

Revue des systèmes de stockage thermique d'énergie appliqués aux enceintes d'agriculture en environnement contrôlé

Thermal energy storage applied to controlled environment agriculture: A review

Lysie GODFRIN¹, Didier HAILLOT^{1*}, Stéphane GIBOUT²

¹ École de Technologie Supérieure, Département de génie mécanique, L3e, Montréal, Québec, Canada

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, LaTEP, Pau, France

*(auteur correspondant : didier.haillot@etsmtl.ca)

Résumé - Dans cet article, nous dresserons une liste exhaustive des différents systèmes de stockage thermique de l'énergie (STE) appliqués au domaine de l'agriculture en environnement contrôlé (AEC). Un tableau de synthèse rassemblant l'ensemble des technologies de STE ainsi que des indicateurs clés les caractérisant tel que la densité énergétique, le volume ou encore le rendement de ces systèmes sera présenté. Enfin, l'article cherchera à déterminer les systèmes de STE les plus adaptés à différents espaces d'AEC.

Abstract – In this article, a comprehensive list of thermal energy storage (TES) systems applied to Controlled Environment Agriculture (CEA) is presented. A synthesis table compiling all TES systems but also key characteristics of these technologies such as the energy density, volume or the storage efficiency is presented. At last, the article will seek to determine the most adapted TES systems for different CEA areas.

Nomenclature

ABS	Absorbeurs
AEC	Agriculture en Environnement Contrôlé
FC	Ferme Conteneur
FV	Ferme Verticale
LRA	Lit de roches actif
LRP	Lit de roches passif
LTES	Stockage thermique latent
MCP	Matériau à changement de phase
PM	Panneaux muraux
RE	Réservoir d'eau
SC	Serre chinoise
SM	Serre maraîchère

SRP	Sorption
SSPCM	MCP de forme stabilisée
STE	Stockage thermique de l'énergie
STES	Stockage thermique sensible
TCES	Stockage thermochimique
T	Température [°C]

Indices

s	Souterrain
MCP	Constitué de MCP

Symboles grecs

η_s	Rendement de stockage
ρ_v	Densité énergétique (MJ.m ⁻³)

1. Introduction

L'agriculture en environnement contrôlé (AEC), qu'elle soit appliquée dans des serres maraîchères (SM), des serres chinoises (SC), des fermes conteneurs (FC) ou des fermes verticales (FV) connaît un développement remarquable ces dernières années [1]. En particulier, les serres peuvent se distinguer en sous-catégories selon la constitution de leurs parois : les SM

sont majoritairement transparentes (ou translucides). Les SC ont a minima une paroi opaque lourde permettant de stocker passivement la chaleur. Les FC et les FV possèdent quant à elle des murs solides et opaques. Dans ces environnements de culture, la luminosité, la température ou encore l'humidité représentent des facteurs primordiaux pour la croissance des plantes. Par exemple, les tomates nécessitent une température en journée située entre 21 et 28°C, alors qu'une température au-delà de 32°C rend le pollen stérile, entravant la formation des fruits [2]. Le maintien de ces paramètres entraîne une consommation énergétique élevée, estimée à 80% de la consommation globale de l'espace [3]. En 2018, la consommation énergétique globale des serres situées en Ontario (Canada) est évaluée à 7,5 TWh [4]. À titre de comparaison, la consommation pour le chauffage des maisons individuelles de cette même province est estimée à 4,54 TWh par an [5], soit 40% de moins que pour les serres. Les espaces d'AEC sont souvent équipés de chauffage au propane ou de système moins communs tels qu'une pompe à chaleur, des capteurs solaires thermiques, ou des modules photovoltaïques [6].

Dans ce cadre, les systèmes de stockage thermique de l'énergie (STE) se présentent comme un excellent soutien à ces technologies, puisqu'ils assurent à la fois le lissage de la demande énergétique de l'espace tout en jouant le rôle de stabilisateur des températures de l'espace d'AEC, bénéfique aux plantes [6]. Le stockage thermique de l'énergie se distingue en trois catégories ; le stockage sensible, latent, et thermochimique [7]. Premièrement, le stockage sensible (STES) désigne le stockage thermique de l'énergie par augmentation seule de la température du matériau. À l'inverse, le deuxième type appelé stockage latent (LTES) inclut en plus, le changement de phase d'un élément majeur du système, nommé matériau à changement de phase (MCP). Pour une même plage de température, cette transition permet d'emmagasiner une plus grande quantité d'énergie, la chaleur latente étant mise en jeu. Finalement, le troisième type de stockage est le stockage thermochimique. Les principaux avantages de cette technologie sont une densité de stockage très élevée, et la possibilité d'un stockage quasi infini en durée. En effet, l'énergie est stockée/déstockée via les chaleurs de réaction dégagées ou absorbées lors de transformations chimiques réversibles. Une fois l'énergie absorbée lors de la réaction endothermique, les produits peuvent être stockés dans des contenants séparés, sur des durées importantes, sans risque de détérioration de l'énergie [8].

Le sujet du STE appliqué aux serres est un sujet actif de recherche [9]. Cependant, les auteurs se concentrent sur un type d'espace d'AEC en particulier, les serres. La nouveauté de cet article est de se concentrer sur le recensement des technologies de STE appliquées aux serres tout en regardant leur adaptabilité à d'autres types d'espace d'AEC telles que les fermes containers et les fermes verticales. Un premier objectif est d'établir un état de l'art des solutions de STE développées dans les dix dernières années et appliquées aux serres. Un deuxième objectif est de comparer ces technologies selon plusieurs critères intrinsèques tels que leur volume, leur rendement ou encore leur densité énergétique. Cet article est structuré de manière conventionnelle : la méthodologie est d'abord présentée, suivie de la description des critères de comparaison. Les résultats sont ensuite exposés avant d'ouvrir la discussion à leur sujet.

2. Méthodologie

La sélection des articles étudiés dans cette partie fut effectuée à partir de la ressource *Engineering Village*, plateforme de recherche créée par Elsevier, présentant une agrégation exhaustive des bases de données spécialisées dans l'ingénierie (Compendex, INSPEC). Le critère principal de sélection des publications scientifiques est leur date de parution, qui doit être postérieure à 2015. Le sujet du STE au sein des AEC étant un domaine vaste, il a été choisi de le scinder dès la recherche par mots clés suivant ses trois sous-catégories : STES, LTES et TCES. L'ajout du terme « Crops » aux mots clés a été préféré à l'expression « Greenhouses »

seule afin d'orienter la recherche vers le domaine de l'agriculture et non vers les publications traitant des émissions de gaz à effet de serre, désignés par le terme « Greenhouse gases ». Ainsi, à l'issue de la première sélection, un total de cinquante articles est atteint. Cependant, parmi ces articles, seuls vingt ont été retenus pour cette revue : dix articles pour les systèmes sensibles, neuf pour les systèmes latents et un pour le stockage thermochimique.

Plusieurs publications ont été écartées pour deux raisons principales. Le premier facteur est le manque de données précises sur le système, ses dimensions et ses indicateurs de performance, ce qui rend sa comparaison aux autres technologies impossible. Le second facteur concerne les articles sélectionnés par la plateforme, mais dont le sujet s'éloigne du thème de cette revue : analyse de faisabilité, étude expérimentale uniquement sur le matériau de stockage, étude de séchoirs, ont été écartés. Finalement, au terme de cette seconde sélection, vingt articles ont été choisis pour cette revue de littérature. Chaque article présente une seule technologie de stockage à l'exception d'une thèse qui en recense trois. Le nombre de STE étudiées s'élève donc au nombre de vingt-deux.

L'analyse du tableau 1 met en lumière le faible nombre d'études concernant les TCES appliquées aux serres. En effet, cette technologie de stockage thermique se démocratise peu à peu au niveau industriel, aujourd'hui utilisé pour des hautes températures dans des centrales solaires thermodynamiques, et pour du chauffage résidentiel ou de la récupération de rejets thermiques pour les applications à plus basse température [10].

3. Critères de comparaison

Une fois les articles constituant cette revue de littérature sélectionnés, différents critères de comparaison ont été définis (tableau 2). Les trois premiers s'intéressent davantage au contexte de l'article : catégorie de l'espace d'AEC, localisation de l'espace et catégorie d'étude (numérique, expérimentale). Ensuite, les autres critères se concentrent sur le système de stockage en lui-même, et sont détaillés ci-après.

À propos de la maturité technologique : Technology Readiness Level (TRL), celle-ci représente l'avancement technique du système, une échelle allant de 1 à 9, définie par la NASA [11]. Une maturité évaluée à 1 indique une technologie purement théorique, qui commence à donner lieu à une recherche réelle, tandis qu'une maturité à 9 concerne une technologie déployée et fonctionnelle. Les études numériques se voient assigner directement la maturité de 2, valeur limite pour les études analytiques. Cette maturité a été évaluée à partir des informations renseignées par l'auteur.

Le type de STE désigne un STES, LTES ou TCES tel que présenté précédemment. Précisément, la technologie utilisée détaille le système développé. D'abord pour les STES : les réservoirs d'eau externes et souterrains (RE-REs), les dalles de béton (DB) et les lits de roches passifs (LRP) sont des STE passifs agissant comme une masse thermique [14][15][16][18]. Quant à eux, les lits de roche actifs (LRA) désignent une couche de roche traversée par des tuyaux percés déposée en dessous de la couche de terre. Ces tuyaux sont traversés par un flux d'air chaud durant la journée et froid la nuit. Ils emmagasinent donc la chaleur de ce flux le jour et la retournent lors des périodes froides [14][19][20][21]. Finalement, le stockage thermique souterrain (UTES) désigne l'utilisation du sol comme voie de stockage, par des réservoirs enterrés ou par injection directe de chaleur dans la terre (GTES) [13][17]. Pour les LTES, il existe quatre catégories de système. D'abord les RE peuvent être enrichis en contenant des unités de MCP, et seront qualifiés de RE_{MCP} [22]. Puis, les absorbeurs (ABS) sont des systèmes modulables qui peuvent prendre des formes différentes : réservoirs cylindriques, planches, tubes [23][24][25][26][27]. Les panneaux muraux (PM), utilisés dans les serres chinoises et

apposés sur le mur nord ont pour but de stocker l'énergie provenant du rayonnement solaire incident reçu par le mur sud, usuellement perdue à travers la paroi nord [12][28][29][30]. Finalement les SSPCMs (MCP de Forme Stabilisée) sont des matériaux composites qui encapsulent des MCP dans une matrice poreuse afin d'éviter les fuites de ceux-ci, un risque présent avec les PM [31]. Enfin, les TCES sont ici des systèmes de stockage par sorption SRP [32]. Au niveau des contraintes géométriques, les PM et les SSPCM nécessitent des murs solides, et ne sont donc pas adaptés aux espaces exemptés de murs solides. La température T désigne pour les STES les températures maximales ($T_{\max}$) et minimales ($T_{\min}$), pour les LTES la température de changement de phase du MCP (T_f) soit la température de fusion et pour les TCES la température de sorption (T_{srp}).

En outre, afin d'introduire des notions énergétiques, la définition d'un volume de contrôle est nécessaire. Ici, le rendement de stockage η et la densité énergétique ρ_v sont calculés pour le réservoir de stockage seul, hors pompes à chaleur, conduits et systèmes de captation. Le rendement est défini comme le rapport entre l'énergie restituée par le système lors de la phase de décharge (nuit) et l'énergie stockée par celui-ci pendant le jour immédiatement précédent. Dans les références, il est parfois donné explicitement, et d'autres fois calculable grâce aux graphiques et aux données : énergie emmagasinée lors de la phase de charge, énergie déchargée, ou encore pertes du volume de stockage. Enfin, la densité énergétique est ici une densité énergétique volumique, définie comme le rapport entre l'énergie maximale stockable et le volume du stockage. Pour les LTES, il n'a été considéré dans les calculs que l'énergie liée au changement d'état ; la part liée à la chaleur sensible est négligeable, notamment avec de maigres volumes. Puis, on a considéré la masse volumique du MCP solide ; ρ_v représente la densité énergétique du MCP à l'état solide. Un dernier indicateur sera l'énergie surfacique (MJ.m^{-2}) définie comme le produit du volume et de la densité énergétique divisée par la surface au sol de la serre. Cet indicateur mettra en lumière la quantité d'énergie disponible par m^2 de la serre en fonction de la technologie.

4. Résultats

La classification des systèmes selon les critères définis dans la partie 3 est rassemblée dans le tableau 1. Les études ici présentées sont toutes menées sur des SM (15/22) ou des SC (7/22), situées dans 6 pays différents, avec une majorité réalisée en Chine (8/22). Les articles rapportent surtout des études expérimentales (17/22) ; un seul article mentionne une étude à la fois expérimentale et numérique [13]. Les systèmes sensibles, STES (11/22) et latents, LTES (10/22) sont bien plus développés que les TCES, avec seulement une application recensée. Les lits de roche passifs et actifs (LRP-LRA) ainsi que les absorbeurs (ABS) sont les systèmes les plus étudiés au sein des articles sélectionnés (11/22). Les STES possèdent majoritairement (6/11) des volumes plus importants ($>1 \text{ m}^3$) que les LTES (1/10), c'est une cause de leur densité énergétique plus faible. En effet, les STES sont moins denses énergétiquement ($<50 \text{ MJ.m}^{-3}$), contrairement aux LTES et aux TCES qui sont majoritairement (9/11) au-delà de 150 MJ.m^{-3} . Les rendements de stockage sont proches entre les catégories de STE, avec un minimum atteint à 36% et des maximums au-delà de 100. Cette valeur indique que le système redonne plus d'énergie qu'il n'en a reçu sur un cycle de stockage, ce qui est possible lorsque le système décharge de l'énergie stockée lors de charges antérieures [14] ; la dynamique du stock est parfois plus lente qu'une dynamique journalière. En effet, la difficulté dans la définition de ce rendement réside dans la dynamique intrinsèque du système de stockage. Celui-ci peut conserver une quantité d'énergie à la suite d'une nuit où les besoins étaient inférieurs à la quantité stockée, et donc diminuer le rendement sur ce cycle. Cette énergie sera alors rejetée plus tard, dans un cycle où le rendement excédera 100%. Pour finir, la maturité TRL des systèmes est au-delà de 7 pour la majorité (16/22) des technologies, ce qui indique un prototype

testé et en phase de validation dans un environnement réel. Une seule étude ici présentée possède une maturité de 9, indiquant un système opérationnel en atmosphère réelle [14].

Référence	Type d'AEC	Surface au sol (m ²)	Numérique	Lieu	Type de STE	Technologie	Volume (m ³)	TRL	T [°C]	η (%)	ρ _v (MJ.m ⁻³)	E (MJ.m ⁻²)
[15]	SC	400	X	Chine	STES	RE _s	13,48	7	[8-15]	87	29,26	0,99
[16]	SM	7,36	X	Maroc	STES	RE	0,60	7	[25-35]	86	41,80	3,41
[13]	SM	14,8	XO	Tunisie	STES	UTES	0,06	2-7	[22-26]	>100	16,72	0,07
[17]	SM	40,5	X	Chine	STES	GTES	-	7	[14-22]	-	-	-
[18]	SM	1,5	X	Inde	STES	LRP	0,06	7	[47-75]	-	29,34	1,17
[14]	SM	140	X	Canada	STES	LRP	1,57	9	-	-	-	-
[19]	SM	165	X	Maroc	STES	LRA	9,00	7	[17-34]	95-100	12,73	0,69
[20]	SM	15	X	Maroc	STES	LRA	0,13	7	[9-28]		22,19	0,19
[14]	SM	140	X	Canada	STES	LRA	26,00	9	[14-24]	36-124	15,38	2,86
[21]	SM	165	O	Maroc	STES	LRA	9,00	2	[17-34]	-	12,73	0,69
[14]	SM	140	X	Canada	STES	DB	4,30	9	-	-	-	-
[22]	SM	4046	O	Canada	LTES	RE _{MCP}	15,00	2	45	-	195,73	0,73
[23]	SM	3	X	Tunisie	LTES	ABS	0,01	7	26-29	100	286	0,78
[24]	SM	14,8	X	Tunisie	LTES	ABS	-	7	27	-	294,68	0,00
[25]	SC	1,44	X	Chine	LTES	ABS	0,01	7	18	-	119,45	0,46
[26]	SC	3,4	X	Chine	LTES	ABS	0,20	7	28,5	43	246,75	14,51
[27]	SM	230,4	X	Espagne	LTES	ABS	0,05	7	12-18	40-80	123,20	0,00
[28]	SC	24	O	Maroc	LTES	PM	0,43	2	29	-	293,11	5,28
[29]	SC	3,9	O	Chine	LTES	PM	0,06	2	20	-	167,15	2,57
[30]	SC	8	O	Chine	LTES	PM	0,15	2	25	-	200,29	3,74
[31]	SC	1,34	X	Chine	LTES	SSPCM _s	0,08	7	7,1-25	98	192,06	11,50
[32]	SM	6	X	Chine	TCES	SRP	0,01	6	30	101	726,96	1,79

Tableau 1 : Classification des STE

Concernant l'énergie surfacique (MJ.m⁻²), elle est en moyenne évaluée à 1,12 pour les STES, 3,96 pour les LTES et 1,79 pour les TCES. Les systèmes latents offrent donc en moyenne une capacité de stockage supérieure rapportée à la surface au sol de la serre supérieure, une caractéristique intéressante pour des espaces restreints. Pour une même technologie, cette valeur peut varier grandement, comme pour les absorbeurs où elle prend des valeurs dans l'intervalle [$<10^{-2}$; 14,51]. À l'inverse, les panneaux muraux possèdent communément des énergies surfaciques supérieures à 2 MJ.m⁻² et inférieures à 6 MJ.m⁻².

Pour finir, la figure 1 permet la comparaison des types de STE en termes de densité énergétique et de rendement de stockage. Les études sélectionnées incluent les études numériques et excluent les études ne disposant pas de données sur le rendement et/ou la densité énergétique. La zone des rendements supérieurs à l'unité est distinguée par des hachures symbolisant la majoration de ces rendements par une valeur de 100 % et pour les technologies où le rendement varie au sein d'une certaine plage, une ligne pointillée relie les valeurs extrémales. Il est déductible de cette figure que les systèmes latents possèdent des densités énergétiques toujours supérieures à celles des systèmes sensibles, et des rendements qui sont également légèrement supérieurs, mais qui demeurent dans le même intervalle, avec un écart de 4% sur la valeur minimale. Parmi eux, les absorbeurs (ABS) possèdent des densités et des rendements variables tout comme les lits de roche (LRA). Quant aux TCES, ils surpassent les LTES et STES sur les deux critères représentés sur cette figure.

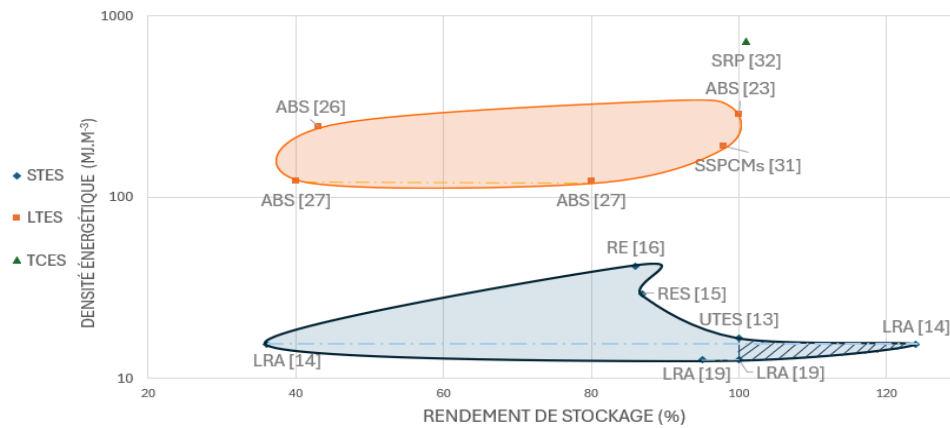


Figure 1 : Comparaison des STE en termes de densité énergétique et de rendement

5. Conclusion

Cet article a permis de réaliser un état de l'art des différents systèmes de STE installés dans les serres. Ces technologies permettent de combler une partie des besoins énergétiques de l'espace de culture, en stockant l'excédent de chaleur disponible en journée. En particulier, la revue s'appuie sur 22 systèmes de stockage, qu'elle classe suivant plusieurs critères. Il en ressort que la plupart des études (16/22) sont réalisées en Chine, principalement sur des serres maraîchères et que les systèmes les plus développés sont les lits de roches et les absorbeurs latents (11/22). En outre, plus de 70% des systèmes possèdent une maturité technologique au-delà de 7, ce qui indique une installation expérimentale et des résultats valides en conditions réelles. Les systèmes latents proposent des densités énergétiques ($150\text{-}250 \text{ MJ.m}^{-3}$) supérieures aux systèmes sensibles ($10\text{-}50 \text{ MJ.m}^{-3}$) et des rendements du même ordre [35-100%]. Ils demeurent moins denses énergétiquement que les systèmes thermochimiques ($>500 \text{ MJ.m}^{-3}$).

Cette étude, permet de conjecturer les technologies susceptibles d'être adaptées à l'équipement en STE d'espaces restreints comme les fermes verticales ou conteneurs (FV-FC). Des systèmes volumineux et nécessitant un accès à la terre comme les réservoirs souterrains ou les lits de roches paraissent inadaptés. En revanche, les réservoirs d'eau, équipés de MCP ou non, peuvent être installés en extérieur ou en intérieur selon les dimensions de l'espace. Puis, pour le stockage latent, les panneaux muraux semblent particulièrement convenables pour ces espaces du fait de leur grande énergie surfacique et de la présence de murs solides, nécessaires aux PM. De même, les absorbeurs par leurs tailles et formes variées peuvent être adaptés aux espaces restreints et confinés. Bien que le domaine soit émergent, l'étude sur le système thermochimique valide leur potentiel d'adaptation aux FC et FV en termes d'encombrement et de performance.

Références

- [1] L. Ashton, « Le boom des serres : Comment l'agriculture intérieure peut transformer la production et les exportations alimentaires », RBC. Consulté le: 21 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rbc.com/fr/leadership-avise/institut-action-climatique/agriculteurs-rapports/le-boom-des-serres-comment-lagriculture-interieure-peut-transformer-la-production-et-les-exportations-alimentaires/>
- [2] R. R. Shamshiri, J. W. Jones, K. R. Thorp, D. Ahmad, H. C. Man, et S. Taheri, « Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review », *International Agrophysics*, vol. 32, n° 2, p. 287-302, avr. 2018, doi: 10.1515/intag-2017-0005.
- [3] F. Almehmadi et K. Hallinan, « Dynamic Modeling and Simulation of a Solar Air Heater Assisted by a Dehumidification System for an Agriculture Greenhouse », présenté à ASME 2020 Power

Conference collocated with the 2020 International Conference on Nuclear Engineering, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, oct. 2020. doi: 10.1115/POWER2020-16189.

- [4] Posterity group, « Greenhouse Energy Profile Study », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ieso.ca/-/media/Files/IESO/Document-Library/research/Greenhouse-Energy-Profile-Study.pdf>
- [5] L. G. Gesteira, J. Uche, et L. K. de Oliveira Rodrigues, « Residential Sector Energy Demand Estimation for a Single-family Dwelling: Dynamic Simulation and Energy Analysis », *[Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems]*, vol. [9], n° [2], p. [1]-[18], juin 2021.
- [6] E. Cuce, D. Harjunowibowo, et P. M. Cuce, « Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, p. 34-59, oct. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.077.
- [7] D. Rousse, « S20211-ENR811-01-02: 17 - Ressources didactiques | ENA ». Consulté le: 27 novembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://ena.etsmtl.ca/mod/folder/view.php?id=791528>
- [8] S. Molina, « Combinaisons huiles/solides pour le stockage thermocline : De l'étude des matériaux au modèle de stockage thermique », Theses, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2018. Consulté le: 10 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-05046507>
- [9] J. Lu, H. Li, C. Zong, C. Wang, W. Song, et D. Yang, « Recent developments of thermal energy storage applications in the greenhouse environment: A comprehensive review », *Energy and Buildings*, vol. 347, p. 116342, nov. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.116342.
- [10] J. Riffat et S. R. Samaei, « Thermochemical Energy Storage for Renewable Grids: A Critical Review of Materials, Reactor Architectures, and Integration Strategies », *Research and Reviews in Sustainability*, vol. 2, n° 1, p. 12-30, févr. 2026, doi: 10.65582/rrs.2026.003.
- [11] « Technology Readiness Levels - NASA ». Consulté le: 26 mars 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>
- [12] S. Nishad et I. Krupa, « Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review », *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 52, p. 102241, août 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
- [13] S. Awani, S. Kooli, R. Chargui, et A. Guizani, « Numerical and experimental study of a closed loop for ground heat exchanger coupled with heat pump system and a solar collector for heating a glass greenhouse in north of Tunisia », *International Journal of Refrigeration*, vol. 76, p. 328-341, avr. 2017, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.01.030.
- [14] P. Piché, « Amélioration du comportement thermique d'une serre nordique communautaire. », Theses, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2021. Consulté le: 14 novembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03368948>
- [15] W. Xu, H. Guo, et C. Ma, « An active solar water wall for passive solar greenhouse heating », *Applied Energy*, vol. 308, p. 118270, févr. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118270.
- [16] N. Arbaoui *et al.*, « Effects of a solar heating system on the microclimate of an agricultural greenhouse. Application on zucchini (Cucurbita pepo) », *Solar Energy*, vol. 262, p. 111910, sept. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.111910.
- [17] J. Luo, A. Li, X. Ma, et K. Pei, « Stabilization of the temperature in a greenhouse using a Geothermal-Battery-Energy-Storage (GBES) system », *Applied Thermal Engineering*, vol. 223, p. 120029, mars 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120029.
- [18] G. R. Kashyap, N. Deka, P. R. Chanda, et A. Biswas, « Experimental Investigation of Greenhouse Solar Dryer with Sensible Heat Storage Material », in *Recent Trends in Mechanical Engineering*, A. De, P. P. Mukherjee, S. Pati, et A. Biswas, Éd., Singapore: Springer Nature, 2024, p. 621-629. doi: 10.1007/978-981-97-7535-4_52.

- [19] A. Bazgaou *et al.*, « An experimental study on the effect of a rock-bed heating system on the microclimate and the crop development under canarian greenhouse », *Solar Energy*, vol. 176, p. 42-50, déc. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.10.027.
- [20] L. Gourdo *et al.*, « Solar energy storing rock-bed to heat an agricultural greenhouse », *Energy*, vol. 169, p. 206-212, févr. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.036.
- [21] A. Bazgaou *et al.*, « CFD Modeling of the Microclimate in a Greenhouse Using a Rock Bed Thermal Storage Heating System », *Horticulturae*, vol. 9, n° 2, p. 183, févr. 2023, doi: 10.3390/horticulturae9020183.
- [22] Z. Naghibi, R. Cariveau, et D. S.-K. Ting, « Improving clean energy greenhouse heating with solar thermal energy storage and phase change materials », *Energy Storage*, vol. 2, n° 1, p. e116, 2020, doi: 10.1002/est2.116.
- [23] M. Lazaar, S. Bouadila, S. Kooli, et A. Farhat, « Conditioning of the tunnel greenhouse in the north of Tunisia using a calcium chloride hexahydrate integrated in polypropylene heat exchanger », *Applied Thermal Engineering*, vol. 68, n° 1-2, p. 62-68, juill. 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.04.014.
- [24] S. Kooli, S. Bouadila, M. Lazaar, et A. Farhat, « The effect of nocturnal shutter on insulated greenhouse using a solar air heater with latent storage energy », *Solar Energy*, vol. 115, p. 217-228, mai 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.02.041.
- [25] L. Li, Y. Wang, W. Ren, et S. Liu, « Thermal Environment Regulating Effects of Phase Change Material in Chinese Style Solar Greenhouse », *Energy Procedia*, vol. 61, p. 2071-2074, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.078.
- [26] X. Qu *et al.*, « Study on photo pyrolysis coupling and performance of columnar phase change energy storage system based on composite phase change materials for Chinese solar greenhouse », *Energy*, vol. 332, p. 137129, sept. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.137129.
- [27] P. Llorach-Massana, J. Peña, J. Rieradevall, et J. I. Montero, « Analysis of the technical, environmental and economic potential of phase change materials (PCM) for root zone heating in Mediterranean greenhouses », *Renewable Energy*, vol. 103, p. 570-581, avr. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.11.040.
- [28] F. Berroug, E. K. Lakhal, M. El Omari, M. Faraji, et H. El Qarnia, « Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall », *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 11, p. 3027-3035, nov. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.07.020.
- [29] E. Meng, T. Xia, J. Zhao, Y. Song, J. Li, et H. Zhao, « Numerical study on thermal environment of plastic greenhouse with high absorption latent heat storage plate (LHSP) », *Applied Thermal Engineering*, vol. 278, p. 127376, nov. 2025, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.127376.
- [30] W. Chen et G. Zhou, « Numerical investigation on thermal performance of a solar greenhouse with synergetic energy release of short- and long-term PCM storage », *Solar Energy*, vol. 269, p. 112313, févr. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112313.
- [31] H. Ling, C. Chen, Y. Guan, S. Wei, Z. Chen, et N. Li, « Active heat storage characteristics of active-passive triple wall with phase change material », *Solar Energy*, vol. 110, p. 276-285, déc. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.09.015.
- [32] C. Wang, H. Zou, S. Du, D. Huang, et R. Wang, « Water and heat recovery for greenhouses in cold climates using a solid sorption system », *Energy*, vol. 270, p. 126919, mai 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126919.

Remerciements

Ce projet a bénéficié du soutien du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) - subvention à la découverte RGPIN-2021-03138 ainsi que du Fonds de recherche du Québec - subvention « relève professorale » 313364.