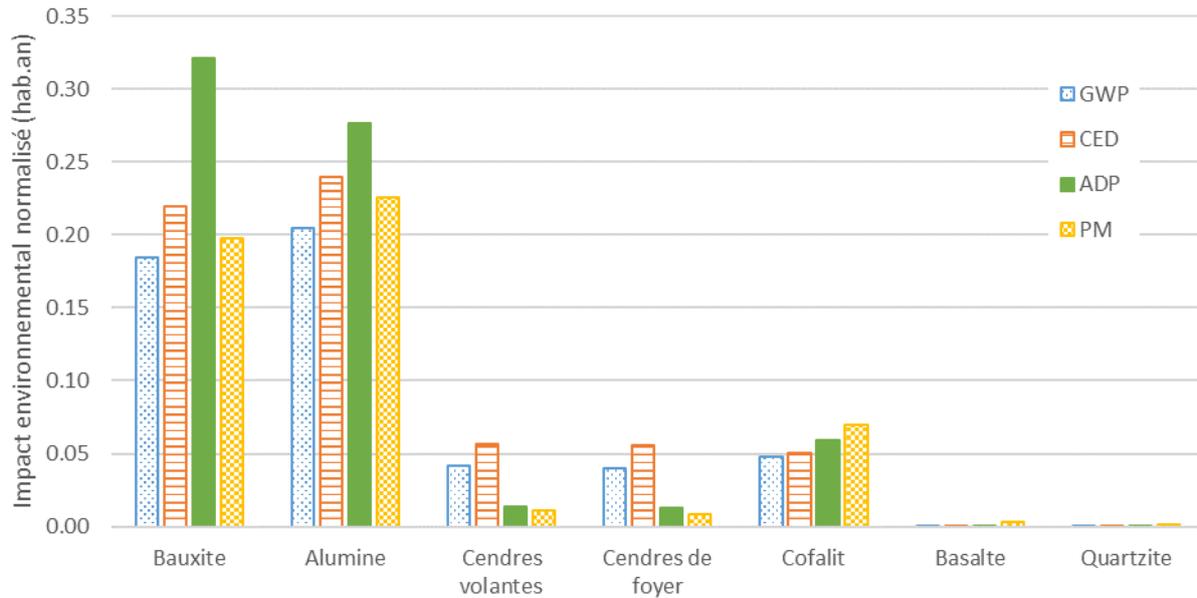


Figure 68 :Impact environnemental normalisé (hab.an) d’une tonne de matériau de garnissage selon les quatre indicateurs GWP, CEP, ADP et PM

Pour sélectionner le meilleur solide de remplissage en fonction de son effusivité, son coût et son impact environnemental, la méthode TOPSIS/Shannon est utilisée. Les trois critères considérés (effusivité, coût et empreinte environnementale) sont normalisés de façon linéaire :

$$\tilde{\epsilon}_i = \frac{\epsilon_i}{\sum_{i=1}^7 \epsilon_i} \quad ; \quad \tilde{C}_{s,i} = \frac{C_{s,i}}{\sum_{i=1}^7 C_{s,i}} \quad ; \quad \widetilde{ACV}_i = \frac{ACV_i}{\sum_{i=1}^7 ACV_i}$$

L’entropie de Shannon est ensuite déterminée :

$$S_{\epsilon} = -\frac{1}{\ln 7} \cdot \sum_{i=1}^7 \tilde{\epsilon}_i \cdot \ln \tilde{\epsilon}_i = 0,9010$$

$$S_{C_s} = -\frac{1}{\ln 7} \cdot \sum_{i=1}^7 \tilde{C}_{s,i} \cdot \ln \tilde{C}_{s,i} = 0,4764$$

$$S_{ACV} = -\frac{1}{\ln 7} \cdot \sum_{i=1}^7 \widetilde{ACV}_i \cdot \ln \widetilde{ACV}_i = 0,6649$$

A partir des entropies de Shannon, les pondérations des trois critères sont calculées :

$$\omega_{\epsilon} = 0,063 \quad ; \quad \omega_{C_s} = 0,571 \quad ; \quad \omega_{ACV} = 0,366$$

Étant donné que les entropies des critères environnemental et économique sont faibles, leurs pondérations sont élevées devant celle de l’effusivité. En effet, la plupart des solutions présentent un faible impact environnemental pour un coût réduit (cf. Figure 64 et Figure 68). C’est le cas des trois matériaux issus des déchets et des deux roches naturelles, sur les sept

matériaux de garnissage comparés dans ce paragraphe. Les pondérations calculées sont ensuite affectées aux solutions normalisées :

$$\hat{\epsilon}_i = \omega_\epsilon \cdot \tilde{\epsilon}_i \quad ; \quad \hat{C}_{s,i} = \omega_{C_s} \cdot \tilde{C}_{s,i} \quad ; \quad \widehat{ACV}_i = \omega_{ACV} \cdot \tilde{ACV}_i$$

La méthode TOPSIS est finalement appliquée sur les solutions normalisées et pondérées. Le Tableau 18 présente les différentes valeurs des paramètres déterminés tout au long des étapes de cette méthode d'aide à la décision. Les trois critères sont donnés dans les colonnes 2 à 4. Les critères normalisés et pondérés dans les colonnes 5 à 7. Les distances euclidiennes aux solutions non-idéale (colonne 8) et idéale (colonne 9), et le ratio des distances (colonne 10) sont également présentés. Ces distances sont déterminées à partir de la solution idéale ($\widehat{\epsilon}_{max} = 0,002$, $\widehat{ACV}_{min} = 0,001$, $\widehat{C}_{s,min} = 0,007$) et non-idéale ($\widehat{\epsilon}_{min} = 0,001$, $\widehat{ACV}_{max} = 0,157$, $\widehat{C}_{s,max} = 0,363$). Finalement, le classement obtenu est le suivant : quartzite, basalte, cendres volantes, cendres de foyer, cofalit, bauxite et alumine. Ainsi, les matériaux les moins onéreux et présentant une faible empreinte environnementale sont à privilégier.

Tableau 18 : Matrice des évaluations, distances euclidiennes et ratio des distances (classement des matériaux de garnissage selon leurs propriétés thermophysiques, ACV et coût)

	Critères			Critères normalisés et pondérés			Distances euclidiennes		Ratio
	ϵ (kJ/m ² /K/s ^{1/2})	ACV (hab.an/kg)	Coût C _s (€/kg)	$\hat{\epsilon}_i$	\widehat{ACV}_i	$\hat{C}_{s,i}$	SN	SI	$\frac{SN}{SN + SI}$
Quartzite	2,61	6	0,03	0,001	0,001	0,007	0,0007	0,3886	0,9981
Basalte	2,08	3	0,03	0,001	0,001	0,007	0,0009	0,3887	0,9976
Cendres de foyer	2,31	117	0,03	0,001	0,019	0,007	0,0189	0,3815	0,9529
Cendres volantes	2,60	123	0,03	0,001	0,020	0,007	0,0198	0,3812	0,9506
Cofalit	3,20	227	0,03	0,002	0,038	0,007	0,0370	0,3754	0,9102
Bauxite	3,23	924	0,9	0,002	0,153	0,204	0,2492	0,1588	0,3892
Alumine	3,75	946	1,6	0,002	0,157	0,363	0,3887	0,0009	0,0024

4.1.2.2. Optimisation et sélection du meilleur matériau de garnissage

Pour sélectionner la configuration optimale du système de stockage, c'est-à-dire le meilleur matériau de garnissage et la géométrie de cuve optimale à lui associer, la méthodologie développée précédemment (cf. section 4.1.1) est appliquée. Dans un premier temps, l'algorithme génétique multi-objectifs de Matlab® permet d'obtenir un ensemble de solutions

optimisées pour un couple fluide/solide. Ensuite, une solution de compromis est sélectionnée via la méthode TOPSIS/Shannon. Cette solution présente la géométrie de cuve et la granulométrie des particules idéales pour optimiser à la fois les critères exergetique, environnemental et économique. Ces deux actions sont répétées pour chaque couple fluide/solide testé. La résolution des sept problèmes d'optimisations multi-objectifs et l'application des méthodes d'aide à la décision permettent de sélectionner les solutions à mi-chemin entre les optimisations exergetique et économique pour chacun des couples fluide/solide testés. Ce paragraphe vise à classer les matériaux de garnissage et sélectionner le meilleur, à partir des solutions multi-objectifs sélectionnées. Les performances des sept solutions sélectionnées, optimisées géométriquement, sont comparées pour arriver à cet objectif.

Tout d'abord, la géométrie des cuves et la granulométrie des particules sont illustrées sur la Figure 69 pour les configurations sélectionnées. Le dégradé des couleurs correspond au placement de la solution sélectionnée dans l'ensemble de Pareto, avec le vert et le violet respectivement pour les optimisations exergetique et économique. La bauxite, l'alumine et le cofalit présentant des produits (ρc) élevés, le volume de leur cuve est le plus faible. Les stockages avec des cendres volantes ou de foyer et du basalte présentent des volumes environ 25 % plus grands. A cause d'un produit (ρc) plus faible, le volume du stockage avec du quartzite est 75 % plus élevé que ceux avec bauxite, alumine ou cofalit. Les diamètres de particules sont plus importants pour l'alumine et le quartzite, car les conductivités thermiques de ces deux matériaux sont plus élevées que pour les autres TESM. Quant aux formes des cuves, elles sont carrées à trapues, exceptées pour les configurations avec alumine et quartzite.

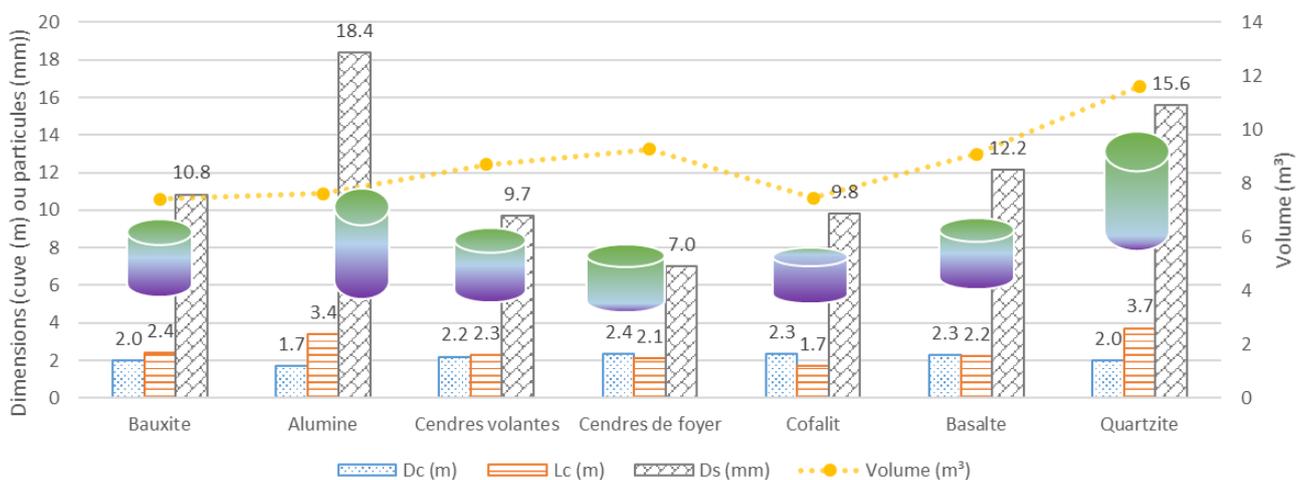


Figure 69 : Dimensions des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents

L'influence du choix du matériau de garnissage sur la géométrie de cuve optimale vient d'être étudiée. Désormais, cette influence va être analysée sur les performances exergetique, environnementale et économique des systèmes. Les profils limites de température sont présentés sur la Figure 70 en fonction des longueurs de cuve normalisées, pour les sept solutions sélectionnées. Ces profils se superposent pour quatre matériaux de garnissage (bauxite, cofalit, quartzite et basalte), ce qui montre des similarités entre les performances exergetiques de ces différents matériaux. Ceux des cendres volantes et de foyer sont légèrement plus pentus, alors que ceux de l'alumine sont moins raide. Par conséquent, la stratification est meilleure pour l'optimisation avec cendres volantes ou de foyer, et moins bonne pour celle avec alumine. En effet, les diamètres de particules nettement plus importants pour l'alumine limitent les échanges entre le fluide caloporteur et les solides de garnissage, ce qui détériorent le rendement exergetique. Les performances exergetiques et énergétiques sont influencées de la même manière, comme l'illustre la Figure 71, donnant le rendement exergetique et le taux d'utilisation énergétique de chacune des configurations.

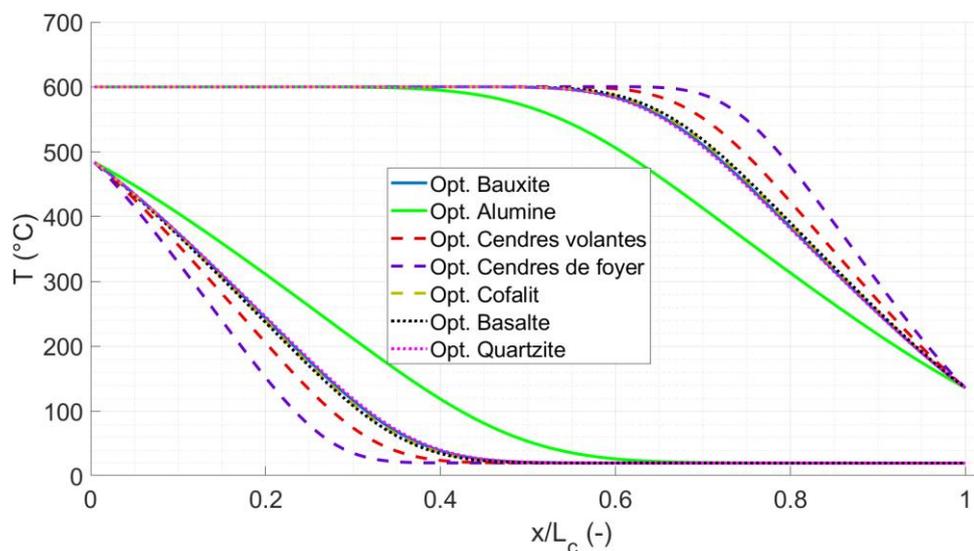


Figure 70 : Profils limites de température des sept solutions sélectionnées

Les rendements exergetiques des optimisations avec bauxite, cofalit, quartzite et basalte sont en moyenne de 97,0 %. Ceux des solutions avec cendres volantes et de foyer atteignent respectivement 97,7 et 98,0 %. En revanche, celle de la configuration avec alumine est de 95,3 %. Les mêmes tendances sont visibles et plus accentuées avec les taux d'utilisation énergétique. Pour l'alumine, il est plus de 17 % plus faible en moyenne que pour les solutions

avec bauxite, cofalit, quartzite et basalte (68,0 %). Avec les cendres de foyer, la zone active entre les profils limites de température étant plus grande, le taux d'utilisation est le plus élevé.

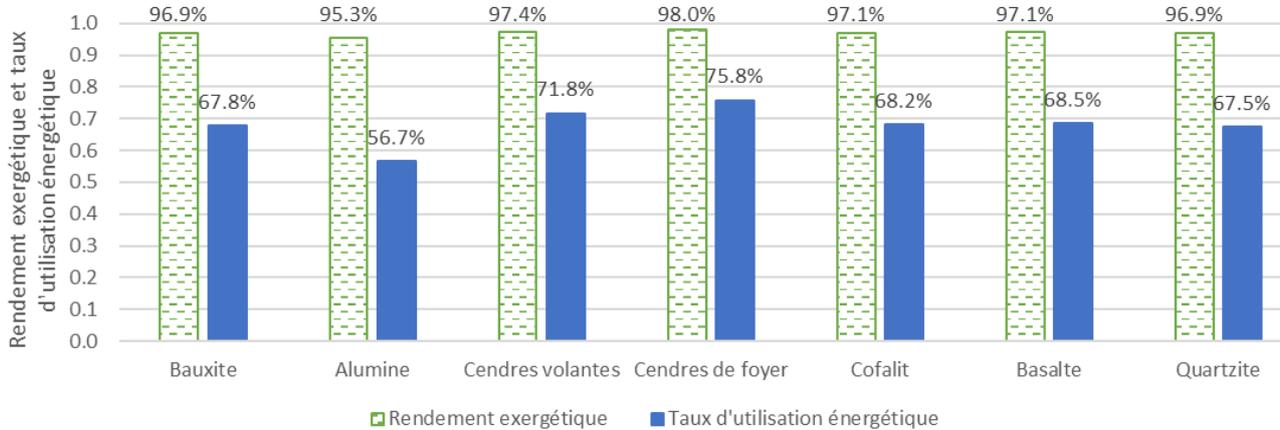


Figure 71 : Rendement exergetique et taux d'utilisation énergetique des sept solutions sélectionnées

L'influence des matériaux de garnissage est désormais étudiée sur l'empreinte écologique du stockage. La répartition de l'impact environnemental est représenté par indicateurs écologiques et phase du cycle de vie sur la Figure 72 pour les sept solutions sélectionnées. Pour plus de clarté, l'empreinte moyenne des matériaux issus des déchets, qui sont similaires, ont été regroupées (Déc. : cendres volantes et de foyer, et cofalit), ainsi que celles des roches naturelles (RN : quartzite et basalte). L'indicateur GWP des matériaux usinés est 1,5 à 2,5 fois plus impactant que pour les autres TESM. La même tendance est visible pour les indicateurs CED (multiplication de 1,3 à 2,7) et PM (+ 14 à 56 %). L'indicateur ADP est également plus grand dans le cas des solutions avec matériaux usinés (2 à 24 %). Finalement, l'empreinte totale de ces deux solutions atteint 68 (bauxite) et 78 hab.an (alumine). Quant aux autres solutions, elles sont près d'un quart moins impactante environnementalement (empreinte totale moyenne de 56 hab.an), et leurs indicateurs sont similaires.

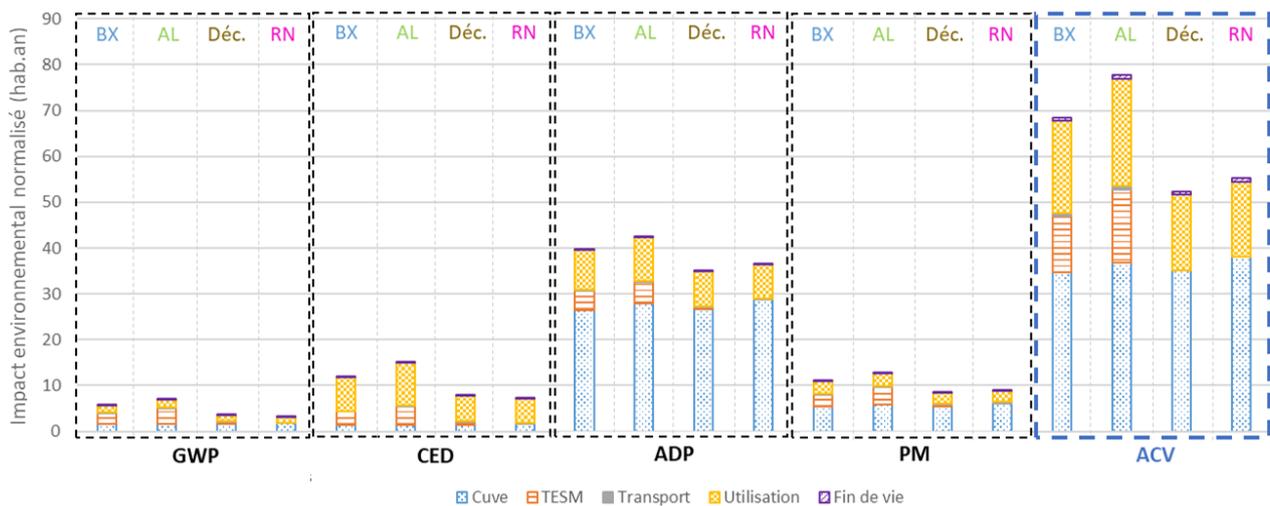


Figure 72 : Impact environnemental normalisé par phase du cycle de vie et par indicateurs des sept solutions sélectionnées

Les configurations avec matériaux issus des déchets et basalte présentent des designs similaires : la phase d'utilisation de ces TES est semblable, avec un impact environnemental de 16 hab.an. Pour les matériaux usinés et le quartzite, l'empreinte de cette phase est 32 % plus importante puisque les géométries de ces stockages sont plutôt effilées, entraînant une plus grande consommation énergétique du ventilateur, comme expliqué dans le chapitre précédent (cf. section 3.1.3). La phase de formation des billes de matériaux usinés (bauxite et alumine) représente en moyenne 19 % de l'impact environnemental total. Pour les cinq autres TESM, cette phase est nettement moins importante (3 % en moyenne pour les matériaux issus des déchets et quasi-nulle pour les roches naturelles). En effet, leur mise en forme nécessite moins d'énergie que celle des matériaux usinés (cf. paragraphe 4.1.2.1 et ANNEXE A.7). Finalement, l'impact de la phase de conception de la cuve est plus grand pour la solution avec quartzite (40 hab.an), à cause du volume plus important de cette cuve (cf. Figure 69). Quant aux configurations avec de la bauxite et du cofalit, leur volume étant plus faible (cf. Figure 69), l'impact écologique de leur conception l'est également (34 hab.an).

L'utilisation d'une des cuves optimisées permet de réduire considérablement l'empreinte environnementale de la chaleur restituée par rapport à celle issue de la combustion de gaz naturel, pour une même énergie restituée (27 423 MWh_{th} sur 25 ans) : -99 % pour les indicateurs GWP et CED, -88 % pour le PM et -65 % pour l'ADP. Un tel système est donc très intéressant d'un point de vue environnemental.

Avant de sélectionner le meilleur matériau de garnissage, les performances économiques sont comparées pour les sept solutions sélectionnées. L'utilisation de matériaux issus des déchets ou de roches naturelles réduit les coûts du TESM à moins de 550 € (-97 % en moyenne par rapport aux solutions avec bauxite et alumine). Le coût du réservoir est proche entre les configurations avec bauxite, alumine et cofalit (149 k€), dû à un volume de stockage similaire (cf. Figure 69). A l'inverse, celui du quartzite est un quart plus grand. Pour les autres matériaux, ce coût est similaire (en moyenne 163 k€). Par conséquent les coûts d'investissement sont les plus faibles pour le cofalit (277 k€). Les solutions avec bauxite, cendres volantes et basalte sont en moyenne 10 % plus chères à l'investissement que celle avec cofalit. Quant aux configurations avec alumine et quartzite, leurs coûts d'investissement s'élèvent respectivement à 338 et 347 k€. Malgré ses excellentes propriétés thermophysiques, le coût élevé de l'alumine ne permet pas de rendre compétitif son utilisation dans un stockage thermocline.

Les coûts d'investissement du stockage avec cofalit étant les plus faibles, les indicateurs économiques de cette configuration sont les meilleurs, comme le montre la Figure 73 avec les indicateurs économiques de toutes les solutions sélectionnées. En effet, la VAN dépasse les 404 k€, soit 9 % de plus que la configuration avec basalte. L'utilisation d'alumine et de quartzite réduit la VAN respectivement de 84 et 96 k€ par rapport au cofalit. Quant aux autres matériaux, leur VAN est proche, 46 k€ de moins en moyenne que la solution avec cofalit. Les deux autres indicateurs suivent logiquement les mêmes tendances. Ainsi, l'utilisation de cofalit comme matériau de garnissage permet d'atteindre un LCOE de 2,9 c€/ kWh_{th}, i.e. 52 % de moins que le prix du gaz naturel en France (6,0 c€/ kWh_{th}).

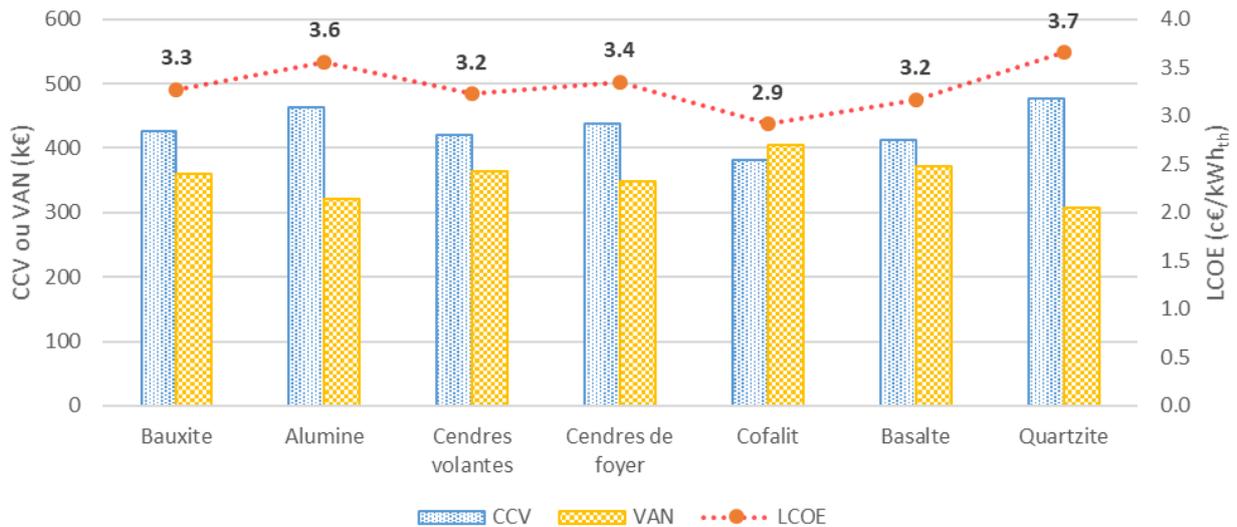


Figure 73 : Indicateurs économiques des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents

Les performances des sept réservoirs optimisés géométriquement ont été analysées dans ce paragraphe. Pour résumer, les performances exergetiques et énergetiques sont peu influencées par le matériau de garnissage utilisé, car toujours très élevées (rendement exergetique supérieur à 95,3 %). Les critères environnemental et économique varient de manière plus prononcée. L'utilisation de matériaux issus des déchets ou de roches naturelles limitent l'impact environnemental à moins de 61 hab.an, soit 16 % de moins qu'avec des matériaux usinés. Cette grande différence est notamment due à la phase de conception des matériaux de remplissage, beaucoup plus énergivore pour des matériaux usinés. Quant au LCOE, il est le plus faible avec du cofalit, et le plus élevé avec du quartzite, à cause d'un volume de stockage plus important, et de l'alumine, pénalisée par son coût.

Afin de sélectionner une solution de compromis générale présentant le meilleur matériau de garnissage, la méthode TOPSIS/Shannon est appliquée aux sept solutions optimisées géométriquement. Après normalisation de ces solutions, les entropies de Shannon sont calculées ($S_{ex} = 0,9855$; $S_{ACV} = 0,9946$; $S_{LCOE} = 0,9988$). La Figure 74 illustre bien la différence entre les entropies. En effet, les solutions sur le critère LCOE sont plus regroupées (autour de 0,143 sur la Figure 74) que sur le critère ACV, et également sur le critère exergetique. Une hiérarchie des critères se forme donc : LCOE, ACV et rendement exergetique. L'entropie du critère exergetique étant la plus faible, sa pondération est par conséquent la plus élevée. A contrario, celle du critère économique est la plus grande, ce qui confère au LCOE une

pondération proche de 0. Les pondérations de Shannon déterminées valent ainsi 0,687, 0,255 et 0,058 respectivement pour les critères exergétique, environnemental et économique.

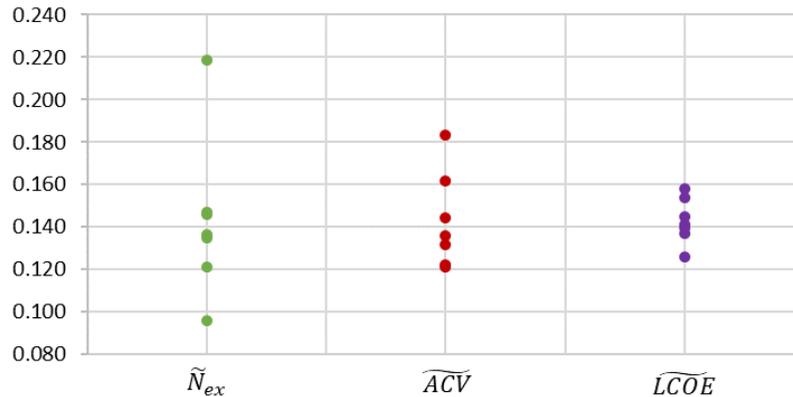


Figure 74 : Solutions normalisées optimales avec sept matériaux de garnissage différents

Les cendres volantes, de foyer, le cofalit et le basalte présentent des performances exergétiques et un impact environnemental similaires. Les pondérations jouent donc un rôle primordial sur le choix du meilleur matériau. Les critères des différentes solutions sont rappelés dans le Tableau 19 (colonnes 2 à 4). Le ratio des distances euclidiennes (colonne 5) permet de classer les solutions (colonne 6). Finalement, le classement obtenu via la méthode TOPSIS est le suivant : cendres de foyer, cendres volantes, basalte, cofalit, quartzite, bauxite et alumine. Ce classement n'est pas le même que celui obtenu d'après leur effusivité, impact environnemental et coût (cf. paragraphe 4.1.2.1). Cela montre qu'au-delà des propriétés intrinsèques des matériaux de garnissage, leurs mises en œuvre optimales (géométrie de la cuve et granulométrie des particules) restent essentielles. Les cendres de foyer apparaissent comme étant le meilleur matériau de garnissage puisqu'il maximise l'efficacité exergétique tout en maintenant un LCOE petit (0,4 c€/kWh_{th} de plus que la solution minimisant ce critère) et une faible empreinte environnementale (58 hab.an). Les cendres volantes, le basalte et le cofalit sont également prometteurs puisque leur LCOE est plus petit que celui des cendres de foyer, pour d'aussi bonnes, voire légèrement inférieures, performances exergétiques et environnementales. Malgré une bonne effusivité, due à une excellente conductivité, un impact environnemental quasi-nul et un faible coût, le quartzite ne présente pas d'aussi bons résultats dans un TES. En effet, une capacité thermique volumique élevée ($\rho c \geq 2,6 \text{ MJ/K/m}^3$) est primordiale pour un stockage, alors qu'une conductivité importante peut augmenter les tailles de particules et donc limiter les échanges convectifs fluide/solide. Quant aux matériaux usinés, leur coût et l'énergie consommée pour leur mise en forme les pénalisent beaucoup.

Tableau 19 : Matrice des évaluations et ratio des distances (classement des solutions avec sept matériaux de garnissage différents pour l'Eco-Stock®)

	Critères			Ratio	Classement
	N_{ex} (%)	ACV (hab.an)	LCOE (c€/kWh _{th})	$\frac{SN}{SN + SI}$	
Cendres de foyer	2,05	57,7	3,35	0,9553	1
Cendres volantes	2,58	55,8	3,23	0,7968	2
Basalte	2,88	51,3	3,17	0,6905	3
Cofalit	2,90	51,8	2,92	0,6803	4
Quartzite	3,12	61,1	3,66	0,5882	5
Bauxite	3,11	68,5	3,27	0,5838	6
Alumine	4,66	77,8	3,56	0,0030	7

D'autres indicateurs environnementaux et économiques ont été calculés pour la solution générale sélectionnée (lit air/cendres de foyer). Les temps de retours environnementaux (PBT) sont moins élevés que la cuve de référence, comme l'illustre la Figure 75a. Les indicateurs de l'Eco-Stock® sont représentés en bleu, et ceux de la solution optimisée en orange. Les PBT des indicateurs PM et ADP sont réduits d'un tiers, et ceux des indicateurs GWP et CED diminuent de moitié. La dette énergétique contractée par l'indicateur ADP est remboursée en moins de la moitié de la durée de vie du système. Celle des autres indicateurs est remboursée en moins d'un 1,5 an, ce qui signifie que la dette écologique contractée par l'Eco-Stock® optimisé est remboursée rapidement. La Figure 75b présente le taux de retour énergétique (EROI). Quatre configurations sont comparées à la chaleur issue du gaz naturel (croix noire) : énergie valorisée par l'Eco-Stock® (rond bleu), énergie restituée par un four équipé d'un Eco-Stock® (triangle bleu), énergie valorisée par le stockage optimisé (rond orange plein) et énergie restituée par un four équipé d'un stockage optimisé (triangle orange plein). L'EROI du stockage optimisé est 24 % supérieur à celui de l'Eco-Stock®, et plus de 4 fois supérieur à celui du gaz naturel. L'intégration d'un stockage optimisé à un four de cuisson conventionnel permet d'améliorer l'EROI de la chaleur fournie de 54 %, soit 28 % de plus que celui équipé d'un Eco-Stock®. Par conséquent, la rentabilité énergétique est encore plus assurée avec le stockage optimisé.

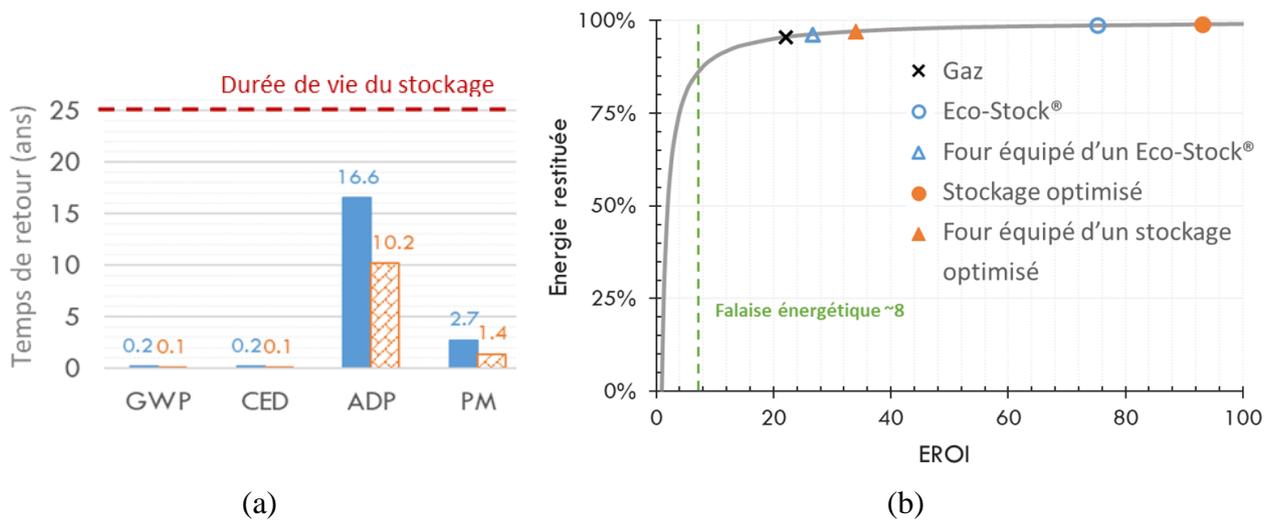


Figure 75 : Temps de retour des différents indicateurs environnementaux (par rapport à la chaleur issue du gaz naturel) (a), Énergie fournie (b) par l'Eco-Stock® (bleu) et par la cuve optimisée (orange)

Pour cette même solution optimisée, les temps de retour actualisé et conventionnel sont similaires à ceux de l'Eco-Stock®, atteignant respectivement 7,4 et 8,8 ans. Le taux de rentabilité interne diminue légèrement par rapport à la cuve de référence (16,0 % vs 16,4 %). En effet, les LCOE de la cuve de référence et du réservoir optimisé sont très proches : 3,3 vs 3,4 c€/kWh_{th}.

Afin de s'assurer de la robustesse du modèle économique, en vue du contexte économique actuel qui fluctue beaucoup, une étude de sensibilité sur les taux d'intérêt réel a été effectuée (entre 5 et 10 % par an) sur l'optimisation multi-objectifs air/cendres de foyer, et donc sur la solution optimale sélectionnée. Elle est présentée en ANNEXE A.8. Cette étude paramétrique montre que la méthodologie est robuste et que les optimisations multi-objectifs donnent les mêmes résultats.

L'influence des matériaux de garnissage sur les trois critères d'optimisation sélectionnés vient d'être étudiée. L'application des méthodes TOPSIS/Shannon a permis de sélectionner une solution de compromis optimisant à la fois la géométrie de la cuve, la granulométrie des particules et le couple fluide/solide. Dans le contexte actuel de réduction des GES, le coût du carbone évité peut être ajouté dans les modèles économique et environnemental. C'est l'objet de la prochaine section qui vise à comprendre l'influence du carbone évité sur la méthodologie et les modèles, à travers des optimisations multi-objectifs avec différents couples fluide/solide.

4.1.3. Prise en compte du carbone évité

La prise en compte du carbone évité est étudiée sur l'ensemble des solides de remplissage comparés dans la section précédente. Le carbone évité impacte l'ACV et l'ACC, comme expliqué dans la section 2.4.1. L'objectif de cette section est de vérifier la robustesse de la méthodologie et des modèles à travers la sélection de la géométrie de cuve, la granulométrie des particules idéales et le couple fluide/solide optimal.

Comme précédemment (cf. paragraphe 4.1.2.2), pour sélectionner le meilleur matériau de garnissage parmi les sept considérés, la même méthodologie est appliquée. L'algorithme génétique multi-objectifs de Matlab® est utilisé pour déterminer les solutions efficaces de l'ensemble de Pareto. Par la suite, les méthodes d'aide à la décision sont utilisées pour sélectionner les solutions de compromis. L'entropie de Shannon et les pondérations qui en découlent sont déterminées après avoir normalisé l'ensemble des solutions. Pour tous les matériaux étudiés, la pondération du critère environnemental est nulle. En effet, toutes les solutions normalisées sont rassemblées autour d'une valeur moyenne (0.048), tel que le montre la Figure 76 pour le lit air/bauxite. Ceci confère une entropie égale à l'unité pour ce critère. De plus, la pondération du critère exergetique est nettement plus élevée (entre 0.75 et 0.98) pour les sept matériaux de garnissage. Finalement, les solutions présentant le meilleur rendement exergetique, ou proche, sont sélectionnées par la méthode TOPSIS. Seules ces solutions optimisées géométriquement sont présentées ci-dessous.

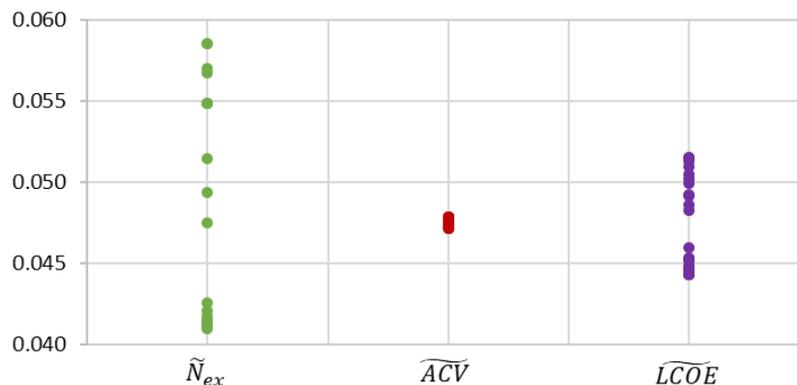


Figure 76 : Solutions normalisées optimales pour le lit air/bauxite, en tenant compte du carbone évité

Dans un premier temps, l'impact du carbone évité est étudié sur les dimensions des sept cuves sélectionnées. La Figure 77 illustre la géométrie des cuves et la granulométrie des particules

pour les sept solutions sélectionnées (optimisations exergetiques en vert et solutions proches des optimisations exergetiques en vert pâle). Par rapport aux optimisations précédentes, les formes de cuves sont plus trapues (cf. Figure 69). Les volumes sont plus faibles (- 6 % en moyenne), tout comme les diamètres de particules (- 25 %). Les mêmes différences que celles vues précédemment (cf. paragraphe 4.1.2.2), entre les différentes solutions sont visibles. Les volumes de stockage sont influencés par la capacité thermique volumique des solides de garnissage, alors que le diamètre des particules dépend de la conductivité thermique.

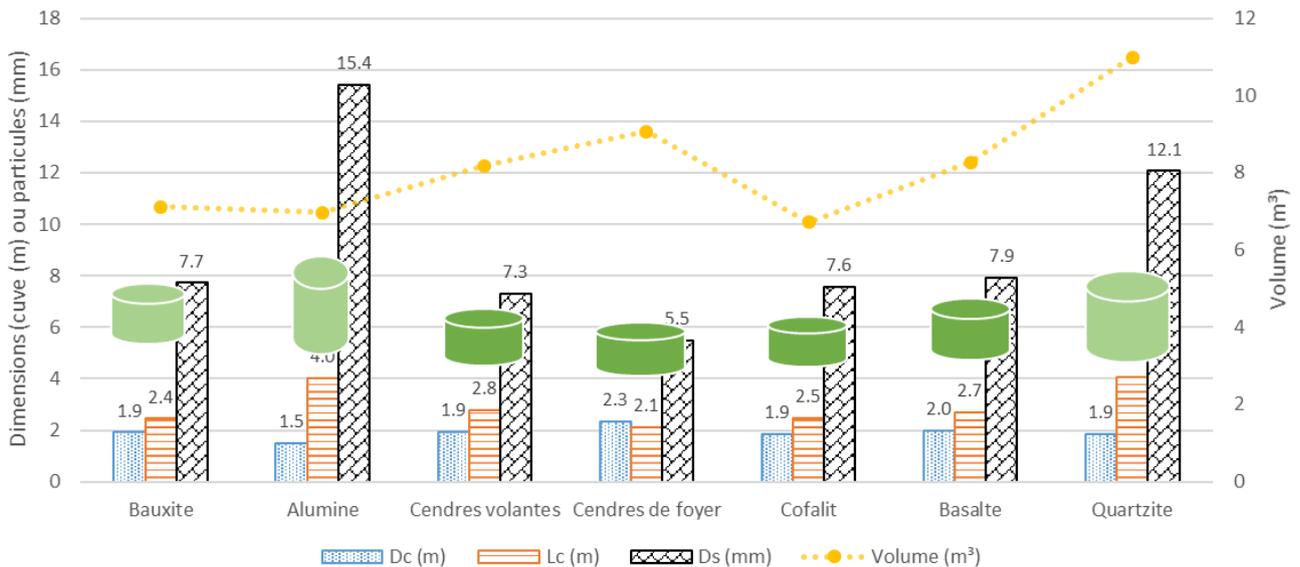


Figure 77 : Dimensions des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents, en incluant le carbone évité

Les performances exergetiques sont légèrement plus élevées que celles des solutions sélectionnées sans tenir compte du carbone évité (cf. paragraphe 4.1.2.2). En effet, les optimisations exergetiques étant préférées, les rendements exergetiques sont légèrement meilleurs et les taux d'utilisation exergetiques s'améliorent de 7 % en moyenne.

Le carbone évité améliore considérablement l'empreinte écologique des systèmes, comme l'illustre la Figure 78, présentant l'impact environnemental de chaque solution de compromis par indicateur. L'utilisation du stockage évite de consommer du gaz naturel pour fournir de la chaleur. Sachant que le gaz naturel est très impactant, notamment pour les indicateurs GWP et CED (cf. Tableau 15), les empreintes écologiques des cuves optimisées se retrouvent largement négatives, avec les valeurs les plus faibles pour les matériaux issus des déchets et les roches naturelles. Les indicateurs GWP et CED sont inférieurs à -730 hab.an. Les deux autres indicateurs (ADP et PM) représentent, quant à eux, moins de 5 % de l'impact total.

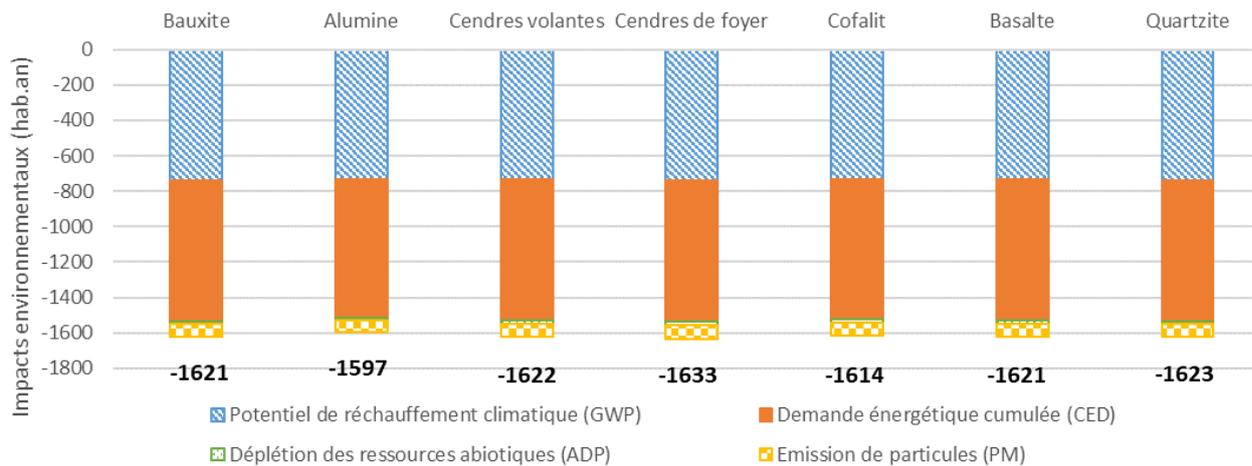


Figure 78 : Impacts environnementaux des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents, en incluant le carbone évité

L'influence du carbone évité sur les performances économiques des stockages est désormais étudiée. Les indicateurs économiques s'améliorent puisque la taxe carbone est incluse dans les revenus (cf. paragraphe 2.4.1.2). La même hiérarchie des solutions sélectionnées que celles de la Figure 73 (sans tenir compte du carbone évité) est obtenue. La solution utilisant du cofalit comme matériau de garnissage présente la VAN la plus élevée (549 k€) et le LCOE le plus faible (1,8 c€/kWh_{th}). Les VAN et LCOE des solutions avec bauxite, cendres volantes et de foyer, et basalte sont un peu moins bonnes, avec respectivement 525 k€ et 2,0 c€/ kWh_{th} en moyenne. Le volume plus important de la solution avec quartzite et le coût plus élevé de l'alumine réduit considérablement la VAN de ces deux solutions (488 k€), et augmente leur LCOE (2,3 c€/kWh_{th}). Par rapport aux optimisations sans tenir compte du carbone évité, les CCV sont similaires car les géométries de cuve sont proches.

Afin de sélectionner le meilleur matériau de garnissage en tenant compte du carbone évité, la méthode TOPSIS/Shannon est appliquée aux sept solutions optimisées géométriquement. La pondération environnementale est cette fois-ci quasi-nulle car l'entropie de ce critère est la plus élevée ($S_{ACV} = 1,000$), indiquant une équiprobabilité de chacune des solutions sur ce critère. Cette équiprobabilité est illustrée sur la Figure 79, présentant les solutions normalisées linéairement. Les solutions sont regroupées autour d'une valeur moyenne de 0,143 pour le critère ACV. Par conséquent, les solutions présentant le plus faible impact environnemental ne seront pas forcément privilégiées par la méthode TOPSIS. L'entropie du critère exergétique est la plus petite ($S_{ex} = 0,9840$; $S_{LCOE} = 0,9982$), indiquant que la pondération exergétique est plus importante que l'économique (0,901 et 0,099 respectivement). En effet, les solutions sont

plus dispersées sur le critère exergetique (cf. Figure 79) Le rendement exergetique du stockage avec cendres de foyer étant le plus élevé, ce système est sélectionné par la méthode TOPSIS. Le classement est identique au cas sans tenir compte du carbone évité, prouvant la robustesse du modèle : cendres de foyer, cendres volantes, basalte, cofalit, quartzite, bauxite, et alumine.

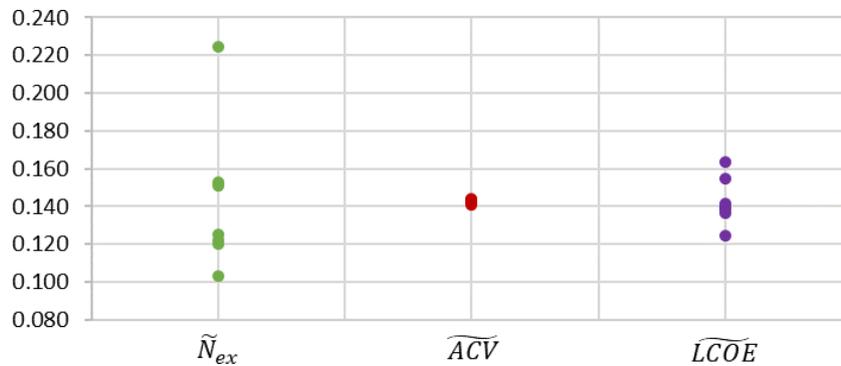


Figure 79 : Solutions normalisées optimales avec sept matériaux de garnissage différents, en prenant en compte le carbone évité

La solution optimisée (optimisation exergetique avec un lit air/cendres de foyer, en incluant le carbone évité) présente dans ce cas des temps de retour environnementaux nuls, car chacun des indicateurs environnementaux est négatif. Par conséquent, aucune dette écologique est contractée par la solution optimisée. Dans ce cas, l'EROI tend vers l'infini. Quant aux autres indicateurs économiques (temps de retour et taux de rentabilité interne), ils sont encore meilleurs que ceux obtenus sans tenir compte du carbone évité. Les temps de retour actualisé et conventionnel sont inférieurs à 6,4 ans, soit 25 % plus faibles que ceux de la cuve de référence. Le taux de rentabilité interne est légèrement plus faible que celui de la solution optimisée sans tenir compte du carbone évité (15,7 vs 16,0 %), ce qui est nettement plus élevé que le taux d'actualisation réel (6,8 % par an) considéré.

4.2. Optimisation de la cuve type Andasol

Afin d'étudier l'influence des critères exergetique, environnemental et économique sur une cuve de plus grande dimension et utilisant une fluide caloporteur liquide un stockage thermocline imaginé pour la centrale CSP Andasol (8) est optimisé. Cette partie présente dans un premier temps le système considéré. Ensuite, des optimisations multi-objectifs sont effectuées, et plusieurs couples fluide/solide sont comparés. La même méthodologie que pour l'Eco-Stock® est appliquée. Cependant, les spécificités de ce stockage (taille, changement de fluide caloporteur) ont nécessité d'adapter l'inventaire du cycle de vie de l'ACV et l'estimation

des coûts. Ils sont détaillés dans l'ANNEXE A.9. La valorisation sous forme d'électricité modifie également l'unité fonctionnelle, comme expliqué à la section 2.4.3.

4.2.1. Définition du stockage de référence

La centrale CSP Andasol utilise actuellement un stockage thermique à deux cuves, entre 293 et 393°C. Fasquelle (8) a dimensionné un stockage thermocline sur cette centrale, qui sera utilisé comme cuve de référence dans cette partie. Dans le cas de la centrale CSP Andasol, le système est contraint par le champ solaire en amont et le bloc de puissance en aval (valorisation sous forme d'électricité). Les taux de *cut-off* resteront donc fixes (20 %). Cette cuve permet de valoriser l'énergie solaire entre 293 et 393°C, et produit 410 MWh/cycle d'exergie. Elle utilise un lit huile synthétique dowtherm A / alumine. Le Tableau 20 présente les différents paramètres de conception et spécificités de ce stockage (8).

Tableau 20 : Spécifications de la cuve thermocline type Andasol (8)

<i>Capacité énergétique théorique maximale Q_{theo}</i>	1010 MWh_{th}
<i>Temps cibles de charge ou t_{ch} ou de décharge t_{dech}</i>	7,5 h
<i>Porosité ϵ</i>	40 %
<i>Température haute T_H</i>	393°C
<i>Température basse T_L</i>	293°C
<i>Température ambiante T_∞</i>	15°C
<i>Taux de cut-off $\tau_{cut-off}$</i>	20 %
<i>Hauteur de cuve L_c</i>	14,0 m
<i>Diamètre de cuve D_c</i>	33,1 m
<i>Diamètre des particules D_s</i>	19,9 mm
<i>Propriétés thermophysiques du fluide caloporteur (dowtherm A)</i>	$c_f = 2507 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\rho_f = 753,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ $\lambda_f = 0,087 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\mu_f = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
<i>Propriétés thermophysiques du solide de garnissage (alumine)</i>	$c_s = 1023 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\rho_s = 3670 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ $\lambda_s = 21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

4.2.2. Sélection du matériau de garnissage optimal et de sa géométrie associée

Dans cette section sont comparés différents lits de solides de garnissage pour un même fluide caloporteur : l'huile synthétique dowtherm A, utilisée également dans le champ solaire de la centrale CSP Andasol. Au vu des compatibilités fluide/solide (cf. Tableau 5), six matériaux de garnissage différents sont comparés avec la cuve type Andasol : bauxite, alumine, cendres volantes, cofalit, laitiers de four à arc électrique et quartzite. Les optimisations multi-objectifs avec ces TESSM sont résolues de la même manière que pour l'Eco-Stock® (cf. paragraphe 4.1.2.2). L'application de la méthode TOPSIS/Shannon permet de sélectionner la configuration optimale du système de stockage. Dans un premier temps, une solution de compromis, présentant la meilleure géométrie de cuve et la granulométrie idéale des particules, est sélectionnée pour chaque couple fluide/solide testé. Dans ce cas, les critères ACV et LCOE sont regroupées autour d'une valeur moyenne (0.048), comme l'illustre la Figure 80 pour le lit dowtherm A/alumine. Par conséquent, les entropies de ces deux critères sont égales à l'unité, ce qui confère des pondérations nulles à ces deux critères. Par conséquent, ce sont les solutions avec le meilleur rendement exergetique qui sont sélectionnées par la méthode TOPSIS. Avant d'appliquer la méthode d'aide à la décision pour désigner le meilleur matériau de garnissage, les six solutions sélectionnées, optimisées géométriquement, sont comparées.

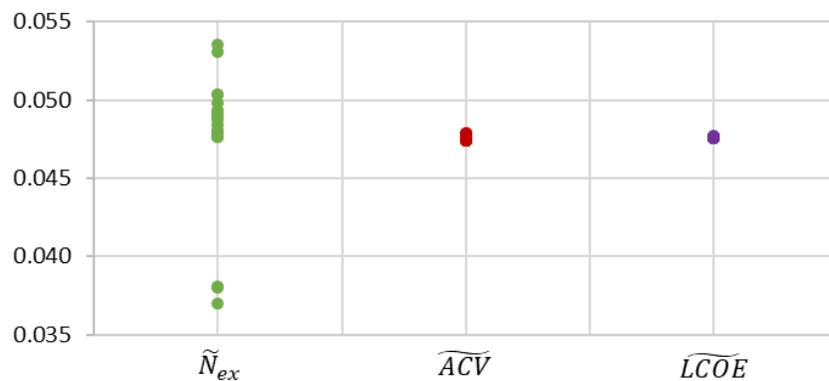


Figure 80 : Solutions normalisées optimales avec le lit dowtherm A/alumine

Tout d'abord, la géométrie des cuves et la granulométrie des particules sont données sur la Figure 81 pour les six configurations optimisées (en vert car optimisations exergetiques). Avec des matériaux usinés, les cuves présentent des géométries effilées alors qu'avec des matériaux issus des déchets ou du quartzite, les cuves sont trapues. Comme pour l'Eco-Stock®, les volumes des réservoirs avec bauxite, alumine ou cofalit sont plus faibles (produits (ρc) élevés), alors que celui du réservoir avec quartzite est plus grand (produit (ρc) petit). Les diamètres des

particules sont tous proches du demi-centimètre, avec des valeurs légèrement plus grandes pour l'alumine et le quartzite, à cause de leur conductivité thermique élevée.

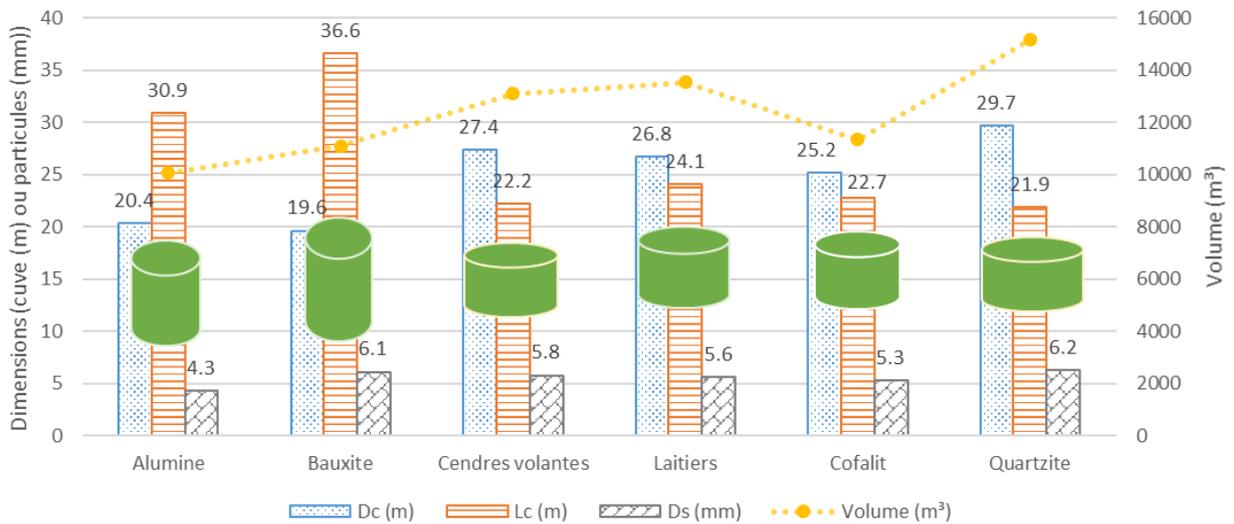


Figure 81 : Dimensions des solutions sélectionnées avec six solides de garnissage différents

Les profils de température sont très raides et quasiment superposés pour tous les solides. Les rendements exergetiques sont donc très élevés, avec 99,9 % pour toutes les solutions. Comme pour l'Eco-Stock®, les performances exergetiques sont peu influencées par le matériau de garnissage utilisé.

L'influence des matériaux de remplissage est désormais étudiée sur l'impact écologique des six solutions sélectionnées, indiqué par phase du cycle de vie sur la Figure 82. Le fluide caloporteur est la phase la plus impactante avec 66 à 90 % de l'impact total. Le choix de matériaux issus des déchets ou de roches naturelles permet de limiter l'empreinte environnementale de cette phase, comme expliqué précédemment. Cependant, le gain réalisé sur l'élaboration de ce matériau peut être neutralisé par l'augmentation du volume de stockage, et donc du volume de l'huile synthétique. En effet, dans le cas de l'alumine, le volume du réservoir atteint 10 100 m³, alors qu'il est plus grand pour les autres configurations. La solution avec cofalit présente l'empreinte environnementale la plus faible avec 65 334 hab.an. Malgré un gain sur la phase d'élaboration des matériaux, l'impact environnemental de la solution avec laitiers est supérieur, avec 68 913 hab.an, notamment à cause d'un volume plus important et donc plus de fluide caloporteur (4 086 vs 3 433 tonnes d'huile synthétique pour la solution avec cofalit).

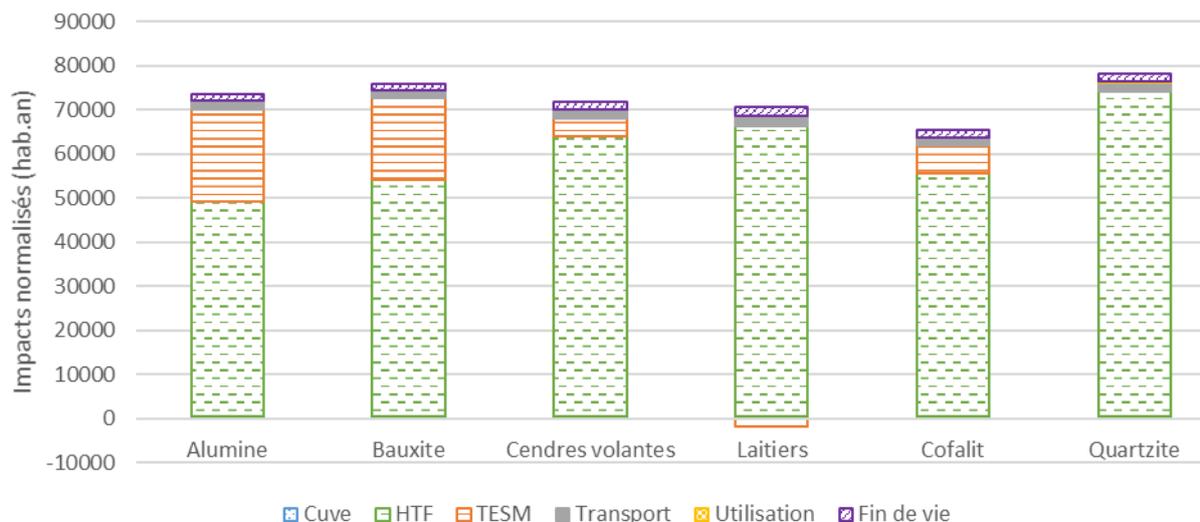


Figure 82 : Impact environnemental par phase du cycle de vie des solutions sélectionnées avec six solides de garnissage différents

Avant de sélectionner le meilleur matériau de garnissage, les performances économiques des six solutions sélectionnées sont comparées. La Figure 83 présente les indicateurs économiques de ces configurations. Deux catégories se dessinent. Les performances économiques des cuves avec matériaux usinés sont moins bonnes que les autres. Avec des matériaux issus des déchets ou du quartzite, le CCV est réduit d'un tiers en moyenne par rapport au stockage avec alumine. De plus, le LCOE atteint presque la moitié du prix de l'électricité en Espagne. Par conséquent, la VAN est plus de deux fois plus élevée avec des matériaux issus des déchets ou des roches naturelles. La solution avec cofalit présente les meilleurs indicateurs économiques, avec un LCOE de 10,6 c€/kWh_e.

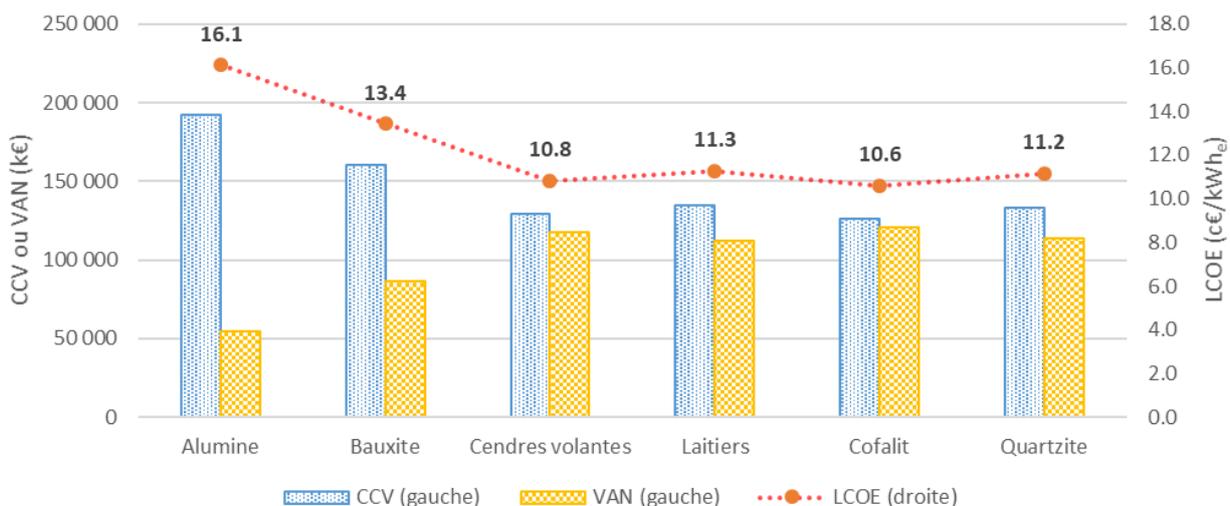


Figure 83 : Indicateurs économiques des solutions sélectionnées avec six solides de garnissage différents

Les performances des six réservoirs type Andasol, optimisés géométriquement, ont été analysées dans cette section. Pour résumer, le changement de matériau de remplissage n'influence pas les performances énergétiques et exergetiques, qui demeurent très élevées (rendement exergetique de 99,9 %). L'utilisation de matériaux issus des déchets ou de roches naturelles permet de limiter l'impact environnemental de la phase d'élaboration des solides de garnissage. Cependant, les gains écologiques réalisés sur cette phase peuvent être absorbés par l'augmentation du volume du stockage, et donc de l'empreinte environnementale du fluide caloporteur. Le LCOE dépend fortement des solides de garnissage utilisés, puisque ceux usinés sont plus onéreux. Le choix d'un matériau présentant une capacité thermique volumique élevée (plus de 2,3 MJ/K/m³), tout en ayant une faible empreinte environnementale et un coût modeste sont à privilégier. Par conséquent, les trois solides issus des déchets semblent être de bons candidats.

Afin de sélectionner une solution de compromis générale présentant le meilleur matériau de garnissage, la méthode TOPSIS/Shannon est appliquée aux six solutions optimisées géométriquement. Les entropies de Shannon sont déterminées : $S_{ex} = 0,9176$; $S_{ACV} = 0,9199$; $S_{LCOE} = 0,9144$. Elles sont toutes similaires, ce qui entraînent des pondérations proches pour les trois critères d'optimisation : $\omega_{ex} = 0,332$; $\omega_{ACV} = 0,323$; $\omega_{LCOE} = 0,345$. Les critères des différentes solutions sont rappelées dans le Tableau 19 (colonnes 2 à 4). Le ratio des distances euclidiennes (colonne 5) permet de classer les solutions (colonne 6). Finalement, le classement obtenu via la méthode TOPSIS est le suivant : cofalit, laitiers de four à arc électrique, cendres volantes, quartzite, bauxite et alumine. Le cofalit, présentant le plus faible impact environnemental et le LCOE le plus petit pour un rendement exergetique similaire aux autres solutions, apparaît comme étant le meilleur pour stocker la chaleur dans la cuve type Andasol. Les laitiers de four à arc électrique peuvent également être une solution prometteuse. Le classement obtenu est différent de celui obtenu pour l'Eco-Stock® (cf. paragraphe 4.1.2.2), indiquant encore une fois que la mise en œuvre optimale est plus importante que les propriétés intrinsèques des matériaux de garnissage (cf. paragraphe 4.1.2.1).

Tableau 21 : Matrice des évaluations et ratio des distances (classement des solutions avec six matériaux de garnissage différents pour la cuve type Andasol)

	Critères			Ratio	Classement
	N_{ex}	ACV (hab.an)	LCOE (c€/kWh _e)	$\frac{SN}{SN + SI}$	
Cofalit	0,11	65 300	3,93	0,9360	1
Laitiers	0,11	68 900	4,19	0,8783	2
Cendres volantes	0,11	71 700	4,03	0,8580	3
Quartzite	0,11	78 300	4,15	0,7372	4
Bauxite	0,11	75 900	5,00	0,5621	5
Alumine	0,15	73 500	6,00	0,0970	6

Les temps de retours environnementaux (PBT) et le taux de retour énergétique (EROI) de la solution générale sélectionnée (optimisation exergetique avec un lit dowtherm A/cofalit) sont donnés sur la Figure 84. Les indicateurs de la cuve de référence type Andasol sont représentés en bleu, et ceux de la solution optimisée en orange. Les PBT des indicateurs PM et ADP sont réduits d'un tiers environ, et ceux des indicateurs GWP et CED diminuent de moitié par rapport à la référence. La dette énergétique contractée par l'indicateur PM est remboursée sur la durée de vie du système contrairement à la cuve de référence. Cependant, celle contractée par l'indicateur ADP reste nettement supérieure (83 ans). L'EROI de la cuve de référence (rond bleu) et de celle optimisée (rond orange plein) sont comparées sur la Figure 84b. Cet indicateur est plus que doublé par rapport à la référence, et atteint 22 ans pour le stockage optimisé, soit l'EROI du gaz naturel. L'investissement sur ce système est donc très intéressant.

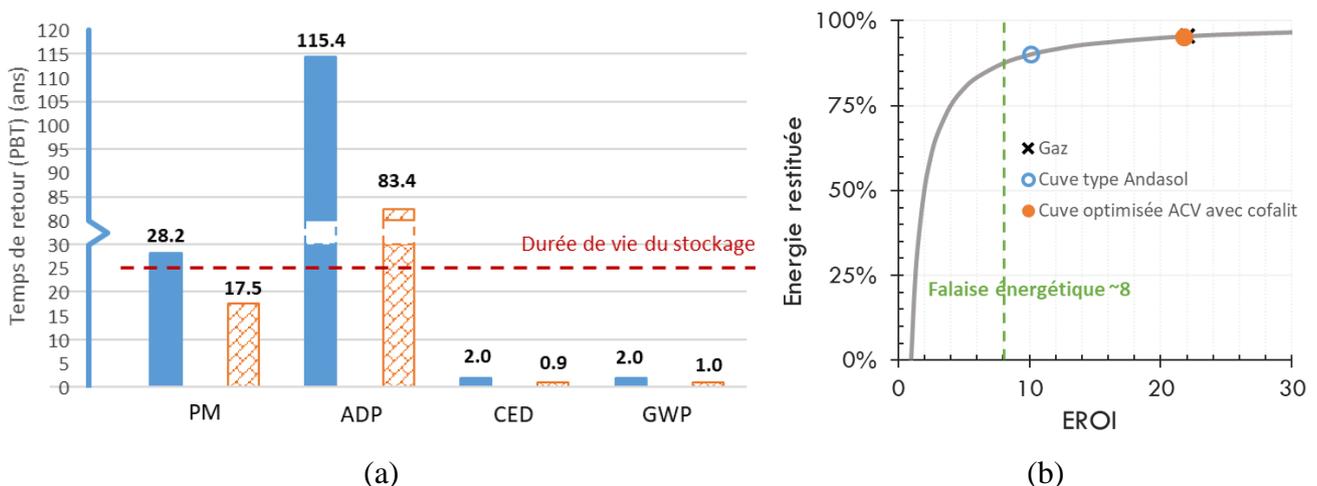


Figure 84 : Temps de retour des différents indicateurs environnementaux (par rapport à la chaleur issue du gaz naturel) (a), Énergie fournie (b) par la cuve de référence type Andasol (bleu) et par celle optimisée (orange)

Pour cette même solution, les temps de retour actualisé et conventionnel ont été déterminés. Ils diminuent de 35 et 44 % respectivement par rapport à la cuve de référence, atteignant 8,2 et 10,2 ans. Le taux de rentabilité interne est quant à lui doublé (18,1 vs 9,5 %).

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, des optimisations multi-objectifs ont été réalisées sur deux stockages, pour compléter les résultats obtenus dans le CHAPITRE 3 : l'Eco-Stock® et la cuve type Andasol. Dans un premier temps, les simulations ont été effectuées sur l'Eco-Stock®, valorisant les chaleurs fatales. Un ensemble de Pareto, borné par les optimisations exergetique, économique et environnementale, est obtenu, composé de 18 solutions optimales. Les optimisations économique et environnementale sont proches, et antagonistes à l'optimisation exergetique. L'application de la méthode d'aide à la décision TOPSIS/Shannon permet de sélectionner une solution entre les optimisations exergetique et environnementale comme solution de compromis. En effet, les pondérations exergetique et environnementale sont proches de 0,5, alors que celle économique est quasi-nulle. La solution sélectionnée présente ainsi un rendement exergetique élevé (96,9 %), tout en gardant une empreinte écologique minimale (68 hab.an) et un LCOE faible (3,3 c€/kWh_{th}).

Connaissant l'influence des deux facteurs de forme sur les performances du stockage, plusieurs couples fluide caloporteur / solide de garnissage ont été étudiés. Des matériaux usinés (bauxite, alumine), des matériaux issus des déchets (cendres volantes, cendres de foyer, cofalit) et des roches naturelles (basalte, quartzite) ont été considérés. Dans un premier temps, chaque solide a été classé sur des critères d'effusivité thermique, d'empreinte environnementale et de coût, indépendamment du stockage. Ces classements, obtenus avec la méthode TOPSIS/Shannon, permettront à l'avenir de sélectionner le meilleur matériau de garnissage en fonction des besoins du TES. Néanmoins, l'effusivité ne semble pas être un bon critère de sélection. En effet, pour maximiser l'utilisation du stockage et réduire son volume, une conductivité thermique faible et un produit (ρc) élevé doivent être préférés. Malgré d'excellentes propriétés thermophysiques, les matériaux usinés sont plus onéreux et impactant environnementalement. D'après la méthode d'aide à la décision, les roches naturelles présentent les meilleures performances, suivies par les matériaux issus des déchets.

Afin de comparer ces classements, des optimisations multi-objectifs avec chacun des solides ont été réalisées. Chacun des stockages, utilisant un couple fluide/solide donné, a d'abord été optimisé géométriquement, avant d'être comparé aux autres. Les performances exergetiques et énergétiques sont peu influencées par le matériau de garnissage utilisé. L'empreinte environnementale est nettement améliorée avec des matériaux issus des déchets ou des roches naturelles. Quant aux performances économiques, le choix d'un matériau présentant une capacité thermique volumique (produit (ρc)) élevée est primordial pour limiter les coûts d'investissement. Les matériaux issus des déchets et le basalte semblent être de très bons choix pour une application dans un TES. Les cendres de foyer sont sélectionnées comme meilleur solide de remplissage par la méthode TOPSIS/Shannon. En effet, cette solution présente les meilleures performances exergetiques, tout en maintenant un impact environnemental et un LCOE faibles. A contrario, les matériaux usinés (alumine et bauxite) sont plus onéreux et affichent une empreinte environnementale plus élevée. Malgré une bonne effusivité, un faible coût et un impact écologique minime, le quartzite est largement pénalisé par sa capacité thermique volumique. En outre, l'étude montre qu'au-delà des propriétés intrinsèques des matériaux de garnissage, leurs mises en œuvre optimales (géométrie de la cuve et granulométrie des particules) restent essentielles.

Enfin, pour intégrer la politique environnementale actuelle et sachant que l'Eco-Stock® permet d'éviter la consommation de gaz naturel, l'impact du carbone évité a été ajouté aux modèles économique et environnemental, comme expliqué dans le CHAPITRE 2. Dans ce cas, l'empreinte environnementale est nettement négative puisque la combustion de gaz naturel est beaucoup plus impactante que l'utilisation d'un stockage thermique. De plus, les LCOE ont diminué d'un tiers en moyenne. Les optimisations multi-objectifs avec les sept mêmes matériaux de remplissage ont été réalisées. Les optimisations exergetiques sont préférées comme solutions de compromis. Les cendres de foyer restent toujours le meilleur matériau de garnissage, indiquant la robustesse de la méthodologie à la prise en compte d'autres paramètres, tel que le carbone évité.

Le problème d'optimisation multi-objectifs a ensuite été appliqué sur la cuve type Andasol, imaginée par Fasquelle (8). Ce stockage thermocline, de plus grande taille que l'Eco-Stock®, est intégré dans la centrale CSP Andasol pour convertir la chaleur du champ solaire directement

en électricité. Il utilise de l'huile synthétique dowtherm A et de l'alumine. Les modèles environnemental et économique ont été revus afin d'inclure les nouveaux composants et définir le nouveau périmètre d'étude (cf. ANNEXE A.9). Dans ce cas, six matériaux de garnissage ont été comparés : alumine, bauxite, quartzite, cendres volantes, cofalit et laitiers de four à arc électrique. Des optimisations multi-objectifs avec chacun des solides ont été réalisées. La méthode TOPSIS/Shannon sélectionne les cuves présentant le meilleur rendement exergetique comme solutions de compromis. Des cuves effilées sont obtenues pour les matériaux usinés alors que des cuves trapues sont préférées pour les autres. Les diamètres des particules sont similaires, de l'ordre du demi-centimètre. Le changement de matériau de remplissage n'influence pas les performances exergetiques et énergétiques du stockage. Contrairement à l'Eco-Stock®, le choix de solide avec un produit (ρc) élevé (supérieur à 2,3 MJ/K/m³) est plus important pour réduire l'empreinte écologique du système que l'utilisation d'un matériau ayant un faible impact environnemental. Afin de limiter le LCOE, des solides issus des déchets ou des roches naturelles doivent être privilégiés. Finalement, le cofalit semble être le meilleur choix puisque les impacts environnementaux et le LCOE sont minimisés avec cette solution, tout en présentant un rendement exergetique identique aux solutions avec les autres matériaux.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Afin de compléter les études sur le stockage de type thermocline, et d'intégrer sa conception dans une démarche de développement durable et de transition énergétique, l'objectif de ces travaux de thèse était de créer un outil d'aide à la décision permettant de sélectionner les différents éléments d'un tel système. Pour ce faire, une optimisation multi-objectifs a été réalisée afin de sélectionner la géométrie de la cuve, la granulométrie des particules, le fluide caloporteur et le matériau de garnissage, répondant au mieux aux critères exergétique, environnemental et économique.

Le **modèle physique** utilisé, qui complète le travail de Rebouillat (194), est employé pour déterminer les performances énergétique et exergétique du réservoir. Le comportement dynamique du système est évalué à partir de cinq paramètres de conception indépendants (capacité énergétique théorique, temps de charge/décharge cibles, températures opérationnelles, porosité), définis par les spécificités du système de stockage à mettre en place, et des quatre variables d'optimisation (facteurs de forme externe F_e et interne F_i , fluide caloporteur et matériau de garnissage). Plusieurs cycles sont simulés jusqu'à atteindre le régime stationnaire périodique pour lequel les performances énergétiques et exergétiques sont déterminées.

Les **impacts environnementaux** sont évalués à partir d'une Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'unité fonctionnelle à laquelle se réfèrent tous les impacts dépend du type de valorisation : chaleur ou électricité. Dans le premier cas, le stockage restitue une énergie de décharge égale à celle de la cuve de référence sur sa durée de vie. Dans le second cas, c'est l'exergie de décharge qui doit être égale à celle de la cuve de référence. Quatre indicateurs environnementaux sont sélectionnés : le potentiel de réchauffement climatique, la demande énergétique cumulée, l'épuisement des ressources abiotiques et l'émission de matière particulaire. Ces indicateurs sont normalisés selon l'impact d'un européen moyen. Le critère d'optimisation retenu est ainsi défini comme la somme de ces quatre indicateurs normalisés.

Le **modèle économique** se base sur une Analyse des Coûts du Cycle de vie (ACC). Elle permet de déterminer plusieurs indicateurs économiques : le Coût du Cycle de Vie (CCV), la Valeur Actualisée Nette (VAN) et le LCOE. Ce dernier est utilisé comme critère économique.

Le problème d'optimisation recherche les valeurs optimales des facteurs de forme, pour un couple fluide caloporteur et solide de garnissage donné, selon les critères exergetique, environnemental et économique. **L'algorithme génétique multi-objectifs**, basé sur NSGA-II, disponible sur Matlab®, est utilisé avec les paramètres par défaut. Pour chaque couple fluide/solide simulé, un ensemble de Pareto est obtenu. La **méthode TOPSIS couplée à l'entropie de Shannon** est utilisée pour sélectionner la meilleure solution de compromis dans chaque ensemble de Pareto, évitant ainsi tout choix subjectif de la part du décideur.

La méthodologie développée a été appliquée à **deux cas d'étude**. Le premier concerne un stockage industriel air/bauxite à haute température (1,5 MWh_{th} entre 20 et 600°C), conçu et commercialisé par Eco-Tech Ceram pour la valorisation de chaleurs fatales : l'Eco-Stock®. Le second est un stockage thermocline imaginé par Fasquelle (8) pour la centrale CSP Andasol, stockant 1010 MWh_{th} entre 293 et 393°C, et utilisant de l'huile synthétique dowtherm A et de l'alumine.

Dans un premier temps, les **optimisations mono-objectifs** ont été menées sur l'Eco-Stock® pour comprendre l'influence des variables d'optimisation sur les trois critères. Pour maximiser le rendement exergetique du stockage, la forme de la cuve doit être effilée ($F_e < 1$) et les particules doivent être petites (de l'ordre du centimètre). Cependant, les pertes de charge sont plus importantes, nécessitant une énergie de pompage plus grande. De ce fait, l'empreinte environnementale d'un stockage de forme effilée est plus élevée que celle d'un réservoir trapu ($F_e > 1$). Au vu du très faible impact du stockage par rapport à la combustion de gaz naturel, la moindre énergie de pompage supplémentaire augmente l'empreinte environnementale de la phase d'utilisation du système. Pour optimiser le LCOE, une forme trapue est également à privilégier car l'énergie de pompage entraîne des surcoûts d'investissement (ventilateur plus gros) et d'opération (énergie de pompage plus importante).

Des **études de sensibilité des paramètres de conception** ont également été réalisées sur les optimisations mono-objectifs. Tout d'abord, l'influence des taux de *cut-off* pour des valorisations sous forme de chaleur (taux de *cut-off* de 80 à 90 %) ou d'électricité (taux de 10 à 20 %) a été étudiée. L'augmentation de ces taux implique une meilleure utilisation du volume du stockage, et par conséquent, une réduction de l'empreinte environnementale et des coûts du système. L'influence de la porosité sur les performances de l'Eco-Stock® a également fait

l'objet d'une étude paramétrique. Les simulations ont montré que le rendement exergetique et l'impact environnemental s'améliorent lorsque la porosité augmente. Le LCOE optimal est obtenu pour une porosité entre 0,3 et 0,4. Par conséquent, chercher à diminuer la porosité du lit de solides dans un stockage thermocline ne semble pas être un choix optimal pour maximiser les performances exergetiques, tout en limitant l'empreinte écologique et les coûts.

Concernant les **optimisations tri-objectifs** de l'Eco-Stock®, un ensemble de Pareto est obtenu pour chaque couple fluide/solide simulé. Sept matériaux de garnissage différents ont été testés avec de l'air : deux matériaux usinés (alumine et bauxite), trois matériaux issus des déchets (cendres volantes et de foyer, et cofalit) et deux roches naturelles (basalte et quartzite). L'application de la méthode TOPSIS combinée à l'entropie de Shannon sélectionne des solutions situées entre les optimisations exergetique et économique comme solutions de compromis pour chaque couple fluide/solide simulé.

Finalement, les performances des stockages optimisés géométriquement pour les **sept solides de garnissage testés** sont comparées. Les performances exergetiques ne sont pas affectées par le choix du matériau de remplissage. L'utilisation de matériaux issus des déchets ou de roches naturelles diminue l'empreinte environnementale de façon similaire. Cependant, les roches naturelles n'ayant pas d'aussi bonnes propriétés thermophysiques que les solides usinés ou issus des déchets, le volume des cuves augmente, tout comme les coûts d'investissement. Le LCOE est plus faible pour les matériaux issus des déchets. La **solution optimale** sélectionnée par TOPSIS/Shannon est celle avec les **cendres de foyer**. Elle est caractérisée par les performances suivantes : $\eta_{ex} = 98,0 \%$, ACV = 58 hab.an et LCOE = 3,35 c€/kWh_{th}.

Pour intégrer la politique environnementale actuelle, **l'impact du carbone évité** a été inclus aux modèles environnemental et économique. Dans ce cas, l'empreinte écologique est nettement négative et le LCOE diminue considérablement. La méthode TOPSIS/Shannon a encore une fois sélectionné les cendres de foyer comme meilleur matériau de garnissage, conduisant aux performances suivantes : $\eta_{ex} = 98,0 \%$, ACV = -1633 hab.an et LCOE = 2,03 c€/kWh_{th}.

Dans le cas de la **cuve de référence type Andasol**, la même méthodologie a été appliquée. L'utilisation d'un fluide caloporteur liquide permet d'obtenir des rendements énergétique et

exergétique très élevées (proches de 100 %). Néanmoins, les huiles synthétiques présentent une empreinte environnementale très importante devant celle de l'élaboration des solides de garnissage et des autres phases du cycle de vie du système. Les optimisations multi-objectifs montrent que le rendement exergétique est à privilégier dans un stockage avec huile synthétique, quel que soit le matériau de garnissage utilisé. Six matériaux ont été comparés : deux usinés (bauxite et alumine), trois issus des déchets (cendres volantes, cofalit et laitiers de sidérurgie) et une roche naturelle (quartzite). Le stockage avec cofalit est sélectionné par la méthode TOPSIS/Shannon, puisque les impacts environnementaux et le LCOE sont minimisés avec cette solution (respectivement 65 334 hab.an et 10,6 c€/kWh_e), tout en présentant un rendement exergétique très élevé ($\eta_{ex} = 99,9 \%$).

L'ensemble de ces travaux a donné lieu à 3 publications et 5 communications listées en ANNEXE A.11.

Ces principaux résultats ouvrent **plusieurs perspectives**.

Tout d'abord, notons que la **méthodologie développée présente des incertitudes**. Au niveau du modèle physique, les pertes thermiques par les parois ne sont pas prises en compte. Il serait intéressant de les intégrer au modèle dynamique. De plus, le modèle économique est soumis à la forte évolution des coûts, et surtout aux fluctuations de l'économie mondiale. De ce fait, les taux d'intérêt doivent être actualisés sur la durée de vie du projet. Quant au modèle environnemental, les incertitudes qui en découlent proviennent essentiellement de la base de données. Cette dernière doit être actualisée régulièrement pour tenir compte des fluctuations sur la provenance de l'énergie et des matières premières notamment.

Par ailleurs, la méthodologie développée a montré la **robustesse de l'algorithme d'optimisation multi-objectifs** et de la **méthode d'aide à la décision non-subjective TOPSIS/Shannon**. Elle pourrait être utilisée dans d'autres champs d'application, comme les récepteurs solaires et les réacteurs thermochimiques, qui présentent des problématiques voisines au stockage thermocline.

Pour élargir l'analyse multi-objectifs et **améliorer l'éco-conception** d'un stockage thermocline, une **analyse sociale du cycle de vie** pourrait être réalisée, comme expliqué dans la section 1.3.3. L'ACV pourrait également être revue pour intégrer l'épuisement des ressources

naturelles utilisées sur le cycle de vie du système. Une **ACV exergétique** serait alors appliquée sur le stockage thermocline, ce qui permettrait d'utiliser des ressources naturelles de manière plus durable (cf. paragraphe 1.3.1.7).

De plus, dans le cas de système de stockage dont le volume est très grand, comme pour la cuve type Andasol, il serait intéressant d'ajouter une autre variable d'optimisation tenant compte du nombre de stockages thermiques mis en série. En effet, de fortes hauteurs de réservoir impliquent des contraintes mécaniques importantes sur les parois du système, et donc l'utilisation d'autres matériaux. Plusieurs cuves, placées en série, pourraient ainsi être préférées pour limiter ces contraintes, plutôt que de concevoir un réservoir de grande hauteur.

Cette méthodologie pourrait enfin s'étendre à **d'autres applications potentielles** au niveau du procédé. Dans ce cas, le périmètre d'étude serait élargi et l'unité fonctionnelle revue. Plusieurs procédés énergétiques pourraient être analysés et optimisés : une centrale CSP entière, comme celle d'Andasol, un réseau multi-énergies, un éco-parc industriel par exemple. Cette méthodologie permettrait alors de concevoir des systèmes « durables » et ainsi de **relever avec succès les défis de la transition énergétique et environnementale**.

LISTE DES FIGURES

	Page
Chapitre 1 : Etude Bibliographique	
Figure 1 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique à concentration, modifié de (8)	6
Figure 2 : Répartition du gisement en fonction du niveau de température, pour l'industrie française (12)	7
Figure 3 : Principe de fonctionnement du stockage thermocline sur lit de solides (a) (25), Schéma décrivant le déplacement de la zone thermocline dans la cuve (b)	11
Figure 4 : Schéma des principaux phénomènes physiques impliqués dans le comportement thermique des systèmes de stockage thermocline, modifié de (26)	12
Figure 5 : Schéma de la température de <i>cut-off</i> lors d'une décharge pour la configuration idéale (a) et celle d'une thermocline sur lit de solides (b) (87)	26
Figure 6 : Différents degrés de stratification thermique pour une même quantité d'énergie stockée dans une cuve thermocline : stratification forte (a), stratification modérée (b) et diffusion de la thermocline ayant conduit à la disparition du gradient (89)	27
Figure 7 : Profils de température en fin de cycle pour un cycle court (a) et un cycle long (b) (74)	28
Figure 8 : Dimensions des systèmes de stockage thermique de type thermocline référencés	31
Figure 9 : Différentes méthodes proposées pour déterminer les performances et l'efficacité d'un stockage d'eau, traduit de (89)	33
Figure 10 : Étapes de l'ACV et ses applications, d'après (122)	37
Figure 11 : Rapports et échanges entre le système étudié et l'environnement	38
Figure 12 : Arbre des processus et principales étapes du cycle de vie d'un produit, d'après (122)	38
Figure 13 : Classification des résultats d'inventaire dans des catégories intermédiaires ou de dommages	40
Figure 14 : Comparaison de l'indicateur des changements climatiques de l'ACV pour plusieurs centrales CSP et TES	47
Figure 15 : Cycle de vie économique d'un produit, d'après (150)	48
Figure 16 : Arbre des coûts intervenant dans l'ACC	49

Figure 17 : Comparaison du coût actualisé de l'énergie pour plusieurs centrales CSP et TES (les barres jaunes correspondent aux évaluations d'ESTELA (163))	51
Figure 18 : Schéma d'une frontière de Pareto en deux dimensions.....	55
Figure 19 : Principe de fonctionnement d'un algorithme évolutionnaire.....	57
Figure 20 : Principe de l'algorithme NSGA-II (177).....	58
Figure 21 : Déplacement d'une particule dans un algorithme d'OEP.....	59
Figure 22 : Solutions idéale et non-idéale d'un ensemble de Pareto	61
Figure 23 : Maillage du système et conditions aux limites, complété de (194).....	73
Figure 24 : Installation industrielle (a) (90), Dimensions (b) de l'Eco-Stock®.....	80
Figure 25 : Profils limites de température (a), Énergie interne (b) de l'Eco-Stock®	82
Figure 26 : Périmètre du « berceau à la tombe ».....	83
Figure 27 : Différence des périmètres d'analyse pour les calculs d'ACV et de EROI – Exemple du pétrole (127).....	85
Figure 28 : Comparaison des indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie de l'Eco-Stock® et de ceux issus de la combustion du gaz naturel dans un four industriel en France	87
Figure 29 : Temps de retour des différents indicateurs environnementaux (par rapport à une chaleur issue du gaz naturel) (a), Énergie fournie par un four traditionnel, valorisée par l'Eco-Stock® ou par un four équipé d'un Eco-Stock® (b) .	88
Figure 30 : Comparaison des différents coûts composants les coûts d'investissement (a) et des coûts par étape (b) de l'Eco-Stock®	96
Figure 31 : Ensemble de Pareto de l'optimisation bi-objectifs exergie/ACV de l'Eco-Stock®	104
Figure 32 : Étape 1 – Normalisation de l'ensemble de Pareto	105
Figure 33 : Principe de la sélection de la solution de compromis avec la méthode TOPSIS pour une pondération subjective (0.5 / 0.5).....	106
Figure 34 : Solutions normalisées optimales comparées à une solution équiprobable $c_i =$ constante.....	107
Figure 35 : Principe de la sélection de la solution de compromis avec la méthode TOPSIS pour une pondération objective (entropie de Shannon).....	108
Figure 36 : Structure générale du problème d'optimisation multi-objectifs avec les entrées et sorties de chaque modèle.....	109

Figure 37 : Dimensions de l'Eco-Stock® et des cuves optimisées air/bauxite.....	115
Figure 38 : Profils limites de température de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite	116
Figure 39 : Indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite.....	117
Figure 40 : Impacts environnementaux des phases de conception (cuve et solide de garnissage) pour l'indicateur ADP de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite	118
Figure 41 : Impacts environnementaux de la phase d'utilisation pour l'indicateur ADP (a) et Paramètres influençant l'ACV (b) de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite	119
Figure 42 : Coût d'investissement de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite.....	120
Figure 43 : Indicateurs économiques de l'Eco-Stock® et des trois optimisations mono-objectifs air/bauxite	121
Figure 44 : Évolution des dimensions des cuves optimisées air/bauxite en fonction des taux de <i>cut-off</i> pour une valorisation sous forme de chaleur	124
Figure 45 : Évolution des profils de température (a) et des performances exergetiques (b) en fonction des taux de <i>cut-off</i> , pour une valorisation sous forme de chaleur	125
Figure 46 : Évolution des indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie en fonction des taux de <i>cut-off</i> pour une valorisation sous forme de chaleur	126
Figure 47 : Évolution des indicateurs économiques en fonction des taux de <i>cut-off</i> pour une valorisation sous forme de chaleur.....	127
Figure 48 : Évolution des dimensions des cuves optimisées air/bauxite en fonction des taux de <i>cut-off</i> pour une valorisation sous forme d'électricité	128
Figure 49 : Évolution des profils de température (a) et des performances exergetiques (b) en fonction des taux de <i>cut-off</i> pour une valorisation sous forme d'électricité	129
Figure 50 : Évolution des indicateurs environnementaux normalisés par phase du cycle de vie en fonction des taux de <i>cut-off</i> pour une valorisation sous forme d'électricité	130
Figure 51 : Évolution des indicateurs économiques en fonction des taux de <i>cut-off</i> pour une valorisation sous forme d'électricité.....	131

Figure 52 : Évolution des dimensions des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité	132
Figure 53 : Évolution des profils de température des optimisations exergetiques air/cofalit en fonction de la porosité	133
Figure 54 : Évolution des performances exergetiques des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité	133
Figure 55 : Évolution de l'impact environnemental par indicateur des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité.....	134
Figure 56 : Évolution de 3 paramètres impactant l'empreinte environnementale des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité.....	135
Figure 57 : Évolution des indicateurs économiques des cuves optimisées air/cofalit en fonction de la porosité	136
Figure 58 : Ensemble de Pareto en 3D de l'optimisation multi-objectifs air/bauxite	141
Figure 59 : Ensemble de Pareto en 2D de l'optimisation multi-objectifs air/bauxite	142
Figure 60 : Facteurs de forme des solutions de l'optimisation multi-objectifs air/bauxite...	143
Figure 61 : Ensemble de Pareto normalisé des solutions air/bauxite en 3D	143
Figure 62 : Solutions normalisées optimales air/bauxite	144
Figure 63 : Ensemble de Pareto normalisé et pondéré des solutions air/bauxite en 3D et sélection de la solution de compromis via la méthode TOPSIS	145
Figure 64 : Évolution du coût en fonction de l'effusivité des sept matériaux de remplissage	147
Figure 65 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes d'alumine	148
Figure 66 : Dimensions des moules pour confectionner des briques de cofalit.....	149
Figure 67 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes de roches naturelles	149
Figure 68 : Impact environnemental normalisé (hab.an) d'une tonne de matériau de garnissage selon les quatre indicateurs GWP, CEP, ADP et PM.....	150
Figure 69 : Dimensions des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents	152
Figure 70 : Profils limites de température des sept solutions sélectionnées	153
Figure 71 : Rendement exergetique et taux d'utilisation énergétique des sept solutions sélectionnées.....	154
Figure 72 : Impact environnemental normalisé par phase du cycle de vie et par indicateurs des sept solutions sélectionnées.....	155

Figure 73 : Indicateurs économiques des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents	157
Figure 74 : Solutions normalisées optimales avec sept matériaux de garnissage différents .	158
Figure 75 : Temps de retour des différents indicateurs environnementaux (par rapport à la chaleur issue du gaz naturel) (a), Énergie fournie (b) par l'Eco-Stock® (bleu) et par la cuve optimisée (orange).....	160
Figure 76 : Solutions normalisées optimales pour le lit air/bauxite, en tenant compte du carbone évité	161
Figure 77 : Dimensions des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents, en incluant le carbone évité	162
Figure 78 : Impacts environnementaux des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents, en incluant le carbone évité.....	163
Figure 79 : Solutions normalisées optimales avec sept matériaux de garnissage différents, en prenant en compte le carbone évité	164
Figure 80 : Solutions normalisées optimales avec le lit dowtherm A/alumine	166
Figure 81 : Dimensions des solutions sélectionnées avec six solides de garnissage différents	167
Figure 82 : Impact environnemental par phase du cycle de vie des solutions sélectionnées avec six solides de garnissage différents	168
Figure 83 : Indicateurs économiques des solutions sélectionnées avec six solides de garnissage différents.....	168
Figure 84 : Temps de retour des différents indicateurs environnementaux (par rapport à la chaleur issue du gaz naturel) (a), Énergie fournie (b) par la cuve de référence type Andasol (bleu) et par celle optimisée (orange).....	170
Figure 85 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes de bauxite	205
Figure 86 : Schémas synoptiques de l'élaboration des billes de cendres de foyer (a) et de cendres volantes (b).....	206
Figure 87 : Ensembles de Pareto normalisés des optimisations multi-objectifs avec différents taux d'intérêt réel	207
Figure 88 : Schéma décrivant les épaisseurs de matériaux autour de la cuve type Andasol	208
Figure 89 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes de laitiers (similaire au cofalit) .	210
Figure 90 : Impact environnemental d'une tonne de laitiers de four à arc électrique par indicateur, pour les trois mises en forme considérées	216

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Chapitre 1 : Etude Bibliographique	
Tableau 1 : Critères de choix pour les matériaux de stockage thermique (31)	13
Tableau 2 : Ordres de grandeur des propriétés thermophysiques et des coûts des solides de remplissage envisagés (8,15,25,29,31,35,42–47).....	15
Tableau 3 : Critères de choix pour la sélection d'un fluide de transfert de chaleur (46,68)....	17
Tableau 4 : Ordres de grandeur des propriétés thermophysiques et des coûts des fluides caloporteurs envisagés (8,31,42–46,75).....	19
Tableau 5 : Études de compatibilité fluide caloporteur / solides de garnissage issues de la littérature	21
Tableau 6 : Études de compatibilité fluide/solide issues de la littérature - Analyses sur le fluide.....	24
Tableau 7 : Études de compatibilité fluide/solide issues de la littérature - Analyses sur le solide	25
Tableau 8 : Outils de l'éco-conception et leurs caractéristiques, d'après (121)	36
Tableau 9 : Coefficients de normalisation des indicateurs d'impacts, d'après (128)	41
Tableau 10 : Récapitulatif des différentes études cherchant à optimiser un stockage thermocline.....	63
Tableau 11 : Signe des différentes quantités d'énergie apparaissant dans le 1 ^{er} principe.....	76
Tableau 12 : Spécifications de la cuve thermocline industrielle Eco-Stock® (90).....	80
Tableau 13 : Valeurs des indices de Marshall & Swift utilisés dans l'étude économique	92
Tableau 14 : Paramètres et facteurs économiques impliqués dans l'ACC	95
Tableau 15 : Impact environnemental d'un MWh _{th} de gaz naturel en France.....	97
Tableau 16 : Définition du problème d'optimisation.....	101
Tableau 17 : Paramètres d'ajustement et réglages pour l'algorithme génétique multi-objectifs	102
Tableau 18 : Matrice des évaluations, distances euclidiennes et ratio des distances (classement des matériaux de garnissage selon leurs propriétés thermophysiques, ACV et coût).....	151

Tableau 19 : Matrice des évaluations et ratio des distances (classement des solutions avec sept matériaux de garnissage différents pour l'Eco-Stock®)	159
Tableau 20 : Spécifications de la cuve thermocline type Andasol (8)	165
Tableau 21 : Matrice des évaluations et ratio des distances (classement des solutions avec six matériaux de garnissage différents pour la cuve type Andasol).....	170
Tableau 22 : Liste des logiciels en ACV existants	189
Tableau 23 : Liste des bases de données disponibles	191
Tableau 24 : Les différentes catégories et sous-catégories d'impacts sociaux	192
Tableau 25 : Matrice des évaluations, avant et après normalisation (étape 1).....	195
Tableau 26 : Entropie de Shannon des solutions et matrice des évaluation après pondération (étape 2).....	196
Tableau 27 : Distances euclidiennes aux solutions idéales (<i>SI</i> , 2 ^{ème} colonne) et non-idéales (<i>SN</i> , 3 ^{ème} colonne), et classement des solutions (4 ^{ème} et 5 ^{ème} colonne)..	197
Tableau 28 : Récapitulatif de quelques études de sensibilité sur les stockages thermoclines	198
Tableau 29 : Valeurs des pondérations exergetiques testées avec l'algorithme OEP.....	201
Tableau 30 : Paramètres d'ajustement et réglages pour l'algorithme OEP.....	202
Tableau 31 : Procédés de la base de données EcoInvent v.3.7.1 considérés.....	203
Tableau 32 : Composants de la cuve thermocline et de ses fondations en relation avec la base de données EcoInvent v.3.7.1 pour calculer les impacts de la conception du TES	209
Tableau 33 : Taux de recyclage des matériaux en relation avec la base de données EcoInvent v.3.7.1 pour calculer les impacts de la fin de vie du TES	212
Tableau 34 : Paramètres et facteurs économiques impliqués dans l'ACC (cuve type Andasol)	215

ANNEXES

A.1 Liste des logiciels et bases de données disponibles

Les différents logiciels et bases de données en ACV disponibles à ce jour sont donnés respectivement par le Tableau 22 et le Tableau 23 (122,131). Certains logiciels sont conçus pour des études dans des domaines spécifiques. Les bases de données associées sont alors représentatives de ces domaines. Par ailleurs, tous les logiciels ne respectent pas les méthodologies de calcul d'impact préconisées par la norme ISO. Les prix sont indiqués pour des licences étudiantes uniques, qui se rapportent au cas de la thèse.

Tableau 22 : Liste des logiciels en ACV existants

<i>Nom</i>	<i>Secteur</i>	<i>Niveau</i>	<i>Base de données</i>	<i>Localité</i>	<i>Prix</i>	<i>Principales caractéristiques</i>
Balance	Transversal	Expert	incluses	Europe	250\$	
BEE	Emballage	Simplifié		France	gratuit	
The boustead model	Matériaux	Expert	incluses	Europe	15000\$	Évaluation préliminaire en ACV
Brightway 2		Expert		Europe		Outil puissant pour visualisation de pointe
Bilan Produit	Transversal	Simplifié	incluses	France	gratuit	Évaluation préliminaire en ACV
CMLCA		Expert	payantes	Europe	gratuit	Calcul de boucles dans les procédés malgré une interface peu attrayante et des graphiques limités
CUMPAN	Matériaux	Expert	incluses	Europe	6000\$	Évaluation préliminaire en ACV
Cycle IT System	Mécanique et électronique					
e>DEA	Transversal	Simplifié		Europe		
e!Sankey		Simplifié	incluses	Europe		Faire des diagrammes de Sankey
e-LICCO	Bâtiment	Simplifié		France	gratuit	
Earthster		Simplifié		Europe	gratuit	
Eco-Bat	Bâtiment et construction	Expert		Europe		
Eco-Bilan		Expert	incluses	Europe		Modélisation de n'importe quel système représentant les différentes opérations relatives aux produits, aux procédés et aux activités d'une entreprise
EcoDesign Pilot		Simplifié		Europe	gratuit	
EcoScan	Transversal	Simplifié	incluses	Europe	475\$	Évaluation préliminaire en ACV
ECO it	Transversal	Simplifié	incluses	Europe	215\$	Calcul la charge environnementale d'un produit à partir de plus de 200 éco-scores pré-calculés pour des matériaux utilisés couramment
Eco Lab	Matériaux	Expert	incluses	Europe		
EDIP PC-tool		Expert	incluses	Europe	700\$	
EGES	Agriculture	Simplifié		France	gratuit	
EIME	Électrique et électronique	Expert		France		
EPS Design Pilot	Transversal	Expert	incluses	Europe	3200\$	Évaluation préliminaire en ACV
EQUER	Bâtiment	Expert		France		

eVerdEE		Simplifié	incluses	Europe		Problèmes méthodologiques complexes (comme la définition des limites du système) simplifiés selon les besoins
Food'Print	Agro-Alimentaire	Simplifié		France		
GaBi	Transversal	Expert	incluses	Europe	2500-8000\$	Introduction par l'utilisateur de relations non linéaires + base de données supplémentaires dans domaines automobile et télécommunication
GEMIS	Transversal	Expert	incluses	Europe	gratuit	Ne suit pas la norme ISO
Green-E		Simplifié	incluses	Europe		Analyse les performances environnementales et les coûts associés à une entreprise
JAMAI-LCA	Transversal	Expert	incluses	Japon	900\$	Uniquement en japonais
KCL-ECO		Simplifié		Europe	3 000 €	ACV sur des systèmes complexes
LCA support	Transversal	Simplifié	incluses	Europe	2800\$	Uniquement en japonais
LCAiT	Transversal	Simplifié	incluses	Europe	3930\$	Facteurs de caractérisation et de pondération inclus
Lesosai	Bâtiment et construction	Expert		Europe	990 CHF	
Open LCA		Expert		Europe	gratuit	
PEMS	Transversal	Expert	incluses	Europe	£3000	
Quantis	Transversal	Simplifié	incluses	Europe		Bilan de l'activité d'une entreprise par site, par produit ou par unité de management
REGIS	Agro-Alimentaire	Expert	incluses	Hors-Europe	5900\$	Évaluation préliminaire en ACV
SankeyEditor	Transversal	Expert	incluses	Europe		Faire des diagrammes de Sankey
SIEC		Expert		France		Spécifique à la France
SilvéaACV	Transversal	Simplifié		France		
SimaPro	Transversal	Expert	incluses	Europe	4 430 €	Design environnemental des produits + analyse environnementale détaillée + propagation des incertitudes (Monte Carlo) + combinaison approche par processus et I/O
Sivéa ACV	Transversal	Simplifié		France		
SPINE@CPM Data Tool	Transversal	Expert		Europe	gratuit	
TCAce (sylvatica)	Matériaux			Europe		Évaluation du coût total
TEAM		Expert	incluses	Europe	3000\$	Processus supplémentaires mais de source peu claire
TESPI	Bâtiment	Simplifié	incluses	Europe		Produit considéré soit être un article modulaire, qui est démonté et analysé dans chaque composant
Umberto		Expert	incluses	Europe	1000-20000\$	Champ d'application plus vaste : ACV représente une application possible
WISARD	Transversal	Expert	incluses	France	1500-3000\$	

Tableau 23 : Liste des bases de données disponibles

Nom	Niveau	Nombre de données	Localité	Prix
Agri-footprint	Agriculture et alimentation	6342	Europe	1 400 €
Agribalyse	Agriculture	156	France	gratuit
ARVI	Polymères	23	Europe	gratuit
Bioenergiedat	Bioénergie	178	Allemagne	gratuit
DEAM	Bâtiment et construction	1200	Europe	gratuit
EcolInvent	Transversal	plus de 35000	Europe	1 900 €
ELCD	Transversal	608	Europe	gratuit
Environmental footprints		3504	Europe	gratuit
ESU World Food	Agriculture et alimentation	6910	Monde	2 000 €
EuGeos' 15804-IA	Construction	14889	Europe	700 €
The Evah Pigments Database		193		1 750 €
Exiobase		11816	Europe	gratuit
GaBi databases	Transversal	11434	Europe	2 500 €
Idea	Transversal	3847	Japon	400 €
LCA Commons		25468	USA	gratuit
LC-Inventories.ch		2092	Monde	3 000 €
NEEDS	Électricité (projections)	933	Europe	gratuit
Ökobaudat	Construction	1300	Allemagne	150 €
ProBas	Transversal	29369	Allemagne	gratuit
PSILCA	Social	14839	Monde	3 000 €
Soca	Social	14378		950 €
Social Hotspots	Social		Monde	1 700 €
USDA	Agriculture		USA	gratuit
UVEK LCI Data		5133	Europe	gratuit

A.2 Catégories et sous-catégories d'impacts sociaux de l'ASCV

Tableau 24 : Les différentes catégories et sous-catégories d'impacts sociaux

<i>Catégories</i>	<i>Sous-catégories</i>	<i>Partie prenante considérée</i>
<i>Droits du travail et travail décent</i>	Liberté d'association et négociation collective	Travailleurs
	Travail des enfants	Travailleurs
	Salaire juste	Travailleurs
	Temps de travail	Travailleurs
	Travail forcé	Travailleurs
	Discrimination	Travailleurs
	Délocalisation et migration	Communauté locale
<i>Santé et sécurité</i>	Santé et sécurité	Travailleurs
	Prestations sociales et sécurité sociale	Travailleurs
	Conditions de vie sûres et saines	Communauté locale
	Conditions de vie sécurisées	Communauté locale
	Accès à des ressources matérielles	Communauté locale
<i>Héritage culturel et naturel</i>	Héritage culturel	Communauté locale
	Respect des droits autochtones	Communauté locale
	Prévention et atténuation des conflits armés	Société
	Accès à des ressources immatérielles	Communauté locale
	Corruption	Société
<i>Équité des relations</i>	Compétition juste	Acteurs de la chaîne de valeur
	Relations avec les fournisseurs	Acteurs de la chaîne de valeur
	Respect du droit de la propriété intellectuelle	Acteurs de la chaîne de valeur
	Promouvoir la responsabilité sociale	Acteurs de la chaîne de valeur
	Engagements publics sur les questions de durabilité	Société
	Engagement de la communauté	Communauté locale
<i>Répercussions socio-économiques</i>	Emploi local	Communauté locale
	Contribution au développement économique	Société
	Développement des technologies	Société
	Utilité sociale du produit	Société

A.3 Principe des méthodes multi-objectifs d'aide à la décision : TOPSIS et entropie de Shannon

A.3.1. Méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS consiste à choisir une solution dans un ensemble de Pareto qui se rapproche le plus de la solution idéale, soit la meilleure sur tous les critères, et s'éloigne le plus possible de la pire dégradant tous les critères (227). Elle se décompose en sept étapes. Premièrement, la matrice des évaluations, comprenant n solutions et o critères, est construite. Il est ensuite nécessaire de la normaliser entre les valeurs minimale et maximale de chacun des critères j , pour que toutes les valeurs soient comprises entre 0 et 1 :

$$\widetilde{m}_{ij} = \frac{m_{ij} - m_{\min,j}}{m_{\max,j} - m_{\min,j}} \quad (j = 1, 2, \dots, o) \quad (\text{A.1})$$

avec \widetilde{m}_{ij} , la valeur normalisée du critère j de la solution i , m_{ij} la valeur du critère j de la solution i , $m_{\min,j} = \min(m_{ij})$ et $m_{\max,j} = \max(m_{ij})$, respectivement les valeurs minimale et maximale du critère j déterminées pour un ensemble de Pareto. La matrice des valeurs normalisées obtenues est $\widetilde{M} = [\widetilde{m}_{ij}]_{n \times o}$. D'autres normalisations peuvent également être utilisées, comme celle utilisant la somme des racines carrées des solutions.

La prochaine étape consiste à attribuer un poids ω_j à chaque critère, sachant que la somme de toutes les pondérations doit être égale à un. Les solutions idéales I et non-idéales N sont alors déterminées pour chacun des critères. Le profil idéal, soit la valeur maximale pour les critères de bénéfice (à maximiser) et la valeur minimale pour les critères de coûts (à minimiser), est calculé d'après :

$$I = (\omega_1 \widetilde{m}_{i_1}^+, \omega_2 \widetilde{m}_{i_2}^+, \dots, \omega_m \widetilde{m}_{i_m}^+), \quad \omega_j \widetilde{m}_{ij}^+ = \max_{1 \leq i \leq n} (\omega_j \widetilde{m}_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, o) \quad (\text{A.2})$$

Le profil non-idéal, soit la valeur maximale pour les critères de coûts et la valeur minimale pour les critères de bénéfice, est déterminé par :

$$N = (\omega_1 \widetilde{m}_{i_1}^-, \omega_2 \widetilde{m}_{i_2}^-, \dots, \omega_m \widetilde{m}_{i_m}^-), \quad \omega_j \widetilde{m}_{ij}^- = \min_{1 \leq i \leq n} (\omega_j \widetilde{m}_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, o) \quad (\text{A.3})$$

S'en suit le calcul des distances euclidiennes n -dimensionnelles. La distance euclidienne de chaque solution par rapport à la solution idéale SI (entre $\omega_j \widetilde{m}_{ij}$ et $\omega_j \widetilde{m}_{ij}^+$) est donnée par :

$$SI = \sqrt{\sum_{j=1}^o (\omega_j \widetilde{m}_{ij}^+ - \omega_j \widetilde{m}_{ij})^2} \quad (\text{A.4})$$

De manière identique, la distance euclidienne par rapport à la solution non-idéale SN vaut :

$$SN = \sqrt{\sum_{j=1}^o (\omega_j \tilde{m}_{ij}^- - \omega_j \tilde{m}_{ij})^2} \quad (\text{A.5})$$

L'avant-dernière étape consiste à déterminer le ratio R_i entre les distances, selon l'eq (A.6).

$$R_i = \frac{SN}{SN + SI} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A.6})$$

Finalement, les solutions de l'ensemble de Pareto sont classées par ordre croissant en fonction de la valeur du ratio R_i , sachant que le rang 1 est affecté à la valeur la plus grande.

A.3.2. Entropie de Shannon

L'entropie de Shannon quantifie les incertitudes de la source d'information, à travers une distribution de probabilité discrète (185). Plus l'entropie d'un critère d'optimisation est grande (cf. eq (A.8)), plus sa pondération sera faible (cf. eq (A.7)) (184). Cette pondération ω_j est déterminée pour chaque critère j par :

$$\omega_j = \frac{1 - S_j}{o - \sum_{j=1}^o S_j}; \quad (j = 1, \dots, o); \quad \text{avec} \quad \sum_{j=1}^o \omega_j = 1 \quad (\text{A.7})$$

où S_j est l'entropie de Shannon du critère j , et s'exprime selon :

$$S_j = -\frac{1}{\ln n} \cdot \sum_{i=1}^n \tilde{m}_{ij} \cdot \ln \tilde{m}_{ij} \quad \text{avec} \quad 1 \leq j \leq o \quad (\text{A.8})$$

$$\tilde{m}_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}} \quad (\text{A.9})$$

A.3.3. TOPSIS combinée à l'entropie de Shannon

Dans cette étude, la méthode TOPSIS est combinée à l'entropie de Shannon afin d'éviter le choix subjectif des pondérations au décideur. Après normalisation de la matrice des évaluations (cf. (A.1)), les pondérations de Shannon sont calculées de manière objective (cf. eq (A.7) à (A.9)) et appliquées à chacun des critères. Par la suite, les autres étapes de la méthode TOPSIS sont réalisées (cf. eq (A.2) à (A.6)) pour sélectionner la solution de compromis.

A.3.4. Application des méthodes multi-objectifs d'aide à la décision TOPSIS et entropie de Shannon

Pour illustrer la méthode TOPSIS et l'entropie de Shannon, un exemple est présenté dans la section 2.5.3. Dans cette partie sont détaillées les valeurs des critères des 18 solutions de l'optimisation bi-objectifs exergie/ACV parmi la population de 50 individus, avant normalisation, après normalisation et après pondération. Le Tableau 25 présente la matrice des évaluations des 18 solutions. La première colonne donne la valeur des critères avant normalisation. Les critères sont ensuite normalisés (2^{ème} colonne), selon l'éq (A.9) (normalisation linéaire), qui amène le front de Pareto normalisé représenté Figure 32.

Tableau 25 : Matrice des évaluations, avant et après normalisation (étape 1)

	Critères		Étape 1 - Normalisation	
	N_{ex}	ACV	\tilde{N}_{ex}	\tilde{ACV}
Solution 1	0,0281	93,7	0,052	0,059
Solution 2	0,0343	84,6	0,063	0,053
Solution 3	0,0343	84,6	0,063	0,053
Solution 4	0,0327	84,1	0,060	0,053
Solution 5	0,0282	91,4	0,052	0,057
Solution 6	0,0293	87,5	0,054	0,055
Solution 7	0,0281	92,6	0,052	0,058
Solution 8	0,0282	92,3	0,052	0,058
Solution 9	0,0311	85,6	0,057	0,054
Solution 10	0,0283	91,4	0,052	0,057
Solution 11	0,0315	85,2	0,058	0,054
Solution 12	0,0287	88,9	0,053	0,056
Solution 13	0,0290	88,0	0,054	0,055
Solution 14	0,0284	90,6	0,052	0,057
Solution 15	0,0327	84,8	0,060	0,053
Solution 16	0,0294	87,2	0,054	0,055
Solution 17	0,0281	93,7	0,052	0,059
Solution 18	0,0306	85,7	0,057	0,054

Par la suite, les critères normalisés sont pondérés de manière objective avec l'entropie de Shannon (cf. Figure 35). L'entropie de chaque critère est calculée d'après l'éq (2.91) et les pondérations sont déterminées (cf. eq (2.92)). Le Tableau 26 présente les termes $\tilde{N}_{ex} \cdot \ln \tilde{N}_{ex}$ et

$\overline{ACV} \cdot \ln \overline{ACV}$, l'entropie de Shannon et le facteur de pondération associés à chaque critère, et la valeur des critères normalisés et pondérés.

Tableau 26 : Entropie de Shannon des solutions et matrice des évaluation après pondération (étape 2)

	<i>Entropie de Shannon</i>		<i>Étape 2 - Pondération</i>	
	$\tilde{N}_{ex} \cdot \ln \tilde{N}_{ex}$	$\overline{ACV} \cdot \ln \overline{ACV}$	\tilde{N}_{ex}	\overline{ACV}
<i>Solution 1</i>	-0,154	-0,167	0,040	0,013
<i>Solution 2</i>	-0,175	-0,156	0,049	0,012
<i>Solution 3</i>	-0,175	-0,156	0,049	0,012
<i>Solution 4</i>	-0,170	-0,155	0,047	0,012
<i>Solution 5</i>	-0,154	-0,164	0,041	0,013
<i>Solution 6</i>	-0,158	-0,159	0,042	0,012
<i>Solution 7</i>	-0,154	-0,165	0,041	0,013
<i>Solution 8</i>	-0,154	-0,165	0,041	0,013
<i>Solution 9</i>	-0,164	-0,157	0,045	0,012
<i>Solution 10</i>	-0,154	-0,164	0,041	0,013
<i>Solution 11</i>	-0,165	-0,157	0,045	0,012
<i>Solution 12</i>	-0,156	-0,161	0,041	0,012
<i>Solution 13</i>	-0,157	-0,160	0,042	0,012
<i>Solution 14</i>	-0,155	-0,163	0,041	0,013
<i>Solution 15</i>	-0,170	-0,156	0,047	0,012
<i>Solution 16</i>	-0,158	-0,159	0,042	0,012
<i>Solution 17</i>	-0,154	-0,167	0,040	0,013
<i>Solution 18</i>	-0,162	-0,157	0,044	0,012
Entropie S	0,9991	0,9998		
Pondération ω	0,779	0,221		

Les matrices étant normalisées et pondérées, la méthode TOPSIS peut désormais être appliquée. Les solutions idéales et non-idéales sont alors déterminées. Les distances euclidiennes de chaque solution par rapport aux distances idéales SI (cf. eq (A.4)) et non-idéales SN (cf. eq (A.5)), ainsi que le ratio $R = \frac{SN}{SN+SI}$ entre les distances sont ensuite calculés. Finalement, les solutions sont classées par ordre croissant en fonction de la valeur du ratio. Le Tableau 27 présente les valeurs des distances euclidiennes, du ratio de distances et le classement attribué aux solutions. La solution 14 est sélectionnée avec cette méthode d'aide à la décision.

Tableau 27 : Distances euclidiennes aux solutions idéales (*SI* , 2^{ème} colonne) et non-idéales (*SN* , 3^{ème} colonne), et classement des solutions (4^{ème} et 5^{ème} colonne)

	<i>SI</i>	<i>SN</i>	<i>R</i>	<i>Rang</i>
<i>Solution 1</i>	0,0013	0,0090	0,8708	7
<i>Solution 2</i>	0,0090	0,0013	0,1235	17
<i>Solution 3</i>	0,0090	0,0013	0,1235	17
<i>Solution 4</i>	0,0066	0,0027	0,2885	16
<i>Solution 5</i>	0,0010	0,0088	0,8960	2
<i>Solution 6</i>	0,0017	0,0073	0,8072	10
<i>Solution 7</i>	0,0012	0,0089	0,8831	6
<i>Solution 8</i>	0,0011	0,0089	0,8868	5
<i>Solution 9</i>	0,0043	0,0048	0,5321	13
<i>Solution 10</i>	0,0010	0,0088	0,8947	3
<i>Solution 11</i>	0,0048	0,0043	0,5708	14
<i>Solution 12</i>	0,0010	0,0082	0,8890	4
<i>Solution 13</i>	0,0014	0,0077	0,8473	9
<i>Solution 14</i>	0,0010	0,0086	0,8998	1
<i>Solution 15</i>	0,0065	0,0027	0,2932	15
<i>Solution 16</i>	0,0019	0,0072	0,7896	11
<i>Solution 17</i>	0,0013	0,0090	0,8708	7
<i>Solution 18</i>	0,0035	0,0055	0,6114	12

A.4 Études de sensibilité sur des stockages thermoclines

Tableau 28 : Récapitulatif de quelques études de sensibilité sur les stockages thermoclines

<i>Référence</i>	<i>Lit</i>	<i>Type d'analyse</i>	<i>Paramètres étudiés</i>	<i>Critère(s) à optimiser</i>	<i>Principaux résultats</i>
Yoo (228)	Huile synthétique / Alumine	1 ^{er} principe	Géométriques (rapport d'aspect, diamètre des particules, porosité) et opérationnels (différence de température)	Efficacité du stockage	L'augmentation de la différence de température de fonctionnement conduit à une densité de stockage d'énergie plus élevée et donc à des coûts plus faibles.
Zhao et al. (229)	Sels fondus / Roches et sable	1 ^{er} principe	Opérationnels (températures de <i>cut-off</i> en charge et décharge)	Capacité effective du stockage et facteur de capacité	Une charge profonde peut réduire le coût unitaire total du TES, malgré un diamètre de particule plus petit et donc une chute de pression plus élevée.
Cárdenas et al. (230)	Air / Roche	2 nd principe et économie	Géométriques (rapport d'aspect, diamètre des particules) et thermophysiques (masse du matériau de stockage)	Rendement exergetique, coûts d'investissement et coût actualisé du stockage	Un faible rapport d'aspect augmente les pertes exergetiques. Malgré l'amélioration du rendement exergetique, l'augmentation de la masse du matériau de stockage diminue la rentabilité du stockage.
Odenthal et al. (231)	Solar Salt / Basalte	2 nd principe	Géométriques (section transversale, diamètre des particules), et opérationnels (temps de charge, variation de la température de sortie)	Rapport entre l'exergie extraite et l'exergie nominale	Le stockage thermocline n'entraîne que des pertes d'exergie mineures par rapport à un stockage 2-cuves. Le diamètre du stockage et le temps de charge ont un faible impact sur la performance exergetique. Un petit diamètre de particule améliore le transfert de chaleur et réduit la zone thermocline. Une variation importante de la température de sortie réduit la taille du réservoir et la masse du HTF par un facteur compris entre 2 et 3.
Lou et al. (232)	Sels fondus		Géométriques (rapport d'aspect, angle du cône, porosité, nombre d'orifices)	Géométrie des chicanes réalisées dans les collecteurs supérieur et inférieur	L'ajout de chicanes performantes optimisées a un impact beaucoup plus important sur les performances de stockage que l'optimisation des quatre paramètres géométriques.
Van Lew et al. (62)	Therminol VPI / Roche de rivière en granite	1 ^{er} principe	Géométriques (rapport d'aspect, porosité, diamètre de particules)	Rendement énergétique de charge	Le rendement énergétique augmente avec le rapport d'aspect. Elle diminue lorsque la porosité ou le diamètre des particules augmentent.

Flueckiger et Garimella (225)	Sels fondus / Quartzite	2 nd principe	Géométrique (diamètre de particules)	Rendement exergetique	La diminution du diamètre de particules augmente le rendement exergetique. Il existe un optimum car si ce diamètre est trop petit, les pertes de charge augmentent considérablement.
Ismail et al. (202)	Air ou eau / Roches ou acier	1 ^{er} principe	Géométriques (diamètre des particules, porosité), thermophysiques (solide de garnissage) et opérationnels (débit massique, température d'entrée)		L'augmentation du diamètre des particules permet de diminuer les pertes de charge et la taille de la zone thermocline. La diminution de la porosité augmente la masse des solides, la capacité de stockage et la taille de la zone thermocline.
Klein et al. (207)	Sels fondus / Alumine	1 ^{er} principe	Géométriques (rapport d'aspect, diamètre de particules)	Facteur d'utilisation et efficacité du stockage	L'augmentation du diamètre des particules diminue la quantité d'énergie extraite. L'augmentation du rapport d'aspect augmente la quantité d'énergie extraite mais également les pertes de charge.
Yang et al. (233)	Sels fondus / Quartzite	1 ^{er} principe	Thermophysiques (solides de garnissage)	Rendement énergétique	Une capacité thermique élevée augmente l'entropie générée dans le système. Un diamètre de particules, une conductivité thermique et une porosité faibles permettent d'augmenter le rendement du stockage.
Elfeky et al. (234)	Air / Quartzite, scories d'acier, magnétite, ou roche de rivière	Technico-économique	Thermophysiques (solide de garnissage)	Efficacité thermo-économique	Le quartzite présente les meilleures efficacités thermo-économiques. Les scories, le coût le plus faible.
El Sihy et al. (28)	Sels fondus / Quartzite, scories ou alumine	1 ^{er} principe	Géométrique (diamètre des particules), opérationnel (débit massique en entrée de cuve) et thermophysiques (solides de garnissage)	Puissance de décharge	L'augmentation du débit massique entraîne l'épaississement de la zone thermocline. La diminution du diamètre des particules diminue le gradient thermique et donc le temps de charge, permettant d'augmenter le rendement de décharge. Les scories semblent plus efficaces que le quartzite.
Keilany et al. (235)	Huile synthétique (Jaryther DBT) / Alumine ou cofalit	1 ^{er} principe	Géométriques (diamètre des particules, porosité) et thermophysiques (solide de garnissage)	Rendement énergétique de décharge	L'augmentation de la capacité thermique augmente le temps de charge, donc l'épaisseur de la thermocline, ce qui diminue le rendement de décharge. La conductivité et la porosité ont peu d'influence sur le comportement thermique du stockage. Il existe un diamètre de particules optimal pour un solide de garnissage et des conditions opératoires données.

<p>Ortega-Fernandez et al. (236)</p>	<p>Air / Scories d'acier</p>	<p>1^{er} principe</p>	<p>Géométriques (rapport d'aspect, hauteur de cuve conique, diamètre des particules) et opérationnel (débit massique)</p>	<p>Efficacité globale du cycle</p>	<p>L'augmentation du rapport d'aspect améliore l'efficacité du stockage. Le diamètre de particules optimal semble être compris entre 1 et 3 cm, et le débit optimal entre 0.01 kg/s et 1 kg/s.</p>
<p>Xu et al. (101)</p>	<p>Sels fondus / Quartzite</p>	<p>1^{er} principe</p>	<p>Géométriques (hauteur du stockage, porosité) et opérationnels (vitesse, température d'entrée)</p>	<p>Efficacité effective de décharge</p>	<p>Le débit massique et la différence de température ont peu d'influence sur les performances du stockage. Une valeur critique de porosité (0.22) a été déterminée, en-dessous de laquelle, l'efficacité diminue nettement. L'augmentation de la hauteur de cuve permet de diminuer la taille de la zone thermocline et donc d'augmenter l'efficacité effective de décharge</p>

A.5 Algorithme d'optimisation par essaim particulaire (OEP)

Dans un premier temps, l'algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) a été utilisé pour faire des optimisations bi-objectifs (rendement exergetique et impacts environnementaux). Cette partie décrit rapidement le problème d'optimisation résolu dans ce cas.

La fonction objectif, appelée *fitness*, inclue les deux critères avec leur pondération respective. L'algorithme tente de minimiser cette fonction pour trouver la meilleure géométrie du système de stockage pour un fluide caloporteur et un solide de garnissage choisis.

$$fitness = ACV \cdot \omega_{ACV} - \eta_{ex} \cdot \omega_{ex} \quad (A.10)$$

avec ω_{ACV} et ω_{ex} les pondérations respectives des critères environnemental et exergetique.

La pondération de chaque critère permet de faire varier l'importance relative des deux critères. Le choix de ces pondérations doit être fait judicieusement pour ne pas privilégier un critère vis-à-vis d'un autre. Pour cela, plusieurs simulations sont lancées avec différentes valeurs de pondérations, afin d'obtenir un ensemble de Pareto. La pondération environnementale est fixée à l'unité tandis que la pondération exergetique varie de 1 à 10 000 (cf. Tableau 29).

Tableau 29 : Valeurs des pondérations exergetiques testées avec l'algorithme OEP

Test	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6	n°7	n°8	n°9	n°10
ω_{ex}	1	100	200	400	800	1 000	2 000	4 000	8 000	10 000

Le problème d'optimisation à résoudre s'écrit alors de la même manière que pour l'algorithme génétique (cf. eq (2.82)), avec la fonction *fitness* :

$$Inf(fitness) \text{ avec } (Q_{dech})^* = (Q_{dech})_{ref} \quad (A.11)$$

L'algorithme OEP développé par Matlab® a été utilisé et les paramètres par défaut ont été conservés (cf. Tableau 30).

Tableau 30 : Paramètres d'ajustement et réglages pour l'algorithme OEP

Paramètres	Valeur
<i>Variables d'optimisation</i>	2
<i>Fonction objectif (fitness)</i>	1
<i>Nombre de particules</i>	100
<i>Nombre d'itérations</i>	400
<i>Coefficient d'inertie (décroissance linéaire)</i>	[0,1 ; 1,1]
<i>Coefficient d'accélération décrivant la confiance en soi</i>	1,49
<i>Coefficient d'accélération décrivant la confiance en l'essaim</i>	1,49

Un ensemble de Pareto est obtenu, chaque point donné par une valeur de pondération exergétique. Par la suite, l'application de la méthode d'aide à la décision TOPSIS permet de décider des meilleures pondérations à adopter. Les résultats ont été décrits dans (223).

A.6 Procédés EcoInvent v.3.7.1 utilisés pour les ACV

Les travaux de (123,212) utilisant la base de données EcoInvent v.3.5 pour l'ACV réalisée sur l'Eco-Stock®, le Tableau 31 présente les procédés EcoInvent v.3.7.1 considérés dans cette étude.

Tableau 31 : Procédés de la base de données EcoInvent v.3.7.1 considérés

<i>Matériaux</i>	<i>Équivalence base de données EcoInvent v.3.7.1</i>
Élaboration des solides de garnissage	
<i>Bauxite et alumine - Al₂O₃</i>	market for aluminium oxide, metallurgical aluminium oxide, metallurgical Cutoff, U – GLO
<i>Bauxite et alumine - SiO₂</i>	market for silica sand silica sand Cutoff, U - GLO
<i>Bauxite et alumine - CaO</i>	market for quicklime, milled, packed quicklime, milled, packed Cutoff, U - RoW
<i>Bauxite - MgO</i>	market for magnesium oxide magnesium oxide Cutoff, U - GLO
<i>Bauxite et alumine - Na₂O</i>	market for sodium oxide sodium oxide Cutoff, U - RoW
<i>Bauxite et alumine - Autres</i>	market for chemicals, inorganic chemical, inorganic Cutoff, U - GLO
<i>Cendres de foyer - Enfouissement</i>	treatment of hard coal ash, residual material landfill hard coal ash Cutoff, U - FR
<i>Basalte</i>	basalt quarry operation basalt Cutoff, U - RER
<i>Quartzite</i>	gravel and sand quarry operation gravel, round Cutoff, U - RoW
<i>Cofalit - Déchet inerté</i>	treatment of inert waste, inert material landfill inert waste, for final disposal Cutoff, U - RoW
<i>Cofalit - Bentonite</i>	market for bentonite bentonite Cutoff, U - GLO
<i>Cofalit - Déchets sable</i>	market for waste foundry sand waste foundry sand Cutoff, U - GLO
<i>Cofalit - Déchets Al₂O₃</i>	treatment of waste aluminium, sanitary landfill waste aluminium Cutoff, U - RoW
<i>Eau (formation billes)</i>	market group for tap water tap water Cutoff U - RER
<i>Eau usée (séchage billes)</i>	treatment of wastewater from ceramic production, capacity 5E9l/year wastewater from ceramic production Cutoff, U - RoW

<i>Diesel (concassage roches)</i>	market for diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW Cutoff, U - GLO
Élaboration de la cuve de stockage	
<i>Traitement conteneur</i>	treatment of used intermodal shipping container, 20-foot used intermodal shipping container, 20-foot Cutoff, U - GLO
<i>Acier carboné</i>	steel turning, average, conventional steel removed by turning, average, conventional Cutoff, U - RER
<i>Acier inoxydable</i>	steel production, chromium steel 18/8, hot rolled steel, chromium steel 18/8, hot rolled Cutoff, U - RER
<i>Laine de roche</i>	stone wool production, packed stone wool, packed Cutoff, U - RoW
<i>Aluminium</i>	sheet rolling, aluminium sheet rolling, aluminium Cutoff, U - RER
<i>Ventilateur</i>	air input/output unit production, heat and power co-generation unit, 160kW electrical air input/output unit, heat and power co-generation unit, 160kW electrical Cutoff, U - RER
<i>Pompe</i>	pump production, 40W pump, 40W Cutoff, U - RoW
<i>Armoire électrique</i>	control cabinet production, heat and power co-generation unit, 160kW electrical control cabinet, heat and power co-generation unit, 160kW electrical Cutoff, U - RER
Transport	
<i>Camion de 16 à 32 tonnes</i>	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cutoff, U - RER
Utilisation	
<i>Électricité</i>	electricity voltage transformation from high to medium voltage electricity, medium voltage Cutoff, U - FR
<i>Gaz naturel</i>	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RER
Fin de vie	
<i>Laine de roche</i>	treatment of waste mineral wool, inert material landfill waste mineral wool, for final disposal Cutoff, U - GLO
<i>Métaux (aciers et aluminium)</i>	process-specific burdens, inert material landfill process-specific burdens, inert material landfill Cutoff, U - RoW

A.7 Inventaire de la phase de conception des matériaux de garnissage

La formation des billes de bauxite, de cendres volantes et de cendres de foyer a été précédemment réalisées par (127,212). Les Figure 85 et Figure 86 présentent les schémas synoptiques des phases d'élaboration de ces trois matériaux de garnissage, qui comprennent la formation des billes de solides, leur séchage et enfin leur cuisson.

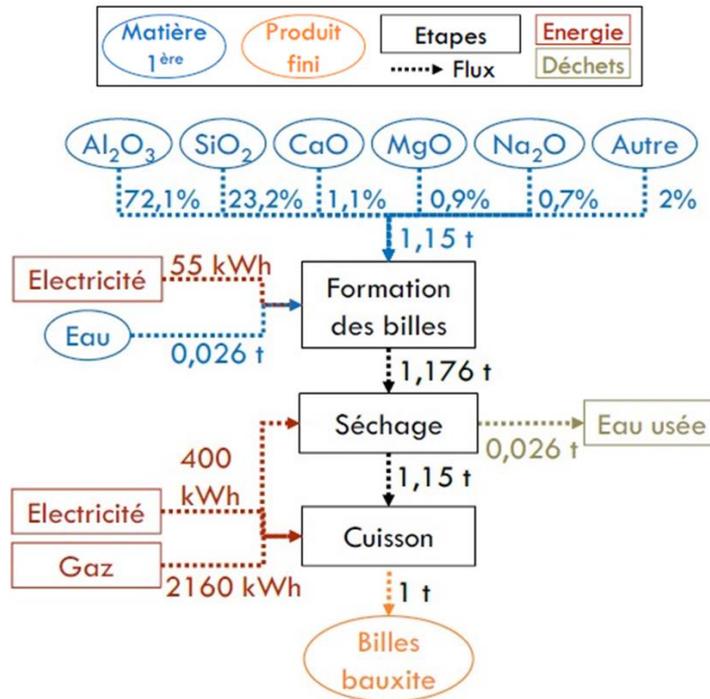


Figure 85 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes de bauxite

Les cendres volantes et de foyer sont issues de la combustion de charbon dans les centrales thermiques produisant de l'électricité. La filtration des fumées permet de récupérer des cendres volantes, alors que les résidus du lit de combustion composent les cendres de foyer. En France, les cendres volantes sont largement valorisées, à hauteur de 90 %, notamment dans les travaux routiers (237). A l'inverse, aucune voie de valorisation existe actuellement pour les cendres de foyer, malgré la validation de leur utilisation pour des applications routières (238). La fabrication de billes de garnissage pour le stockage thermique de la chaleur permettrait de valoriser ces deux déchets avec une forte valeur ajoutée.

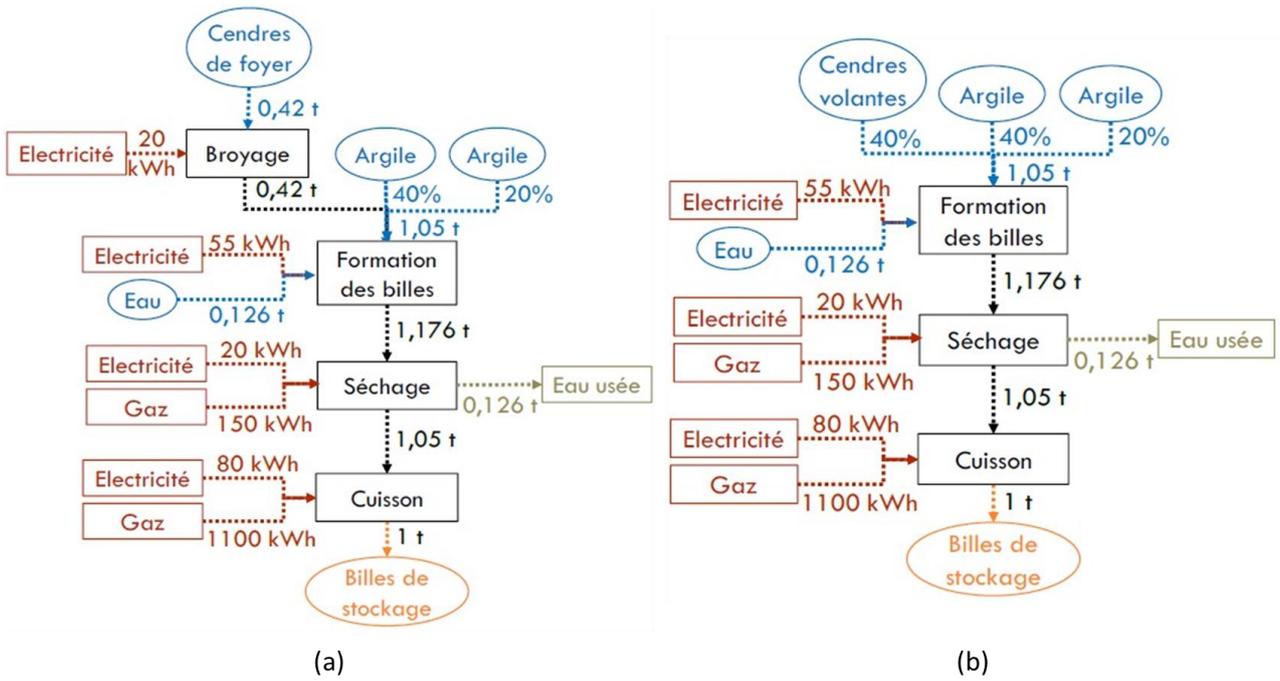


Figure 86 : Schémas synoptiques de l'élaboration des billes de cendres de foyer (a) et de cendres volantes (b)

A.8 Étude de sensibilité sur les taux d'intérêt réel

Pour étudier la sensibilité du modèle économique aux variations du taux d'intérêt réel, une étude de sensibilité a été effectuée sur les optimisations multi-objectifs, ainsi que la solution optimale sélectionnée pour l'Eco-Stock® : optimisation exergetique avec cendres de foyer. En plus du taux d'intérêt réel considéré (6,8 % .an⁻¹), deux autres valeurs ont été testées : 5 et 10 % par an.

Les ensembles de Pareto normalisés de façon linéaire et en 2D sont présentés sur la Figure 87 : les critères exergetique et environnemental – en haut, à gauche – ceux environnemental et économique – à gauche – et ceux exergetique et économique – en bas, à gauche. Les trois ensembles sont quasiment superposés sur les trois critères, et suivent la même tendance.

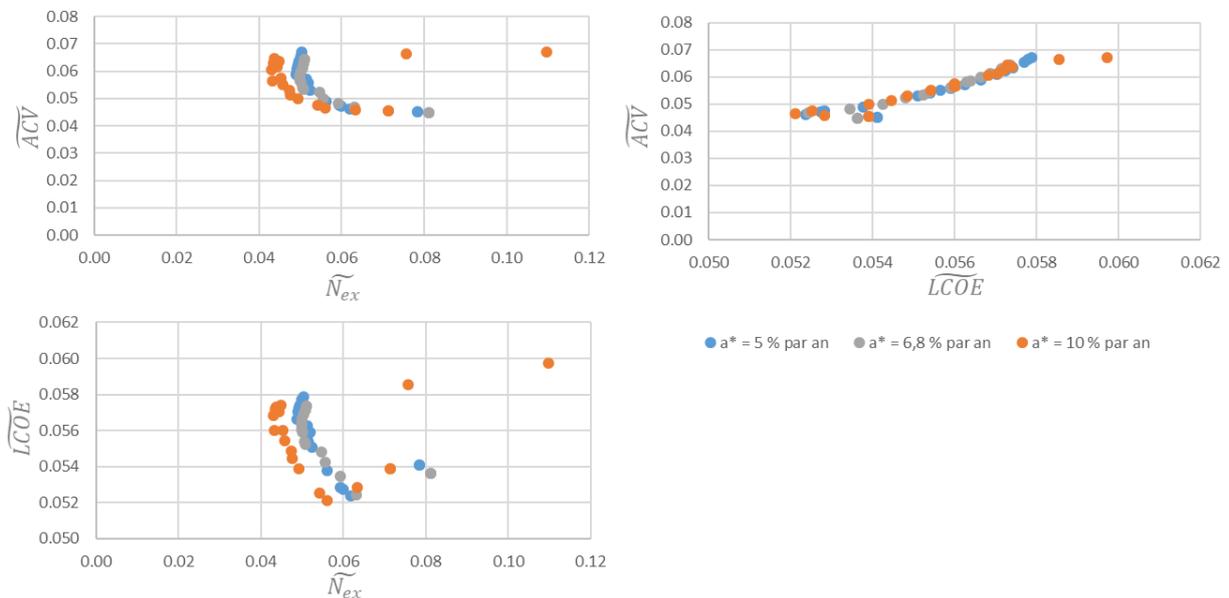


Figure 87 : Ensembles de Pareto normalisés des optimisations multi-objectifs avec différents taux d'intérêt réel

L'application de la méthode TOPSIS/Shannon sélectionne toujours une cuve carrée (ou légèrement trapue, $F_e < 1,11$) comme solution de compromis. En effet, les pondérations de Shannon restent similaires. Celle du critère exergetique est toujours la plus élevée (entre 0.6 et 0.8), alors que celle du LCOE est toujours quasi-nulle, quel que soit le taux d'intérêt réel. Finalement, les solutions sélectionnées présentent toutes les mêmes facteurs de forme : 1,03 à 1,11 en externe et 0,003 en interne. Le modèle économique ainsi que les optimisations multi-objectifs semblent donc être robustes vis-à-vis de modification de taux d'intérêt réel, qui peuvent facilement survenir dans le contexte actuel.

A.9 Variation des modèles environnemental et économique pour la cuve type Andasol

A.9.1. Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie est totalement revu dans le cadre de la cuve type Andasol. Plusieurs références ont été prises en compte : des ACV réalisées sur des centrales CSP avec stockage (123,125,239,240) ou sans (241), et un rapport détaillé du stockage thermocline de la centrale Solar One (242). Cette section recense les différents matériaux et flux énergétiques utilisés pour concevoir et utiliser ce stockage.

1) Élaboration de la cuve

L'inventaire des matériaux nécessaires à la conception de la cuve se base sur le rapport du seul stockage thermocline ayant été élaboré à grande échelle jusqu'à présent : Solar One (242). A l'inverse du stockage industriel Eco-Stock® qui était directement placé sur des roues pour être déplacé facilement, des fondations sont incluses dans l'inventaire du cycle de vie du TES type Andasol. La Figure 88 présente les différents composants et leur épaisseur.

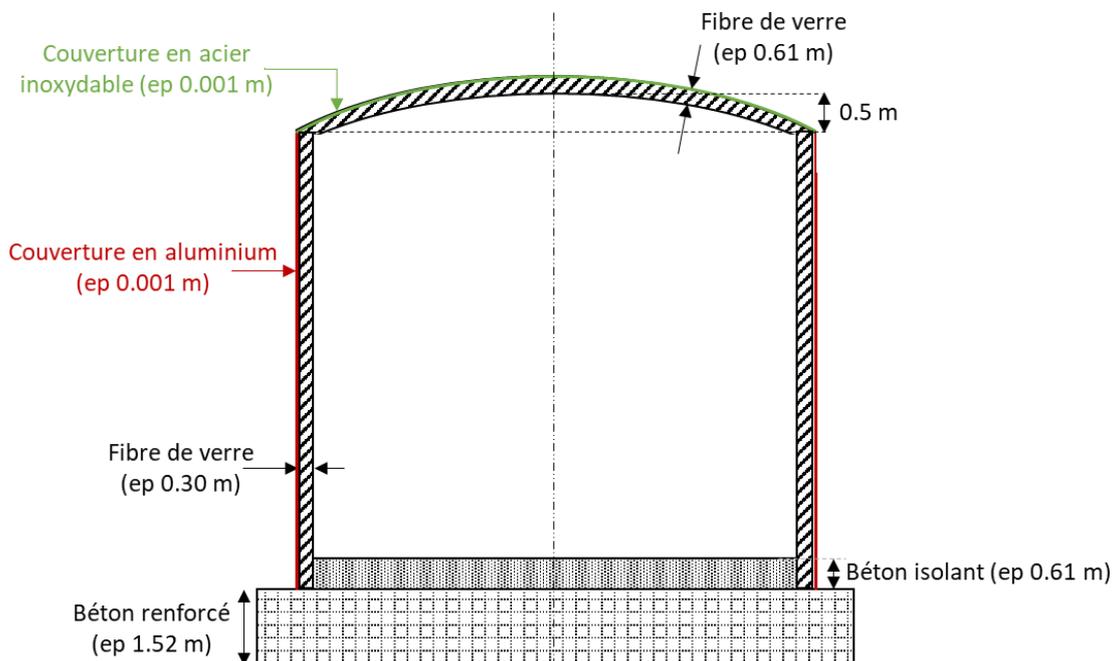


Figure 88 : Schéma décrivant les épaisseurs de matériaux autour de la cuve type Andasol

Les impacts pris en compte sont ceux correspondants aux composants utilisés, listés dans le Tableau 32. Chaque composant est assemblé sur site, et l'énergie nécessaire à cet assemblage (du diesel) est de 36,65 MWh_{th}. En effet, d'après Viebhan *et al.* (239), l'assemblage d'un

stockage 2-cuves utilise 55,53 MWh_{th} d'énergie. Or d'après Burkhardt *et al.* (125), un stockage thermocline permet de réduire de 33 % l'énergie nécessaire ($0,66 * 55,53 \text{ MWh}_{th} = 36,65 \text{ MWh}_{th}$).

Tableau 32 : Composants de la cuve thermocline et de ses fondations en relation avec la base de données EcoInvent v.3.7.1 pour calculer les impacts de la conception du TES

Matériaux / Énergie	Équivalence base de données EcoInvent v.3.7.1
Acier carboné	sheet rolling, steel sheet rolling, steel Cutoff, U - RER
Acier inoxydable	steel production, chromium steel 18/8, hot rolled steel, chromium steel 18/8, hot rolled Cutoff, U - RER
Acier de la tuyauterie	drawing of pipe, steel drawing of pipe, steel Cutoff, U - RER
Acier renforcé (béton renforcé)	reinforcing steel production reinforcing steel Cutoff, U - Europe without Austria
Aluminium	powder coating, aluminium sheet powder coat, aluminium sheet Cutoff, U - RER
Laine de verre	glass fibre production glass fibre Cutoff, U - RER
Laine de roche	stone wool production, packed stone wool, packed Cutoff, U - CH
Béton (isolant et renforcé)	market for concrete, normal concrete, normal Cutoff, U - CH
Pompe	pump station construction pump station Cutoff, U - CH
Huile synthétique	diphenylether-compound production diphenylether-compound Cutoff, U - RER
Diesel brûlé pendant la construction	diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine Cutoff, U - GLO

2) Élaboration des matériaux de garnissage

Au vu des compatibilités fluide caloporteur / solide de garnissage (cf. Tableau 5), plusieurs TESM sont étudiés avec le stockage type Andasol : alumine, bauxite, cendres volante, cofalit, quartzite et laitiers de sidérurgie, issus d'un four à arc électrique. Seul l'inventaire de l'élaboration des laitiers n'a pas été explicité précédemment.

Les laitiers sont issus d'industries métallurgiques (sidérurgies). Selon Euroslag (243), 76 % étaient valorisés en 2008 en Europe, notamment pour des applications routières. En France, les laitiers non valorisés sont stockés et traités en centre d'enfouissement technique (244). Trois scénarios sont considérés pour mettre en forme des billes de laitiers :

- Contrôle du refroidissement du laitier en fusion,

- Mise en forme d'une céramique à partir de grains fins de laitiers, concassés directement sur site,
- Concassage des blocs de laitiers, refroidis directement sur site.

La première mise en forme se base sur les travaux de Lalau *et al.* (123), scénario 2 : refroidissement passif en utilisant des moules isolés au sable, sur le même principe que le cofalit. En effet, les laitiers étant issus de la fusion d'acier, il est possible de les récupérer directement à l'état liquide. Dans ce cas, des briques sont directement coulées à partir des laitiers en fusion. La Figure 89 présente le schéma synoptique de cette méthode.

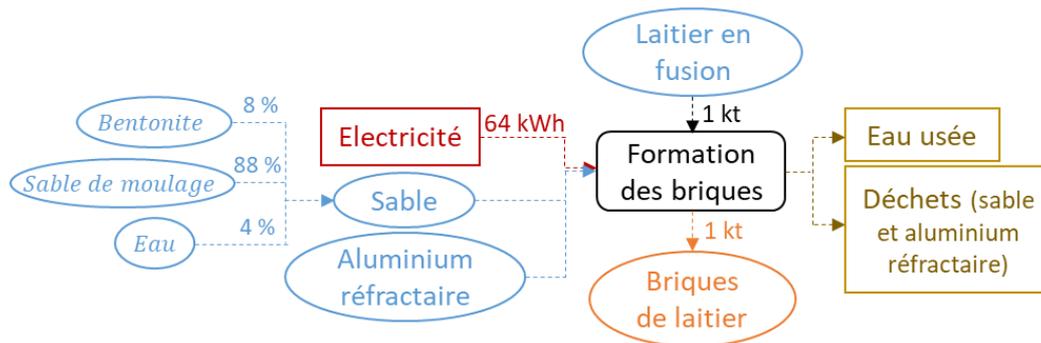


Figure 89 : Schéma synoptique de l'élaboration des billes de laitiers (similaire au cofalit)

Dans le second cas, le refroidissement n'est pas inclus dans l'ACV, car les aciéries laissent reposer à l'air libre les laitiers avant de les concasser et les stocker sous forme de sable. Par conséquent, seule la mise en forme à partir de particules fines de laitiers est considérée dans l'inventaire du cycle de vie. Les particules sont remises dans un four pour former des billes de céramiques, qui sont séchées puis cuites, comme pour les cendres de foyer (cf. ANNEXE A.7).

Enfin, la dernière méthode de mise en forme est la plus simple. Le laitier étant refroidi sur site à l'air libre sous forme de blocs, ces derniers peuvent être directement concassés, comme des roches naturelles, pour obtenir des blocs de plus petite taille, assimilables à des billes de diamètre équivalent. Dans ce cas, seul l'utilisation du diesel est prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie.

Ces trois mises en forme sont comparées en ANNEXE A.10. Étant donné que la plus simple présente l'impact environnemental le plus faible, elle sera considérée dans cette étude.

3) Phase de transport

Les matériaux sont acheminés sur site par des camions de très grande taille (> 32 tonnes). Un trajet moyen des composants, venant majoritairement d'Europe (cf. Tableau 32), de 2 000 km est retenu. La norme européenne EURO4 est considérée ici, pour des camions mis en circulation entre 2006 et 2011. Le procédé EcoInvent utilisé est *transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4* / *transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4* / *Cutoff, U – RER*.

4) Phase d'utilisation

Comme pour l'Eco-Stock®, la consommation de la pompe dépend de la géométrie du stockage et de la granulométrie des solides, et donc des pertes de charge. L'énergie électrique consommée annuellement par la pompe E_{circ} s'exprime par cycle à partir du modèle physique (cf. eq (2.67) avec l'efficacité de la pompe de 85 %) et l'énergie de l'armoire électrique est de 0,2 kWh/cycle. Le mix électrique espagnol est considéré dans le cas du stockage type Andasol (procédé EcoInvent : *electricity voltage transformation from high to medium voltage* / *electricity, medium voltage* / *Cutoff, U – ES*).

De plus, une opération de maintenance changeant 50 % des conduites est prise en compte tous les 15 ans (125), afin d'assurer l'hypothèse de durée de vie.

5) Fin de vie

Les composants sont démantelés sur site, et l'énergie nécessaire (du diesel) est de 32,28 MWh_{th}, soit (48,90 MWh_{th} (239) * 33 % de réduction avec le stockage thermocline (125)). Le procédé EcoInvent utilisé est *diesel, burned in building machine* / *diesel, burned in building machine* / *Cutoff, U – GLO*.

En fin de vie, la partie des matériaux recyclés ou réutilisés sont acheminés jusqu'au centre de traitement (500 km), puis plus aucun impact ni gain environnemental ne sont considérés. Les matériaux non-recyclés sont enfouis ou éliminés. Le Tableau 33 récapitule les taux de recyclage des différents composants du TES (141). Les billes de garnissage sont entièrement réutilisées.

Tableau 33 : Taux de recyclage des matériaux en relation avec la base de données EcoInvent v.3.7.1 pour calculer les impacts de la fin de vie du TES

Matériaux	Équivalence base de données EcoInvent v.3.7.1	Taux de recyclage (%)
Aciers	treatment of waste reinforcement steel, collection for final disposal waste reinforcement steel Cutoff, U - CH	90
Aluminium	treatment of waste aluminium, sanitary landfill waste aluminium Cutoff, U - CH	90
Laine de roche	treatment of waste mineral wool, inert material landfill waste mineral wool, for final disposal Cutoff, U - C	0
Laine de verre	treatment of waste glass, inert material landfill waste glass Cutoff, U - CH	0
Béton	treatment of waste concrete, not reinforced, collection for final disposal waste concrete, not reinforced Cutoff, U - CH	95
Béton renforcé	treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal waste reinforced concrete Cutoff, U - CH	95
Huile synthétique	market for waste mineral oil waste mineral oil Cutoff, U - CH	0

A.9.2. Variation du modèle économique

De l'air est utilisé comme fluide caloporteur dans le stockage Eco-Stock®, d'où l'utilisation d'un ventilateur pour disséminer ce fluide à travers le lit de solide. Dans le cas de la cuve type Andasol, une pompe est préférée car le fluide caloporteur est une huile synthétique. Le coût de la pompe est déterminé à partir de sa puissance (cf. eq (2.67)) (245) :

$$C_{circ} = C_{ref,circ} \cdot (W_{circ})^{0.71} \cdot 1,41 \cdot f_{\eta,circ} \cdot f_{M\&S(2021,1991)} \quad (4.12)$$

avec $C_{ref,circ}$, le coût spécifique de référence de la pompe (€/kW^{0.71}) (245),

$f_{M\&S}$, l'indice de Marshall & Swift (–), les facteurs de correction étant définis en 1991,

$f_{\eta,circ}$, le facteur de correction lié à l'efficacité de la pompe (–) (cf. eq (4.13)) (45,245),

$$f_{\eta,circ} = 1 + \frac{0,2}{1 - \eta_{circ}} \quad (4.13)$$

avec η_{circ} , l'efficacité de la pompe, généralement de 85 %.

La laine de verre est préférée à la laine de roche pour isoler la cuve de stockage. En regardant le prix de ces deux matériaux isolants, la laine de verre semble être 40 % moins chère que la

laine de roche en moyenne⁵. Le coût spécifique de référence de l'isolant ($C_{ref,isol}$) est donc revu à la baisse. Le volume de l'isolant (cf. eq (2.57)) est également rectifié pour tenir compte des deux épaisseurs d'isolant (30,5 cm sur le côté et 61 cm sur le toit), et de la forme arrondie du toit (hauteur de l'arc de cercle égale à 0,5 m) (cf. Figure 88).

$$V_{isol} = \pi \cdot L_c \cdot \left(\left(\frac{D_c}{2} + e_{isol-cote} \right)^2 - \frac{D_c}{2} \right) + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{D_c}{2} + e_{isol-cote} \right)^2 \cdot (0,5 + e_{isol-toit}) - \left(\frac{D_c}{2} \right)^2 \cdot 0,5 \right) \quad (4.14)$$

Pour protéger l'isolation du stockage, une couverture en aluminium est placée sur les côtés et une couverture en acier inoxydable sur le toit. Les coûts de ces deux matériaux sont également inclus au coût d'isolation.

$$C_{isol} = C_{ref,isol} \cdot V_{isol} \cdot f_{M\&S(2021,1985)} + S_{alu} \cdot C_{ref,alu} + m_{acier-inox} \cdot C_{ref,inox} \cdot f_{M\&S(2021,2006)} \quad (4.15)$$

avec $C_{ref,alu}$, le coût spécifique de référence de l'aluminium ($\text{€}/\text{m}^3$),

S_{alu} , la surface d'aluminium pour couvrir la cuve extérieure sur le côté (m^2),

$m_{acier-inox}$, la masse d'acier inoxydable pour couvrir la cuve extérieure sur le toit (kg),

$C_{ref,inox}$, le coût spécifique de référence de l'acier inoxydable ($\text{€}/\text{m}^3$) (246),

$f_{M\&S}$, l'indice de Marshall & Swift (—), le coût spécifique de l'acier inoxydable $C_{ref,inox}$ étant défini en 2006, et le coût spécifique de l'isolant $C_{ref,isol}$ étant défini en 1985.

La cuve thermocline type Andasol utilise de l'huile synthétique comme fluide caloporteur. Contrairement à l'Eco-Stock®, ce fluide n'est pas gratuit et coûte :

$$C_{HTF} = m_f \cdot C_{dowtherm-A} \quad (4.16)$$

où $C_{dowtherm-A}$ est le coût de l'huile synthétique dowtherm A ($\text{€}/\text{kg}$), et m_f , la masse du fluide caloporteur (kg).

Les conduites étant assez conséquentes par rapport à l'Eco-Stock®, leur coût est déterminé :

$$C_{tuy} = m_{acier} \cdot C_{ref,acier} \cdot f_{M\&S(2021,2006)} + V_{tuyaux-isol} \cdot C_{ref,isol} \cdot f_{M\&S(2021,1985)} \quad (4.17)$$

⁵ <https://www.leroymerlin.fr/produits/materiaux/isolation/laine-de-roche/laine-de-roche-mur/> et <https://www.leroymerlin.fr/produits/materiaux/isolation/laine-de-verre/laine-de-verre-mur/>

avec m_{acier} , la masse d'acier carboné de la tuyauterie (108 tonnes (239) * 33 % de réduction (125)),

$V_{tuyaux-isol}$, le volume de laine de roche nécessaire pour isoler la tuyauterie (m^3), déduit de m_{acier} ,

$C_{ref,isol}$ et $C_{ref,acier}$, respectivement les coût spécifiques de référence de l'isolant en laine de roche (€/m³) (218) et de l'acier carboné (€/kg) (246),

$f_{M\&S}$, l'indice de Marshall & Swift (-), les coût spécifiques étant définis entre 1985 et 2006 (246).

De plus, comme indiqué dans l'inventaire du cycle de vie, des **fondations** sont mises en place. Par conséquent, leur coût doit être inclus dans le modèle économique :

$$C_{fond} = (V_{beton-isol} \cdot C_{ref,beton-isol} + V_{beton} \cdot C_{ref,beton} + m_{renf} \cdot C_{ref,renf}) \cdot f_{M\&S(2021,2006)} \quad (4.18)$$

avec $V_{beton-isol}$, le volume de béton isolant (m^3),

V_{beton} , le volume de béton nécessaire pour couler la dalle de béton renforcé (m^3),

m_{renf} , la masse d'acier renforcé pour la dalle de béton renforcé (73 kg/m³ de béton) (246),

$C_{ref,beton-isol}$, $C_{ref,beton}$, et $C_{ref,renf}$, les coût spécifiques de référence du béton isolant, du béton renforcé, de l'isolant en laine de roche (€/m³), de l'acier renforcé et de l'acier carboné (€/kg) respectivement (246),

$f_{M\&S}$, l'indice de Marshall & Swift (-), les coût spécifiques étant définis en 2006 (246).

Les coûts d'installation (cf. (2.62)), d'ingénierie (cf. eq (4.20)) et des imprévus (cf. eq (4.21)) tiennent compte des nouveaux équipements intégrés dans le cas du stockage type Andasol : les **conduites**, le **fluide caloporteur** et les **fondations**.

$$C_{inst} = 0,25 \cdot (C_c + C_{isol} + C_s + C_{circ} + C_{HTF} + C_{tuy} + C_{fond}) \quad (4.19)$$

$$C_{ing} = 0,05 \cdot (1,25 \cdot C_{inst}) \quad (4.20)$$

$$C_{aleas} = 0,1 \cdot (1,25 \cdot C_{inst}) \quad (4.21)$$

Les coûts d'installation des fondations ont été validés par les données détaillées par (246).

Finalement, les coûts d'investissement sont calculés avec ces nouvelles données :

$$C_I = C_c + C_{isol} + C_s + C_{circ} + C_{HTF} + C_{tuy} + C_{fond} + C_{inst} + C_{ing} + C_{aleas} \quad (4.22)$$

Le Tableau 34 présente tous les paramètres et facteurs économiques considérés dans les coûts d'investissement. Le facteur de correction tient compte de l'efficacité de la pompe.

Tableau 34 : Paramètres et facteurs économiques impliqués dans l'ACC (cuve type Andasol)

	Paramètres	Valeur
Economique	Taux d'intérêt réel a^*	0,068
	Durée de vie du TES N	25 ans
	$f_{\eta\ circ}$ lié à la pompe (-)	$1 + \frac{0,2}{1-\eta_{\circ}} (45,245)$
	$C_{ref,circ}$ (€/kW ^{0.71})	510,86 (245)
	$C_{ref,isol}$ (€/m ³) (laine de verre)	153 (60 % du coût de la laine de roche) ⁶
Investissement	$C_{ref,acier}$ (€/kg)	3,608 (246)
	$C_{ref,alu}$ (€/m ²)	3,5 ⁷
	$C_{ref,inox}$ (€/kg)	2,55 ⁸
	$C_{dowtherm-A}$ (€/tonne)	2 378 ⁹
	$C_{ref,beton-isol}$ (€/m ³)	82 (246)
	$C_{ref,beton}$ (€/m ³)	69,7 (246)
	$C_{ref,renf}$ (€/kg)	0,656 (246)
Revenus	Prix de l'électricité en Espagne P_e (€/kWh _e)	0,2070 *
	Prix de vente de la chaleur (égal au prix du gaz naturel en Espagne P_{th} (€/kWh _{th}))	0,0690 *

* Prix donnés pour l'année 2021

⁶ <https://www.leroymerlin.fr/produits/materiaux/isolation/laine-de-roche/laine-de-roche-mur/> et <https://www.leroymerlin.fr/produits/materiaux/isolation/laine-de-verre/laine-de-verre-mur/>

⁷ <https://french.alibaba.com/p-detail/aluminium-62290922429.html?spm=a2700.8699010.29.101.6f096966332Sqq>

⁸ <https://www.journaldunet.fr/patrimoine/guide-des-finances-personnelles/1146972-prix-des-metiaux-les-tarifs-des-metiaux-en-janvier-2022/>

⁹ https://nanostar.fm.alibaba.com/product/131545335-103368896/Dowtherm_A_equivalents.html validé avec le coût de l'huile Jarytherm dans la these de Fasquelle (8)

A.10 Comparaison de l'impact environnemental des laitiers pour trois mises en forme différentes

La Figure 90 présente l'impact environnemental des trois mises en forme des laitiers de four à arc électrique. Les appellations « Cofalit », « CF » et « Roches » font respectivement référence aux mises en forme similaires à celles du cofalit, des cendres de foyer et des roches naturelles. Le choix de la mise en forme semble être importante, puisque son impact environnemental total peut être 2 à 100 fois plus élevé. Cet écart peut devenir très grand pour une masse de solide de garnissage importante. Néanmoins, par rapport à des matériaux usinés (cf. Figure 68), l'impact reste nettement moins élevé.



Figure 90 : Impact environnemental d'une tonne de laitiers de four à arc électrique par indicateur, pour les trois mises en forme considérées

L'impact de la mise en forme des laitiers de four à arc électrique par concassage (comme pour les roches naturelles) est négatif. En effet, l'impact environnemental du diesel brûlé pour concasser les blocs de laitiers est largement inférieur à celui de la mise en décharge de ces déchets. A contrario, pour les deux autres mises en forme, l'impact relatif à chaque indicateur est réduit, mais ne devient pas négatif car beaucoup plus d'énergie et de matériaux sont nécessaires dans ces deux cas. L'impact global de la mise en forme des laitiers sur le même principe que le cofalit ou les cendres de foyer est similaire (respectivement 0,13 et 0,14 hab.an pour 1 tonne de laitiers). Celle utilisant uniquement un concasseur est négative, puisque l'utilisation des laitiers évite l'impact environnemental de sa mise en décharge. Par conséquent, cette mise en forme semble être la plus intéressante pour limiter l'empreinte environnementale du matériau de garnissage. Elle sera utilisée pour l'optimisation multi-objectifs avec laitiers.

A.11 Valorisation

Articles scientifiques dans des journaux internationaux

- D. Le Roux, Y. Lalau, B. Rebouillat, P. Neveu, and R. Olivès, “**Thermocline thermal energy storage optimisation combining exergy and life cycle assessment**”. *Energy Convers. Manag.*, vol. 248, p. 114787, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114787.
- D. Le Roux, R. Olives, and P. Neveu, “**Geometry optimisation of an industrial thermocline Thermal Energy Storage combining exergy, Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis**”. *Journal of Energy Storage*, accepté en Septembre 2022.
- D. Le Roux, A. Touzo, T. Esence, and R. Olives, “**Experimental and numerical investigation of the temperature and flow rate variation on an industrial high-temperature thermocline storage for recovering waste heat**”. *Journal of Energy Storage*, accepté en Septembre 2022.

Communications

- D. Le Roux, P. Neveu and R. Olivès, “**Multi-criteria optimisation of an industrial thermocline thermal energy storage**”, ECOS 2022.
- D. Le Roux, P. Neveu and R. Olivès, “**Optimisation monocritère des performances exergétique, environnementale et économique d’un stockage thermique thermocline en fonction des taux de *cut-off* en charge et en décharge**”. SFT 2022.
- D. Le Roux, P. Neveu and R. Olivès, “**Eco-conception d’un échangeur-stockeur de type thermocline**”. Webinaire “Transition énergétique”, SFGP 2021.
- D. Le Roux, P. Neveu and R. Olivès, “**Optimisation énergétique et environnementale d’un stockage thermique de type thermocline**”. SFT 2021.

Séminaires internes (UPVD et PROMES)

- D. Le Roux, P. Neveu and R. Olivès, “**Multi-criteria optimisation of thermocline thermal energy storage**”. JDOCS PROMES 2022.
- D. Le Roux, P. Neveu and R. Olivès, “**Ecoconception d’un échangeur-stockeur de type thermocline**”. Congrès des doctorants de l’UPVD 2020.

BIBLIOGRAPHIE

1. IPCC. Climate Change 2022 - Impacts, adaptation and vulnerability - Summary for Policymakers [Internet]. IPCC (Intergovernmental panel on climate change); 2022 févr [cité 24 juin 2022] p. 3676. Report No.: 6th assessment report. Disponible sur: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_FullReport.pdf
2. REN21 R. Renewables 2022 Global Status Report [Internet]. Paris: REN21 Secretariat; 2022 [cité 16 juin 2022]. 312 p. Disponible sur: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
3. REN21. Renewables 2020 Global Status Report [Internet]. Paris: REN21 Secretariat; 2020 [cité 1 févr 2021]. 367 p. Disponible sur: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf
4. IEA. Tracking Industry 2021 [Internet]. Paris: IEA; 2021 nov [cité 24 juin 2022]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2021>
5. Plisson P, Devroe S, Gonzalez A, Guiard A, Denis G, Mathieu C. Waste heat recovery: technologically and economically viable solutions for industrial businesses - A white book on industrial waste heat recovery [Internet]. Fives group; 2017 [cité 23 juin 2022] p. 48. Disponible sur: https://dk8mx37zdr9bp.cloudfront.net/corporate/Innovation/2017.02_Fives-WHR.pdf
6. Forman C, Muritala IK, Pardemann R, Meyer B. Estimating the global waste heat potential. *Renew Sustain Energy Rev.* 1 mai 2016;57:1568-79.
7. Miró L, Gasia J, Cabeza LF. Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. *Appl Energy.* 1 oct 2016;179:284-301.
8. Fasquelle T. Modélisation et caractérisation expérimentale d'une boucle solaire cylindro-parabolique intégrant un stockage de type thermocline [Internet] [thesis]. [Perpignan]: Université de Perpignan Via Domitia; 2017 [cité 7 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2017PERP0040>
9. Gil A, Medrano M, Martorell I, Lázaro A, Dolado P, Zalba B, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renew Sustain Energy Rev.* 1 janv 2010;14(1):31-55.
10. International Energy Agency. Technology Roadmap – Concentrating Solar Power [Internet]. 2010 [cité 9 juin 2020] p. 49. Disponible sur: http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/csp_roadmap.pdf
11. Baharoon DA, Rahman HA, Omar WZW, Fadhl SO. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 1 janv 2015;41:996-1027.
12. ADEME. Excess heat [Internet]. 2017^e éd. Angers: ADEME; 2018 [cité 11 juin 2020]. 48 p. Disponible sur: <https://www.ademe.fr/excess-heat>

13. Panayiotou GP, Bianchi G, Georgiou G, Aresti L, Argyrou M, Agathokleous R, et al. Preliminary assessment of waste heat potential in major European industries. *Energy Procedia*. 1 sept 2017;123:335-45.
14. Johnson I, Choate WT, Davidson A. Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities in U.S. Industry [Internet]. BCS, Inc., Laurel, MD (United States); 2008 mars [cité 26 juin 2020]. Disponible sur: <https://www.osti.gov/biblio/1218716/>
15. Lopez Ferber N. Validation expérimentale d'un système de stockage thermocline air/céramique à échelle pilote - développement d'un matériau céramique issu de sous-produits industriels [Internet]. [Perpignan]: Université de Perpignan Via Domitia; 2018 [cité 15 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/234311789>
16. Pelay U, Luo L, Fan Y, Stitou D, Rood M. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renew Sustain Energy Rev*. 1 nov 2017;79:82-100.
17. REN21. Renewables 2019 Global Status Report [Internet]. Paris: REN21 Secretariat; 2019 [cité 12 juin 2020]. 336 p. Disponible sur: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
18. Mackenzie W. Solar-plus-storage in the Middle East and Africa: A Market Opportunity Assessment [Internet]. Verisk Business; 2019 janv [cité 12 juin 2020]. Disponible sur: <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-solar-plus-storage-in-the-middle-east-and-africa-a-market-opportunity-assessment-94766>
19. Odru P. Stockage de la chaleur : Stockage de chaleur sensible. Tech Ing Stock Lénergie [Internet]. 10 avr 2017;base documentaire: TIB638DUO(ref. article: be8597). Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/stockage-de-l-energie-42638210/stockage-de-la-chaleur-be8597/>
20. Herrmann U, Kelly B, Price H. Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. *Energy*. 1 avr 2004;29(5):883-93.
21. Angelini G, Lucchini A, Manzolini G. Comparison of Thermocline Molten Salt Storage Performances to Commercial Two-tank Configuration. *Energy Procedia*. 1 janv 2014;49:694-704.
22. Fasquelle T, Falcoz Q, Neveu P, Hoffmann JF. Numerical simulation of a 50 MWe parabolic trough power plant integrating a thermocline storage tank. *Energy Convers Manag*. 15 sept 2018;172:9-20.
23. Brosseau D, Kelton JW, Ray D, Edgar M, Chisman K, Emms B. Testing of Thermocline Filler Materials and Molten-Salt Heat Transfer Fluids for Thermal Energy Storage Systems in Parabolic Trough Power Plants. *J Sol Energy Eng*. 1 févr 2005;127(1):109-16.
24. Libby C. Demonstration Development Project: Solar Thermocline Storage Systems: Preliminary Design Study [Internet]. Palo Alto, California, USA: Electric power research institue; 2010 juin [cité 9 juin 2022] p. 188. (2010 207 Solar Generation). Report No.: 1019581. Disponible sur: <https://www.epri.com/research/products/1019581>

25. Molina S. Combinaisons huiles/solides pour le stockage thermocline : De l'étude des matériaux au modèle de stockage thermique [Internet] [thesis]. [Pau]: Pau et des Pays de l'Ardour; 2018 [cité 16 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2018PAUU3015>
26. Esence T. Étude et modélisation des systèmes de stockage thermique de type régénératif solide/fluide [Internet] [thesis]. [Grenoble]: Grenoble Alpes; 2017 [cité 7 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2017GREAA024>
27. Galione P, Pérez-Segarra C, Rodríguez I, Torras S, Rigola J. Numerical Evaluation of Multi-layered Solid-PCM Thermocline-like Tanks as Thermal Energy Storage Systems for CSP Applications. *Energy Procedia*. 1 mai 2015;69:832-41.
28. ELSihy ElsS, Liao Z, Xu C, Du X. Dynamic characteristics of solid packed-bed thermocline tank using molten-salt as a heat transfer fluid. *Int J Heat Mass Transf*. 1 févr 2021;165:120677.
29. Kocak B, Paksoy H. Performance of laboratory scale packed-bed thermal energy storage using new demolition waste based sensible heat materials for industrial solar applications. *Sol Energy*. 15 nov 2020;211:1335-46.
30. Rebouillat B, Falcoz Q, Neveu P. 2nd law analysis of thermocline – heat storage system. In: *ECOS 2019* [Internet]. Wrocław, Poland: Institute of Thermal Technology - Silesian University of Technology; 2019. p. 3065-76. Disponible sur: <http://www.s-conferences.eu/ecos2019>
31. Hoffmann. Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en oeuvre des matériaux céramiques naturels ou recyclés [Internet] [thesis]. Perpignan; 2015 [cité 7 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2015PERP0033>
32. Flueckiger S, Yang Z, Garimella SV. An integrated thermal and mechanical investigation of molten-salt thermocline energy storage. *Appl Energy*. 1 juin 2011;88(6):2098-105.
33. Py X, Calvet N, Olives R, Meffre A, Echegut P, Bessada C, et al. Recycled Material for Sensible Heat Based Thermal Energy Storage to be Used in Concentrated Solar Thermal Power Plants. *J Sol Energy Eng* [Internet]. 1 août 2011 [cité 9 janv 2020];133(3). Disponible sur: <https://electronicpackaging.asmedigitalcollection.asme.org/solarenergyengineering/article/133/3/031008/456218/Recycled-Material-for-Sensible-Heat-Based-Thermal>
34. Naimi KMA, Delclos T, Calvet N. Industrial Waste Produced in the UAE, Valuable High-temperature Materials for Thermal Energy Storage Applications. *Energy Procedia*. 1 août 2015;75:2087-92.
35. Gutierrez A, Miró L, Gil A, Rodríguez-Aseguinolaza J, Barreneche C, Calvet N, et al. Advances in the valorization of waste and by-product materials as thermal energy storage (TES) materials. *Renew Sustain Energy Rev*. 1 juin 2016;59:763-83.
36. Koçak B, Paksoy H. Using demolition wastes from urban regeneration as sensible thermal energy storage material. *Int J Energy Res*. 2019;43(12):6454-60.

37. Agalit H, Zari N, Maaroufi M. Thermophysical and chemical characterization of induction furnace slags for high temperature thermal energy storage in solar tower plants. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 1 déc 2017;172:168-76.
38. Grosu Y, Ortega-Fernández I, López del Amo JM, Faik A. Natural and by-product materials for thermocline-based thermal energy storage system at CSP plant: Compatibility with mineral oil and molten nitrate salt. *Appl Therm Eng*. 25 mai 2018;136:657-65.
39. Wang Y, Wang Y, Li H, Zhou J, Cen K. Thermal properties and friction behaviors of slag as energy storage material in concentrate solar power plants. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 1 août 2018;182:21-9.
40. Miró L, Navarro ME, Suresh P, Gil A, Fernández AI, Cabeza LF. Experimental characterization of a solid industrial by-product as material for high temperature sensible thermal energy storage (TES). *Appl Energy*. 1 janv 2014;113:1261-8.
41. Calderón-Vásquez I, Segovia V, Cardemil JM, Barraza R. Assessing the use of copper slags as thermal energy storage material for packed-bed systems. *Energy*. 15 juill 2021;227:120370.
42. Esence T, Bruch A, Molina S, Stutz B, Fourmigué JF. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Sol Energy*. 1 sept 2017;153:628-54.
43. Achkari O, El Fadar A. Latest developments on TES and CSP technologies – Energy and environmental issues, applications and research trends. *Appl Therm Eng*. 25 févr 2020;167:114806.
44. Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 1 févr 2018;144:341-78.
45. Attonaty K. Stockage d'électricité associant un cycle thermodynamique à haut rendement avec un stockage thermique à haute température [Internet] [Thèse]. [Pau]: Pau et des Pays de l'Ardour; 2018 [cité 7 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2018PAUU3014>
46. Heller L. Literature Review on Heat Transfer Fluids and Thermal Energy Storage Systems in CSP Plants-STERG Report. Stellenbosch RSA. 2013;83.
47. Meffre A. Matériaux de stockage thermique haute température issus de la valorisation de matières premières secondaires inorganiques [Internet] [These de doctorat]. [Perpignan]: Université de Perpignan Via Domitia; 2013 [cité 4 avr 2022]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2013PERP1238>
48. Nellis G, Klein SA. Heat transfer. In: University of Wisconsin-Madison. 2009. p. 1107.
49. Bruch A, Fourmigué JF, Couturier R, Molina S. Experimental and Numerical Investigation of Stability of Packed Bed Thermal Energy Storage for CSP Power Plant. *Energy Procedia*. 1 janv 2014;49:743-51.

50. Faas SE, Thorne LR, Fuchs EA, Gilbertsen ND. MWe Solar Thermal Central Receiver Pilot Plant: Thermal Storage Subsystem Evaluation. In: Report No SAND86-8212. Sandia National Laboratories Livermore, CA; 1986.
51. Pacheco JE, Showalter SK, Kolb WJ. Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants. *J Sol Energy Eng.* 1 mai 2002;124(2):153-9.
52. Brown B. Development of a Structured Concrete Thermocline Thermal Energy Storage System [Internet]. [Fayetteville]: University of Arkansas; 2011. Disponible sur: <https://scholarworks.uark.edu/etd/208>
53. John E, Hale M, Selvam P. Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems. *Sol Energy.* 1 oct 2013;96:194-204.
54. Laing D, Bahl C, Bauer T, Fiss M, Breidenbach N, Hempel M. High-Temperature Solid-Media Thermal Energy Storage for Solar Thermal Power Plants. *Proc IEEE.* févr 2012;100(2):516-24.
55. Motte F, Bugler-Lamb SL, Falcoz Q. Thermocline Storage Filled with Structured Ceramics. Numerical Consistency of the Developed Numerical Model and First Observations. *High Temp Mater Process.* 2014;34(4):353-65.
56. Esence T, Desrues T, Fourmigué JF, Cwicklinski G, Bruch A, Stutz B. Experimental study and numerical modelling of high temperature gas/solid packed-bed heat storage systems. *Energy.* 1 août 2019;180:61-78.
57. Odenthal C, Steinmann WD, Zunft S. Analysis of a horizontal flow closed loop thermal energy storage system in pilot scale for high temperature applications – Part I: Experimental investigation of the plant. *Appl Energy.* 1 avr 2020;263:114573.
58. Odenthal C, Steinmann WD, Zunft S. Analysis of a horizontal flow closed loop thermal energy storage system in pilot scale for high temperature applications – Part II: Numerical investigation. *Appl Energy.* 1 avr 2020;263:114576.
59. Abdulla A, Reddy KS. Effect of operating parameters on thermal performance of molten salt packed-bed thermocline thermal energy storage system for concentrating solar power plants. *Int J Therm Sci.* 1 nov 2017;121:30-44.
60. Ammar ASA, Ghoneim AA. Optimization of a sensible heat storage unit packed with spheres of a local material. *Renew Energy.* 1 janv 1991;1(1):91-5.
61. Anderson R, Shiri S, Bindra H, Morris JF. Experimental results and modeling of energy storage and recovery in a packed bed of alumina particles. *Appl Energy.* 15 avr 2014;119:521-9.
62. Van Lew JT, Li P, Chan CL, Karaki W, Stephens J. Analysis of Heat Storage and Delivery of a Thermocline Tank Having Solid Filler Material. *J Sol Energy Eng* [Internet]. 22 mars 2011 [cité 28 avr 2022];133(2). Disponible sur: <https://doi.org/10.1115/1.4003685>

63. Yang Z, Garimella SV. Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline. *Sol Energy*. 1 juin 2010;84(6):974-85.
64. Yang Z, Garimella SV. Cyclic operation of molten-salt thermal energy storage in thermoclines for solar power plants. *Appl Energy*. 1 mars 2013;103:256-65.
65. Meier A, Winkler C, Wuillemin D. Experiment for modelling high temperature rock bed storage. *Sol Energy Mater*. 2 déc 1991;24(1):255-64.
66. Rose HE, Rizk AMA. Further Researches in Fluid Flow through Beds of Granular Material. *Proc Inst Mech Eng*. 1 juin 1949;160(1):493-511.
67. Hollands KGT, Sullivan HF, Shewen EC. Flow uniformity in rock beds. *Sol Energy*. 1 janv 1984;32(3):343-8.
68. Vignarooban K, Xu X, Arvay A, Hsu K, Kannan AM. Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review. *Appl Energy*. 15 mai 2015;146:383-96.
69. Desrues T, Ruer J, Marty P, Fourmigué JF. A thermal energy storage process for large scale electric applications. *Appl Therm Eng*. 1 avr 2010;30(5):425-32.
70. Erdim E, Akgiray Ö, Demir İ. A revisit of pressure drop-flow rate correlations for packed beds of spheres. *Powder Technol*. 1 oct 2015;283:488-504.
71. Sagara K, Nakahara N. Thermal performance and pressure drop of rock beds with large storage materials. *Sol Energy*. 1 janv 1991;47(3):157-63.
72. Palacios A, Barreneche C, Navarro ME, Ding Y. Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – A review from a materials perspective. *Renew Energy*. 1 août 2020;156:1244-65.
73. Yang Z, Garimella SV. Molten-salt thermal energy storage in thermoclines under different environmental boundary conditions. *Appl Energy*. 1 nov 2010;87(11):3322-9.
74. Bruch A, Fourmigué JF, Couturier R. Experimental and numerical investigation of a pilot-scale thermal oil packed bed thermal storage system for CSP power plant. *Sol Energy*. 1 juill 2014;105:116-25.
75. El Alami K, Asbik M, Agalit H. Identification of natural rocks as storage materials in thermal energy storage (TES) system of concentrated solar power (CSP) plants – A review. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 1 nov 2020;217:110599.
76. Haller JRW, Gervais RL. Central Receiver Solar Thermal Power System, Phase 1: preliminary design report. Volume V. Thermal storage subsystem. [Sensible heat storage using Caloria HT43 and mixture of gravel and sand] [Internet]. Martin Marietta Corp., Denver, Colo. (USA). Aerospace Div.; 1977 oct [cité 17 janv 2020]. Report No.: SAN/1108-8/5; MDC-G-6776(Vol.5), 5266573. Disponible sur: <https://www.osti.gov/biblio/5252962-central-receiver-solar-thermal-power-system-phase-preliminary-design-report-volume-thermal-storage-subsystem-mw-commercial-tower-focus-plant-mw-pilot-plant>

77. Guillot S, Faik A, Rakhmatullin A, Lambert J, Veron E, Echegut P, et al. Corrosion effects between molten salts and thermal storage material for concentrated solar power plants. *Appl Energy*. 1 juin 2012;94:174-81.
78. Calvet N, Gomez JC, Faik A, Roddatis VV, Meffre A, Glatzmaier GC, et al. Compatibility of a post-industrial ceramic with nitrate molten salts for use as filler material in a thermocline storage system. *Appl Energy*. 1 sept 2013;109:387-93.
79. Ortega I, Rodríguez-Aseguinolaza J, Gil A, Faik A, D'Aguanno B. New Thermal Energy Storage Materials From Industrial Wastes: Compatibility Of Steel Slag With The Most Common Heat Transfer Fluids. In 2014.
80. Motte F, Falcoz Q, Veron E, Py X. Compatibility tests between Solar Salt and thermal storage ceramics from inorganic industrial wastes. *Appl Energy*. 1 oct 2015;155:14-22.
81. Grirate H, Agalit H, Zari N, Elmchaouri A, Molina S, Couturier R. Experimental and numerical investigation of potential filler materials for thermal oil thermocline storage. *Sol Energy*. 1 juin 2016;131:260-74.
82. Fasquelle T, Falcoz Q, Neveu P, Walker J, Flamant G. Compatibility Study Between Synthetic Oil and Vitrified Wastes for Direct Thermal Energy Storage. *Waste Biomass Valorization*. 1 avr 2017;8(3):621-31.
83. Bonk A, Martin C, Braun M, Bauer T. Material investigations on the thermal stability of solar salt and potential filler materials for molten salt storage. *AIP Conf Proc*. 27 juin 2017;1850(1):080008.
84. Keilany MA, Milhé M, Bézian JJ, Fasquelle T, Falcoz Q, Flamant G. Vitrified asbestos waste used as filler material in a thermocline storage tank. In *IMT Mines Albi*; 2018 [cité 9 janv 2020]. p. p.244. Disponible sur: <https://hal-mines-albi.archives-ouvertes.fr/hal-01890815>
85. Martin C, Bonk A, Braun M, Odenthal C, Bauer T. Investigation of the long-term stability of quartzite and basalt for a potential use as filler materials for a molten-salt based thermocline storage concept. *Sol Energy*. 1 sept 2018;171:827-40.
86. Hoffmann, Fasquelle T, Vaitilingom G, Olives R, Py X, Goetz V. Compatibility of vegetable oils with solid filler materials for thermocline thermal energy storage systems. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 15 sept 2019;200:109932.
87. Li P, Van Lew J, Chan C, Karaki W, Stephens J, O'Brien JE. Similarity and generalized analysis of efficiencies of thermal energy storage systems. *Renew Energy*. 1 mars 2012;39(1):388-402.
88. Bayón R, Rivas E, Rojas E. Study of Thermocline Tank Performance in Dynamic Processes and Stand-by Periods with an Analytical Function. *Energy Procedia*. 1 janv 2014;49:725-34.
89. Haller MY, Cruickshank CA, Streicher W, Harrison SJ, Andersen E, Furbo S. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – Review and theoretical comparison. *Sol Energy*. 1 oct 2009;83(10):1847-60.

90. Touzo A, Olives R, Dejean G, Pham Minh D, El Hafi M, Hoffmann JF, et al. Experimental and numerical analysis of a packed-bed thermal energy storage system designed to recover high temperature waste heat: an industrial scale up. *J Energy Storage*. 1 déc 2020;32:101894.
91. Modi A, Pérez-Segarra CD. Thermocline thermal storage systems for concentrated solar power plants: One-dimensional numerical model and comparative analysis. *Sol Energy*. 1 févr 2014;100:84-93.
92. Zanganeh G, Pedretti A, Zavattoni S, Barbato M, Steinfeld A. Packed-bed thermal storage for concentrated solar power – Pilot-scale demonstration and industrial-scale design. *Sol Energy*. 1 oct 2012;86(10):3084-98.
93. Mertens N, Alobaid F, Frigge L, Epple B. Dynamic simulation of integrated rock-bed thermocline storage for concentrated solar power. *Sol Energy*. 1 déc 2014;110:830-42.
94. Touzo A. Intégration d'un stockage thermocline à des procédés énergétiques. [Perpignan]: Université de Perpignan Via Domitia; 2021.
95. Melanson MM, Dixon AG. Solid conduction in low dt/dp beds of spheres, pellets and rings. *Int J Heat Mass Transf*. 1 févr 1985;28(2):383-94.
96. Lopez Ferber N, Falcoz Q, Pham Minh D, Hoffmann JF, Meffre A, Nzihou A, et al. Flexibility and robustness of a high-temperature air/ceramic thermocline heat storage pilot. *J Energy Storage*. 1 févr 2019;21:393-404.
97. Geissbühler L, Becattini V, Zanganeh G, Zavattoni S, Barbato M, Haselbacher A, et al. Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 1: Plant description and tests with sensible thermal-energy storage. *J Energy Storage*. 1 juin 2018;17:129-39.
98. Sassine N, Donzé FV, Harthong B, Bruch A. Thermal stress numerical study in granular packed bed storage tank. *Granul Matter*. 29 juin 2018;20(3):44.
99. Charlas B, Doremus P, Gillia O, Imbault D. Numerical analysis of a metal hybride powder bed under swelling or lateral compaction by the Discrete Element Method. In: *World Powder Metall Congr, Florence (Italy)*. 2010. p. 463-70.
100. Faas SE, Thorne LR, Fuchs EA, Gilbertsen ND. 10 MW/sub e/ Solar Thermal Central Receiver Pilot Plant: thermal storage subsystem evaluation. Final report [Internet]. United States: Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, CA (United States); 1986 juin [cité 27 juill 2021] p. 113. Report No.: SAND86-8212. Disponible sur: <https://www.osti.gov/biblio/5829864/>
101. Xu C, Wang Z, He Y, Li X, Bai F. Parametric study and standby behavior of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system. *Renew Energy*. 1 déc 2012;48:1-9.
102. Esence T, Bruch A, Fourmigué JF, Stutz B. A versatile one-dimensional numerical model for packed-bed heat storage systems. *Renew Energy*. 1 avr 2019;133:190-204.

103. Le Roux D, Touzo A, Esence T, Olives R. Experimental and numerical investigation of the temperature and flow rate variation on an industrial high-temperature thermocline storage for recovering waste heat. *Journal of Energy Storage*. in press;
104. Vannerem S, Neveu P, Falcoz Q. Experimental and numerical investigation of the impact of operating conditions on thermocline storage performance. *Renew Energy*. 1 mai 2021;168:234-46.
105. Ortega-Fernández I, Rodríguez-Aseguinolaza J. Thermal energy storage for waste heat recovery in the steelworks: The case study of the REslag project. *Appl Energy*. 1 mars 2019;237:708-19.
106. Sliwinski BJ, Mech AR, Shih TS. STRATIFICATION IN THERMAL STORAGE DURING CHARGING. In Begel House Inc.; 1978 [cité 15 juin 2022]. Disponible sur: <https://ihtcdigitalibrary.com/conferences/2d9b67ad1b92ab15,4242f01c32efeded,3d0013bd06da5551.html>
107. Bahnfleth WP, Song J. Constant flow rate charging characteristics of a full-scale stratified chilled water storage tank with double-ring slotted pipe diffusers. *Appl Therm Eng*. 1 déc 2005;25(17):3067-82.
108. Kandari AM. Thermal stratification in hot storage-tanks. *Appl Energy*. 1 janv 1990;35(4):299-315.
109. Wu L, Bannerot R. An experimental study of the effect of water extraction on thermal stratification in storage. *Sol Eng - 1987 Voll1*. 1987;445-51.
110. Abdoly MA, Rapp D. Theoretical and experimental studies of stratified thermocline storage of hot water. *Energy Convers Manag*. 1 janv 1982;22(3):275-85.
111. Chan AMC, Smereka PS, Giusti D. A Numerical Study of Transient Mixed Convection Flows in a Thermal Storage Tank. *J Sol Energy Eng*. 1 août 1983;105(3):246-53.
112. Rosen MA. Appropriate Thermodynamic Performance Measures for Closed Systems for Thermal Energy Storage. *J Sol Energy Eng*. 1 mai 1992;114(2):100-5.
113. Rosengarten G, Morrison G, Behnia M. A Second Law Approach to Characterising Thermally Stratified Hot Water Storage With Application to Solar Water Heaters. *J Sol Energy Eng*. 1 nov 1999;121(4):194-200.
114. Shah LJ, Furbo S. Entrance effects in solar storage tanks. *Sol Energy*. 1 oct 2003;75(4):337-48.
115. Panthaloorkaran V, Heidemann W, Müller-Steinhagen H. A new method of characterization for stratified thermal energy stores. *Sol Energy*. 1 août 2007;81(8):1043-54.
116. Berkel, van J., van Steenhoven, Anton A., Rindt, Camilo C.M., Mechanical Engineering, Energy Technology. Thermocline entrainment in stratified energy stores [Internet]. Technische Universiteit Eindhoven; 1997 [cité 15 juin 2022]. Disponible sur: <https://research.tue.nl/nl/publications/99b34735-3f02-4cc7-a940-04dec69717cb>

117. Lavan Z, Thompson J. Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks. *Sol Energy*. 1 janv 1977;19(5):519-24.
118. Andersen E, Furbo S, Fan J. Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks. *Sol Energy*. 1 oct 2007;81(10):1219-26.
119. Davidson JH, Adams DA, Miller JA. A Coefficient to Characterize Mixing in Solar Water Storage Tanks. *J Sol Energy Eng*. 1 mai 1994;116(2):94-9.
120. Janin M. Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus [Internet]. [Chambéry]: École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers; 2000 [cité 30 oct 2019]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00005632/document>
121. Bellini B, Janin M. Écoconception : état de l'art des outils disponibles. Ref TIP452WEB - Opérations Unit Génie Réaction Chim [Internet]. 10 oct 2011 [cité 30 oct 2019]; Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/industrialisation-des-procedes-et-usine-du-futur-42602210/ecoconception-etat-de-l-art-des-outils-disponibles-g6010/>
122. Jolliet O, Saadé-Sbeih M, Crettaz P, Jolliet-Gavin N, Shaked S. Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan. 3e éd. PPUR Presses polytechniques; 2017. 340 p. (Science et ingénieur de l'environnement).
123. Lalau Y, Py X, Meffre A, Olives R. Comparative LCA Between Current and Alternative Waste-Based TES for CSP. *Waste Biomass Valorization*. 1 déc 2016;7(6):1509-19.
124. International Organization for Standardization. ISO 14044 : Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines [Internet]. British Standard Institution; 2021 juin [cité 20 mai 2020] p. 64. (BSI British Standards). Report No.: BS EN ISO 14044:2006+A2:2020. Disponible sur: <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Undated?UPI=000000000030349610>
125. Burkhardt JJ, Heath GA, Turchi CS. Life Cycle Assessment of a Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant and the Impacts of Key Design Alternatives. *Environ Sci Technol*. 15 mars 2011;45(6):2457-64.
126. Heath G, Turchi C, Decker T, Burkhardt J, Kutscher C. Life Cycle Assessment of Thermal Energy Storage: Two-Tank Indirect and Thermocline. In: ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability, Volume 2 [Internet]. San Francisco, California, USA: ASME; 2009 [cité 28 oct 2019]. p. 689-90. Disponible sur: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1648049>
127. Lalau Y, Py X, Dejean G. Analyse de cycle de vie (ACV) comparative d'une solution de stockage thermique contenant des matériaux issus de déchets. 2019 juin p. 48. (Concours Mondial de l'Innovation (CMI)). Report No.: Lot N°4.
128. Benini L, Mancini L, Sala S, Manfredi S, Schau EM, Pant R. Normalisation method and data for Environmental Footprints [Internet]. Luxemburg: Joint Research Center Institute for Environment and Sustainability; 2014 [cité 27 nov 2019] p. 113. Report No.: ISBN: 978-92-79-40847-2. Disponible sur:

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC91531/lb-na-26842-en-n.pdf>

129. Silva DAL, Nunes AO, Moris VADS, Piekarski CM, Rodrigues TO. How important is the LCA software tool you choose? Comparative results from GaBi, OpenLCA, SimaPro and Umberto. In Medellín, Colombie; 2017 [cité 27 nov 2019]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/profile/Diogo_Silva10/publication/318217179_Poster/data/595d8541aca27230850d0b6f/Poster.pdf
130. Jönbrink AK, Wolf-Wats IC, Erixon M. LCA Software Survey. 2000;203.
131. Breuil R, Fruchet J, Roger S. Logiciels ACV et Base de données [Internet]. 2010 [cité 31 oct 2019]. Disponible sur: <http://avnir.org/FR/Logiciels-ACV-et-Base-de-donnees-264.html>
132. Gong M, Wall G. On exergetics, economics and optimization of technical processes to meet environmental conditions. In: Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems [Internet]. Beijing, China; 1997 [cité 29 oct 2019]. p. 8. Disponible sur: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.194.9731&rep=rep1&type=pdf>
133. Szargut J, Morris DR, Steward FR. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Springer. New York: Hemisphere; 1988. 360 p.
134. De Meester B, Dewulf J, Janssens A, Van Langenhove H. An Improved Calculation of the Exergy of Natural Resources for Exergetic Life Cycle Assessment (ELCA). Environ Sci Technol. 1 nov 2006;40(21):6844-51.
135. Valero A, Valero A. Thanatia: The Destiny of the Earth's Mineral Resources: A Thermodynamic Cradle-to-Cradle Assessment [Internet]. World Scientific. Zaragoza, Spain: WORLD SCIENTIFIC; 2014 [cité 18 juin 2020]. 672 p. Disponible sur: <http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/7323>
136. Valero A, Valero A. Exergoecology: A thermodynamic approach for accounting the Earth's mineral capital. The case of bauxite–aluminium and limestone–lime chains. Energy. 1 janv 2010;35(1):229-38.
137. Cornelissen RL, Hirs GG. The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA. Energy Convers Manag. 1 juin 2002;43(9):1417-24.
138. Lamnatou Chr, Chemisana D. Concentrating solar systems: Life Cycle Assessment (LCA) and environmental issues. Renew Sustain Energy Rev. 1 oct 2017;78:916-32.
139. Cavallaro F, Ciruolo L. A Life Cycle Assessment (LCA) of a Paraboloidal-Dish Solar Thermal Power Generation System. In 2006. p. 260-5.
140. Lechón Y, de la Rúa C, Sáez R. Life Cycle Environmental Impacts of Electricity Production by Solarthermal Power Plants in Spain. J Sol Energy Eng [Internet]. 1 mai 2008 [cité 24 juin 2020];130(2). Disponible sur: <https://asmedigitalcollection.asme.org/solarenergyengineering/article/130/2/021012/439134/Life-Cycle-Environmental-Impacts-of-Electricity>

141. Kuenlin A, Augsburg G, Gerber L, Maréchal F. Life cycle assessment and environmental optimization of concentrating solar thermal power plants. In: Proceedings of the 26th international conference of ECOS. Guilin, China; 2013.
142. Hertwich EG, Gibon T, Bouman EA, Arvesen A, Suh S, Heath GA, et al. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 19 mai 2015;112(20):6277-82.
143. Nahhas T, Py X, Olives R. Life Cycle Assessment of Air-Rock Packed Bed Storage System and Its Comparison with Other Available Storage Technologies for Concentrating Solar Power Plants. *Waste Biomass Valorization*. 3 déc 2018;11(5):2357-65.
144. Desideri U, Zepparelli F, Morettini V, Garroni E. Comparative analysis of concentrating solar power and photovoltaic technologies: Technical and environmental evaluations. *Appl Energy*. 1 févr 2013;102:765-84.
145. Whitaker MB, Heath GA, Burkhardt JJ, Turchi CS. Life Cycle Assessment of a Power Tower Concentrating Solar Plant and the Impacts of Key Design Alternatives. *Environ Sci Technol*. 4 juin 2013;47(11):5896-903.
146. Zhang M, Wang Z, Xu C, Jiang H. Embodied energy and energy analyses of a concentrating solar power (CSP) system. *Energy Policy*. 1 mars 2012;42:232-8.
147. Ko N, Lorenz M, Horn R, Krieg H, Baumann M. Sustainability Assessment of Concentrated Solar Power (CSP) Tower Plants – Integrating LCA, LCC and LCWE in One Framework. *Procedia CIRP*. 1 janv 2018;69:395-400.
148. Hang Y, Balkoski K, Meduri P. Life Cycle Analysis of Linear Fresnel Solar Power Technology. In American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2014 [cité 13 mai 2022]. Disponible sur: <https://journals.asmedigitalcollection.asme.org/POWER/proceedings/POWER2013/56062/V002T09A007/282172>
149. Blanchard B, Fabrycky W. *System Engineering and Analysis*. Fourth. Pearson International; 1998. (Prentice Hall International series in industrial and systems engineering).
150. Asiedu Y, Gu P. Product life cycle cost analysis: State of the art review. *Int J Prod Res*. 1 avr 1998;36(4):883-908.
151. Barringer H, Weber DP, Weber DA. *Life Cycle Cost Tutorial*. In 1996.
152. Aussel D, Neveu P, Tsuanyo D, Azoumah Y. On the equivalence and comparison of economic criteria for energy projects: Application on PV/diesel hybrid system optimal design. *Energy Convers Manag*. 1 mai 2018;163:493-506.
153. Durairaj SK, Ong SK, Nee AYC, Tan RBH. Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies. *Corp Environ Strategy*. 1 févr 2002;9(1):30-9.

154. Norris GA. Integrating life cycle cost analysis and LCA. *Int J Life Cycle Assess.* 2001;6(2):118-20.
155. CASES project. D02-2 External costs, Euro/ton values. [Internet]. Cost Assessment for Sustainable Energy Systems. 2008 [cité 9 juill 2020]. Disponible sur: http://www.feem-project.net/cases/downloads_presentation.php
156. Abbas M, Merzouk NK. Techno economic study of solar thermal power plants for centralized electricity generation in Algeria. In: 2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications. 2012. p. 179-83.
157. Wagner SJ, Rubin ES. Economic implications of thermal energy storage for concentrated solar thermal power. *Renew Energy.* 1 janv 2014;61:81-95.
158. Parrado C, Girard A, Simon F, Fuentealba E. 2050 LCOE (Levelized Cost of Energy) projection for a hybrid PV (photovoltaic)-CSP (concentrated solar power) plant in the Atacama Desert, Chile. *Energy.* 2015;94:422-30.
159. González-Roubaud E, Pérez-Osorio D, Prieto C. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renew Sustain Energy Rev.* 1 déc 2017;80:133-48.
160. Peters M, Schmidt TS, Wiederkehr D, Schneider M. Shedding light on solar technologies—A techno-economic assessment and its policy implications. *Energy Policy.* 1 oct 2011;39(10):6422-39.
161. Lazard Institute. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis [Internet]. Lazard; 2017 p. 22. (Annual Levelized Cost of Energy). Report No.: 11.0. Disponible sur: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-2017/>
162. Lazard Institute. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis [Internet]. Lazard; 2021 p. 21. (Annual Levelized Cost of Energy). Report No.: 15.0. Disponible sur: <https://www.lazard.com/media/451881/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>
163. Teske S, Leung J, Crespo L, Bial M, Dufour E, Richter C. Solar Thermal Electricity - Global Outlook 2016 [Internet]. SolarPACES, ESTELA, Greenpeace International; 2016 [cité 15 juill 2020] p. 114. Report No.: 4th. Disponible sur: https://www.estelasolar.org/wp-content/uploads/2016/02/GP-ESTELA-SolarPACES_Solar-Thermal-Electricity-Global-Outlook-2016_Full-report.pdf
164. Mahlangu N, Thopil GA. Life cycle analysis of external costs of a parabolic trough Concentrated Solar Power plant. *J Clean Prod.* 10 sept 2018;195:32-43.
165. Althaus HJ, Arena AP, Bouamrane M, Buornamici R, Buttol P, Clark G, et al. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products [Internet]. United Nations Environment Programme; 2009 [cité 9 juill 2020] p. 104. Disponible sur: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7912/-Guidelines%20for%20Social%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20Products-20094102.pdf?sequence=3&isAllowed=>

166. Corona B, Bozhilova-Kisheva KP, Olsen SI, Miguel GS. Social Life Cycle Assessment of a Concentrated Solar Power Plant in Spain: A Methodological Proposal. *J Ind Ecol.* 2017;21(6):1566-77.
167. Benoit-Norris C, Cavan DA, Norris G. Identifying Social Impacts in Product Supply Chains: Overview and Application of the Social Hotspot Database. *Sustainability.* sept 2012;4(9):1946-65.
168. Sala S, Vasta A, Mancini L, Dewulf J, Rosenbaum E. Social life cycle assessment: state of the art and challenges for product policy support. [Internet]. Italie: European Commission; 2015. 90 p. (JRC Technical reports). Disponible sur: <https://biblio.ugent.be/publication/8529658/file/8529660.pdf>
169. Spierling S, Knüpfner E, Behnsen H, Mudersbach M, Krieg H, Springer S, et al. Bio-based plastics - A review of environmental, social and economic impact assessments. *J Clean Prod.* 1 juin 2018;185:476-91.
170. Berro A. Optimisation multiobjectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique [Internet] [thesis]. Toulouse 1; 2001 [cité 22 janv 2020]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2001TOU10091>
171. Dor AE. Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique [Internet] [phdthesis]. [Paris]: Université Paris-Est; 2012 [cité 10 févr 2020]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00788961>
172. Roudenko O. Application des algorithmes évolutionnaires aux problèmes d'optimisation multi-objectif avec contraintes. [Internet] [phdthesis]. [Paris]: Ecole Polytechnique X; 2004 [cité 10 févr 2020]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00000967>
173. Hachimi H. Hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications [Internet] [phdthesis]. INSA de Rouen; 2013 [cité 10 févr 2020]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00905604>
174. Holland JH. Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with application to biology. *Control Artif Intell* [Internet]. 1975 [cité 10 févr 2020]; Disponible sur: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10019844035/>
175. Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. In: Schoenauer M, Deb K, Rudolph G, Yao X, Lutton E, Merelo JJ, et al., éditeurs. *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2000. p. 849-58. Disponible sur: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45356-3_83#citeas
176. Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks.* Perth, WA, Australia; 1995. p. 1942-8.
177. Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput.* avr 2002;6(2):182-97.

178. Clerc M, Kennedy J. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Trans Evol Comput.* févr 2002;6(1):58-73.
179. Hojjati A, Monadi M, Faridhosseini A, Mohammadi M. Application and comparison of NSGA-II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. *J Hydrol Hydromech.* 1 sept 2018;66(3):323-9.
180. Nourbakhsh A, Safikhani H, Derakhshan S. The comparison of multi-objective particle swarm optimization and NSGA II algorithm: applications in centrifugal pumps. *Eng Optim.* 2011;43(10):1095-113.
181. Šedenka V, Raida Z. Critical Comparison of Multi-objective Optimization Methods: Genetic Algorithms versus Swarm Intelligence. *Radioengineering* [Internet]. sept 2010;19(3). Disponible sur: <https://pdfs.semanticscholar.org/bff9/888afe1ac188cee1a09f5dcb833fa33951be.pdf>
182. Maystre LY, Pictet J, Simos J. Méthodes multicritères ELECTRE: description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale. première. Lausanne: PPUR presses polytechniques; 1994. 323 p. (Gérer l'environnement).
183. Hwang CL, Yoon K. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey [Internet]. Berlin Heidelberg: Springer; 1981 [cité 27 juill 2021]. 225 p. (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems). Disponible sur: <https://www.springer.com/gp/book/9783540105589>
184. Jing R, Zhu X, Zhu Z, Wang W, Meng C, Shah N, et al. A multi-objective optimization and multi-criteria evaluation integrated framework for distributed energy system optimal planning. *Energy Convers Manag.* 15 juin 2018;166:445-62.
185. Shannon CE. A mathematical theory of communication. *Bell Syst Tech J.* juill 1948;27(3):379-423.
186. Jafaryeganeh H, Ventura M, Guedes Soares C. Application of multi-criteria decision making methods for selection of ship internal layout design from a Pareto optimal set. *Ocean Eng.* 15 avr 2020;202:107151.
187. Luo Z, Yang S, Xie N, Xie W, Liu J, Souley Agbodjan Y, et al. Multi-objective capacity optimization of a distributed energy system considering economy, environment and energy. *Energy Convers Manag.* 15 nov 2019;200:112081.
188. Torab H, Beasley DE. Optimization of a Packed Bed Thermal Energy Storage Unit. *J Sol Energy Eng.* 1 août 1987;109(3):170-5.
189. Maaliou O, McCoy BJ. Optimization of thermal energy storage in packed columns. *Sol Energy.* 1 janv 1985;34(1):35-41.
190. Choudhury C, Chauhan PM, Garg HP. Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy. *Sol Energy.* 1 juill 1995;55(1):29-37.

191. White AJ, McTigue JD, Markides CN. Analysis and optimisation of packed-bed thermal reservoirs for electricity storage applications. *Proc Inst Mech Eng Part J Power Energy*. 1 nov 2016;230(7):739-54.
192. Marti J, Geissbühler L, Becattini V, Haselbacher A, Steinfeld A. Constrained multi-objective optimization of thermocline packed-bed thermal-energy storage. *Appl Energy*. 15 avr 2018;216:694-708.
193. Trevisan S, Guédez R, Laumert B. Thermo-economic optimization of an air driven supercritical CO₂ Brayton power cycle for concentrating solar power plant with packed bed thermal energy storage. *Sol Energy*. 15 nov 2020;211:1373-91.
194. Rebouillat B. Conception et intégration optimales des convertisseurs thermodynamiques d'énergie solaire concentrée [Internet]. [Perpignan]: Université de Perpignan Via Domitia; 2021. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03554936/document>
195. Hoffmann JF, Fasquelle T, Goetz V, Py X. A thermocline thermal energy storage system with filler materials for concentrated solar power plants: Experimental data and numerical model sensitivity to different experimental tank scales. *Appl Therm Eng*. 5 mai 2016;100:753-61.
196. Bergman TL, Incropera FP, DeWitt DP, Lavine AS. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons; 2011. 2249 p.
197. Mawire A, McPherson M. Experimental characterisation of a thermal energy storage system using temperature and power controlled charging. *Renew Energy*. 1 avr 2008;33(4):682-93.
198. Rodat S, Bruch A, Dupassieux N, Mourchid NE. Unique Fresnel Demonstrator Including ORC and Thermocline Direct Thermal Storage: Operating Experience. *Energy Procedia*. 1 mai 2015;69:1667-75.
199. Schumann TEW. Heat transfer: A liquid flowing through a porous prism. *J Frankl Inst*. 1 sept 1929;208(3):405-16.
200. Handley D, Heggs PJ. The effect of thermal conductivity of the packing material on transient heat transfer in a fixed bed. *Int J Heat Mass Transf*. 1 mai 1969;12(5):549-70.
201. Hollands KGT, Sullivan HF. Pressure drops across rock bed thermal storage systems. *Sol Energy*. 1 janv 1984;33(2):221-5.
202. Ismail KAR, Stuginsky Jr R. A parametric study on possible fixed bed models for pcm and sensible heat storage. *Appl Therm Eng*. 1 juill 1999;19(7):757-88.
203. Klein P, Roos TH, Sheer TJ. Experimental Investigation into a Packed Bed Thermal Storage Solution for Solar Gas Turbine Systems. *Energy Procedia*. 1 janv 2014;49:840-9.
204. Shitzer A, Levy M. Transient Behavior of a Rock-Bed Thermal Storage System Subjected to Variable Inlet Air Temperatures: Analysis and Experimentation. *J Sol Energy Eng*. 1 mai 1983;105(2):200-6.

205. Vortmeyer D, Schaefer RJ. Equivalence of one- and two-phase models for heat transfer processes in packed beds: one dimensional theory. *Chem Eng Sci.* 1 févr 1974;29(2):485-91.
206. Alazmi B, Vafai K. Analysis of Variants Within the Porous Media Transport Models. *J Heat Transf.* 1 mai 2000;122(2):303-26.
207. Klein P, Roos TH, Sheer TJ. Parametric analysis of a high temperature packed bed thermal storage design for a solar gas turbine. *Sol Energy.* 1 août 2015;118:59-73.
208. Wakao N, Kaguei S, Funazkri T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds: Correlation of nusselt numbers. *Chem Eng Sci.* 1 janv 1979;34(3):325-36.
209. Dixon AG, DiCostanzo MA, Soucy BA. Fluid-phase radial transport in packed beds of low tube-to-particle diameter ratio. *Int J Heat Mass Transf.* 1 oct 1984;27(10):1701-13.
210. Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chem Eng Prog.* 1952;48:89-94.
211. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. International reference life cycle data system (ILCD) handbook general guide for life cycle assessment: provisions and action steps. [Internet]. First Edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2011. 159 p. Disponible sur: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf>
212. Lalau Y, Al Asmi I, Olives R, Dejean G, Meffre A, Py X. Energy analysis and life cycle assessment of a thermal energy storage unit involving conventional or recycled storage materials and devoted to industrial waste heat valorisation. *J Clean Prod.* 30 nov 2021;129950.
213. Murphy DJ, Hall CAS. Year in review--EROI or energy return on (energy) invested. *Ann N Y Acad Sci.* janv 2010;1185:102-18.
214. Azoumah YK, Tossa AK, Dake RA. Towards a labelling for green energy production units: Case study of off-grid solar PV systems. *Energy.* 1 oct 2020;208:118149.
215. Tsuanyo D, Azoumah Y, Aussel D, Neveu P. Modeling and optimization of batteryless hybrid PV (photovoltaic)/Diesel systems for off-grid applications. *Energy.* 15 juin 2015;86:152-63.
216. Spelling J. Hybrid Solar Gas-Turbine Power Plants : A Thermo-economic Analysis [Internet]. [Stockholm]: KTH Royal Institute of Technology; 2013 [cité 1 juin 2021]. Disponible sur: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-121315>
217. Turton R, Shaeiwitz JA, Bhattacharyya D, Whiting WB, éditeurs. Analysis, synthesis, and design of chemical processes [Internet]. 5th edition. Boston: Prentice Hall; 2018. 1464 p. (Prentice Hall international series in the physical and chemical engineering sciences). Disponible sur: https://vk.com/doc612380759_594458114?hash=3603321f5347bc0697

218. Wang KY, West RE, Kreith F, Lynn P. High-temperature sensible-heat storage options. *Energy*. 1 oct 1985;10(10):1165-75.
219. Peters MaxS, Timmerhaus KD, West RE. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* [Internet]. 5th éd. University of Colorado: McGraw-Hill Books; 2003 [cité 15 juin 2021]. 922 p. Disponible sur: <https://booksche.blogspot.com/search/label/Peters%20and%20Timmerhaus%20plant%20design%20pdf>
220. Turchi CS, Boyd M, Kesseli D, Kurup P, Mehos MS, Neises TW, et al. *CSP Systems Analysis - Final Project Report* [Internet]. 2019 mai [cité 18 mai 2022] p. NREL/TP--5500-72856, 1513197. Report No.: NREL/TP--5500-72856, 1513197. Disponible sur: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1513197/>
221. Sangi R, Müller D. Application of the second law of thermodynamics to control: A review. *Energy*. 1 mai 2019;174:938-53.
222. Bejan A, Tsatsaronis G, Moran MJ. *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons; 1995. 562 p.
223. Le Roux D, Lalau Y, Rebouillat B, Neveu P, Olivès R. Thermocline thermal energy storage optimisation combining exergy and life cycle assessment. *Energy Convers Manag*. 15 nov 2021;248:114787.
224. Shih HS, Shyur HJ, Lee ES. An extension of TOPSIS for group decision making. *Math Comput Model*. 1 avr 2007;45(7):801-13.
225. Flueckiger SM, Garimella SV. Second-law analysis of molten-salt thermal energy storage in thermoclines. *Sol Energy*. mai 2012;86(5):1621-31.
226. Shahriar K, Oraee K, Bakhtavar E. Effective factors investigation in choice between surface and underground mining. In: *7th International Scientific Conference - SGEM2007 - Conference Proceedings* [Internet]. Sofia, Bulgaria; 2007 [cité 10 déc 2021]. p. 7. Disponible sur: https://www.academia.edu/882722/Effective_factors_investigation_in_choice_between_surface_and_underground_mining
227. Hwang CL, Yoon K. *Multiple attribute decision making: methods and applications : a state-of-the-art survey*. Berlin, New York: Springer-Verlag; 1981. 278 p.
228. Yoo JS (ORCID:0000000339233701). *Design Optimization Study on the Single Tank Packed-bed Thermal Energy Storage System* [Internet]. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States); 2018 nov. Report No.: INL/CON-18-52035-Rev000. Disponible sur: <https://www.osti.gov/biblio/1734766>
229. Zhao B chen, Cheng M song, Liu C, Dai Z min. System-level performance optimization of molten-salt packed-bed thermal energy storage for concentrating solar power. *Appl Energy*. 15 sept 2018;226:225-39.
230. Cárdenas B, Davenne TR, Rouse JP, Garvey SD. Effect of design parameters on the exergy efficiency of a utility-scale packed bed. *J Energy Storage*. 1 août 2018;18:267-84.

231. Odenthal C, Klasing F, Bauer T. Parametric study of the thermocline filler concept based on exergy. *J Energy Storage*. 1 juin 2018;17:56-62.
232. Lou W, Fan Y, Luo L. Single-tank thermal energy storage systems for concentrated solar power: Flow distribution optimization for thermocline evolution management. *J Energy Storage*. 1 déc 2020;32:101749.
233. Yang X, Yang X, Ding J, Shao Y, Qin FGF, Jiang R. Criteria for performance improvement of a molten salt thermocline storage system. *Appl Therm Eng*. 15 déc 2012;48:24-31.
234. Elfeky KE, Mohammed AG, Wang Q. Thermo-Economic Evaluation of Thermocline Thermal Energy Storage Tank for CSP Plants. *Chem Eng Trans*. 15 nov 2021;88:241-6.
235. Keilany MA, Milhé M, Bézian JJ, Falcoz Q, Flamant G. Experimental evaluation of vitrified waste as solid fillers used in thermocline thermal energy storage with parametric analysis. *J Energy Storage*. 1 juin 2020;29:101285.
236. Ortega-Fernández I, Loroño I, Faik A, Uriz I, Rodríguez-Aseguinolaza J, D'Aguanno B. Parametric analysis of a packed bed thermal energy storage system. *AIP Conf Proc*. 27 juin 2017;1850(1):080021.
237. Sow M. Réalisation d'éco-ciments par la valorisation de cendres volantes de charbon non conventionnelles issues de centrales thermiques Spreader Stoker [Internet]. [Toulouse]: Université Paul Sabatier - Toulouse III; 2016. Disponible sur: <https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/STAR/tel-01761414>
238. El Moudni El Alami S, Monkade M, Lahlou K. Valorisation d'un mélange de cendres de foyer de centrale thermique et de scories d'aciérie en techniques routières. *Déchets Sci Tech*. 2009;56:18-22.
239. Viebahn P, Kronshage S, Trieb F, Lechon Y. Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants. CIEMAT; 2008 mars p. 95. (NEEDS - New Energy Externalities Developments for Sustainability). Report No.: Deliverable 12.2-RS Ia.
240. Ehtiwesh IAS, Coelho MC, Sousa ACM. Exergetic and environmental life cycle assessment analysis of concentrated solar power plants. *Renew Sustain Energy Rev*. 1 avr 2016;56:145-55.
241. Oró E, Gil A, de Gracia A, Boer D, Cabeza LF. Comparative life cycle assessment of thermal energy storage systems for solar power plants. *Renew Energy*. 1 août 2012;44:166-73.
242. Friefeld JM, Cannon ID, Moore AE. Energy storage experience at Solar One. California, USA: Intersociety energy, American nuclear society; 1984. (Advanced energy systems: their role in our future; vol. 19th).
243. Euroslag and Eurofer. Position paper on the status of ferrous slag complying with the waste framework directive 2008/98/CE (articles 5 / 6) and the REACH [Internet].

Euroslag & Eurofer; 2012 avr p. 21. Disponible sur: https://www.euroslag.com/wp-content/uploads/2019/01/Position_Paper_April_2012.pdf

244. Adegoloye OGF. Valorisation des laitiers issus de l'élaboration d'aciers inoxydables dans le béton [Internet]. [Cergy-Pontoise]: Université de Cergy-Pontoise; 2014. Disponible sur: <https://core.ac.uk/download/pdf/46815588.pdf>
245. Pelster S, éditeur. Environomic modeling and optimization of advanced combined cycle cogeneration power plants including CO2 separation options. Lausanne: EPFL; 1998. 224 p.
246. Kelly B, Kearney D. Thermal storage commercial plant design study for a 2-tank indirect molten salt system: Final report. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States); 2006 juill p. 32. Report No.: NREL/SR-550-40166.