

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

ABDELMOUMENE Lahcene et BENDJEBBOUR Amine

Sujet

Réalisation et étude expérimentale d'un stockeur à chaleur sensible en utilisant des matériaux naturels (galets de cailloux de mer)

Soutenu publiquement, le 24 / 06 / 2019 , devant le jury composé de :

Mr. AZZI Ahmed	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mme. SAIB Hind	MAA	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. KORTI Abdel Illah Nabil	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr. GUELLIL Hocine	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur 1
Mr. MIMOUN Okacha	MAA	Univ. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2018/2019

Remerciements

*En préambule à ce mémoire nous remercions **ALLAH** qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.*

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce formidable semestre universitaire. Ces remerciements vont tout d'abord au corps des enseignants et administratifs de la Faculté des Sciences de la Technologie, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

*Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur Madame **H.SAIB** et Monsieur le Professeur **A.N.KORTI**, d'avoir accepté de diriger ce travail et de nous avoir accompagnés tout au long de notre enquête avec un grand intérêt et une grande disponibilité, grâce à laquelle nous avons spontanément aidé, guidé, encouragé et critiqué sur la base de l'appréciation de ce travail et d'une meilleure communication de nos points de vue. , En particulier la confiance qu'ils leur ont accordée.*

*Notre respect aux membres de jury, Monsieur **A.AZZI**, Monsieur **H.GUELLIL** et Monsieur **O.MIMOUN**, qui me font l'honneur d'accepter et de juger ce modeste travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.*

*Nous ne manquerons pas d'exprimer nos remerciements à Monsieur **H.GUELLIL**, qui ont rejoint notre projet, et le sentiment de faire partie de leur équipe, dans une atmosphère chaleureuse et conviviale pleine d'activités et plein d'ambiance pendant le travail et qui nous a aidés avec les moyens et les outils dont nous avons besoin au laboratoire.*

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

Dédicace

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

Ma future femme

*Mes frères Djawed et Djamel, Ma sœur Chahinez et leur
famille*

Mes oncles, mes tantes

Tous mes cousins et cousines

*Tous mes amis, mes collègues chacun pour son nom et tous
ceux qui m'estiment*

A tous mes enseignants chacun pour son nom.

Amine

Dédicace

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

Mes frères Mohamed et Ibrahim, Ma chère sœur et leur famille

Ma future femme

Mes oncles, mes tantes

Tous mes cousins et cousines, A tout ma famille

*Tous mes amis, mes collègues chacun pour son nom et tous
ceux qui m'estiment*

A tous mes enseignants chacun pour son nom.

Lahcene

ملخص

تعتبر أنظمة تخزين الطاقة في العديد من البلدان واحدة من الموضوعات ذات الأولوية في مجال البحوث. وبالتالي، فإن الحاجة إلى تخزين الطاقة هي استجابة للاعتبارات الاقتصادية، البيئية، الجيوسياسية، والتكنولوجية. يتمثل هذا العمل في دراسة تجريبية لتخزين الطاقة الحرارية باستخدام المواد الطبيعية (حصى البحر) الموجودة في منطقة تلمسان. تتلخص التجارب التي أجريت في دراسة العوامل الفيزيائية (تدفق الهواء، مسامية وطبيعة وسط التخزين) التي تؤثر على السلوك الحراري للمخزن. أظهرت النتائج أن الحصى البحرية قادرة على ضمان عملية التخزين والتفريغ في مدة 5 ساعات.

الكلمات المفتاحية: التخزين، التفريغ، الحرارة الحساسة، الحصى البحرية.

Résumé

Les systèmes de stockage d'énergie sont identifiés dans de nombreux pays comme une des thématiques prioritaires dans la recherche. Ainsi, le besoin de stockage d'énergie est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique. Notre travail consiste à réaliser un banc d'essai pour étudier expérimentalement le stockage-déstockage d'énergie thermique en utilisant des matériaux naturels (pierres de cailloux de mer) disponible dans la région de Tlemcen. Les expériences menées consistent à étudier les paramètres (débit d'air, la nature et porosité du milieu de stockage) influant sur le comportement thermique du stockeur. Les résultats montrent que les cailloux de mer sont capables d'assurer facilement un cycle de fonctionnement stockage-déstockage de 5h.

Mots clés : stockage, déstockage, chaleur sensible et cailloux de mer.

Abstract

Energy storage systems are identified in many countries as one of the priority research themes. Thus, the need for energy storage is a response to economic, environmental, geopolitical and technological considerations. Our work consists in carrying out a test bench to experimentally study the storage and destocking of thermal energy using natural materials (sea stone) available in the Tlemcen region. The experiments carried out consist in studying the parameters (air flow rate, nature and porosity of the storage medium) influencing the thermal behaviour of the storage unit. The results show that the sea stones are able to easily ensure a 5-hour storage-to-destocking operating cycle.

Key words : storage, destocking, sensible heat and sea stones.

Sommaire	i
Listes des figures	iv
Liste des tableaux	x

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Introduction.....	5
I.2. Stockage thermique sensible et latent.....	5
I.3. Stockage d'énergie thermique sensible à base liquide.....	6
I.4. Stockage d'énergie thermique sensible à base solide.....	8
I.5. Modèle numérique.....	24

Chapitre II : Stockage d'énergie thermique

Partie 1 : Généralités

II.1. Introduction.....	27
II.2. Différentes formes d'énergie.....	27
II.2.1. Energies fossiles.....	27
II.2.2. Energies renouvelables.....	28
II.3. Utilisation des énergies renouvelables.....	30
II.3.1. Energie solaire.....	30
II.3.2. Energie éolienne.....	31
II.3.3. Energie hydraulique.....	32
II.3.4. Energie géothermique.....	32
II.3.5. Energie biomasse.....	33

II.4. Problème de l’intermittence des énergies renouvelables.....	34
II.5. Stockage d’énergie.....	34
II.6. Types de stockage de l’énergie.....	35
II.6.1. Stockage de l’énergie chimique.....	35
II.6.1.1. <i>Hydrogène</i>	35
II.6.1.2. <i>Biocarburants et la biomasse</i>	35
II.6.1.3. <i>Azote liquide</i>	35
II.6.1.4. <i>Oxy-hydrogène</i>	36
II.6.2. Stockage électrochimique de l’énergie.....	36
II.6.2.1. <i>Batterie</i>	36
II.6.2.2. <i>Pile à combustible</i>	36
II.6.3. Stockage d’énergie électrique.....	36
II.6.3.1. <i>Condensateur et le super condensateur</i>	36
II.6.3.2. <i>Supraconducteur ou stockage d’énergie magnétique</i>	37
II.6.4. Stockage de l’énergie mécanique.....	37
II.6.4.1. <i>Accumulateur hydraulique</i>	37
II.6.4.2. <i>Volant d’inertie</i>	37
II.6.5. Stockage de l’énergie thermique.....	37
II.6.5.1. <i>Réservoir d'eau chaude</i>	37
II.6.5.2. <i>Accumulateur de vapeur</i>	37

Partie 2 : Stockage d’énergie thermique

II.7. Définition de stockage thermique.....	38
II.8. Technologies du stockage thermique.....	38
II.9. Quelques applications du stockage thermique.....	41
II.10. Principales techniques de stockage de l’énergie thermique.....	43
II.10.1. Stockage thermique latente.....	43
II.10.2. Stockage thermochimique.....	45
II.10.3. Stockage thermique sensible.....	46
II.10.3.1. Stockage sensible par liquide.....	48
II.10.3.2. Stockage sensible par solide.....	49

II.11. Procédés de stockage sensible solide.....	50
II.11.1. Lit fixe entassé (packed bed).....	50
II.11.2. Lit fluidisé.....	52
II.12. Comparaison des systèmes de stockage.....	54

Chapitre III : Matériaux et Matériels

III.1. Introduction.....	58
III.2. Matériaux de stockage utilisés.....	58
III.2.1. Présentation des matériaux de stockage utilisés.....	60
III.3. Partie expérimentale.....	61
III.3.1. Conception du banc d'essai.....	61
III.3.2. Matériels utilisés.....	62
a. Ventilateur.....	63
b. Potentiomètre électrique.....	64
c. Résistance chauffante.....	64
d. potentiomètre.....	65
e. Anémomètre.....	66
f. Eprouvette graduée.....	67
g. Thermocouple de type K.....	67
h. Enregistreur de température.....	68
i. Emplacement des thermocouples sur le banc d'essai.....	69
III.4. Expériences effectuées.....	70
a. Variation du débit d'air.....	70
b. Variation de la porosité.....	71
c. Changement de matériau.....	73
III.5. Estimation de température de sortie.....	75
III.6. Essais préliminaires et les problèmes.....	76

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	79
IV.2. Comportement thermique du stockeur.....	80
IV.3. Effet du débit d'air sur le comportement thermique du stockeur.....	82
IV.4. Effet de porosité sur le comportement thermique du stockeur.....	85
IV.5. Effet du matériau sur le comportement thermique du stockeur.....	88
Conclusion générale.....	92
Références bibliographiques.....	94

Chapitre I : Recherche bibliographique

Fig. I.1. Schéma de prototype de laboratoire et des capsules de MCP.....	5
Fig. I.2. Système de stockage d'énergie thermique sensible à base liquide.....	6
Fig. I.3. Schéma détaillé de l'accumulateur de chaleur et les positions des sondes de température.....	7
Fig. I.4. Effet de la concentration massique des nanoparticules sur les profils de température aux positions supérieure du stockeur.....	8
Fig. I.5. Échantillons de roche de granit avec un diamètre moyen de : (a)10.5 mm et (b) 31,9 mm.....	9
Fig. I.6. Profils de taux d'énergie stockée pour les trois systèmes de stockage de chaleur sensibles à une température fixe de 260 °C et un débit de 4 ml/s.....	10
Fig. I.7. Échantillons de roche sélectionnés avant (à gauche) et après 20 cycles thermiques.....	11
Fig. I.8. Schéma d'une unité de stockage de lit de roche emballée.....	12
Fig. I.9. Quelques échantillons des roches avant et après le cyclisme thermique.....	12
Fig. I.10. Extraits d'huiles à 250°C et à 350°C après 500 h.....	13
Fig. I.11. Échantillons de roches avant et après le vieillissement.....	13
Fig. I.12. Milieux de stockage d'énergie thermique examinés (sable, graviers et galet)	15
Fig. I.13. Schéma du canal poreux.....	16
Fig. I.14. Schéma des trois collecteurs.....	17
Fig. I.15. Dimensions du lit de roches.....	18
Fig. I.16. Vue isométrique de l'assemblage de briques.....	19
Fig. I.17. Evolution temporelle de la température moyenne de brique à différentes rangées du lit de stockage pendant le stockage et le déstockage (0,0447 kg/s)	20
Fig. I.18. Photo du banc d'essai.....	21
Fig. I.19. Phase expérimentale.....	21

Fig. I.20. Séchoir solaire : (a) Vue avant de configuration, (b) Vue arrière de configuration, (c) schéma descriptif de la configuration.....	23
Fig. I.21. Plateaux chargés de viande de chameau : a) avant le séchage, b) après séchage.....	24
Fig. I.22. Lit des roches emballé avec de l'air (a) phase stockage (b) la phase déstockage.....	25

Chapitre II : Stockage d'énergie thermique

Fig. II.1. Energie solaire photovoltaïque.....	30
Fig. II.2. Fonctionnement et principe éolienne.....	31
Fig. II.3. Fonctionnement d'une centrale gravitaire.....	32
Fig. II.4. Fonctionnement de l'énergie géothermique.....	32
Fig. II.5. Cycle de fonctionnement de l'énergie biomasse.....	33
Fig. II.6. Critères de choix d'une technologie de stockage.....	39
Fig. II.7. Principales techniques de stockage de l'énergie thermique.....	43
Fig. II.8. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	44
Fig. II.9. Schéma de principe du stockage thermochimique.....	45
Fig. II.10. Volume nécessaire pour la même énergie stockée.....	50
Fig. II.11. Schéma d'un système de stockage à lit entassé.....	51
Fig. II.12. Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidisé.....	52
Fig. II.13. Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.....	53

Chapitre III : Matériaux et Matériels

Fig. III.1. Photo géographique de plage Oued Abdallah.....	56
Fig. III.2. Pierre de cailloux de mer.....	60
Fig. III.3. Montage du canal de stockeur.....	61
Fig. III.4. Réalisation de la zone de stockage.....	61

Fig. III.5. L'isolation de canalisation.....	62
Fig. III.6. Réalisation expérimentale du stockage thermique.....	63
Fig. III.7. Ventilateur et son support en bois pour la circulation d'air.....	63
Fig. III.8. Potentiomètre électrique positionnel.....	64
Fig. III.9. Résistance électrique chauffante.....	65
Fig. III.10. Interrupteur variateur.....	65
Fig. III.11. Anémomètre.....	66
Fig. III.12. Eprouvette et Becher.....	67
Fig. III.13. Thermocouple de type K.....	67
Fig. III.14. Enregistreur de température.....	68
Fig. III.15. Emplacement des thermocouples.....	69
Fig. III.16. Mesure de la masse de la pierre.....	72
Fig. III.17. Profil de la masse des pierres en fonction de la porosité.....	73
Fig. III.18. Emplacement des matériaux dans la zone de stockage.....	74
Fig. III.19. Evolution temporelle de la température de l'air à la sortie du canal (0.0078 kg/s)	75
Fig. III.20. Résistance avec brique.....	76
Fig. III.21. Inflammation de résistance.....	77
Fig. III.22. Banc d'essai sans et avec polystyrène.....	77

Chapitre IV : Résultats et discussions

Fig. IV.1. Evolution temporelle de la température du matériau de stockage pour un débit de 0.0078 kg/s.....	80
Fig. IV.2. Evolution temporelle de la différence de température d'entrée et de sortie de l'air.....	81
Fig. IV.3. Evolution temporelle de la température du matériau de stockage pour différents débits.....	82
Fig. IV.4. Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différents débits.....	84

Fig. IV.5. Evolution temporelle de la température du matériau1 pour un débit de 0.0078kg/s et différentes porosités.....	85
Fig. IV.6. Evolution temporelle de la différence de température d'air pour un débit de 0.0078kg/s et différentes porosités.....	86
Fig. IV.7. Evolution temporelle de la température pour trois matériaux (débit de 0.0078kg/s et une porosité de 0.6561)	88
Fig. IV.8. Evolution temporelle de la différence de température d'air pour trois matériaux (1,2 et 3) (débit de 0.0078kg/s et porosité 0.6561)	89

Chapitre II : Stockage d'énergie thermique

Tableau II.1. Technologies de stockage.....	41
Tableau II.2. Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C.....	48
Tableau II.3. Principales caractéristiques des matériaux utilisés dans le stockage liquide.....	49
Tableau II.4. Comparaison de différents types d'TES en fonction de différents facteurs de performance.....	55

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie depuis le commencement des âges a été le moteur de l'activité humaine, et c'est un élément qui intervient dans tous les actes quotidiens de l'homme. Les énergies jouent un rôle de catalyseur principal dans la génération du confort pour une nation et a un rôle significatif dans le développement des secteurs technologiques, industriels, économiques et sociaux.

En attendant la mise au point de techniques permettant la production d'énergie écologique et renouvelable, en grande quantité et à moindre coût, l'intérêt se porte sur le contrôle des dépenses énergétiques et la régulation de la consommation. Le stockage d'énergie peut répondre à cet enjeu, car il permet une utilisation de l'énergie différée de la production, évitant ainsi les pics de surproduction en heures de pointe, onéreux en coût des installations.

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique. Il concourt à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à satisfaire par lui-même ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage d'énergie fait souvent l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs politiques.

Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette énergie. Le stockage est un moyen très important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, dans le bâtiment, il peut contribuer efficacement à améliorer le confort des occupants quand il est installé dans l'enveloppe (inertie des murs, dalles...).

Le stockage de la chaleur est le moyen le plus évident pour atténuer ces inadéquations, mais son application industrielle nécessite des compromis sur des critères souvent antagonistes tels que :

- la densité énergétique (capacité de stockage par unité de volume ou de masse),
- la puissance thermique instantanée stockée et/ou délivrée,
- la simplicité du procédé,
- L'efficacité énergétique (absence des pertes)...etc.

Avec le stockage par chaleur sensible, l'énergie est stockée sous la forme d'une élévation de température du matériau de stockage. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité thermique du matériau de stockage. Ce type de stockage est limité par la capacité de stockage de matériaux, et les déperditions thermiques liées à la qualité de l'isolation. Plusieurs types d'installations de stockage par chaleur sensible ont été développés, soit de courte durée comme dans les chauffe-eau solaires, soit inter-saisonniers (stockage pendant l'été pour une utilisation en hiver) utilisés généralement pour le chauffage des bâtiments.

L'objectif de notre travail porte sur l'étude de phénomènes de stockage et déstockage de l'énergie thermique en utilisant des matériaux naturels (pierre de cailloux de mer) dans un espace rectangulaire. Pour atteindre l'objectif fixé dans cette étude, on a subdivisé le travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués.

Le second chapitre présente une généralité sur les différentes formes d'énergie, la définition du stockage thermique, et ces différents types et application.

Le troisième chapitre présente les matériaux de stockage utilisés et les différents étapes de la réalisation du banc d'essai avec les matériels utilisés.

Le dernier chapitre présente les résultats expérimentaux de trois configurations des pierres utilisées et la discussion de l'effet de certains paramètres.

En fin, **la conclusion** résume l'essentiel des résultats obtenus.

Chapitre 1

I.1. Introduction

Les systèmes de stockage d'énergie sont identifiés dans de nombreux pays comme une thématique prioritaire pour la recherche. Donc le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique.

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique de quelques travaux expérimentaux de recherche effectués sur des différents types du système de stockage thermique par la chaleur sensible et leurs applications.

I.2. Stockage thermique sensible et latent

Zanganeh et al. [1] ont réalisé une analyse expérimentale et numérique d'un système de stockage d'énergie thermique (SET) à haute température. Le concept SET utilise l'air comme fluide caloporteur et combine la chaleur sensible et la chaleur latente pour stabiliser la température de l'air évacué. Un prototype de laboratoire de 40 cm de diamètre et 168 cm de hauteur a été utilisé comme stockeur. Il contient quatre rangées de MCP encapsulé au-dessus d'un lit de roches emballées. AISi12 a été utilisé comme MCP parce que sa température de fusion de 575 °C est adaptée aux applications et qu'il a une température de fusion et une conductivité thermique élevées et une faible évolution thermique. Des tubes en acier inoxydable AISI 316 ont été utilisés encapsulation.

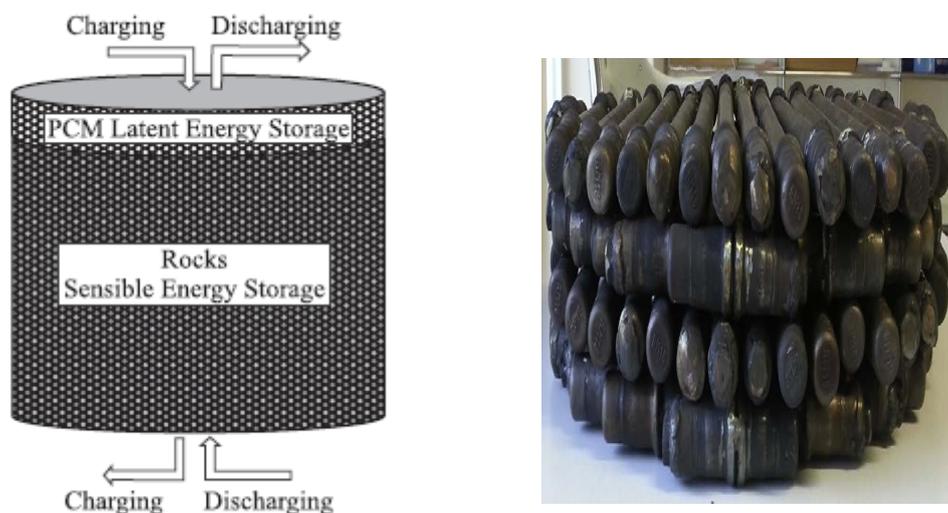


Fig. I.1. Schéma de prototype de laboratoire et des capsules de MCP.

Les résultats ont démontré que pour un système de stockage mixte (latent/sensible) la température de l'air de sortie pendant la décharge s'est stabilisée autour de la température de fusion de l'AlSi12 de 575°C. Les pertes thermiques sont restées inférieures à 3,5 % de l'énergie d'entrée pour tous les essais expérimentaux.

I.3. Stockage d'énergie thermique sensible à base liquide

Vaivudh et al. [2] ont étudié expérimentalement le stockage de l'énergie thermique à haute température. Un échangeur de chaleur destiné au stockage de l'énergie thermique sensible à base liquide est utilisé en séparant deux liquides (le fluide de stockage et le fluide caloporteur). L'huile thermique a été utilisée comme un fluide de stockage dans l'expérience. Deux types de tubes dans l'échangeur de chaleur (un tube droit vertical et un tube serpentin hélicoïdal) ont été utilisés pour la circulation du fluide caloporteur.

Un modèle mathématique a été créé pour comparer les résultats expérimentaux. Les températures de fluide caloporteur et de fluide de stockage ont été mesurées pour valider le modèle mathématique pour différents débits de fluide caloporteur.

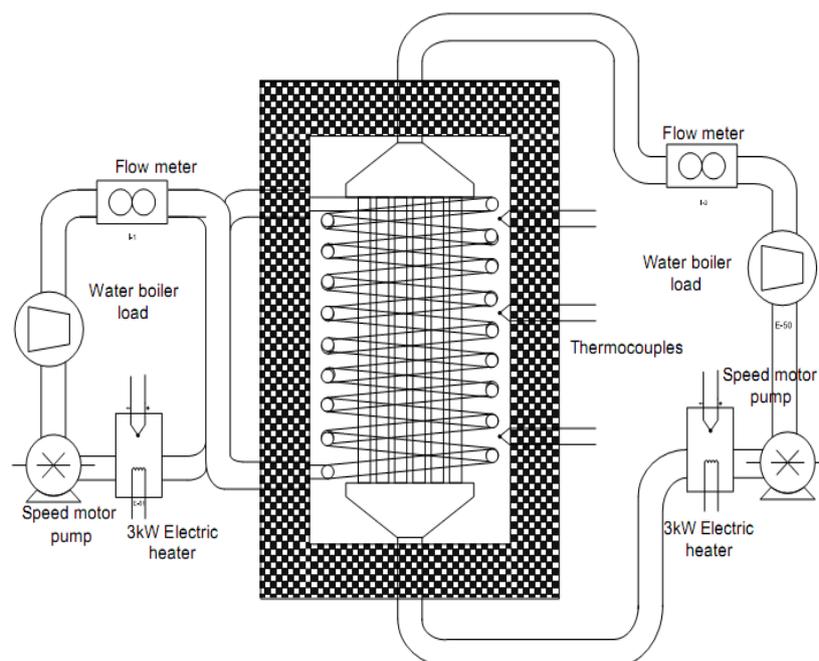


Fig. I.2. Système de stockage d'énergie thermique sensible à base liquide.

Un bon accord a été montré pour les résultats expérimentaux et la prédiction de modèle avec une précision élevée d'environ moins de 10%.

El-Kaddadia et al. [3] ont mené une étude expérimentale pour quantifier la quantité de chaleur sensible stockée et récupéré dans une installation de stockage en utilisant un nano fluide (eau distillée + dioxyde de titane) comme un matériau de stockage.

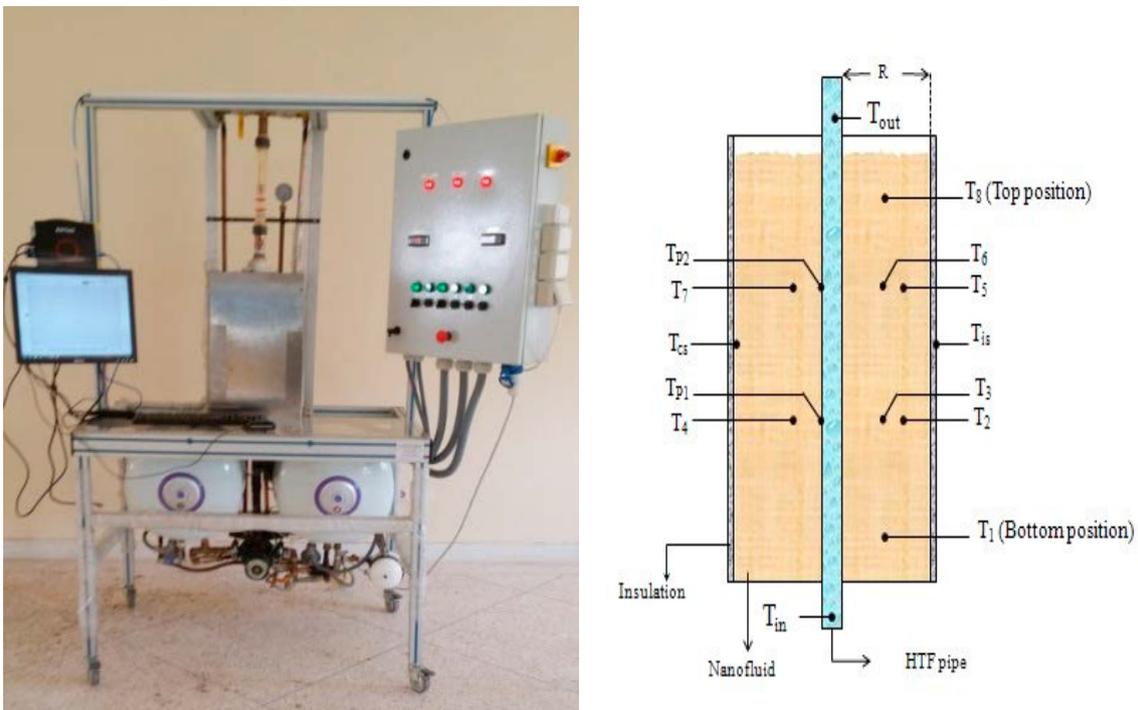


Fig. I.3. Schéma détaillé de l'accumulateur de chaleur et les positions des sondes de température.

Les résultats expérimentaux montrent, en particulier, l'influence de la concentration massique des nano particules sur les performances de stockage/déstockage de chaleur pour un débit massique fixe (300 kg/h) de fluide caloporteur (eau).

Ce paramètre contribue à l'amélioration du transfert de chaleur et donc à l'amélioration de la chaleur sensible pendant la phase stockage et la phase déstockage.

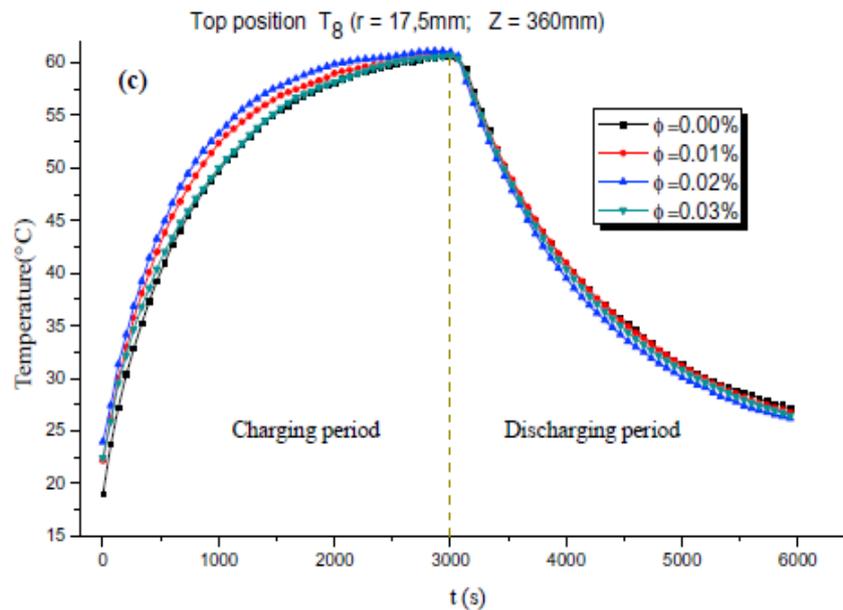


Fig. I.4. Effet de la concentration massique des nanoparticules sur les profils de température aux positions supérieure du stockeur.

I.4. Stockage d'énergie thermique sensible à base solide

Le stockage de chaleur sensible dans les milieux solides utilisant le système de thermocline est une option rentable significative par rapport à un matériau de stockage liquide dans deux systèmes de réservoir. Le système thermocline (transition thermique) huile/roche est basé sur le contact direct entre les roches naturelles (une capacité de chaleur élevée avec une stabilité physique et chimique) choisies comme matériau de stockage et l'huile thermique comme fluide de transfert de chaleur (FHT). Ce système de stockage est utilisé dans les centrales d'énergie solaire concentrée (CSP).

Lugolole et al. [4] ont fait une comparaison de trois systèmes de stockage thermique par chaleur sensible à trois débits différents 4, 8 et 12 ml/s, pour déterminer la performance thermique des lits de galets emballés.

Deux systèmes de stockage utilisant l'huile de tournesol comme fluide de transfert de chaleur avec deux lits de galets emballaient de diamètre différent (10,5 et 31,9 mm) et le troisième réservoir de stockage utilise de l'huile seulement. Ils ont remarqué que Le système de stockage d'huile se charge le plus rapidement, suivi par le système de stockage rempli par des petits galets et enfin système de stockage rempli par des gros galets en raison de sa masse thermique inférieure. Les petits cailloux ont un taux d'élévation de la température plus rapide parce qu'ils atteignent l'équilibre thermique plus facilement que les gros cailloux qui subissent normalement des baisses de température.

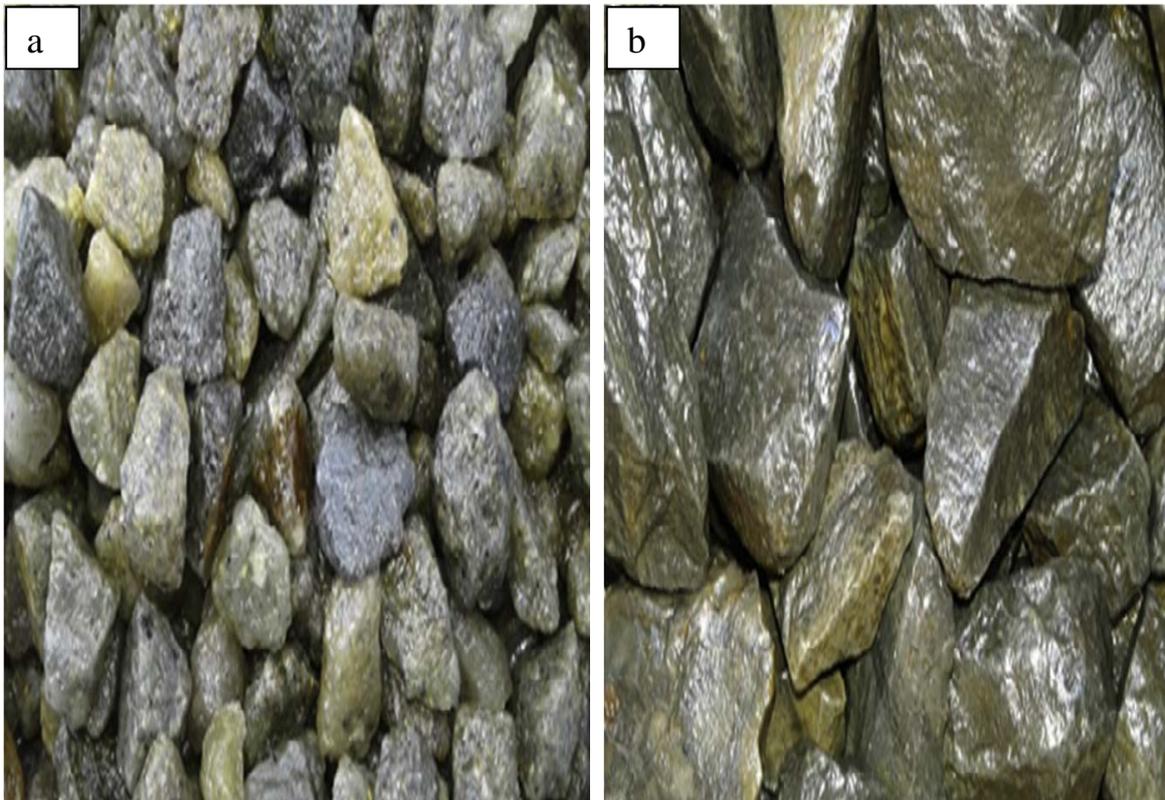


Fig. I.5. Échantillons de roche de granit avec un diamètre moyen de :
(a) 10.5 mm et (b) 31,9 mm.

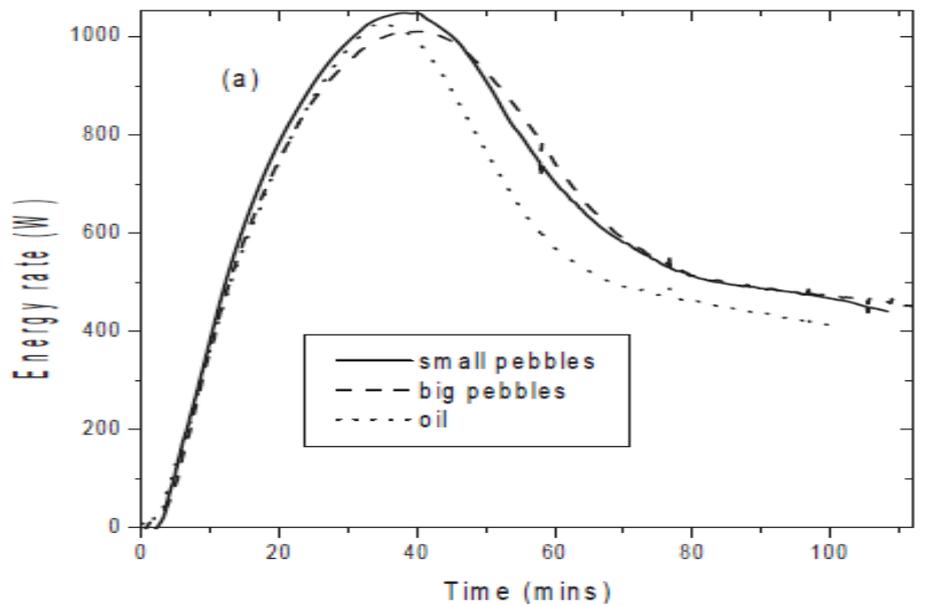


Fig. I.6. Profils de taux d'énergie stockée pour les trois systèmes de stockage de chaleur sensibles à une température fixe de 260 °C et un débit de 4 ml/s.

Les résultats montrent que L'énergie de stockage la plus élevée est obtenue pour le système de petits cailloux (faible porosité) en faisant le meilleur système de stockage d'énergie.

Le stockage de l'énergie thermique à haute température est une technologie cruciale assurant la production continue d'énergie. Le choix du matériau de stockage optimal reste un grand défi. D'après la littérature, il est entendu que la roche naturelle est un bon matériau approprié pour le stockage de l'énergie thermique en centrales à énergie solaire.

Becattini et al. [5] ont étudié six types de roches pour le stockage d'énergie thermique dans des couches emballées à haute température. Les roches ont été soumises à des cycles thermiques dans des fours de laboratoire à une température d'environ 100 °C et 600 °C. On a constaté que le cycle thermique entraîne une diminution de la capacité thermique spécifique et une augmentation de la porosité des roches. Par conséquent, les roches mafiques, felsiques, la serpentinite et le

conglomérat riche en quartz sont considérés comme des matériaux de stockage appropriés.



Fig. I.7. Échantillons de roche sélectionnés avant (à gauche) et après 20 cycles thermiques.

Tiskatine et al. [6] ont présenté un document qui démontre le potentiel de roches en tant que matériaux candidats pour le stockage thermique à haute température. Sur la base d'une analyse documentaire et du point de vue économique, ils ont démontré que la roche naturelle peut être utilisée comme matériel de stockage très prometteur pour tels Systèmes et surtout lorsque l'air est utilisé comme fluide de transfert de chaleur. D'une part, des tests expérimentaux ont été effectués et les données ont été analysés et discutés afin de choisir les meilleures roches parmi cinquante-deux variétés. Les essais thermiques ont montré qu'il y a des roches ne conviennent pas au stockage de température et certains types de roches ont été endommagés à haute Températures. Selon divers critères, les résultats obtenus montrent que la dolérite, la granodiorite, les hornfels, les gabbros et le grès quartzitique sont les meilleurs candidats à être mis en œuvre dans un système de stockage à haute température et à base d'air.

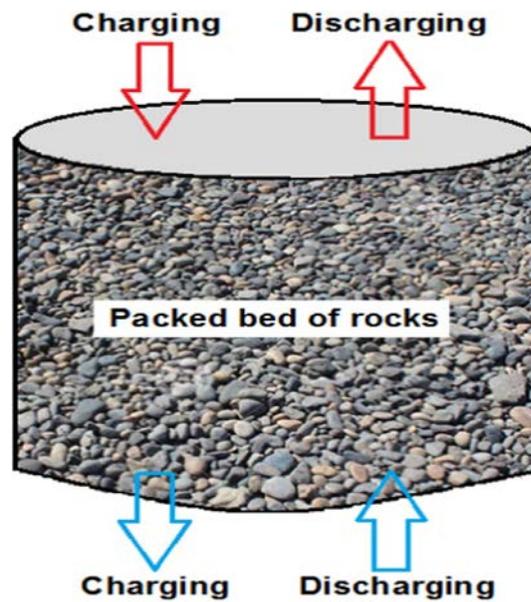


Fig. I.8. Schéma d'une unité de stockage de lit de roche emballée.

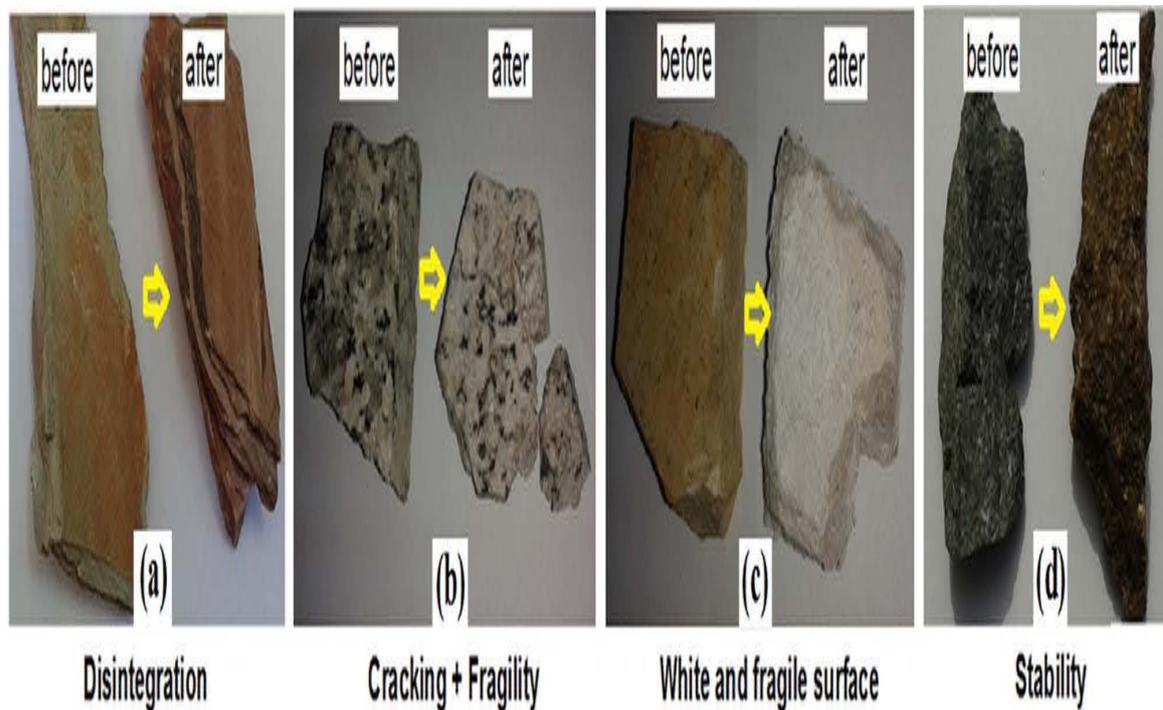


Fig. I.9. Quelques échantillons des roches avant et après le cycle thermique.

Grirate et al. [7] dans leur travail, ont développé un plan d'expériences pour tester les caractéristiques physico-chimiques et thermiques des matériaux de stockage (roche de quartzite), ainsi que la stabilité et La durabilité de l'huile synthétique après une utilisation à long terme et à haute température.

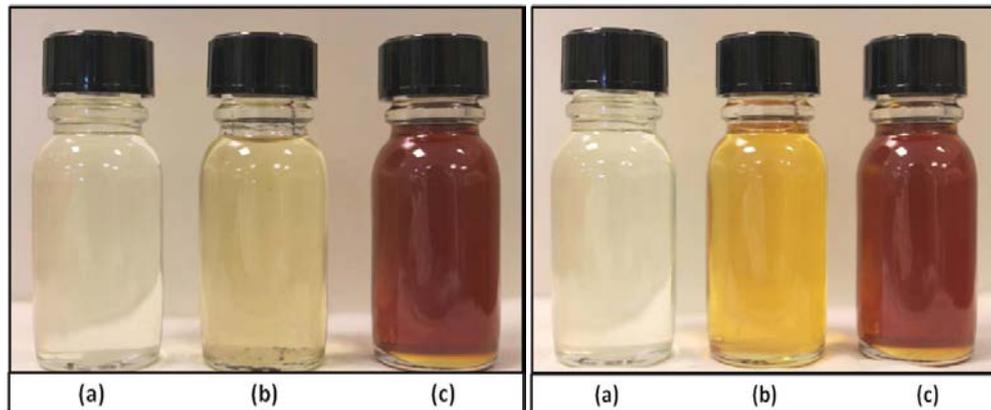


Fig. I.10. Extraits d'huiles à 250°C et à 350°C : a) État initial ; b) huile seul ;
c) huile avec sable après 500 h.



Fig. I.11. Échantillons de roches avant et après le vieillissement.

D'après les figures I.10 et I.11, ils ont remarqué que la couleur des roches et la transparence de l'huile synthétique qui été en contact avec le quartzite et le sable de

silice change radicalement avec le temps de vieillissement (500 h) pour les deux températures (250°C et 350 °C). Les analyses ont montré que les huiles testées en présence de roches et de sable de silice ont le même comportement que les huiles sans matériaux après 500 h, sauf à l'absorption thermique qu'il y a eu une différence en fonction uniquement de l'élévation de température.

En conclusion, cette expérience a révélé qu'aucune détérioration significative de l'huile thermique n'a eu lieu en présence de la roche de quartzite ou du sable de silice après une longue période d'utilisation et à haute température.

D'après **Grirate et al. [8]** on met en évidence le potentiel de stockage d'énergie thermique de six roches (quartzite, basalte, granit, cipolin et marbre) proposé comme matériau de stockage pour le concept de stockage thermocline à l'huile thermique. Ces roches ont été choisies en fonction de leur abondance au Maroc. Différentes méthodes techniques ont été réalisées afin d'évaluer les propriétés des roches (physiques, chimiques et thermiques) à des températures jusqu'à 350 °C. Les performances thermiques des roches étudiées à l'intérieur d'un système de stockage thermocline ont été évaluées à l'aide d'un modèle numérique validé. Les résultats expérimentaux ont identifiées deux roches (quartzite et cipolin) comme étant les matériaux de stockage les plus appropriés à utiliser en contact direct avec les FHT (huile synthétique). Alors que, l'analyse numérique a révélé que la roche Basalt donne des meilleures performances thermiques à l'intérieur de la thermocline étudiée.

Al Edhari et al. [9] ont étudié la performance d'un système de stockage d'énergie thermique en utilisant des milieux poreux naturels disponibles et facilement trouvés. Cette étude est axée sur l'utilisation de différents types de milieu poreux en augmentant progressivement la taille des particules (particules fines (sable) ou grosses (galets)), afin de voir son influence sur la chaleur stockée. Cette étude considère également un système de stockage thermique simple et moins coûteux qui pourrait être construit facilement. Il comporte une unité de stockage rempli par un matériau de stockage naturel (sable, roches de gravier ou de galets)

avec des conduites horizontales intégrées transportant l'eau comme fluide de transfert de chaleur pour la charge thermique.



Fig. I.12. Milieux de stockage d'énergie thermique examinés
(sable, graviers et galet).

Les résultats indiquent que le système de stockage thermique qui utilise le sable comme moyen de stockage est plus performant à cause de la faible porosité par rapport aux roches de gravier ou de galets. Par conséquent, l'utilisation des particules moyennes (roches de gravier) se ramène à une évolution de température plus uniforme dans le milieu pendant la phase du stockage.

Dhifaoui et al. [10] ont fait une étude expérimentale du comportement dynamique d'un milieu poreux soumis à un flux thermique mural en vue du stockage d'énergie thermique par chaleur sensible. L'objectif de la présente étude est d'optimiser le stockage d'énergie par la chaleur sensible dans un lit poreux fixe.

L'étude concerne le stockage de l'énergie thermique dans un lit poreux principalement formé par un canal vertical, rempli de billes de verre et de l'air, chauffé sur un des parois verticales par un flux de chaleur constant.

Une grande inertie thermique du système a été indiquée correspondant à la durée de la décharge. Les résultats ont montré que l'efficacité du système définie par le rapport entre l'énergie stockée sur l'énergie donnée au système augmente avec l'augmentation du volume de stockage et diminue avec le temps de décharge pour une durée de charge fixe. Cette perméabilité du milieu induit un confinement du fluide qui a une basse température à la sortie du canal et augmente l'efficacité du système.

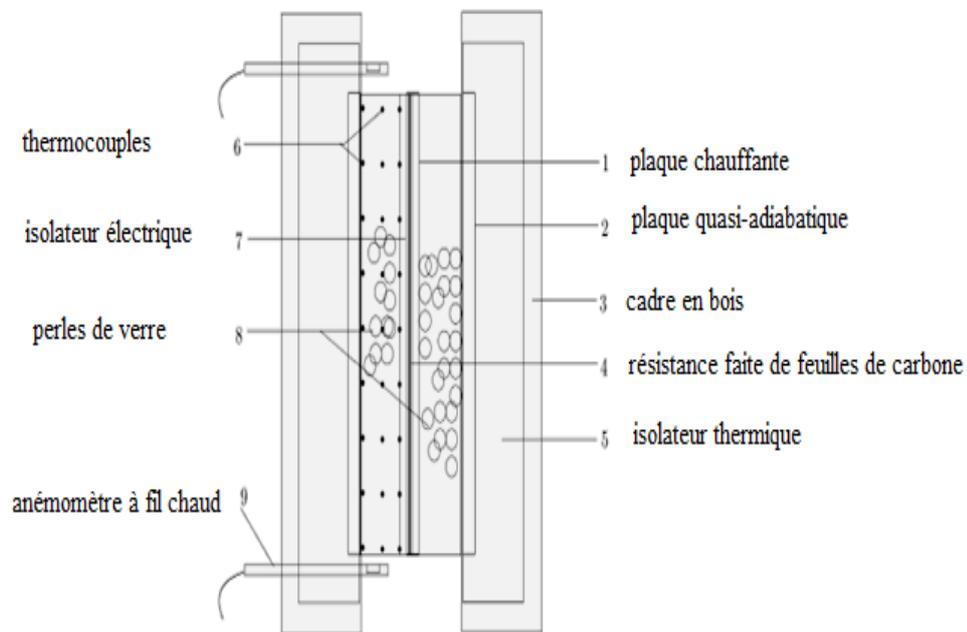


Fig. I.13. Schéma du canal poreux.

Mesut et al. [11] ont visé dans leur étude à déterminer les performances thermiques expérimentales des noyaux de cerise comme un matériau de stockage par la chaleur sensible dans des conditions de convection naturelle. Trois collecteurs ont été utilisés dans l'expérience. Le premier collecteur contient des cerisiers en poudre (32 kg), le deuxième est rempli par des noyaux de cerise (24 kg) et le troisième est un collecteur vide avec une plaque d'absorbeur plat seulement a été utilisé pour la comparaison.

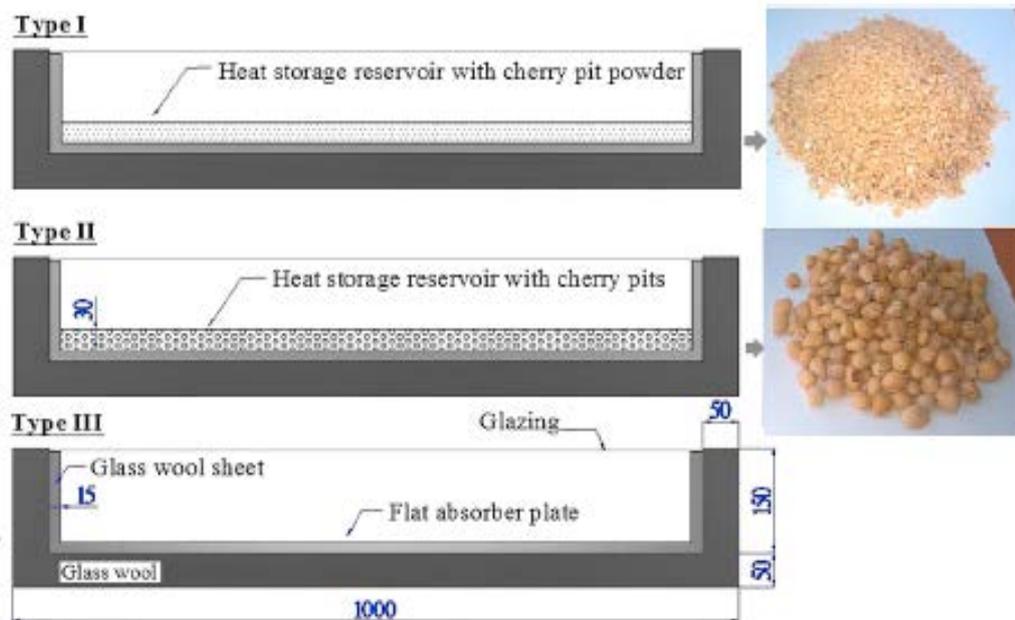


Fig. I.14. Schéma des trois collecteurs.

Selon les résultats de l'essai, les températures de sortie et d'entrée d'air ont été égalisées après 270, 200 et 46 min pour le premier, le deuxième et le troisième collecteur, respectivement, après le coucher du soleil. Par conséquent, l'utilisation des noyaux de cerise comme un nouveau matériau de stockage de la chaleur sensible est nécessaire pour une utilisation à long terme. Or ces dernières années, les cerisiers ont trouvé des zones d'application telle que les coussins thermiques et les oreillers. Alors l'effet de la température sur les fosses de cerise est une question qui doit être explorée en profondeur.

Bazgaoua, et al. [12] ont mené une étude expérimentale pour évaluer l'effet du système de chauffage à lit de roches sur le microclimat et le rendement des tomates en serre. Une étude comparative expérimentale est menée dans deux serres orientées est-ouest pour résoudre le problème des serres conventionnelles qui sont confrontés à des problèmes de surchauffe pendant la journée et un froid excessif la nuit, et pour l'amélioration de la qualité et quantité de production agricole. La géométrie, les matériaux de construction et la date de plantation sont identiques. Les résultats montrent que la température de nuit à l'intérieur de la serre équipée avec le

lit de roche dépasse celui de la serre de contrôle par $2,6^{\circ}\text{C}$. L'humidité relative s'est trouvée à 10% moins pendant la nuit à l'intérieur de la serre chauffée. Cette amélioration du microclimat pendant la nuit a un impact positif sur la qualité des fruits et le rendement a augmenté de près de 29%.

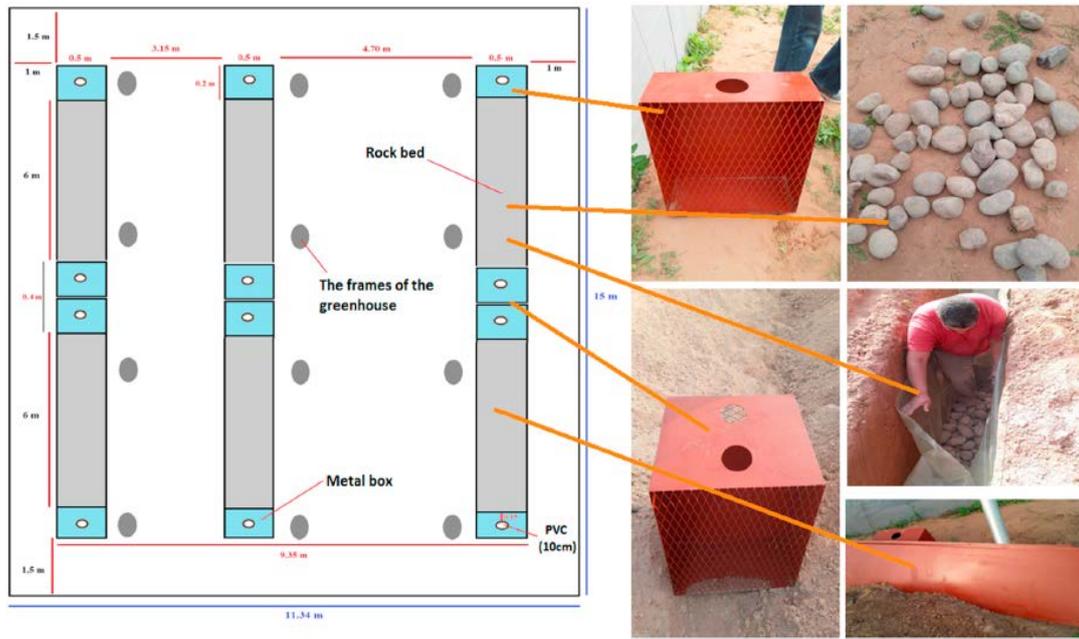


Fig. I.15. Dimensions du lit de roches.

Kuravi et al. [13] ont conçu un système de stockage d'énergie thermique sensible (TES) à haute température, pour être utilisé dans une centrale solaire. L'air est utilisé comme fluide caloporteur et la briques de grande taille (haute densité) est utilisée pour le stockage. Des expériences ont été réalisées en utilisant un système de stockage prototype. La température d'air à l'entrée varie entre 300°C et 600°C , et le débit a été varié entre 50 à 90 pieds cubes par minute. L'expérience montre que la durée de phase stockage diminue avec l'augmentation de débit massique. Un modèle 1D, validé par les résultats expérimentaux, a été utilisé pour simuler le comportement thermique du système. Les équations de conservation de l'énergie en régime transitoire ont été formulées pour la convection forcée conjuguée et résolues numériquement pour les cycles de charge/décharge. Une étude a été réalisée en

faisant varier les dimensions de système de stockage, le débit de fluide, le rendement thermique global et le rapport de la capacité du système.

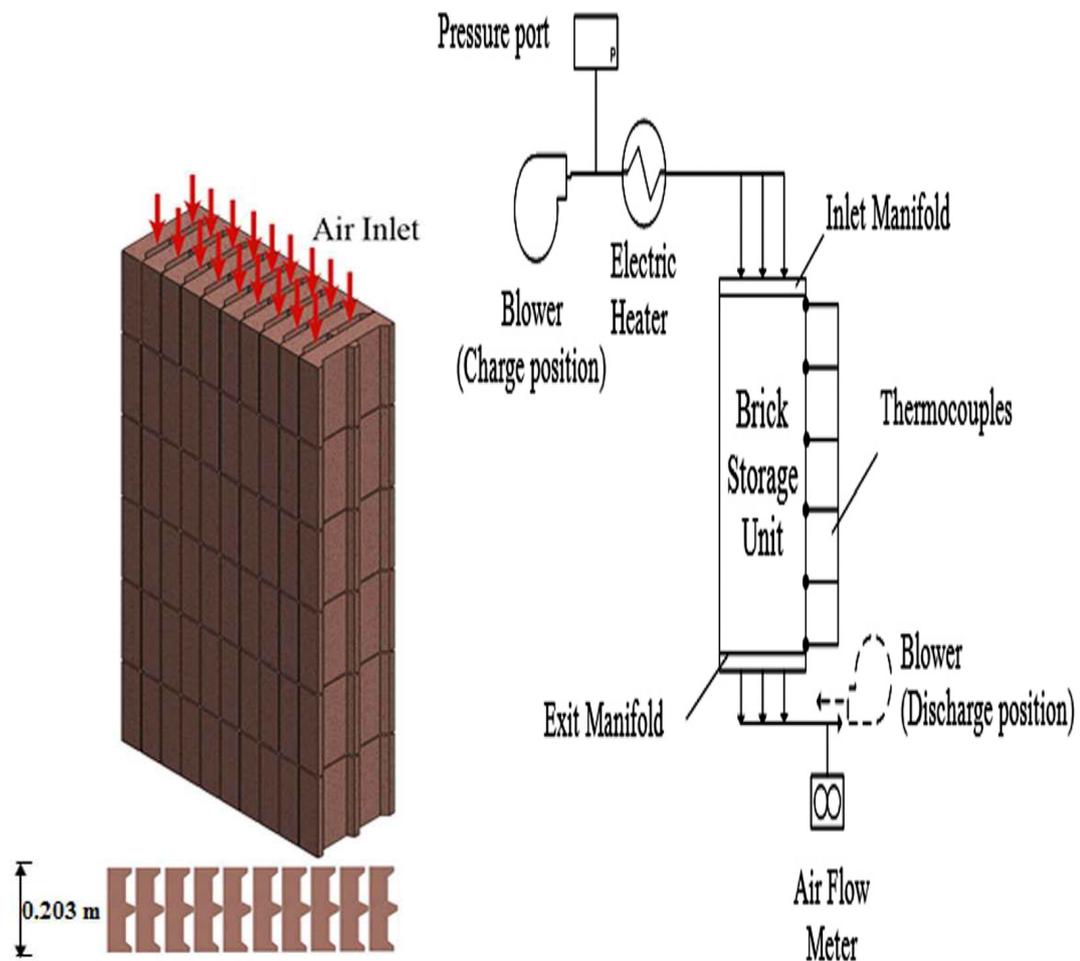


Fig. I.16. Vue isométrique de l'assemblage de briques.

Les résultats sont validés par un système à l'échelle du laboratoire. Le modèle développé a été utilisé pour trouver une configuration d'un lit qui peut stocker 4MW d'énergie thermique.

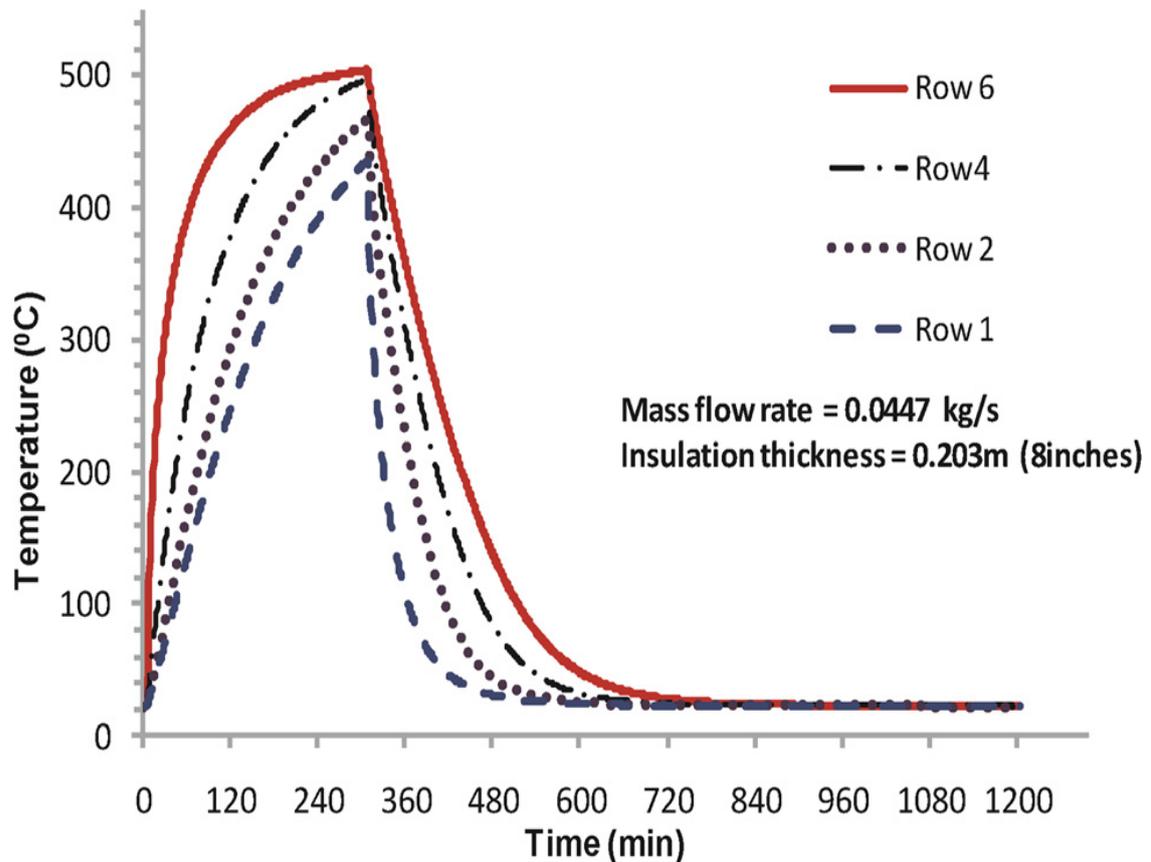


Fig. I.17. Evolution temporelle de la température de l'air de la colonne 5 du lit de stockage pendant le stockage et le déstockage (0,0447 kg/s).

Une étude expérimentale a été mise en œuvre par **Mohamed et al. [14]** pour évaluer l'amélioration des performances et de productivité d'un système de distillation (solaire immobile) par l'inclusion des pierres fine naturelle (basalte noir) comme absorbeur sensible poreux. Deux distillateur solaire avec la même conception et spécifications (conventionnels et améliorés) ont été testés et comparés dans des conditions climatiques. Le premier est construit d'un absorbeur sensible poreux (basalte noir) et le deuxième est un distillateur conventionnel. L'effet de la taille de la pierre (1 cm, 1,5 cm et 2 cm) et la porosité de l'absorbeur poreux sur la performance et la productivité du système ont été présentées.

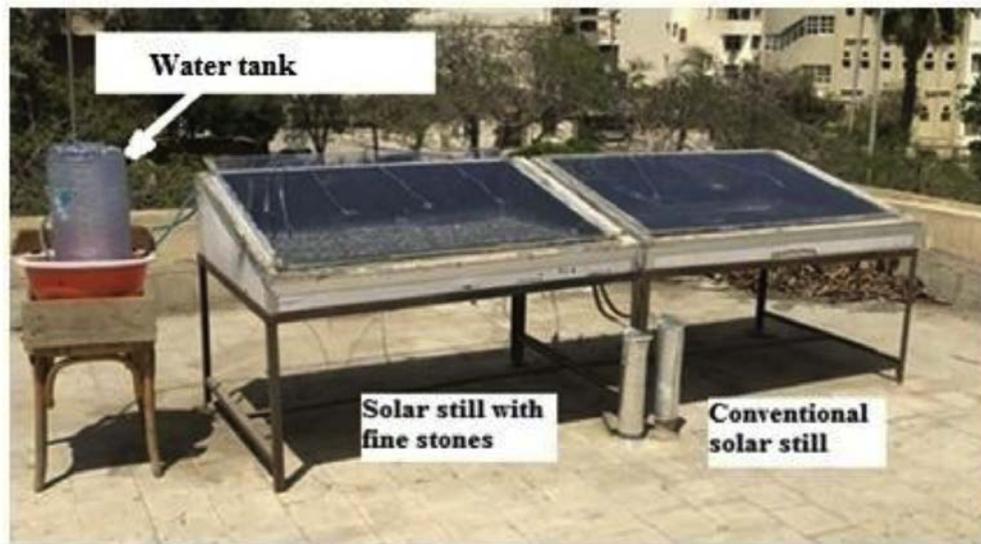


Fig. I.18. Photo du banc d'essai

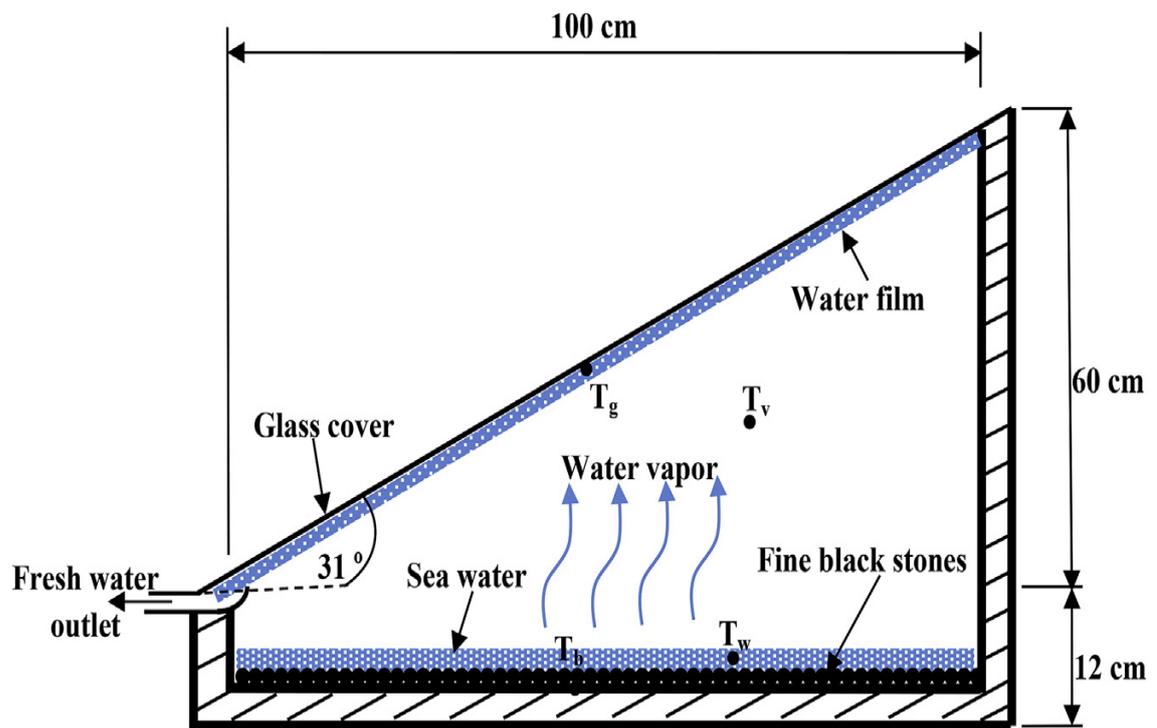


Fig. I.19. Phase expérimentale.

Les principaux résultats sont conclus comme suit :

1. La taille de la pierre de l'absorbant poreux a un effet significatif sur la productivité et la performance du distillateur.
2. La productivité quotidienne d'un distillateur avec des pierres de taille 1 et 1.5 et 2 cm été augmenté d'environ 19.81, 27.86 et 33.37 % respectivement, que le distillateur conventionnel.
3. L'efficacité thermique quotidienne a été aussi améliorée.
4. La meilleure taille de pierre qui devrait être utilisée en fonction des résultats des analyses thermiques et économiques de la présente étude sont de 2 cm.
5. L'efficacité thermique et le rendement en eau du système actuel ont une amélioration considérable par rapport aux travaux précédents de Système.

Braham Chaouch et al. [15] ont développé et étudié expérimentalement Un séchoir solaire composé deux chambres de séchage superposés directe et indirecte, fonctionnant sous convection forcée. Le séchoir est renforcé par un système de stockage par la chaleur sensible en utilisant des cailloux. L'étude est faite pour le séchage de la viande de chameau frais dans des conditions climatiques d'Adrar, une préfecture saharienne du Sahara algérien.

La configuration se compose d'une chambre directe superposée à un séchage indirect. Un premier lit de galets est placé dans un plénum, en dessous d'une chambre directe de séchage, un second lit est placé dans une cavité en dessous du capteur solaire.

Les expériences de séchage ont été menées en juillet et en novembre 2017.

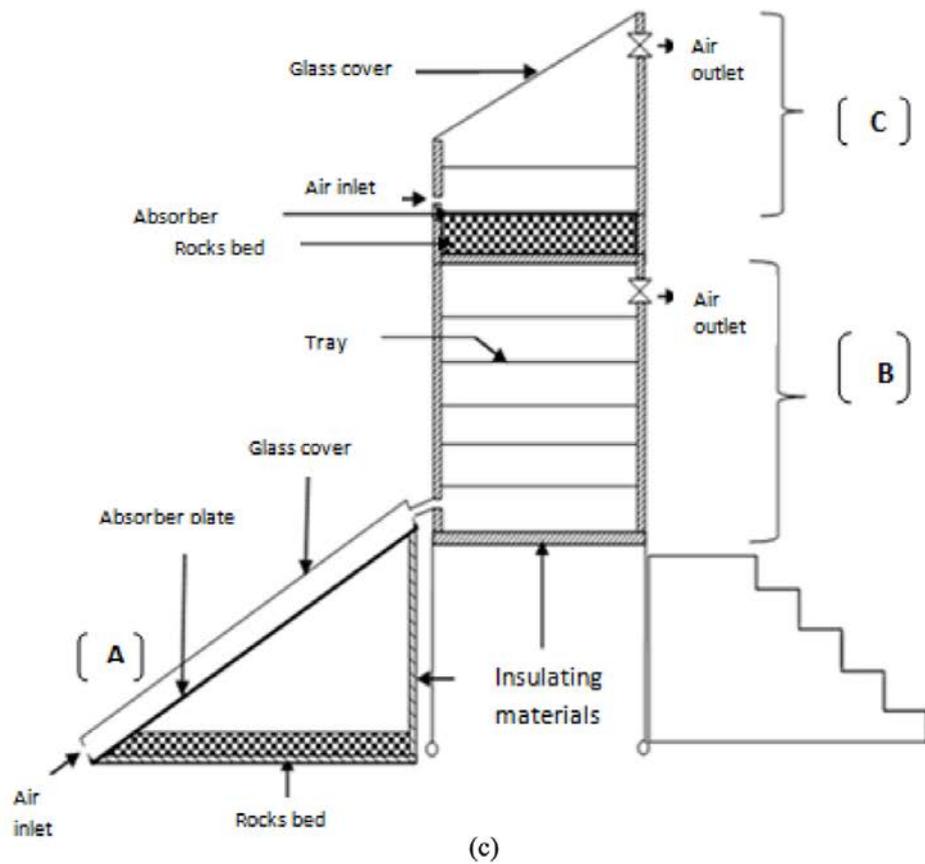
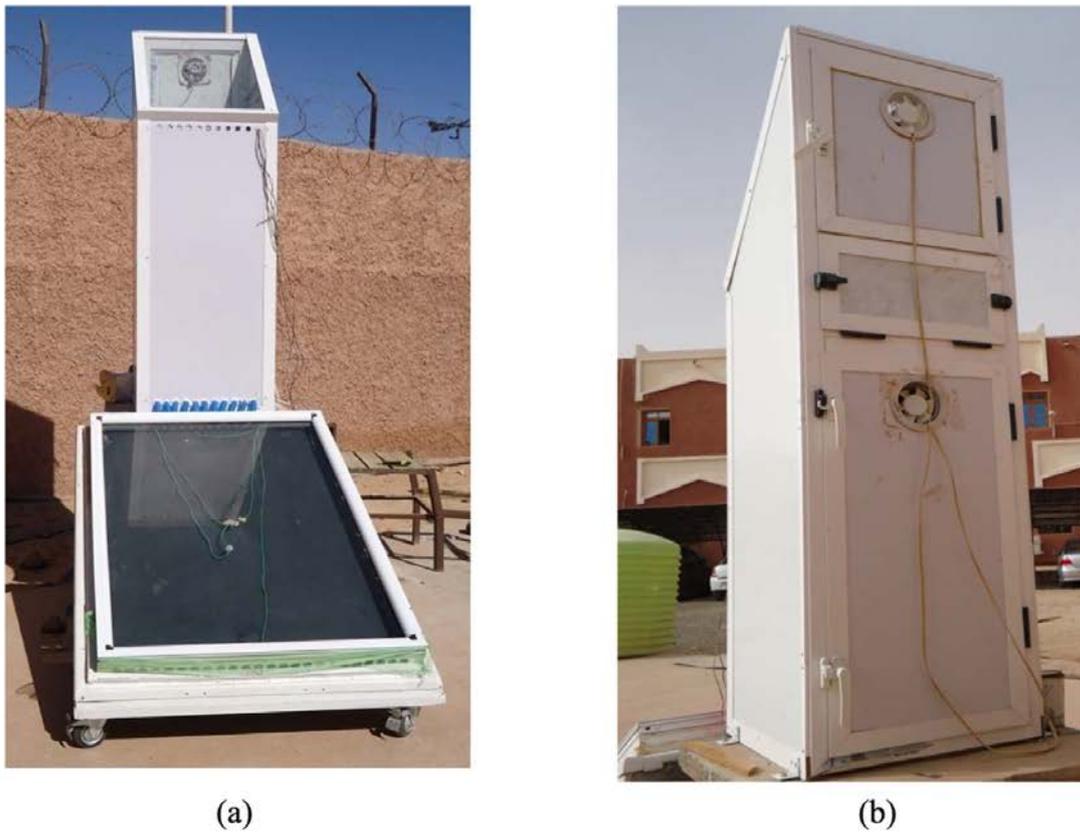


Fig. I.20. Le séchoir solaire : (a) Vue avant de configuration, (b) Vue arrière de configuration, (c) schéma descriptif de la configuration.

Le système de stockage par la chaleur sensible a maintenu le système thermique du capteur solaire jusqu'à une heure après le coucher du soleil avec une amélioration d'efficacité de 28%.

L'efficacité thermique de la chambre directe a été augmentée de 11,8%.



Fig. I.21. Plateaux chargés de viande de chameau : a) avant le séchage, b) après séchage.

Les expériences ont prouvé que le niveau de protéines a été mieux préservé par le séchage ; la qualité microbiologique finale était supérieure avec le Séchage direct. Contrairement au cas de séchage sous ciel où la qualité hygiénique et la qualité physicochimique a étaient beaucoup modifié.

I.5. Modèle numérique

La technologie de stockage d'énergie thermique à lit emballé a gagné un marché important dans le monde entier car elle offre un énorme potentiel de stockage à haute température à base d'air sans impact négatif sur l'environnement.

Shobhana et al. [16] ont développé un modèle numérique unidimensionnel en deux phases le fluide et le solide, pour étudier la performance transitoire d'un lit de

stockage d'énergie à haute température. Le modèle développé est basé sur le modèle original Schumann, qui tient compte à la fois du transfert de chaleur par convection forcée et le transport axial de l'énergie par conduction et rayonnement. En outre, une étude paramétrique pour étudier l'effet de certains paramètres comme, le diamètre de la roche, le taux de charge-décharge et l'épaisseur de l'isolation sur les performances du stockage a été développé.

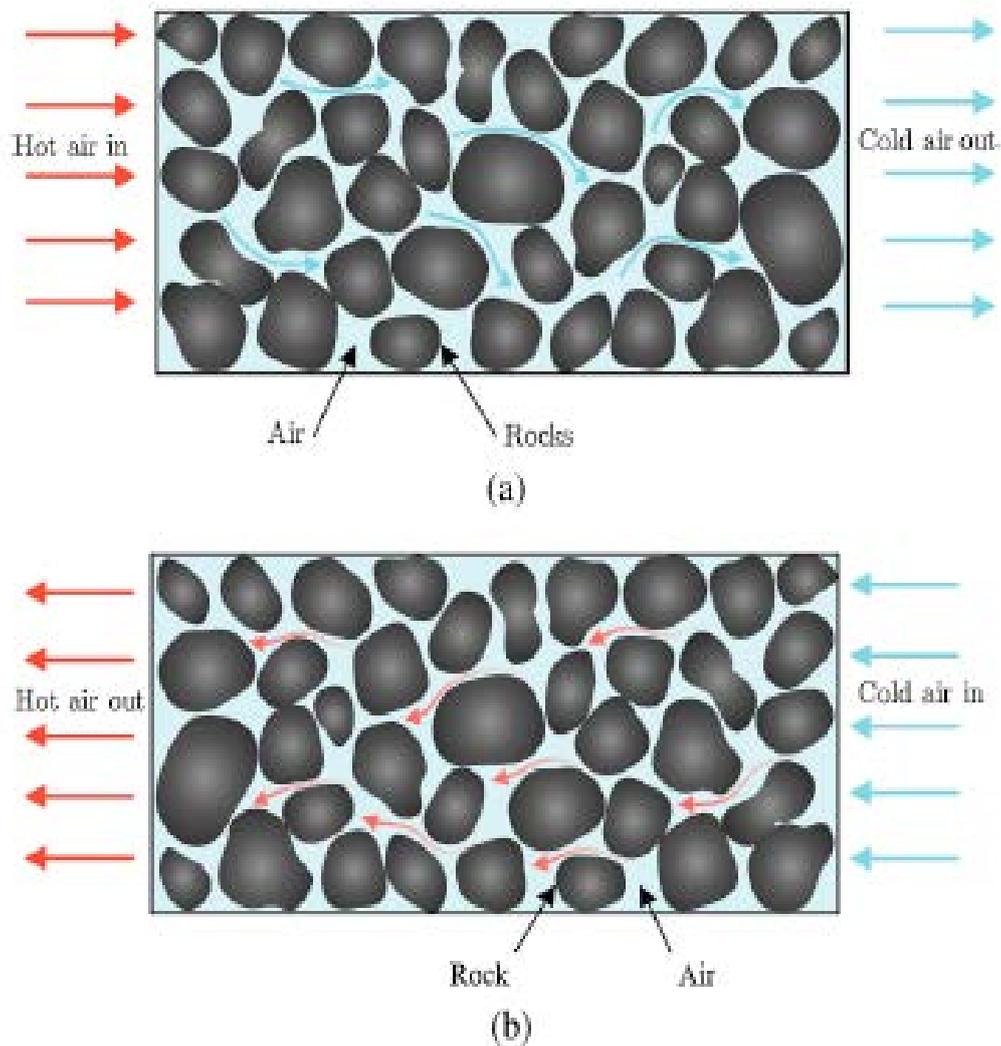


Fig. I.22. Lit des roches emballé avec de l'air (a) phase stockage (b) la phase déstockage.

Le modèle développé peut aider à identifier des solutions de conception de stockage plus avancées et plus rentables pour une application à grande échelle.

Chapitre 2

Partie 1 : Généralités

II.1. Introduction

Les physiciens emploient le terme d'énergie pour désigner une capacité à modifier un état ou à produire un travail entraînant un mouvement ou générant un rayonnement électromagnétique de la lumière, par exemple ou de la chaleur. Le mot vient d'ailleurs du grec et signifie « force en action ».

II.2. Différentes formes d'énergie

II.2.1. Energies fossiles

L'énergie fossile est celle qui est tirée principalement du charbon, du pétrole et du gaz naturel. Elles sont appelées fossiles car elles proviennent de la décomposition très lente d'éléments vivants (surtout des plantes). Leur quantité est limitée sur Terre, leur extraction provoque leur épuisement. Il est plus ou moins facile d'extraire cette énergie, en fonction des conditions géologiques et de l'évolution des techniques. Ces matières sont utilisées en les brûlant, ce qui produit du dioxyde de carbone (CO_2) et est une cause importante du réchauffement climatique. L'énergie nucléaire est un cas particulier. Elle est souvent classée également parmi les énergies fossiles, mais son utilisation ne produit pas elle-même de CO_2 .

➤ Avantages et inconvénients

Les énergies fossiles ont divers avantages et inconvénients selon leurs natures :

- Le charbon à l'avantage d'être assez bien réparti sur la planète et se trouve en très grande quantité. Parmi ces principaux inconvénients, il y a son coût d'exploitation très élevé et la pollution qu'il génère.
- Le pétrole, est disponible presque partout sur le globe, son rendement énergétique est très important, il permet de produire un grand nombre de produits dérivés (plastique, engrais, gaz méthane et propane, essence, etc.)

dont l'humanité ne peut pas encore se passer. Parmi ces inconvénients majeurs, on peut citer le fait qu'il soit très polluant (pour l'exploitation et l'utilisation), que son prix ne cesse d'augmenter et qu'il soit à l'origine de nombreux conflits à travers le monde.

- Le gaz naturel, lui est très facilement exploitable, il est disponible en grande quantité, ne nécessite aucune transformation pour être utilisé et ne pollue pas énormément par rapport aux autres sources d'énergies fossiles. Son principal défaut est sa dangerosité (les explosions sont fréquentes aussi bien au niveau industriel que domestique).

II.2.2. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies qui peuvent être renouvelées ou régénérées naturellement. Elles peuvent donc être utilisées sans limite dans le temps tandis que les énergies fossiles proviennent de réserves qui s'épuisent (qui se vident).

Il y a cinq familles principales d'énergies renouvelables. Dans l'ordre d'importance de leur exploitation actuelle, ce sont : la biomasse (dont le bois de chauffage), l'énergie hydraulique (hydroélectricité), l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la géothermie.

➤ Avantages et inconvénients

De manière générale, les énergies renouvelables sont plus propres que les énergies fossiles et fissiles actuellement exploitées dans le monde entier. Elles sont plus écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont « gratuites » une fois les installations de production rentabilisées. Pour être plus précis, il faudrait se pencher sur les avantages et inconvénients que présente chaque source d'énergie renouvelable. En voici quelques exemples :

- L'énergie éolienne est l'énergie propre par excellence. Sans rejet ni déchet d'aucune sorte, elle permet avec un bon coefficient de performance d'assurer une bonne indépendance énergétique. Sur terre, les éoliennes démontrent

d'excellentes capacités de production et sont une alternative viable pour les territoires les plus reculés dont l'accès à l'électricité est difficile.

- L'énergie biomasse est liée à la combustion du bois. Le bois est un combustible très présent, Si cette énergie rejette tout de même des gaz à effet de serre, les rejets sont moindres par rapport à la quantité de CO₂ qu'un arbre aura absorbé au cours de sa vie. Une forêt bien gérée et renouvelée permet de ne pas épuiser les réserves en bois. La biomasse est donc une énergie qui participe au développement local tout en étant très bon marché (les bûches et les granulés de bois sont les combustibles les moins chers du marché).
- L'énergie solaire est largement plébiscitée dans le secteur énergétique et se développe à grande vitesse. Production d'électricité grâce au photovoltaïque, mais aussi de chauffage grâce aux panneaux solaires thermiques, le solaire peut être exploité à grande échelle dans des parcs prévus à cet effet ou à petite échelle chez les particuliers. Même si les panneaux solaires possèdent un meilleur rendement en zone très ensoleillée.

Comme pour chaque chose, les énergies renouvelables ont également leurs petits défauts. On notera en priorité un coût relativement important à l'achat des installations dont la rentabilité peut se faire attendre des années. De plus, la plupart de ces énergies vertes sont sujettes aux caprices de Dame nature. En effet, des journées sans vent ou sans grande luminosité peuvent contrarier fortement la production de l'éolien et du solaire. Reprenons en détails les trois sources précédemment citées :

- La production d'énergie de l'éolien est très dépendante de la force du vent. Pour pallier cela, les éoliennes sont toujours placées dans des zones très venteuses. Cependant, certaines populations refusent leur implantation à cause des nuisances sonores et visuelles qu'elles entraîneraient.

- L'énergie biomasse, à l'instar de l'énergie géothermique, a pour défaut de ne pas pouvoir être exploitée de manière intensive au risque d'épuiser trop rapidement les ressources naturelles.
- Enfin, l'énergie solaire ne possède pas encore un rendement suffisant pour subvenir à la totalité des besoins énergétiques d'un foyer. Se pose également le problème du recyclage des cellules photovoltaïques et thermiques.

II.3. Utilisation des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont une solution alternative à explorer pour remplacer et/ou compléter les autres énergies traditionnelles pour voyeuses d'énergie. Cinq types d'énergie sont donc disponibles :

II.3.1. Energie solaire

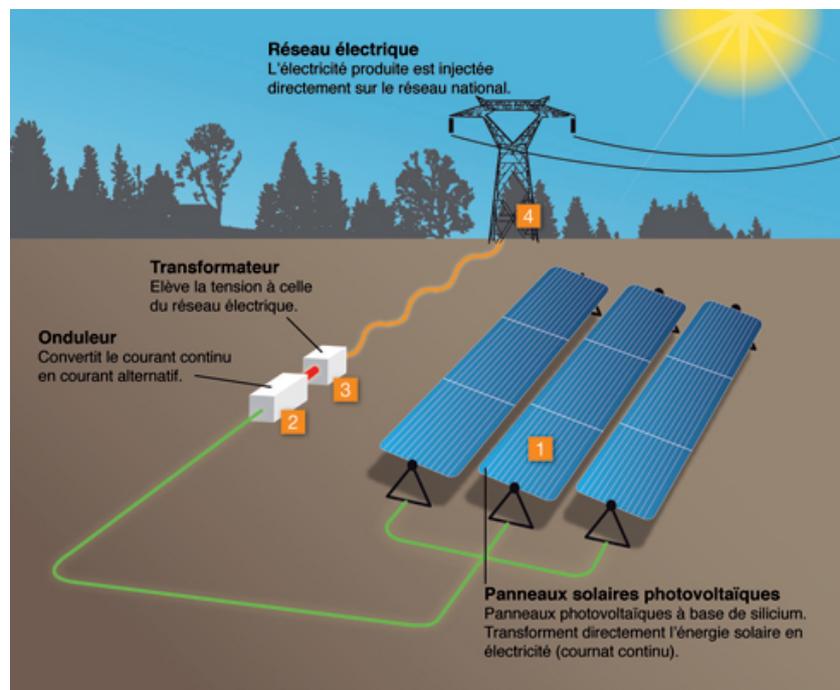


Fig. II.1. Energie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire provient, comme son nom l'indique, du soleil. Cette énergie peut être transformée utilement en chaleur, électricité ou en biomasse. Cette énergie

est principalement utilisée par les industrielles et les particuliers. Elle permet le développement du photovoltaïque sachant que la lumière solaire est transformée en énergie électrique grâce à des panneaux solaires.

II.3.2. Energie éolienne

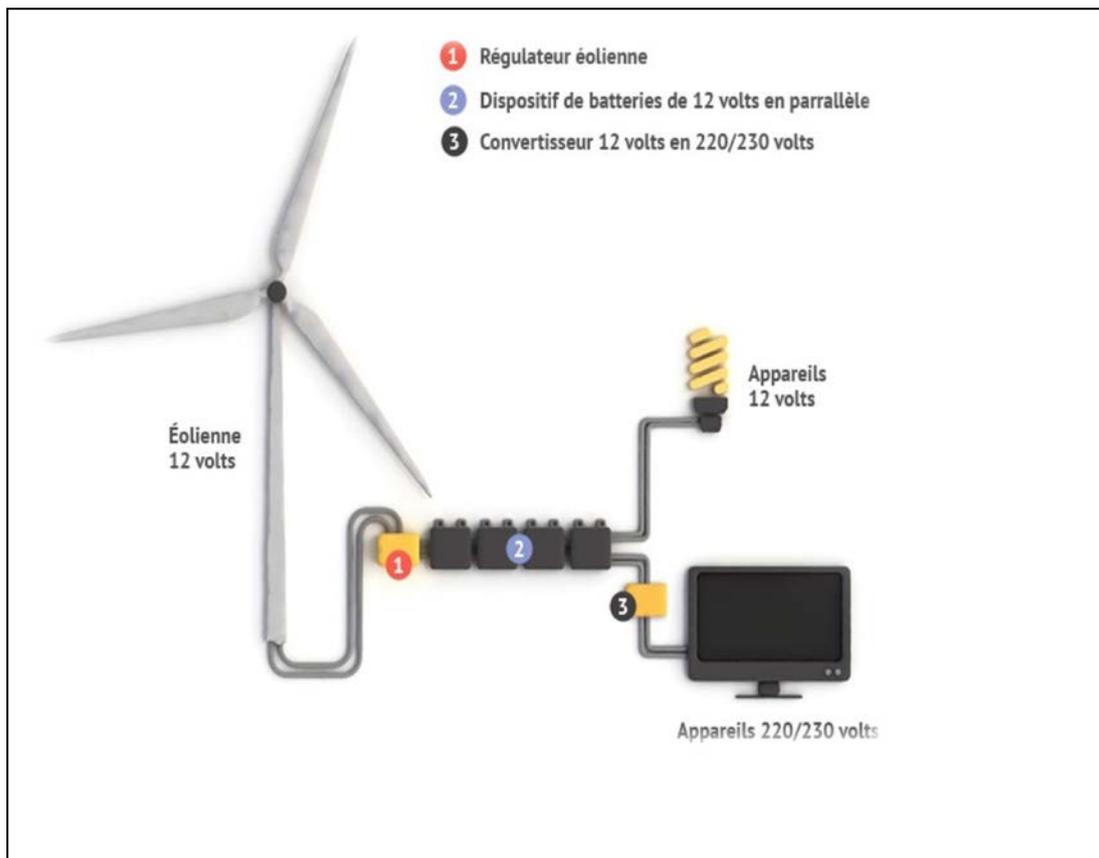


Fig. II.2. Fonctionnement et principe éolienne.

Cette énergie sert à produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un générateur. L'énergie éolienne utilise donc la force du vent. Il y a aussi des minis éoliens pour les particuliers. Ces éoliennes domestiques sont posées sur un toit ou une pente. Selon l'importance de l'éolienne, le particulier concerné pourra consommer l'électricité produite par cette dernière ou la revendre à un fournisseur d'électricité.

II.3.3. Energie hydraulique

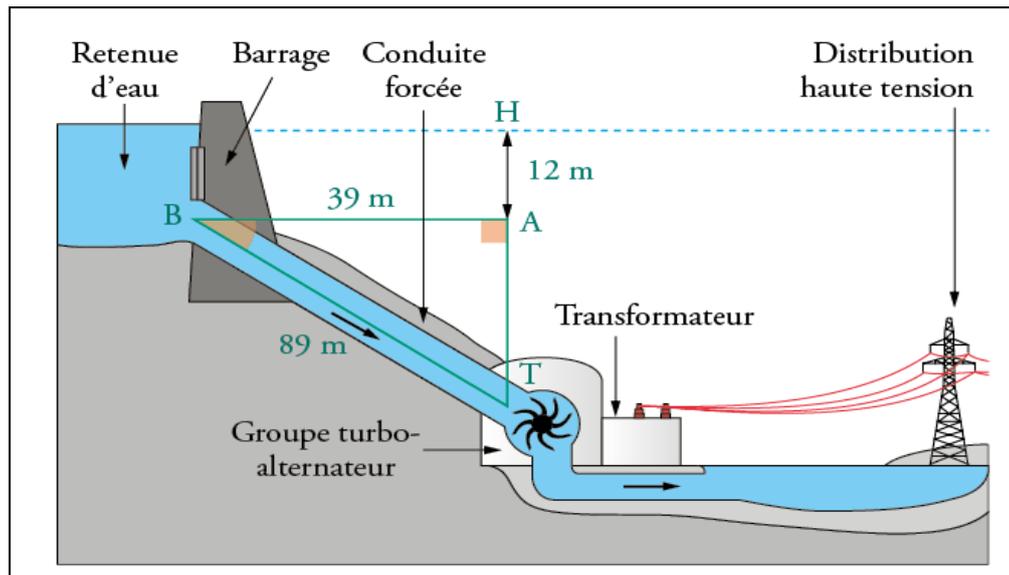


Fig. II.3. Fonctionnement d'une centrale gravitaire.

C'est un procédé très ancien qui permet de stocker des masses importantes d'eau que l'on transforme ensuite en électricité. On la nomme aussi hydroélectricité. Celle-ci peut être produite par des centrales hydrauliques alimentées en partie par des barrages.

II.3.4. Energie géothermique

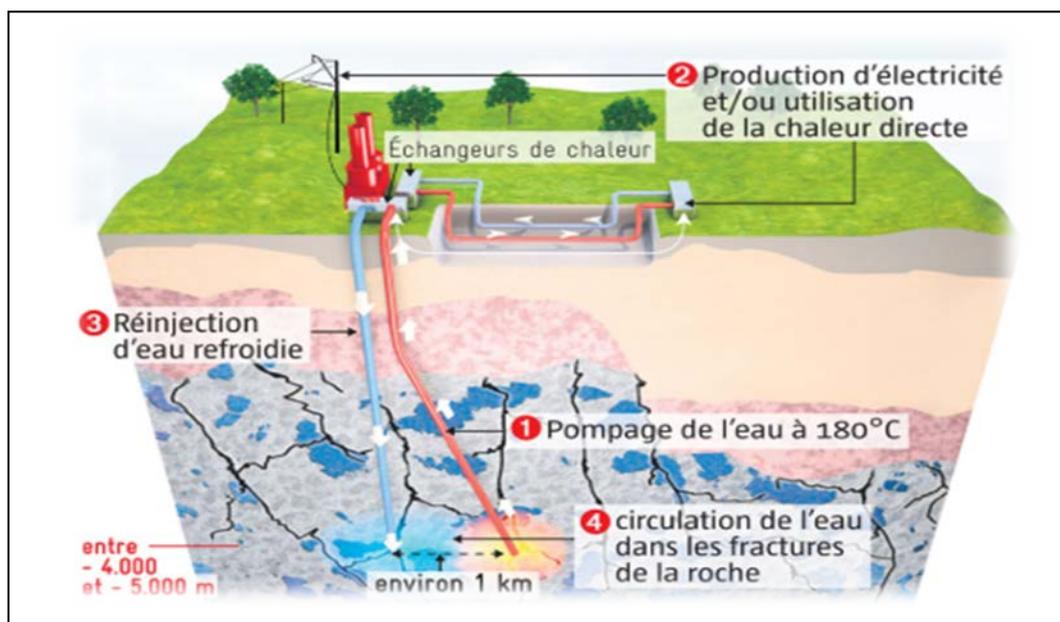


Fig. II.4. Fonctionnement de l'énergie géothermique.

Des centrales géothermiques se servent de la chaleur dégagée par le noyau terrestre. L'avantage de cette énergie est qu'elle ne dépend pas des conditions climatiques ni des saisons.

L'énergie géothermique se présente sous deux formes :

- basse température pour chauffer les habitations des particuliers,
- haute température, dans ce cas, c'est un moyen de produire de l'électricité.

II.3.5. Energie biomasse



Fig. II.5. Cycle de fonctionnement de l'énergie biomasse.

Cette énergie concerne le bois, les résidus forestiers, les déchets organiques et verts ainsi que le biocarburant ou essence verte. Qui est classée en deux types :

- **éthanol** issu du blé, maïs, betterave, canne à sucre et,
- **biodiesel** issu du colza, tournesol, soja.

Ces biocarburants sont souvent mélangés aux carburants classiques pour limiter les effets de serre.

Le bois, quant à lui, est un combustible utilisé depuis la nuit des temps pour le chauffage et la cuisine.

II.4. Problème de l'intermittence des énergies renouvelables

Le problème des énergies renouvelables, c'est que ce sont des énergies irrégulières, ou plutôt « intermittentes ». Concrètement, pour qu'un panneau photovoltaïque fonctionne, il faut qu'il y ait du soleil. S'il n'y en a pas, le panneau ne produit pas d'électricité, et pour l'éolien généralement on admet que l'éolien est en capacité de produire de l'électricité environ 2600 heures par an (30% du temps) et le solaire environ 1200 heures par an (15% du temps). Avec l'hydraulique, il est possible de contrôler en partie la production, puisque l'eau est stockée dans un barrage et que la production peut donc être activée à volonté.

- ✓ Mais si l'on veut généraliser l'utilisation de l'énergie renouvelable avec des panneaux solaires et des éoliennes, il faut être capable de stocker l'énergie pour en disposer lorsqu'il n'y a pas de vent ou pas de soleil.

II.5. Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie provenant d'une source d'énergie en un lieu donné, sous une forme aisément utilisable, pour une utilisation ultérieure. Il est nécessaire pour valoriser avec efficacité les énergies renouvelables et propres lorsqu'elles sont intermittentes, telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Stocker des calories ou de l'électricité permet de stabiliser les réseaux énergétiques, lisser les irrégularités de production/consommation dans le contexte de développement des énergies renouvelables, l'alimentation énergétique de sites insulaires ou isolés.

II.6. Types de stockage de l'énergie

La façon dont l'énergie est stockée dépend principalement de la source d'énergie. Selon cette dernière, les méthodes de stockage de l'énergie sont les suivantes :

II.6.1. Stockage de l'énergie chimique

L'énergie chimique est une forme d'énergie potentielle, de stockage qui dépend en outre de sa source. Nous connaissons les méthodes ou supports suivants :

II.6.1.1. *Hydrogène*

Bien que ce gaz incolore, inodore, insipide et non toxique présente un grand potentiel en tant que source d'énergie, l'hydrogène est principalement utilisé comme un support de stockage d'énergie pour une utilisation ultérieure. Les exemples comprennent le stockage de l'hydrogène sous terre impliquant l'utilisation de cavernes souterraines et les champs de gaz et de pétrole vides pour stocker l'énergie de la grille pour les ressources d'énergie intermittentes telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire par exemple.

II.6.1.2. *Biocarburants et la biomasse*

Ils ne se réfèrent pas au stockage de l'énergie en tant que telle, mais plutôt à des exemples de stockage d'énergie chimique. Lorsque des bûches de bois ou des biocarburants sont brûlés, ils libèrent de l'énergie qui est stockée dans les liaisons entre les molécules et entre les atomes.

II.6.1.3. *Azote liquide*

Tout comme l'hydrogène, l'azote liquide présente un grand potentiel en tant que source d'énergie. Mais à la place, il est utilisé comme une forme de stockage d'énergie. Il peut être utilisé pour produire de l'électricité ou pour la réfrigération et le refroidissement.

II.6.1.4. *Oxy-hydrogène*

Il s'agit d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène qui, lorsqu'il est allumé, produit de la vapeur à haute pression et à haute température qui peut être utilisée pour produire de l'électricité.

II.6.2. Stockage électrochimique de l'énergie

Cela implique l'utilisation de divers dispositifs qui convertissent l'énergie chimique en électricité.

II.6.2.1. *Batterie*

S'agit d'un dispositif largement utilisé qui convertit l'énergie chimique stockée en énergie électrique. Il existe deux types de batteries : les piles non rechargeables et les accumulateurs qui peuvent être rechargés et utilisés à plusieurs reprises.

II.6.2.2. *Pile à combustible*

Elle se réfère à un dispositif qui convertit l'énergie chimique en électricité par une réaction chimique. Plusieurs types de piles à combustible différentes existent mais sont toutes équipées d'une cathode, d'une anode et d'un électrolyte.

II.6.3. Stockage d'énergie électrique

Elle implique l'utilisation d'un champ électrique pour stocker l'énergie.

II.6.3.1. *Condensateur et le super condensateur*

Les deux sont des composants électriques qui sont utilisés pour stocker une charge électrique mais comme son nom l'indique, le super condensateur peut stocker une charge électrique beaucoup plus importante. Le condensateur est généralement utilisé comme alimentation de secours à court terme, tandis que le super condensateur peut également être utilisé pour alimenter de gros moteurs, y compris des véhicules. Mais il est aussi souvent utilisé pour alimenter des dispositifs de faible puissance tels que les lecteurs multimédia portables etc.

II.6.3.2. *Supraconducteur ou stockage d'énergie magnétique*

Il s'agit d'une technologie relativement nouvelle qui stocke l'électricité du réseau au sein d'un champ magnétique qui est créé par le passage du courant dans une bobine.

II.6.4. Stockage de l'énergie mécanique (méthodes pour stocker l'énergie produite par le mouvement)

II.6.4.1. *Accumulateur hydraulique*

Un réservoir de stockage stocke un fluide non compressible sous pression. Il existe plusieurs types d'accumulateurs hydrauliques, mais le plus utilisé est l'accumulateur de gaz comprimé qui contient du gaz sous pression, habituellement de l'azote.

II.6.4.2. *Volant d'inertie*

Ce type de stockage de l'énergie mécanique est utilisé pour stocker l'énergie de la grille et l'énergie qui est générée par les parcs éoliens, mais il montre aussi un potentiel en matière de transport et comme source d'alimentation de secours.

II.6.5. Stockage de l'énergie thermique

Méthodes utilisées pour stocker de l'énergie thermique afin de l'utiliser pour refroidir ou chauffer les bâtiments lorsque la température à l'intérieur est au-dessus ou en dessous de l'énergie stockée dans la substance de stockage.

II.6.5.1. *Réservoir d'eau chaude*

Un réservoir d'eau qui stocke l'eau chaude pour le chauffage, le lavage, le bain, etc. Les réservoirs de stockage d'eau chaude sont utilisés dans les fours à bois et les capteurs solaires thermiques.

II.6.5.2. *Accumulateur de vapeur*

Une cuve en acier contient de la vapeur sous pression. Ce système est utilisé pour équilibrer l'offre et la demande en vapeur en stockant la vapeur lorsque l'offre

est supérieure à la demande et en libérant de la vapeur lorsque la demande dépasse l'offre.

Partie 2 : Stockage d'énergie thermique

Le contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir à l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le double avantage d'être gratuite et propre. Toutefois, l'inconvénient de cette source d'énergie est son intermittence. L'une des solutions envisagées pour faire face à ce problème est le stockage de l'énergie.

L'énergie peut également être stockée sous sa forme thermique et ensuite restituée sous forme de chaleur. Le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie [17].

Le Stockage d'énergie thermique (SET) peut être obtenu par refroidissement, le chauffage, la fusion, la solidification, la vaporisation, ou un matériau avec l'énergie sous forme de chaleur devient disponible lorsque le processus est inversé.

II.7. Définition de stockage thermique

L'énergie thermique est la somme du potentiel et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. À la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se produit dans la substance, ainsi peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente et chaleur thermo-chimique, ou une combinaison de ces derniers.

II.8. Technologies du stockage thermique

La production d'énergie sous forme de chaleur est principalement associée au solaire thermique mais aussi aux sites industriels qui, dans leur activité, produisent du chaud ou du froid. Les températures atteintes peuvent être très variables d'une

technologie à une autre : une centrale thermodynamique peut porter la vapeur d'eau à plus de 500°C, tandis qu'un panneau solaire installé sur le toit d'une maison porte l'eau autour de 80°C. Lors de l'étude du besoin, se pose également la question de la durée de stockage :

- de quelques heures à une journée, pour la gestion des sources intermittentes productrices de chaleur en journée et restituée le soir ;
- de plusieurs mois, stockage saisonnier du surplus de chaleur produit en été et restitué en hiver.

Parmi les trois principes de stockage thermique (sensible, latent ou thermochimique, voir (Fig. II.6) le choix porte donc sur des critères :

- thermodynamiques (température de fusion, capacité calorifique, conductibilité thermique...).
- physiques et chimiques (stabilité chimique, absence de décomposition et corrosion...).

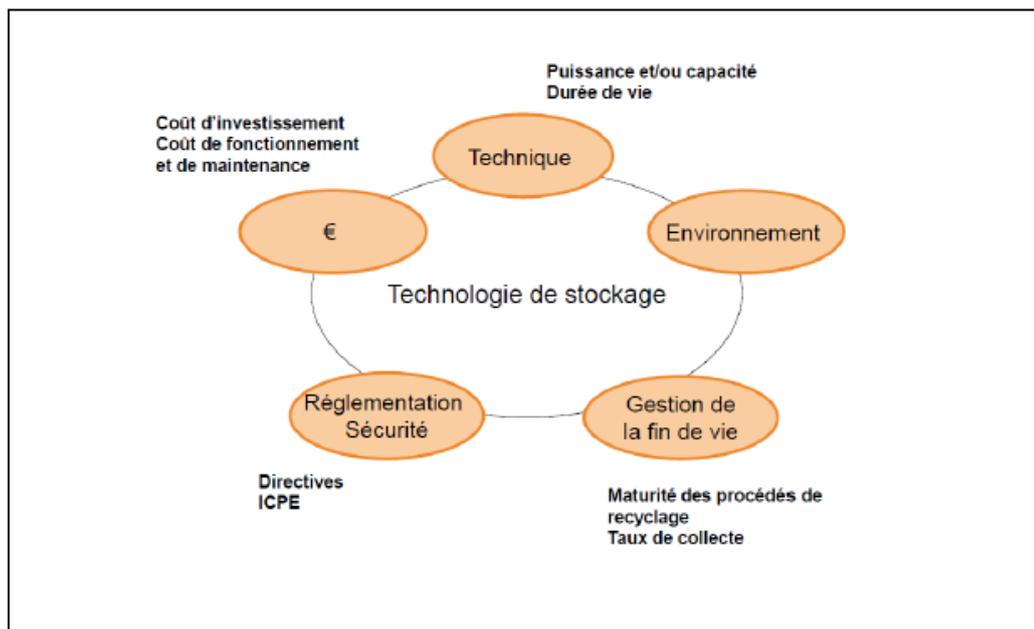


Fig. II.6. Critères de choix d'une technologie de stockage.

Parmi les critères de choix, la prise en compte de l'impact environnemental est également importante, notamment sur la nature des sels fondus utilisés dans certaines technologies de stockage qui peuvent être polluants et difficilement retraités.

La maturité de la technologie de stockage peut également faire partie des critères de sélection. La technologie du chauffe-eau sanitaire est particulièrement mature et ne nécessite, contrairement au stockage associé aux centrales thermodynamiques ou encore au stockage par réaction chimique qui, pour l'instant, n'existe qu'au stade de démonstrateur.

D'un point de vue économique, comme pour le stockage d'électricité, l'évaluation nécessite de prendre en compte le coût d'investissement mais aussi les coûts d'exploitation, de maintenance et de recyclage.

Le volume du système de stockage est souvent la variable prépondérante de cette évaluation, parce qu'il induit des coûts en termes d'isolation et en raison de la quantité de matériaux mobilisés. Le stockage saisonnier par chaleur sensible présente malgré tout des pertes thermiques assez importantes du fait de la longue durée de stockage qui engendre un surcoût de l'énergie stockée. Le stockage thermo-chimique sera alors particulièrement adapté au stockage saisonnier car il n'entraîne pas de perte avec le temps. Il ne sera en revanche pas envisagé pour le stockage à court terme car moins rapidement réversible qu'un système sensible [18].

Technologie de stockage	Principe	Remarques	Applications principales et/ou état de maturité
Chaleur sensible	Augmentation/ diminution de la température d'un matériau	Densité énergétique faibles puissances volumique Potentiellement importantes, pertes	Disponible sur le marché, surtout pour le stockage à court terme
Chaleur latente	Fusion/solidification d'un matériau	Densité énergétiques moyennes, problèmes de puissance thermique volumique	Disponible sur le marché mais amélioration encore souhaitées
Stockage thermochimique	Réaction chimique	Densité énergétiques théoriques Potentiellement élevées	Stockage à long terme

Tableau II.1. Technologies de stockage.

II.9. Quelques applications du stockage thermique

Parmi les applications usuelles du stockage thermique on peut citer [19] :

- la récupération dans les installations industrielles de la chaleur perdue pendant la durée de leur fonctionnement pour l'utiliser ultérieurement pour d'autres besoins.
- Le stockage sous forme thermique du surplus d'énergie électrique produite pendant les heures creuses pour couvrir des besoins qui auraient nécessités le recours à la consommation d'énergie pendant les heures de pointes où les appels en puissance peuvent dépasser les capacités des centrales.

- Le stockage de l'énergie frigorifique en froid industriel et en climatisation quand la capacité libre de production de froid en heures creuses peut être utilisée pour couvrir les besoins lors de pointes de consommation, comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.
- Le stockage de l'énergie produite dans les systèmes solaires passifs pendant le jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.
- le refroidissement des circuits électroniques ou le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à sur-dimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement.

L'utilisation d'un stockage d'énergie associé à ces circuits permet de faire face aux appels transitoires de puissance sans ce surdimensionnement.

- la gestion du confort thermique dans les bâtiments qui dépend non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant mais encore des températures des parois. C'est une des raisons pour laquelle dans ce cas le stockage par chaleur latente est attractif.

II.10. Principales techniques de stockage de l'énergie thermique

Un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique est illustré à la (Fig. II.7) :

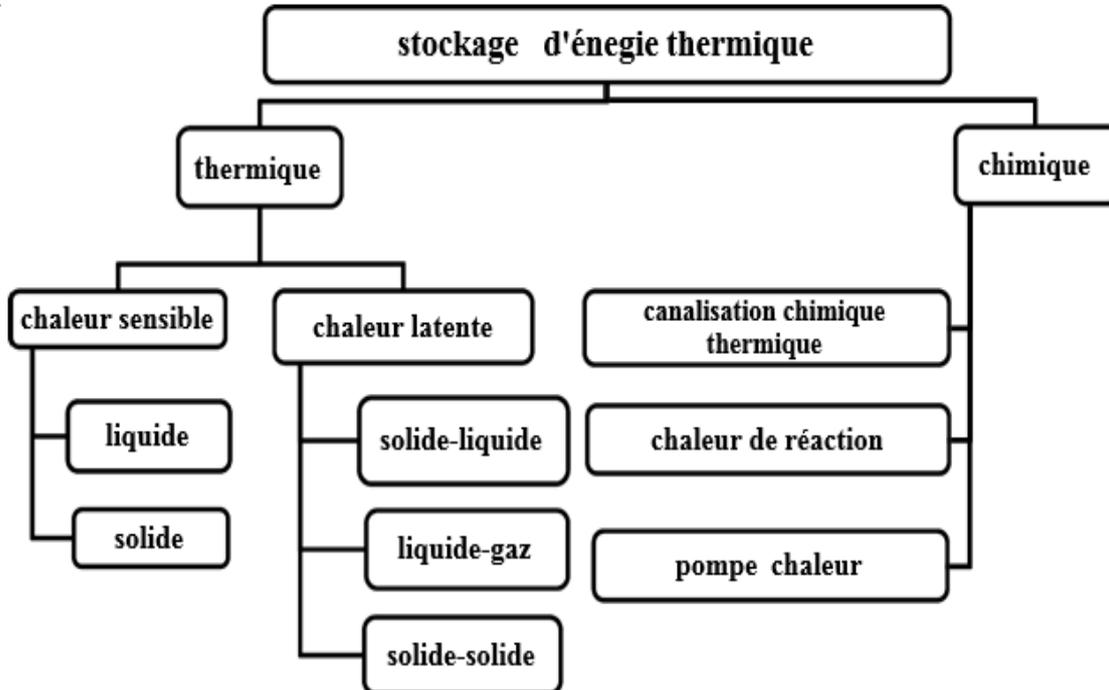


Fig. II.7. Principales techniques de stockage de l'énergie thermique [20].

II.10.1. Stockage thermique latente

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière.

La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation. Cette température correspondant à la température de la transition de phase.

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times \Delta h_f \quad \text{II.1}$$

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, Il faut porter le matériau de sa température initiale T_i à sa température de fusion T_f et l'on écrit :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times c_p \times (T_f - T_i) + m \times \Delta h_f \quad \text{II.2}$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée dans (Fig. II.8). Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

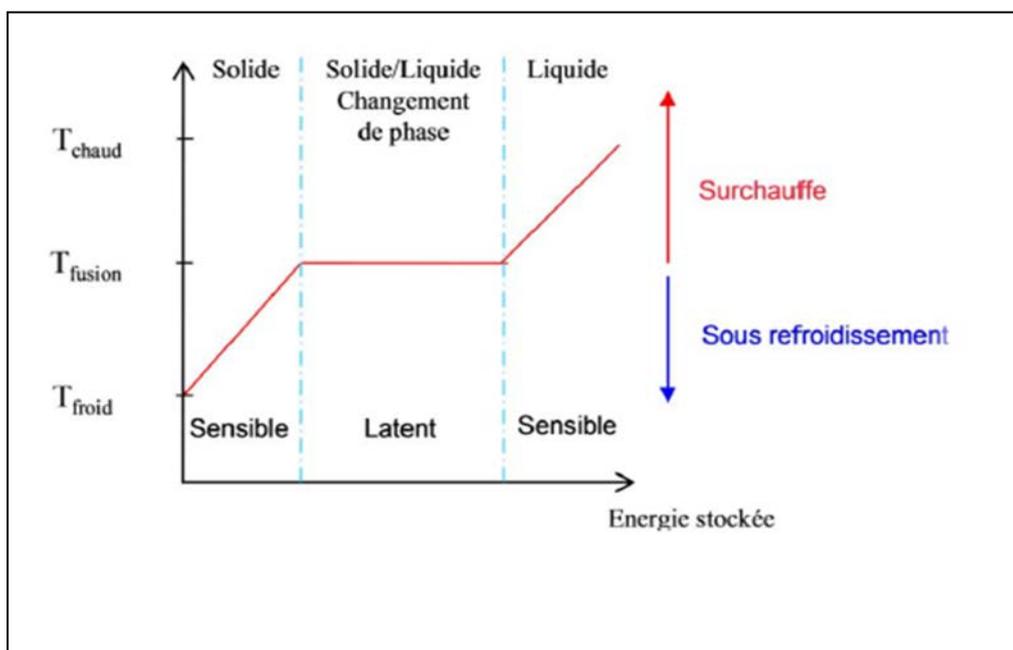


Fig. II.8. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [21].

II.10.2. Stockage thermochimique

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles. Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente. Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs.

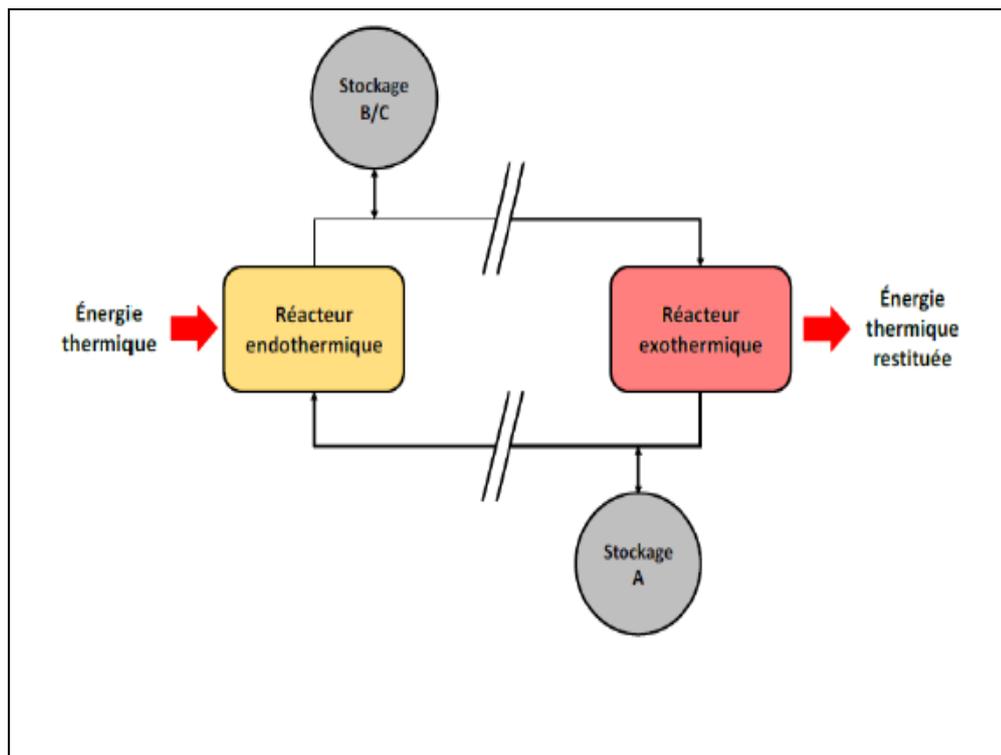


Fig. II.9. Schéma de principe du stockage thermochimique.

II.10.3. Stockage thermique sensible

Dans le stockage de chaleur sensible de l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide ou d'un liquide ; la température du matériau de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée, peuvent être répétés plusieurs fois en utilisant le système de stockage de chaleur sensible sans aucun problème. C'est le plus important avantage de cette méthode.

Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considérée comme un inconvénient pour ce système [22].

Dans ce système, la quantité de chaleur dépend de la capacité calorifique du support de stockage, du changement de température et de la masse du matériau de stockage. La chaleur sensible peut être stockée à l'aide d'un lit de roches ou galets, dans le sol, la brique, le sable, l'eau, l'huile et l'air [23].

Le stockage d'énergie thermique sensible implique un matériau qui ne subit aucun changement de phase. L'équation de base pour la quantité de chaleur stockée est donnée par :

$$\phi = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad \text{II.3}$$

Ou

$$\phi = \rho \times s \times v \times c_p \times \Delta T \quad \text{II.4}$$

Avec:

ρ est la masse volumique de l'air [Kg/m³].

s est la section de passage d'air [m²].

v est la vitesse de l'air [m/s].

c_p est la chaleur spécifique du l'air [J/kg.K].

ΔT est la variation de température de entrée et sortie [°C].

On remarque que la quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température.

Ce type de stockage serait donc intéressant uniquement pour des grands écarts de température.

On distingue les deux cas suivants :

- si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud.
- si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

Pour le stockage par chaleur sensible on utilise principalement des corps ayant des chaleurs spécifiques importantes comme par exemple des liquides tels que l'eau et des solides tels que des pierres.

On peut classer les supports de stockage de chaleur sensible comme suit :

- les supports de stockage liquide (eau, fluides à base d'huile, sel fondu, etc.).
- les supports de stockage solides (roches, le sable, etc.).

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le (tableau II.2).

Matériaux	Densité (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique Volumétrique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

Tableau II.2. Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [24].

II.10.3.1. Stockage sensible par liquide

Les liquides utilisés dans le stockage thermique sont abondants et économiquement compétitifs. Cependant, l'eau reste le liquide le plus utilisé pour des applications à basse température (25 – 90 °C). Pour une variation de température de 60 °C, l'eau stocke 250 kJ/kg, par conséquent, elle est largement utilisée dans les applications solaires destinées au chauffage des bâtiments et à l'eau chaude sanitaire [25]. Par contre son utilisation dans des applications à haute température est conditionnée par sa grande pression de vapeur qui présente un

inconvenient majeur. A cet effet, l'utilisation de grands réservoirs de stockage est recommandée.

D'autres liquides sont utilisés pour le stockage sensible, les plus usuels sont : les sels fondus et les huiles organiques [26]. Toujours conditionné par des problèmes de sécurité et de stabilité, l'utilisation de ces liquides nécessite des installations très sophistiquées du point de vue du contrôle [27].

Milieu de stockage	Température (K)	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m K)	Capacité calorifique (kJ/kg K)	Coût par kg (US\$/kg)	Coût par kWh (US\$/kWh)
Sel solaire HITEC	120-133	1990	0.6	-	-	-
Huile minérale	200-300	770	0.12	2.6	0.3	4.2
Huile synthétique	250-350	900	0.11	2.3	3	42
Huile de Silicone	300-400	900	0.1	2.1	5	80
Sels de Nitrite	250-450	1825	0.57	1.5	1	12
Sels de Nitrate	265-565	1870	0.52	1.6	0.5	3.7
Sels de Carbonate	450-850	2100	2	1.8	2.4	11
Sodium liquide	270-530	850	71	1.3	2	21

Tableau II.3. Principales caractéristiques des matériaux utilisés dans le stockage liquide.

II.10.3.2. Stockage sensible par solide

Contrairement au stockage par liquide, le stockage dans les milieux solides peut être utilisé à la fois pour des applications à haute et à basse température, sans se soucier du problème de la pression de vapeur dans le cas de l'eau et des limitations que présentent d'autres liquides de stockage (corrosion, stabilité, sécurité...). Une grande variété de matériaux solides est utilisée.

La fonte est le matériau le plus performant relativement à sa densité de stockage qui dépasse celle de l'eau [28]. Cependant ce dernier matériau reste très coûteux, en comparaison avec d'autres matériaux (béton, brique, pierre, sable...), et sa période de retour sur investissement est très importante. Pour des applications solaires, le béton et la pierre sont les matériaux les plus exploités et les plus adaptés pour des applications dans le domaine du bâtiment [29]. Par exemple, pour une variation de température de 50 °C, le béton et la pierre stockent environ 36 kJ/kg. En général, le stockage sensible par un solide nécessite un plus grand volume que le stockage par un liquide.

La figure II.10 illustre un exemple de comparaison de volume nécessaire au stockage pour la même quantité d'énergie stockée ($143,4 \cdot 10^8$ J).

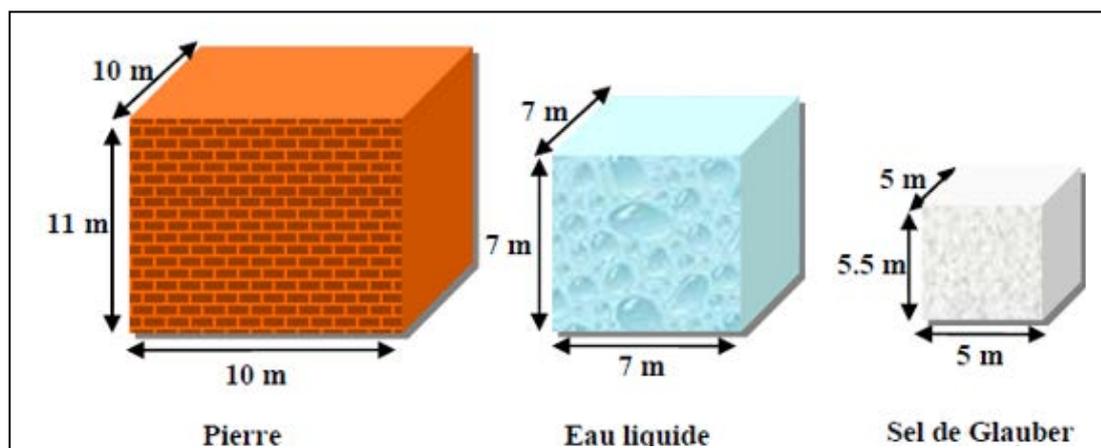


Fig. II.10. Volume nécessaire pour la même énergie stockée.

II.11. Procédés de stockage sensible solide

II.11.1. Lit fixe entassé (packed bed)

La technique des lits entassés consiste en un amas de matériau de stockage solide à travers lequel un fluide caloporteur peut circuler. Ce dernier traverse le lit de haut en bas assurant ainsi le transfert de chaleur au matériau pendant la période de chargement. Durant la période de décharge, le sens de l'écoulement du fluide

caloporteur est inversé. En général cette technique est utilisée avec un capteur solaire à air (Fig. II.11). Dans certaines configurations des conduites sont utilisées pour assurer le transport du fluide caloporteur.

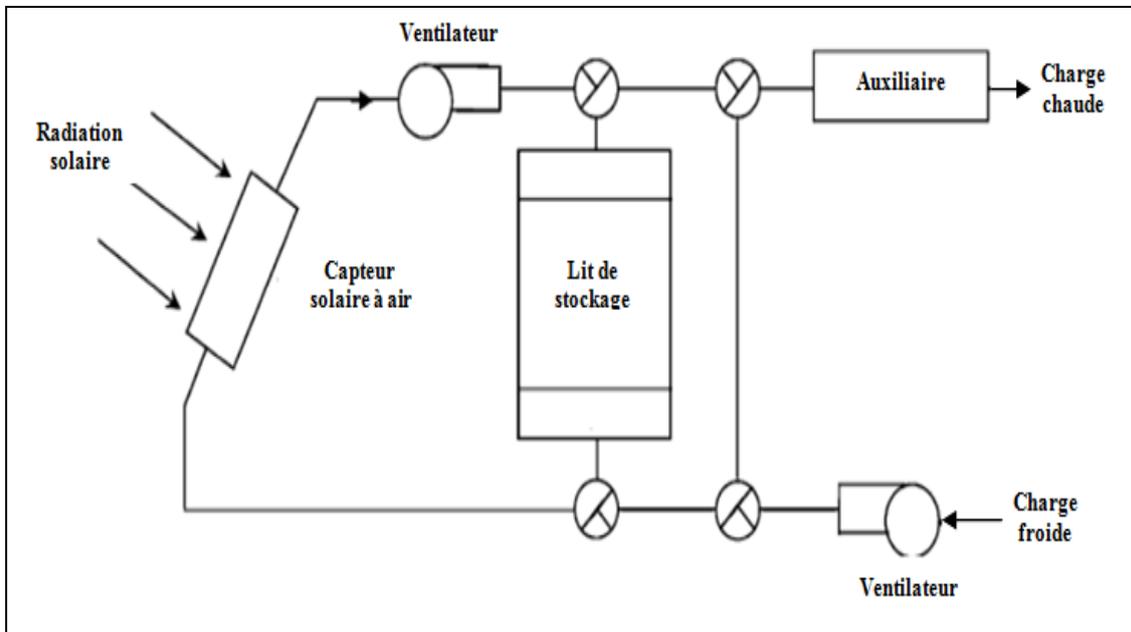


Fig. II.11. Schéma d'un système de stockage à lit entassé.

Les matériaux utilisés dans ce type de stockage sont généralement des matériaux granulaires tels que : les pierres, les roche, les sables...etc. Quelques métaux sont utilisés dans le cas où une importante conductivité thermique est exigée en faveur du coût [30].

Les paramètres optimales pour la conception d'un lit fixe sont : la vitesse d'air, les dimensions du réservoir de stockage, ainsi que celles des particules solides, et cela pour un rendement économique maximal.

Les lits fixes sont aussi utilisés dans des applications de séchage des produits agricoles, comme Le séchage en lit fixe par entrainement à l'air chaud est une technique de conservation très répandue dans les industries agro-alimentaires. Son contrôle et son optimisation nécessitent que soient connues les distributions de température et de teneur en eau dans le lit et ce, en fonction des conditions opératoires utilisées. Ces informations sont obtenues par la modélisation des

phénomènes de transfert de chaleur et de matière impliqués. Les modèles de séchage en lit fixe ont deux composantes. La première est le modèle au niveau du produit. Ce modèle permet de prévoir la façon dont la température et la teneur en eau du produit évoluent en chaque point du lit en fonction des conditions locales de température et d'humidité. La deuxième composante est le modèle au niveau du lit en entier, qui décrit la façon dont la chaleur et l'eau sont véhiculées par l'air de séchage au travers du lit.

II.11.2. Lit fluidisé

La fluidisation est un procédé qui consiste à mettre en suspension des particules solides (lit) sous l'action d'un courant fluide ascendant (Figure II.12). Cet état résulte de la compensation du poids des particules par l'action du fluide sur celles-ci. L'écoulement diphasique ainsi créé, présente une instabilité naturelle qui donne lieu à une dynamique complexe. Cette technique favorise d'avantage le transfert de chaleur entre les particules solides et le fluide, ce qui bénéficie pour les applications de stockage thermique, notamment les applications solaires (Figure II.13).

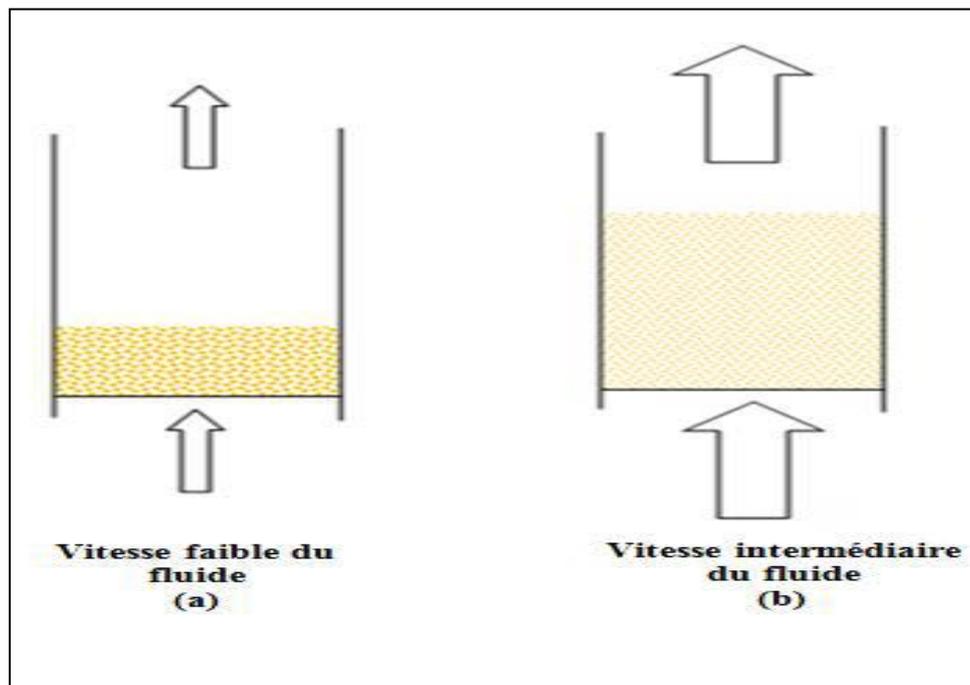


Fig. II.12. Principe de fluidisation (a) lit fixe, (b) lit fluidisé.

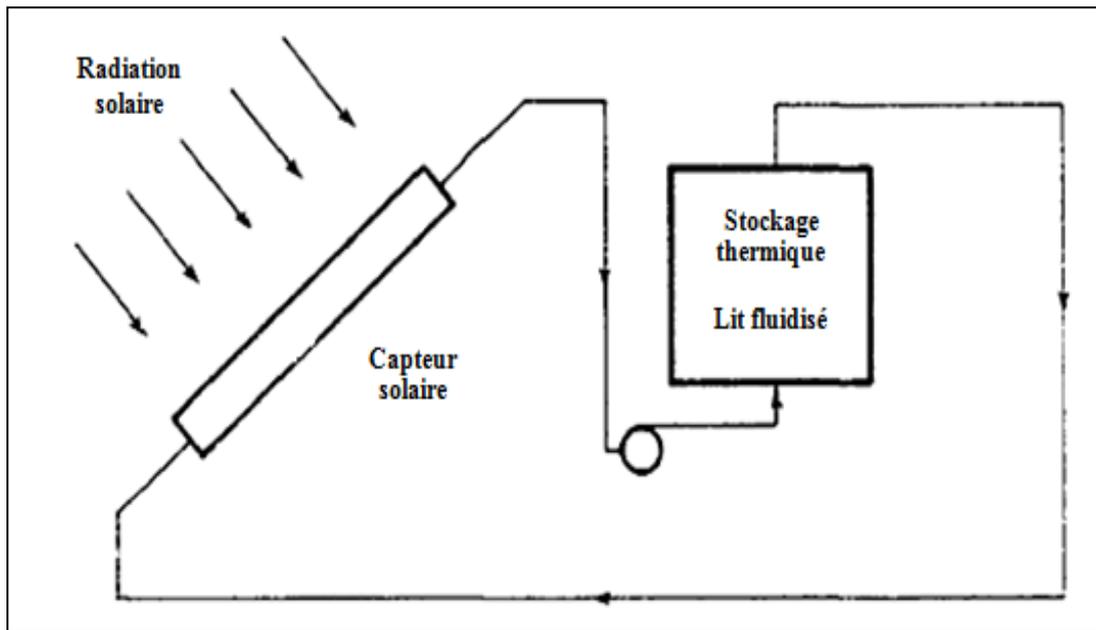


Fig. II.13. Schéma d'un système de stockage thermique à lit fluidisé.

De nombreux processus industriels qui utilisent les lits fluidisés mettent en jeu des phénomènes qui génèrent des transferts thermiques. Les processus les plus courants sont ceux qui font intervenir des réactions chimiques dont la combustion du charbon. Le stockage thermique fait partie des nouvelles applications des lits fluidisés. Trois types de transfert de chaleur sont recensés dans les lits fluidisés : entre particules, entre les particules et le gaz et enfin entre la colonne de fluidisation et l'extérieur. Le transfert de chaleur dans un lit fluidisé est la contribution des trois modes de transfert : conductif, convectif, et radiatif. L'importance d'un mode par rapport à un autre dépend de paramètres opératoires du lit fluidisé, tels que la vitesse de fluidisation, la taille et la nature des particules, et la température de la suspension. En effet, l'expérience a montré que les processus mis en jeu dépendent du régime de fluidisation considéré [31].

II.12. Comparaison des systèmes de stockage

Tous les systèmes de stockage sont utilisés selon trois étapes majeures : la charge, le stockage et la décharge. Un grand nombre de moyens de stockage peuvent être identifiés selon leurs propriétés, leur température d'utilisation, le type de stockage souhaité et le domaine d'application envisagé. Les stockages ont différents potentiels [32].

Pour sélectionner le type de stockage, il conviendra de regarder pour quelle application sera mis en œuvre. Par exemple, les systèmes latents et sensibles seront plutôt utilisés comme stockage tampon pour lisser la production ou différer l'utilisation de l'énergie. Alors que les stockages thermochimiques seront plus adaptés à un stockage de long terme ou inter-saisonnier qui emmagasinerait la chaleur produite en excès par certaines installations d'été et la restituer en hiver.

Par ailleurs, chaque système de stockage a un degré de maturité différent. Les systèmes de stockage sensible ont été expérimentés dans de nombreux prototypes ou à l'échelle d'une centrale solaire [33]. Les Matériaux à Changement de Phase sont mis en œuvre dans des applications pilotes qui émergent peu à peu dans le domaine du stockage thermique. On peut notamment citer l'exemple du projet ITES qui met en place un prototype de stockage latent utilisant du NaNO_3 , combiné à un étage sensible pour une centrale solaire à génération directe de vapeur [34]. De nombreux efforts de recherche perdurent cependant pour déployer de tels systèmes à échelle industrielle. Par ailleurs, par sa grande densité énergétique, le stockage thermochimique est prometteur mais n'est pour l'instant envisagé qu'à l'échelle du laboratoire étant donné la complexité de mise en œuvre.

De nombreuses recherches sont en cours pour développer de tels systèmes. Une comparaison de différents types d'TES en fonction de différents facteurs de performance illustré dans (Tableau II.4).

Paramètre de performance	Type de stockage d'énergie thermique		
	Sensible TES	Latent TES	TES chimique (Sorption et Thermochimique)
Plage de température	Jusqu'à : 1100°C (réservoirs d'eau) 500°C (aquifères et stockage souterrain) 4000°C (béton)	20-400°C (paraffines) 30-800°C (hydrates de sel)	20-2000°C
Densité de stockage	Faible (avec intervalle de température élevé) : 0,2 GJ/m ³ (pour les réservoirs d'eau typiques)	Modérée (avec intervalle de basse température) : 0,3-0,5 GJ/ m ³	Normalement élevé : 0,5-3 GJ/ m ³
Durée de vie	Longue	Souvent limité en raison du cycle des matériaux de stockage	Dépend de la dégradation des réactifs et des réactions secondaires

État de la technologie	Disponible dans le commerce	Disponible dans le commerce pour certaines températures et certains matériaux	Généralement non disponible, mais faisant l'objet de recherches et d'essais dans le cadre de projets pilotes.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Faible coût. -Fiable application. -Simple avec les matériaux disponibles. 	<ul style="list-style-type: none"> -Densité de stockage moyenne. -Petits volumes. -Faibles distances. -Possibilité de transport. 	<ul style="list-style-type: none"> -Densité de stockage élevée. -Faibles pertes de chaleur (stockage à température ambiante). -Longue durée de stockage. -Possibilité de transport longue distance. -Stockage d'énergie très compact.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Perte de chaleur importante au fil du temps (selon le niveau d'isolation). -Grand volume nécessaire. 	<ul style="list-style-type: none"> -Faible conductivité thermique. -Corrosivité des matériaux. -Pertes de chaleur importantes (selon le niveau d'isolation). 	<ul style="list-style-type: none"> -Coûts d'investissement élevés. -Complexité technique.

Tableau II.4. Comparaison de différents types d'TES en fonction de différents facteurs de performance [35].

Chapitre 3

III.1 Introduction

Notre travail consiste à étudier expérimentalement le stockage d'énergie thermique par chaleur sensible en utilisant des matériaux naturels disponible dans la région de Tlemcen. Le choix a été porté sur l'utilisation des pierres de cailloux de mer comme milieu de stockage Thermique. Ce chapitre présente les matériaux de stockage utilisés et les différentes étapes de la réalisation du banc d'essai avec les matériels utilisés.

III.2 Matériaux de stockage utilisés

L'homme a toujours stocké l'énergie sous forme de chaleur en faisant simplement chauffer une pierre au soleil et l'utiliser après pour le chauffage ou la cuisson. Dans le stockage solide, la fonte est le matériau le plus performant relativement à sa densité de stockage qui dépasse celle de l'eau. A basse et à haute température, ce matériau reste très coûteux, en comparaison avec d'autres matériaux (béton, brique, pierre, sable...), et sa période de retour sur investissement est très importante. Pour des applications solaires, le béton et la pierre sont les matériaux les plus exploités et les plus adaptés pour des applications dans le domaine du bâtiment. Par exemple, pour une variation de température de 50 °C, le béton et la pierre stockent environ 36 kJ/kg.

La technique des lits thermiques entassés consiste d'une masse de matériau de stockage solide à travers lequel un fluide caloporteur peut circuler. Ce dernier traverse le lit assurant ainsi le transfert de chaleur au matériau pendant la période de chargement. Durant la période de décharge, le sens de l'écoulement du fluide caloporteur est inversé. En général cette technique est utilisée avec un capteur solaire à air. Les matériaux utilisés dans ce type de stockage sont généralement des matériaux granulaires tels que : les pierres, les roche, les sables...etc. Quelques métaux sont utilisés dans le cas où une importante conductivité thermique est exigée en faveur du coût.

Les galets de mer sont des produits d'érosion qui sont transportés par des rivières ou des fleuves. Par frottement avec les autres fragments et surtout avec le

sable contenu dans l'eau, les roches deviennent lisses. Ils prennent peu à peu leur forme arrondie

Notre travail consiste à étudier le stockage d'énergie thermique par la chaleur sensible en utilisant des galets (pierres de cailloux de mer) comme matériaux de stockage. Ces galets sont recueillis au niveau de la plage d'Oued Abdallah région de Ghazaouet située à l'ouest de Tlemcen à une latitude de 35° et une longitude de 1.52° .

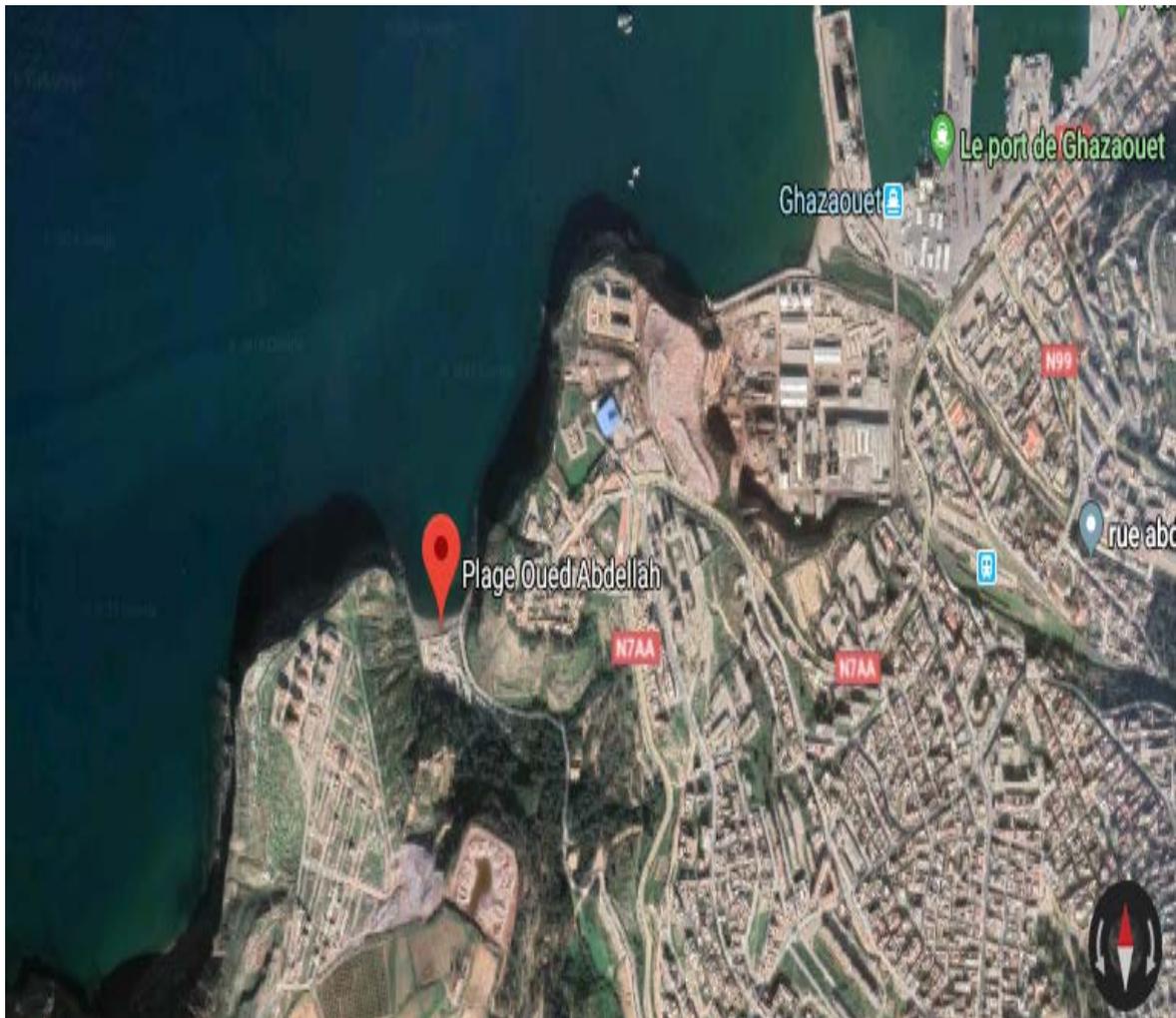


Fig. III.1. Photo géographique de plage Oued Abdallah.

III.2.1. Présentation des matériaux de stockage utilisés

Trois échantillons de galets de mer (1, 2 et 3) de différentes formes et états de surfaces ont été sélectionnés pour les utiliser dans nos expériences en tant que matériaux de stockage de chaleur (Figure III.1).



Fig. III.2. galet de cailloux de mer.

III.3. Partie expérimentale

III.3.1. Conception du banc d'essai

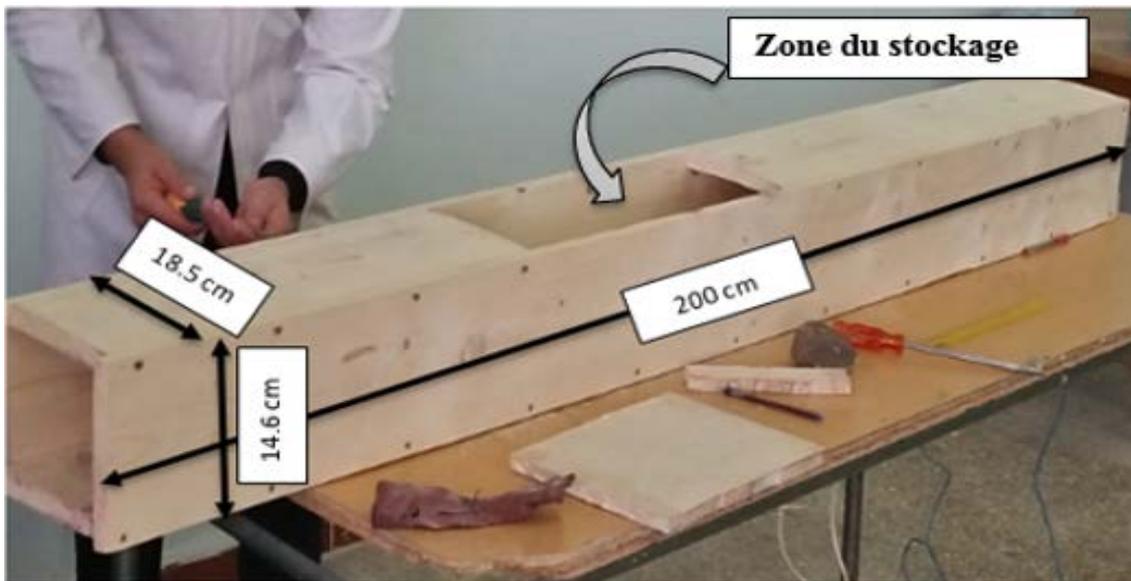


Fig. III.3. Montage du canal de stockeur.

Le banc d'essai a été réalisé au sein du laboratoire de recherche ETAP (Faculté de technologie, université de Tlemcen) pour étudier l'efficacité du stockage et déstockage thermique des galets sélectionnés.

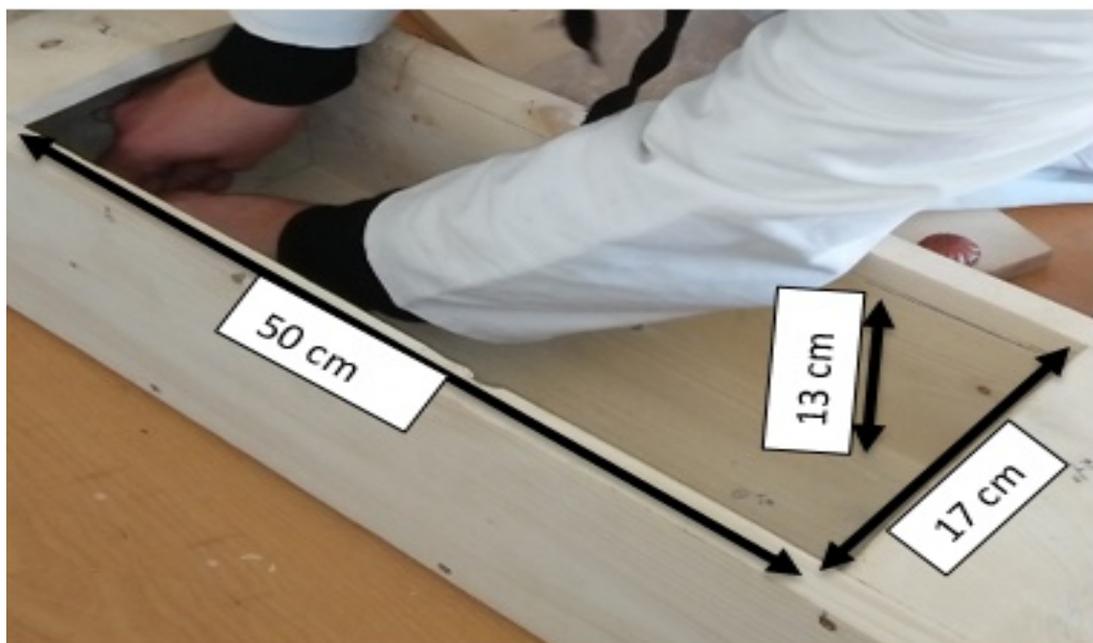


Fig. III.4. Réalisation de la zone de stockage.

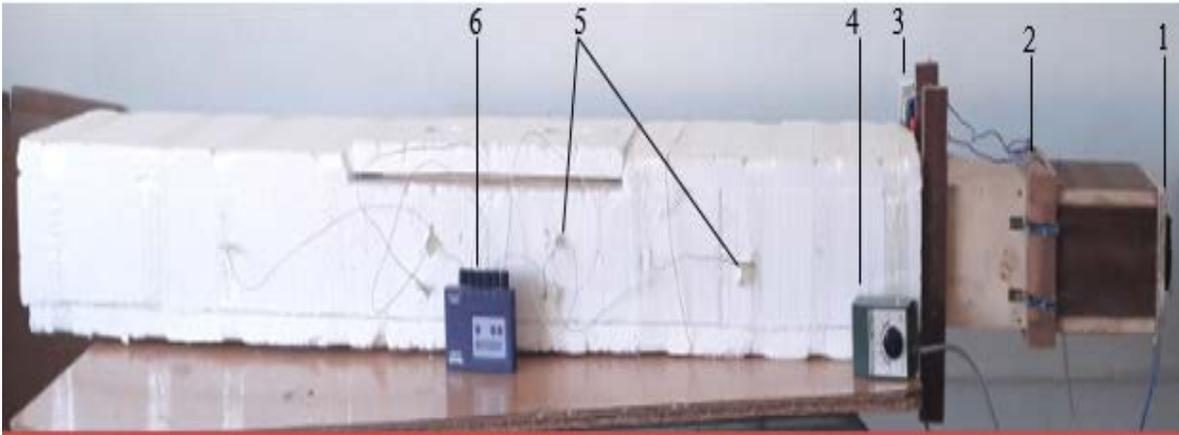
Le banc d'essai est un canal en bois de forme rectangulaire d'une longueur de 200 cm, une largeur de 14.6 cm et une épaisseur de 2 cm (figure III.3). Une partie du canal est accessible par le haut afin de pouvoir placer les galets de mer, c'est la zone de stockage thermique appelée lit thermique (Figure III.4). Cette zone est située à 90 cm de l'entrée du canal, de dimensions 50 cm de longueur, 17 cm de largeur et 13 cm de hauteur. Pour minimiser les pertes de chaleur pendant les manipulations, les parois du canal sont couvertes avec du polystyrène d'épaisseur de 4 cm (Figure III.5).



Fig. III.5. Isolation de canalisation.

III.3.2. Matériels utilisés

Pour le fonctionnement du banc d'essai réalisé, plusieurs matériels ont été exploités pour assurer le stockage et déstockage de l'énergie thermique ainsi que l'instrumentation des mesures (Figure III.6).



- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 1 : ventilateur | 4 : variateur du ventilateur |
| 2 : résistance | 5 : thermocouple |
| 3 : variateur de résistance | 6 : enregistreur des températures |

Fig. III.6. Réalisation expérimentale du stockage thermique.

a. Ventilateur



Fig. III.7. Ventilateur et son support en bois pour la circulation d'air.

À l'entrée du canal un ventilateur est placé pour assurer la circulation de l'air. Le ventilateur est placé dans un support (boîte) en bois est fixé à l'entrée du stockeur (Figure III.7). Un variateur (potentiomètre électrique positionnel) est utilisé pour varier la vitesse du ventilateur et contrôler ainsi le débit d'air (Figure III.8).

b. Potentiomètre électrique

Fig. III.8. Potentiomètre électrique positionnel.

Le potentiomètre électrique positionnel est un type de résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes. Ce système permet de recueillir, entre la borne reliée au curseur, entre les bornes reliées au curseur et une des deux autres bornes, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance.

c. Résistance chauffante

Une résistance électrique a été fabriquée et placée entre le ventilateur et l'entrée du canal qui sert à chauffer l'air. La résistance est fabriquée avec un fil électrique à ressorts et vissée dans un cadre en bois dur qui résiste aux températures élevées. Il est de longueur de 16.5 cm, de largeur 14 cm et d'épaisseur de 3 cm. (Figure III.9).



Fig. III.9. Résistance électrique chauffante.

d. potentiomètre

Un potentiomètre électrique est utilisé pour varier la puissance thermique développée par la résistance (Figure III.10). Cela permet de contrôler la température de l'air à l'entrée.



Fig. III.10. Interrupteur variateur.

e. Anémomètre

Un anémomètre à hélice est utilisé pour mesurer la vitesse de l'air dans le canal (Figure III.11). Les caractéristiques techniques de l'anémomètre sont les suivantes :

- Vitesse de l'air $0 \div 45$ m/s
- Grand écran LCD à 4 chiffres (affichage à cristaux liquides)

Vu la nature poreuse du lit thermique, il est assez difficile de mesurer la vitesse de l'air dans le canal derrière le lit. Cette mesure nous permet de détecter la vitesse minimale capable de vaincre les frottements dans le lit et assurer la circulation minimale de l'air.



Fig. III.11. Anémomètre.

f. Eprouvette graduée

L'éprouvette graduée est constituée d'un cylindre vertical gradué, ouvert en haut. Les capacités usuelles sont de 2 [L] (Figure III.12). Elle a été utilisée pour graduer le bécher.



Fig. III.12. Eprouvette et Becher.

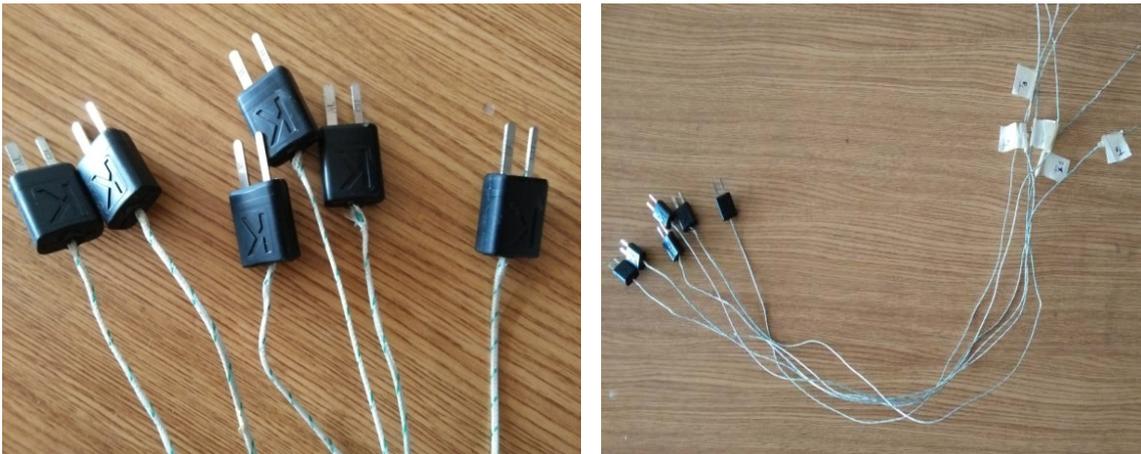
g. Thermocouple de type K

Fig. III.13. Thermocouple de type K.

Un thermocouple de type K peut être utilisée pour mesurer la température de l'air ou du gaz. Elle peut être fixée à des tuyaux ou intégrée à des objets que vous

souhaitez mesurer. Il peut également être utilisé dans des liquides non corrosifs, tels que de l'eau contenant peu de sel ou d'acide. Le capteur se trouve à l'extrémité d'une sonde à fil de 3 m de long, recouverte d'un revêtement plastique, cet isolant peut être utilisé jusqu'à 204 degrés Celsius. Le thermocouple comporte un connecteur miniature de type k qui fonctionnera avec les thermomètres numériques de type K. Ce thermocouple offre une lecture rapide de la température. Temps de réponse thermique est 1second.

h. Enregistreur de température

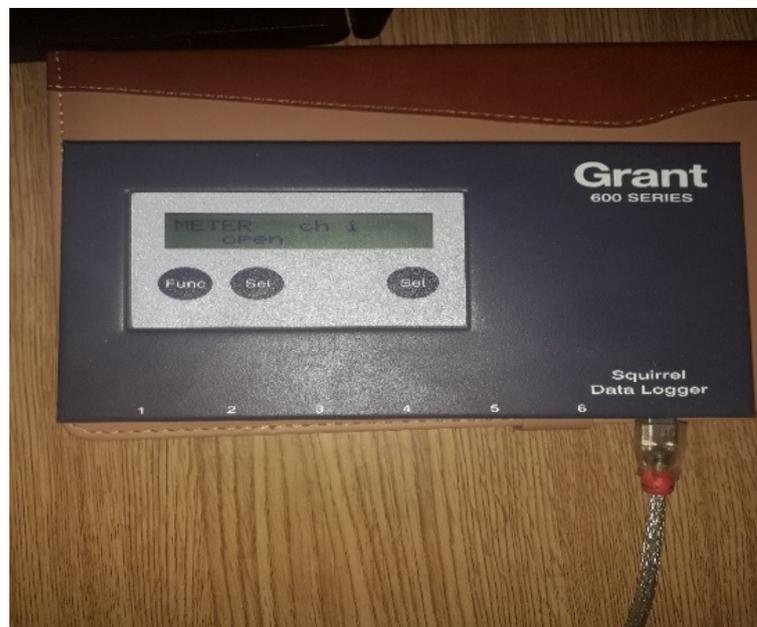


Fig. III.14. Enregistreur de température.

L'appareil d'enregistrement des températures (Grant 600 séries) mesure et enregistre au même temps les températures de chaque position des thermocouples pendant toute la période de fonctionnement du banc (stockage et déstockage) (Figure III.14).

- Détecte automatiquement la présence des capteurs
- 6 canaux pour thermocouples de type K ou T
- Intervalle de température mesurée est entre -200 à 1 300 ° C
- Rapide et facile à programmer via trois boutons poussoirs et écran, ou via PC

- Démarrer et arrêter la journalisation à des heures spécifiques ou à certains niveaux de température
- Une mémoire flash interne fournit jusqu'à 250 000 lectures de données sécurisées.
- Connectivité USB au PC
- Heure et date rapportées à chaque lecture

i. Emplacement des thermocouples sur le banc d'essai

L'évolution de la température est enregistrée à l'aide des thermocouples type K placés dans des différents endroits du stockeur et relié à un enregistreur.

L'emplacement des thermocouples a été fixé après plusieurs tests pour choisir les positions les plus adaptées dans le stockeur. Six (06) thermocouples ont été fixés et liés directement à un enregistreur qui mesure et enregistre les températures avec une fréquence d'une mesure par minute. $T_{\text{entrée}}$ et T_{sortie} désignent les températures de l'air à l'entrée et la sortie du stockeur. T_1 , T_2 , T_3 et T_4 désignent les différentes températures positionnées dans le lit thermique (matériau de stockage) (Figure III.15).

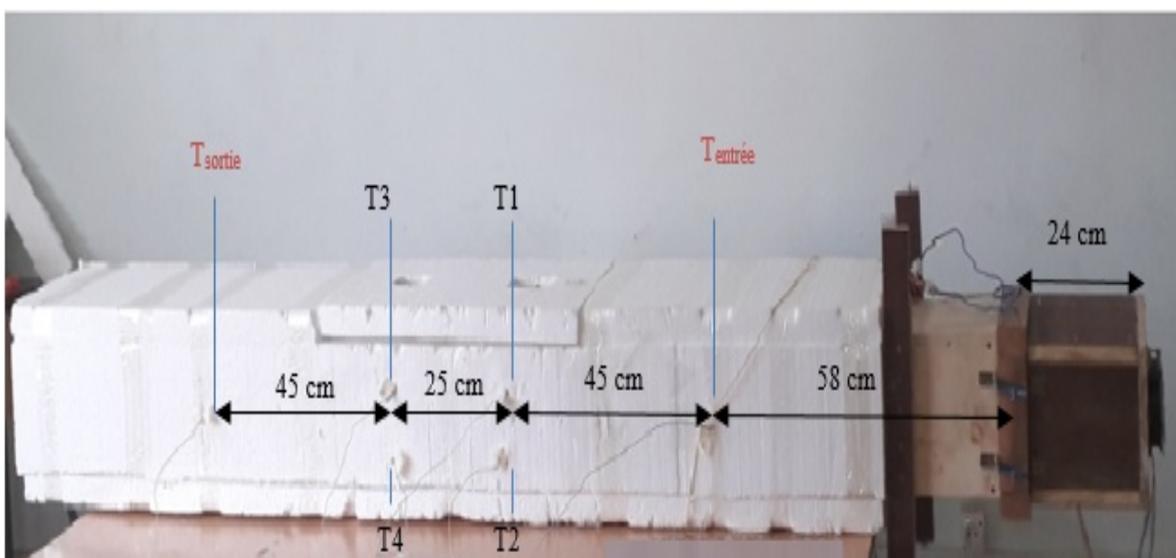


Fig. III.15. Emplacement des thermocouples.

III.4 Expériences effectuées

Les expériences menées consistent à étudier le comportement thermique du stockeur (évolution temporelle de la température du matériau de stockage et celle de l'air à l'entrée et la sortie du canal) durant tout le cycle stockage-déstockage.

Le stockeur fonctionne en position vertical et le ventilateur et la résistance se trouvent à l'extrémité inférieure du canal. Donc, l'écoulement d'air a une direction verticale du bas vers le haut. Le matériau de stockage (galet de mer) est placé dans le lit thermique (zone de stockage) du stockeur avec une masse bien définie.

Pendant la phase de la charge, les expériences commencent par l'allumage du ventilateur pour assurer un débit d'air constant traversant le canal et le lit thermique. Ensuite, la résistance chauffante est allumée pour chauffer l'air et démarrer la phase de stockage. A la fin de cette étape, la résistance chauffante est éteinte pour commencer la phase de décharge et récupérer la chaleur stockée dans les galets de mer.

a. Variation du débit d'air

La zone du stockage (lit thermique) est remplie par une certaine masse de pierres de même nature créant une porosité égale à 0.5131. Cette porosité est calculée en mesurant le rapport du volume occupé par les pierres et celui du lit thermique. Pour voir l'effet du débit d'air sur les performances thermique du stockeur, trois vitesses d'air ont été sélectionnées.

Le débit massique de l'air est calculé par l'expression suivante :

$$\dot{m} = \rho_{air} \times S \times V_{air} \quad \text{III.1}$$

Où ρ_{air} est la masse volumique de l'air, S est la section de passage d'air

V_{air} est la vitesse de l'air.

$$\rho_{air} = 0.9859 \text{ kg/m}^3$$

Trois vitesses d'air ont été fixées durant les différentes manipulations 0.25, 0.36 et 0.40 m/s.

$$S = L \times H \quad \text{III.2}$$

Où L est longueur, H est la largeur.

$$S = 0.17 \times 0.13 = 0.0221 \text{ m}^2$$

❖ Ces vitesses assurent les débits suivants :

$$\dot{m} = 0.00544 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = 0.00780 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} = 0.00870 \text{ kg/s}$$

b. Variation de la porosité

Pour observer l'influence de la porosité sur le comportement thermique de stockeur et sur la chaleur stockée et déstockée, nous avons varié la quantité (la masse) de pierres utilisées afin d'avoir les valeurs de la porosité suivantes : 0,5131, 0,6561 et 0,7918.

Une des principales propriétés structurelles d'un milieu poreux est, sans aucun doute, sa porosité : il s'agit du rapport entre le volume de la phase fluide (volume des pores) et le volume total du milieu.

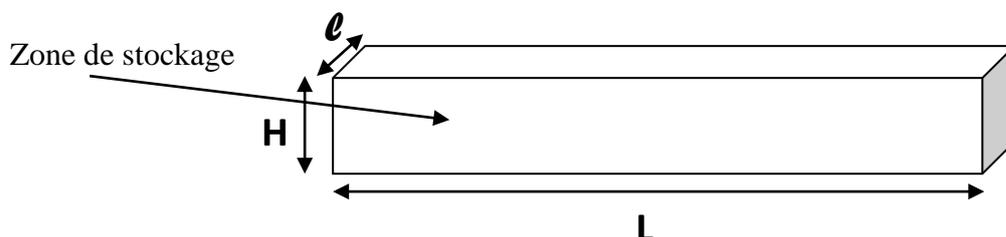
$$\varepsilon = \frac{v_{pores}}{v_{tot}} = 1 - \frac{v_{solid}}{v_{tot}} \quad \text{III.3}$$

Ou, ε est la porosité du milieu, v_{pores} est le volume des pores, v_{tot} est le volume total, v_{solid} est le volume de la phase solide du milieu poreux.

✓ **Calcul du volume total v_{tot} :**

$$v_{tot} = L \times l \times H \quad \text{III.4}$$

Où, L est la longueur, l est la largeur et H est la hauteur de zone de stockage



$$v_{tot} = 50 \times 17 \times 13 = 11050 \text{ cm}^3$$

✓ **Calcul du volume de la masse de la pierre v_{solid} :**

Pour mesurer le volume (v_{solid}) d'un échantillon de pierre, on utilise un bécher (récipient gradué) rempli d'eau de volume initial v_0 , en ajoutant progressivement la masse de matériau dans le bécher, le volume du mélange eau et pierre atteint le niveau v_1 , la quantité $v_1 - v_0$ représente le volume de la masse de pierre (figure III.16).

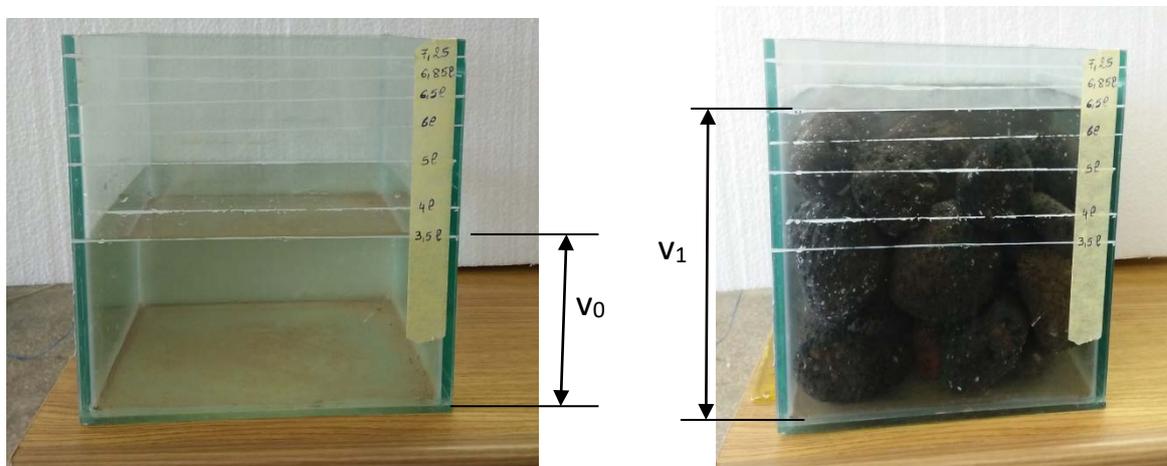


Fig. III.16. Mesure de la masse de la pierre.

Afin de varier la porosité, Nous avons utilisé trois configurations (masse de pierres) différentes.

Ces configurations permettent les volumes suivants :

- La configuration 1 : $m_1 = 12.96 \text{ kg}$; $v_{\text{solid}} = 5380 \text{ cm}^3$
- La configuration 2 : $m_2 = 9.600 \text{ kg}$; $v_{\text{solid}} = 3800 \text{ cm}^3$
- La configuration 3 : $m_3 = 6.250 \text{ kg}$; $v_{\text{solid}} = 2300 \text{ cm}^3$

✓ **Calcul de porosité**

$$\text{Pour } m_1 = 12.96 \text{ kg ; } \varepsilon_1 = 1 - \frac{5380}{11050} = 0,5131$$

$$\text{Pour } m_2 = 9.600 \text{ kg ; } \varepsilon_2 = 1 - \frac{3800}{11050} = 0,6561$$

$$\text{Pour } m_3 = 6.250 \text{ kg ; } \varepsilon_3 = 1 - \frac{2300}{11050} = 0,7918$$

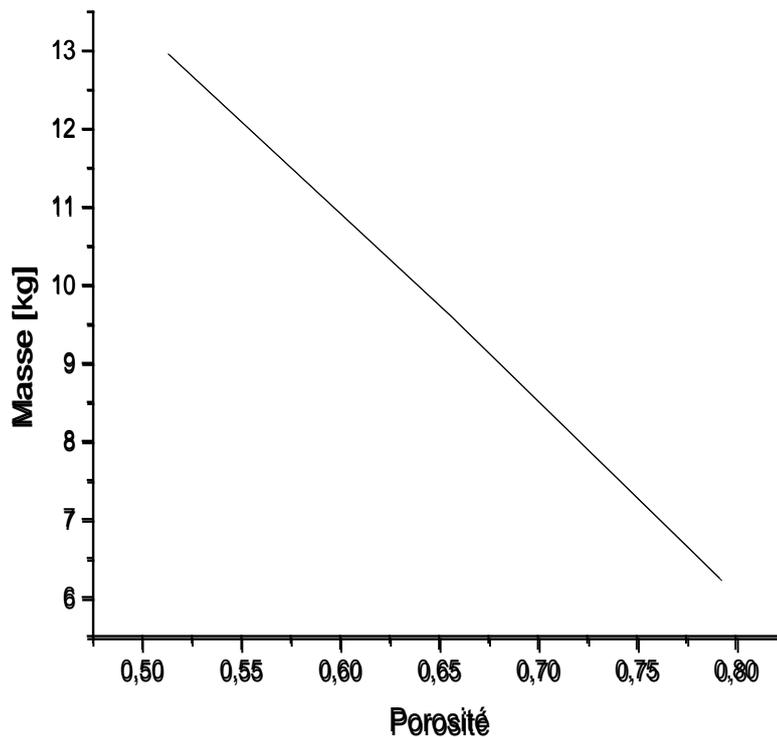


Fig. III.17. Profil de la masse des pierres en fonction de la porosité.

c. Changement de matériau

On a utilisé trois échantillons de galets de mer (1, 2 et 3) de différentes formes et états de surfaces dans nos expériences en tant que matériaux de stockage de chaleur afin d'avoir leur influence sur le comportement thermique du stockeur.

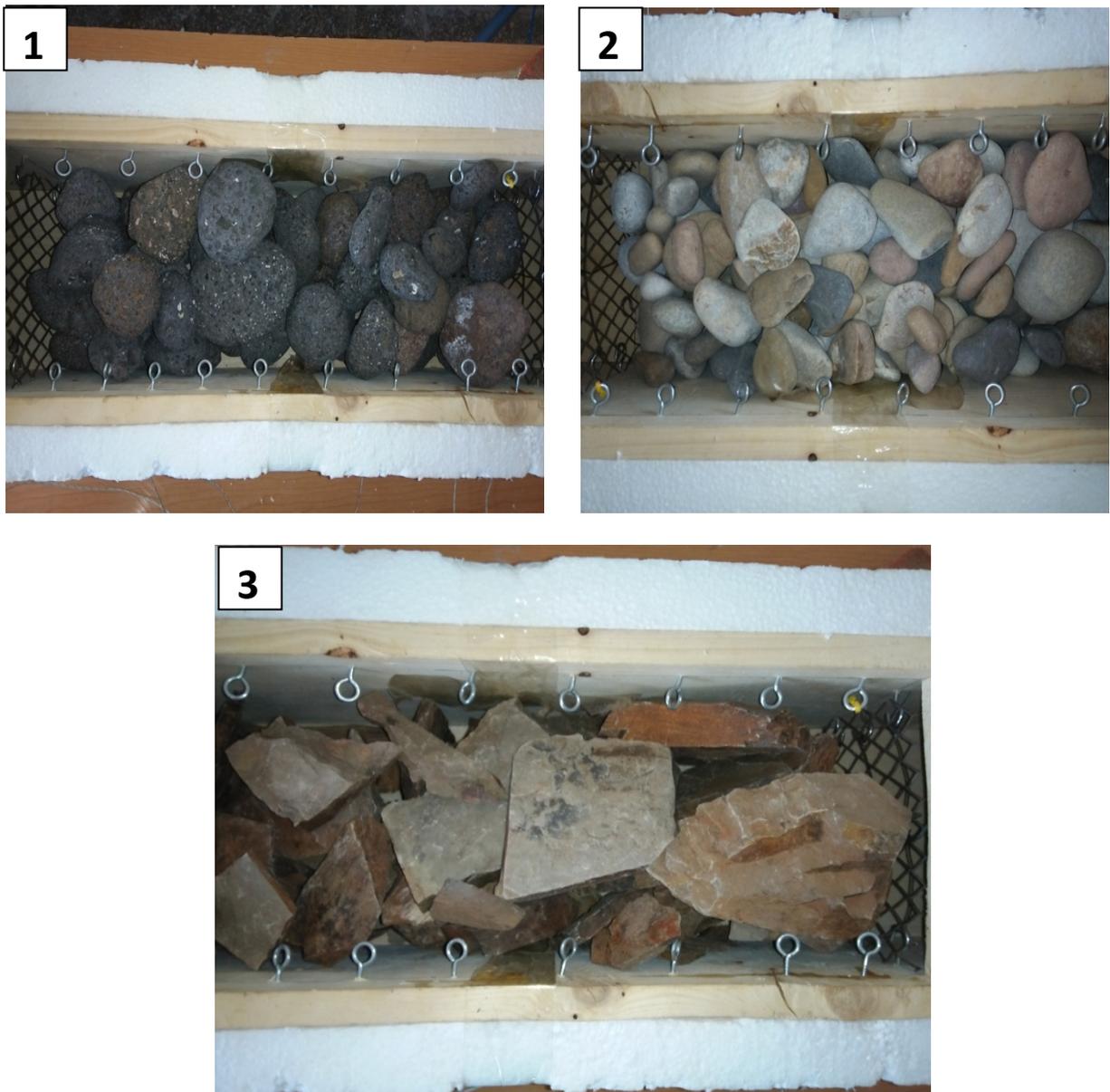


Fig. III.18. Emplacement des matériaux dans la zone de stockage.

III.5. Estimation de température de sortie

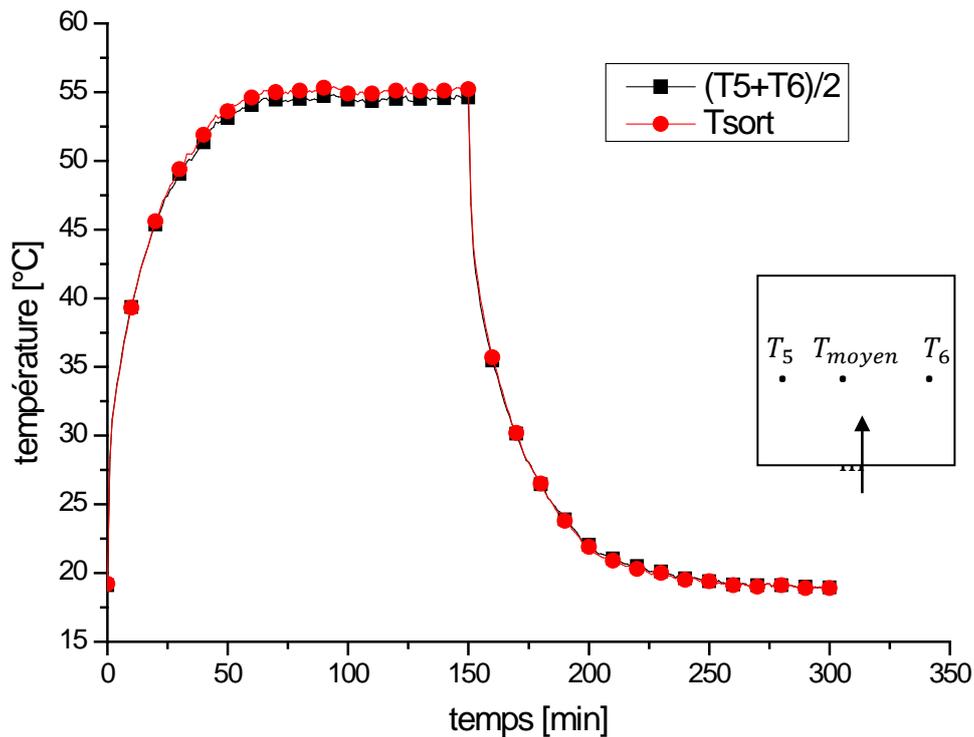


Fig. III.19. Evolution temporelle de la température de l'air à la sortie du canal (0.0078 kg/s).

La (figure III.19) montre l'évolution temporelle de la température de l'air à la sortie du canal pour un débit de 0.0078 kg/s. Afin de mieux mesurer la température de l'air à la sortie du canal, deux positions derrière le matériau de stockage (distance de 140 cm de l'entrée du canal) ont été choisies T_6 et T_5 (Figure III.19). La température finale enregistrée est la moyenne arithmétique entre les deux températures

$$T_{moy} = (T_5 + T_6)/2 \quad \text{III.5}$$

En comparant cette température avec la température mesurée à l'axe T_{sort} (Figure III.19), il est observé que l'écart relatif est de l'ordre (0.36 %). Ainsi, la mesure de température de l'air à la sortie est choisie tout simplement à la position axiale T_{sort} .

III.6. Essais préliminaires et les problèmes

Après le montage du banc d'essai qui a permis d'étudier le phénomène de stockage thermique par chaleur sensible, on a trouvé certains problèmes dans le lancement des manipulations.

- 1^{ère} problème : fabrication de la résistance chauffante

Une brique de maçonnerie a été utilisée comme support de la résistance électrique placée à l'entrée du banc d'essai. Au début de la charge, la brique absorbe et stocke une bonne quantité de chaleur. Lors de la phase de décharge, la brique libère son énergie stockée entraînant un déphasage de refroidissement assez considérable. Comme solution, on propose de fixer le fil de la résistance sur un support en bois rouge (Figure III.20).



Fig. III.20. Résistance avec brique

- 2^{ème} problème : Néanmoins, l'utilisation du bois rouge a entraîné sa brûlure (Figure III.21). La solution finale porte sur l'utilisation d'un bois très dure comme celui de type chêne.



Fig. III.21. Inflammation de résistance

- 3^{ème} problème : durant les premiers essais, les manipulations ont été réalisées sans aucune isolation supplémentaire. Il a été observé que la température à l'entrée ne dépasse pas 68°C. Ainsi, les pertes thermiques du banc sont jugées importantes. Pour vaincre ce problème, le banc a été isolé par une couche supplémentaire en polystyrène de 4 cm d'épaisseur (figure III.22).



Fig. III.22. Banc d'essai sans et avec polystyrène

Chapitre 4

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus au cours des expériences effectuées et la discussion des différents phénomènes thermiques remarqués afin de mieux comprendre le processus de stockage et de déstockage par la chaleur sensible. Différents types de roches solides naturelles sont testées comme un milieu de stockage thermique.

Plusieurs essais tests ont été effectués au début des expériences afin d'assurer le bon fonctionnement de nos expériences, il s'agit de :

- L'emplacement des thermocouples ;
- La puissance de la résistance qui chauffe l'air d'entrée ;
- La vitesse d'air de circulation ;
- L'emplacement du matériau de stockage dans la canalisation ;
- La porosité minimale du matériau de stockage qui assure la circulation de l'air.

Le fait de travailler avec de la pierre rend le positionnement des thermocouples dans l'endroit désiré difficile. De ce fait, les positions des thermocouples seront légèrement modifiées à travers les différentes expériences. Ainsi les comparaisons des résultats seront plus basées sur la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie.

IV.2. Comportement thermique du stockeur

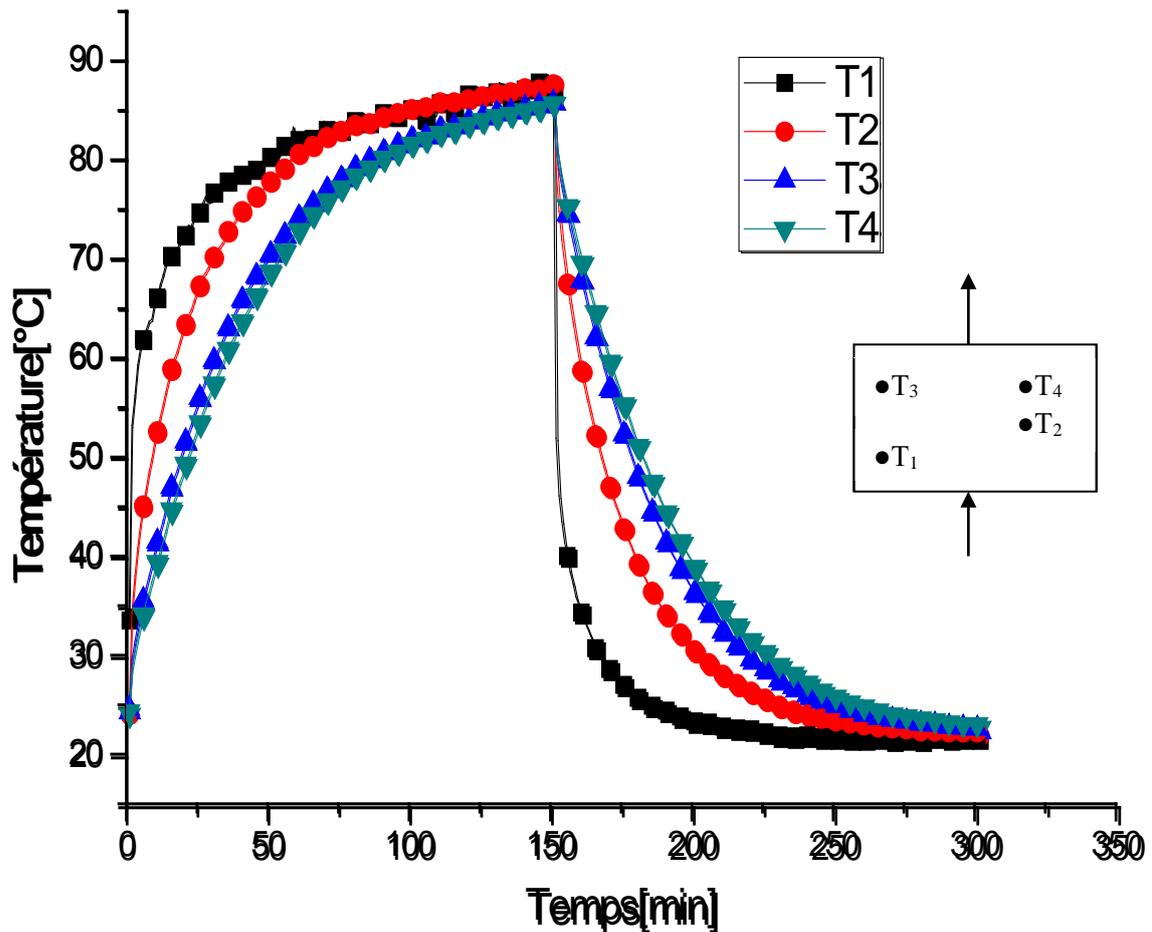


Fig. IV.1. Evolution temporelle de la température du matériau de stockage pour un débit de 0.0078 kg/s.

La Figure IV.1 montre l'évolution de la température du matériau de stockage durant le cycle complet (stockage-déstockage) pour un débit de 0.0078kg/s.

Le canal est placé verticalement et la zone de stockage est remplie par le matériau1.

Durant la phase de stockage, les températures T_1 , T_2 , T_3 et T_4 augmentent exponentiellement en fonction du temps. Après 4 min, elles atteignent 59.3, 40.8, 32.9 et 31.7°C, respectivement. Cependant, la vitesse d'échauffement au niveau de T_1 est plus importante dont la valeur atteint (à 78 min) 84°C. Ensuite, T_2 augmente moins rapidement et atteint 83.25°C à cet instant. Cela est dû aux positions de T_1 et

T_2 qui se trouvent plus proche à l'arrivée de l'air chaud. Après, la vitesse d'échauffement diminue jusqu'à la fin du stockage (à 150min) et les valeurs se stabilisent autour de 87.5°C . Les températures T_3 et T_4 augmentent moins rapidement pendant toute la période de stockage d'une évolution presque identique et atteignent 85.8 et 82.5°C respectivement à la fin.

Durant la phase de déstockage, la température T_1 diminue rapidement et atteint 21.7°C à la fin du processus. La température T_2 diminue moins rapidement et atteint 22.1°C à la fin.

Les températures T_3 et T_4 diminuent d'une façon assez identique pour atteindre les valeurs de 22.6 et 22.9°C respectivement à la fin du déstockage. Parce que T_3 et T_4 sont placées au même plan vertical et à deux positions horizontales différentes.

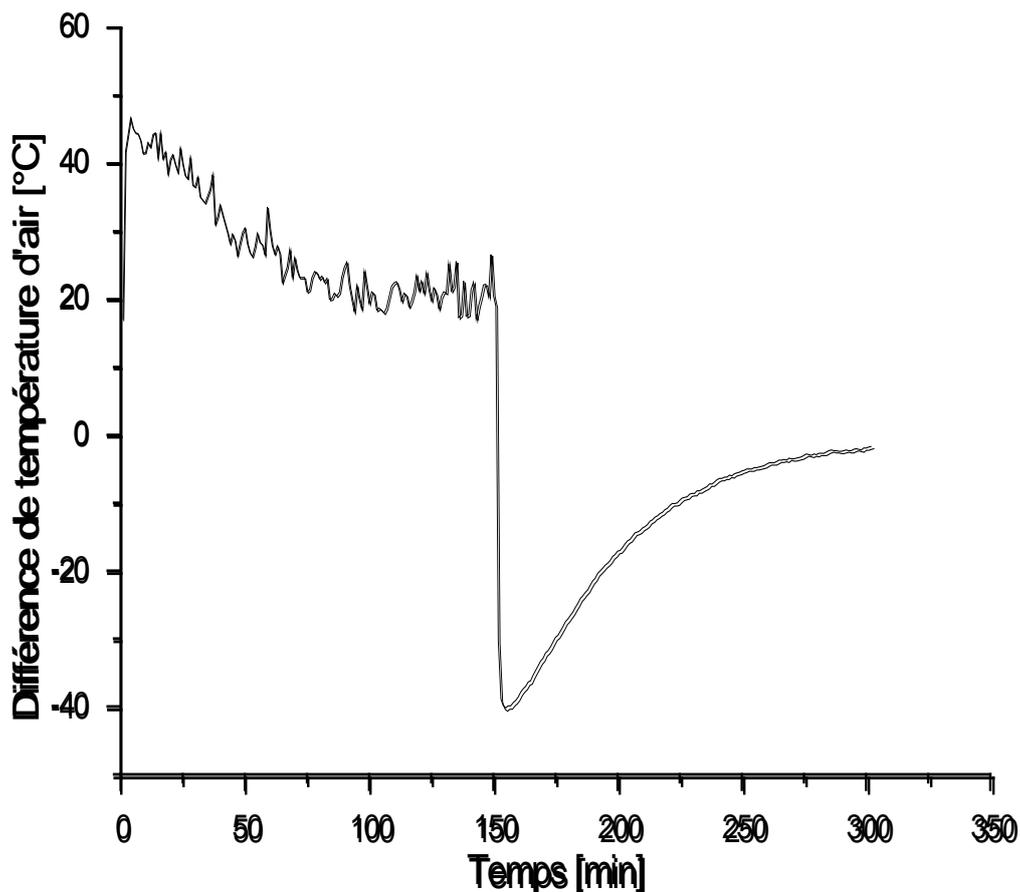


Fig. IV.2. Evolution temporelle de la différence de température

d'entrée et de sortie de l'air.

La figure IV.2 montre l'écart de température d'air entre l'entrée et la sortie pour un débit 0.0078 kg/s.

Pendant la phase de stockage la température de l'air à l'entrée devient supérieure à celle à la sortie et l'écart de température augmente. Jusqu'à atteindre son maximum de 46.7°C à 4 min. Ensuite, l'écart de température diminue pour atteindre son minimum de 20.6 °C après 150 min (2h30min). Ce grand écart montre que le stockeur est encore capable de stocker davantage de chaleur. Il est donc destiné à une application de long période.

Durant la phase de déstockage, la température de sortie devient plus importante que celle à l'entrée et l'écart de température évolue négativement. En valeurs absolues, il est maximal au début (40.2°C à 155min) de la décharge et diminue exponentiellement pour atteindre 1.7 °C après 300 min.

IV.3. Effet du débit d'air sur le comportement thermique du stockeur

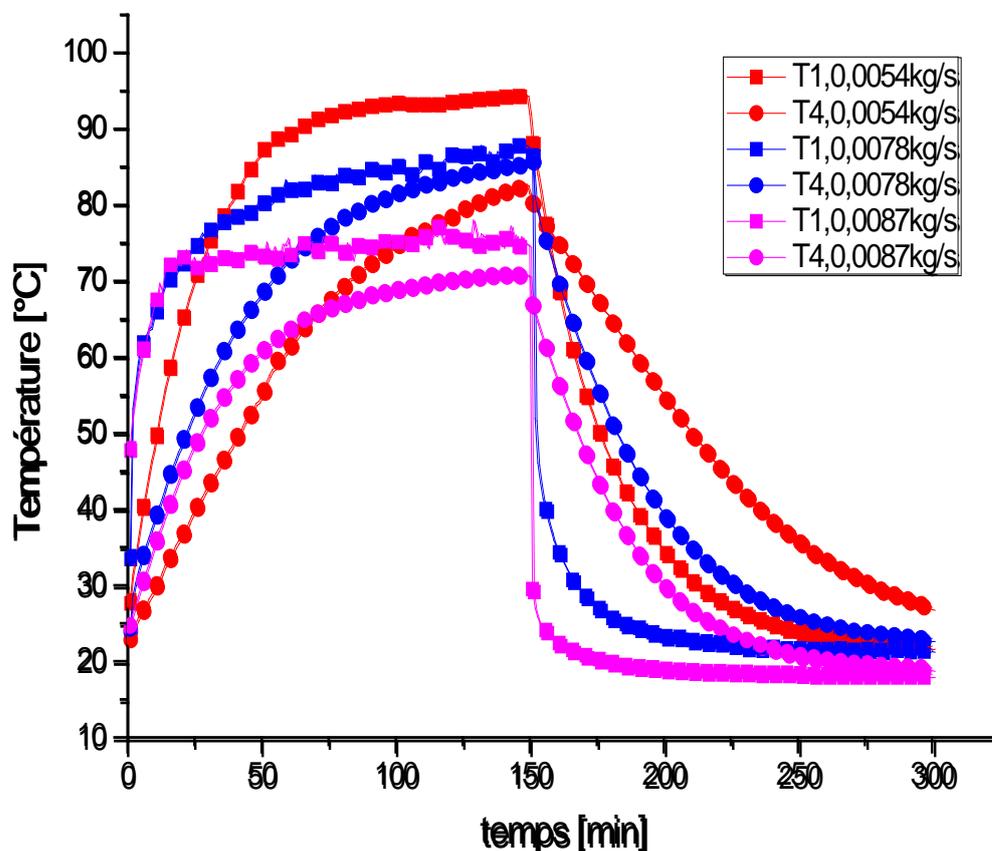


Fig. IV.3. Evolution temporelle de la température du matériau de stockage pour différents débits.

La figure IV.3 montre l'effet du débit d'air (0.0054, 0.0078 et 0.0078kg/s) sur l'évolution de la température du matériau de stockage au niveau de T_1 et T_4 .

Au début de stockage (10 min), les températures au niveau de T_1 augmentent avec l'augmentation du débit et atteignent 47.9, 65.5 et 66.5°C pour un débit de 0.0054, 0.0078 et 0.0078 kg/s, respectivement. Après 40 min, les courbes de T_1 commencent à se stabiliser à des valeurs qui diminuent avec l'augmentation du débit autour de 81, 78.3 et 73.4°C pour 0.0054, 0.0078 et 0.0078 kg/s, respectivement.

On remarque que la température au niveau T_4 pour un faible débit 0.0054kg/s est moins importante par rapport à celle pour le débit 0.0078kg/s. Cela dû à la difficulté de l'évacuation d'air à la sortie du stockeur à cause d'un faible débit.

L'évolution de la température au niveau T_4 pour les débits 0.0078 et 0.0087kg/s montre que l'augmentation du débit diminue le gradient de température dans le milieu de stockage, le stockeur devient plus homogène et atteint le régime permanent plus rapidement. La température d'équilibre diminue avec l'augmentation du débit. Pour un débit élevé (0.0078 kg/s), le stockeur se stabilise après 120min du stockage.

Durant la phase de déstockage, l'augmentation du débit entraîne un déstockage rapide du stockeur. Pour un débit élevé (0.0087 kg/s), le déstockage est plus rapide et le stockeur devient hors service après 250 min (un temps de fonctionnement de 100min).

Donc, la diminution du débit permet d'augmenter la quantité de chaleur stockée et prolonge le processus de stockage.

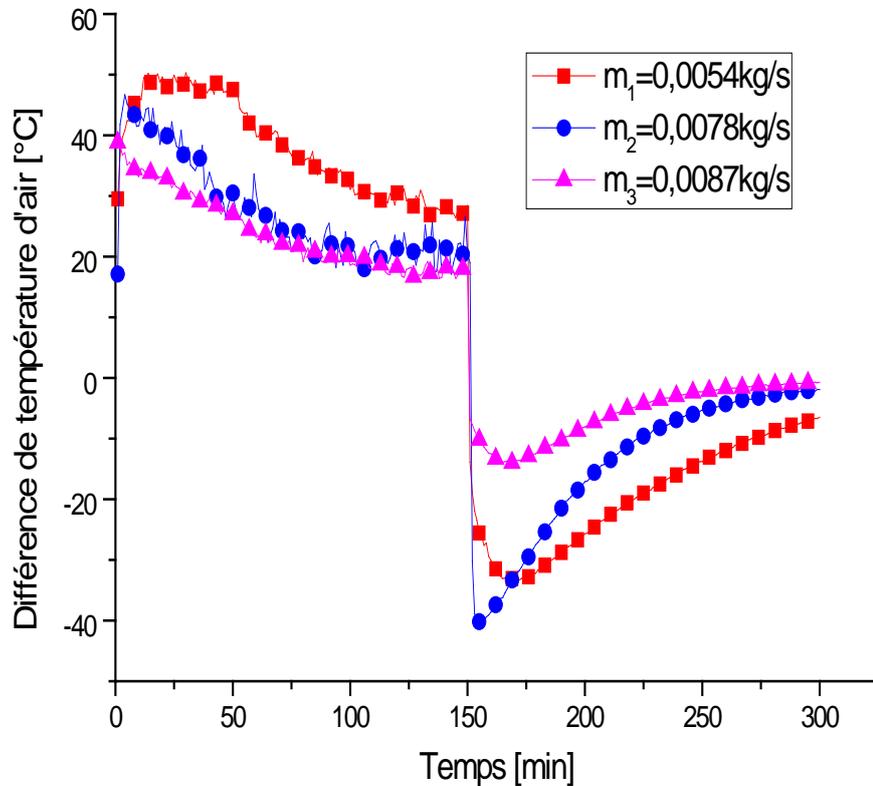


Fig. IV.4. Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différents débits.

La figure IV.4 illustre l'effet du débit sur l'écart de température entre l'entrée et la sortie d'air.

A 150min, l'écart de la température atteint 28.4, 19 et 17.3°C pour les débits de 0.0054, 0.0078 et 0.0087kg/s, respectivement. En constaté d'après le graphe que l'augmentation du débit entraine la diminution de l'écart de température et donc la diminution de la quantité de chaleur stockée. Ainsi, les grands débits diminuent le temps de séjour de l'air dans le stockeur et donc l'échauffement du matériau.

IV.4. Effet de porosité sur le comportement thermique du stockeur

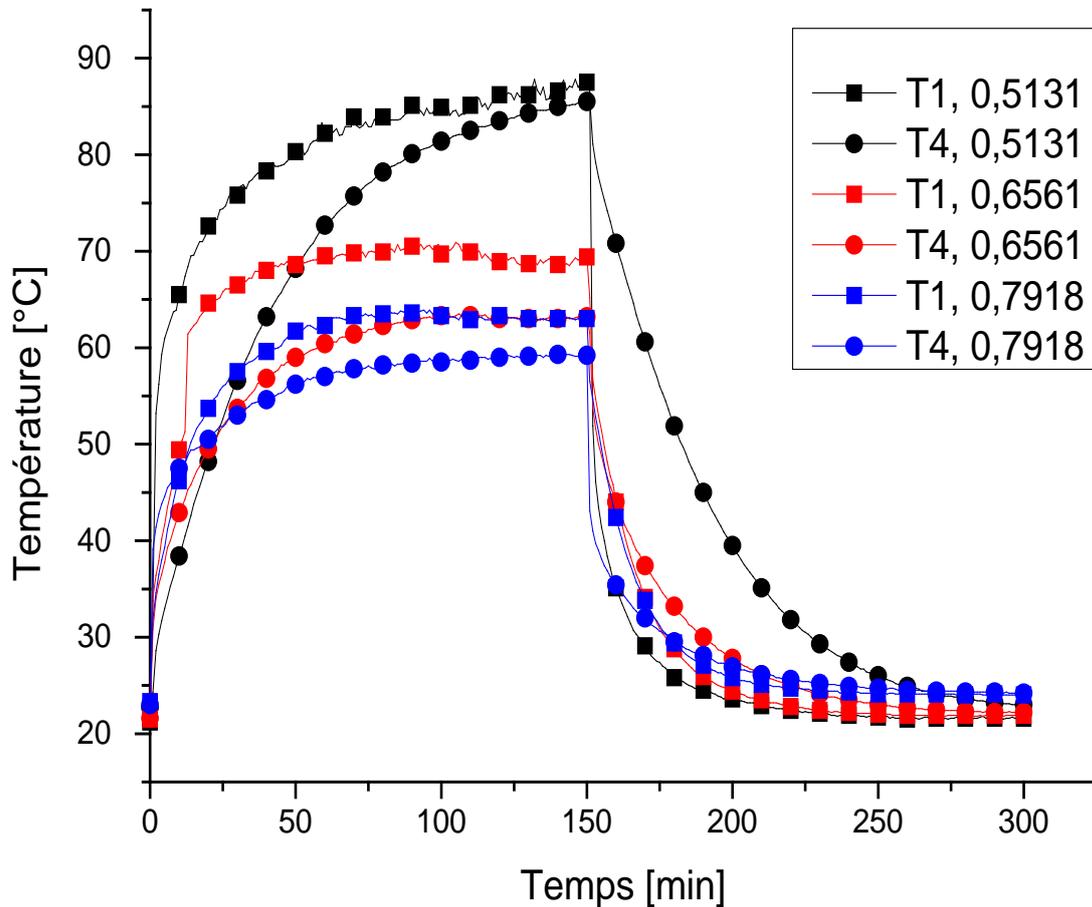


Fig. IV.5. Evolution temporelle de la température du matériau 1 pour un débit de 0.0078kg/s et différentes porosités (0.5131, 0.6561 0.7918).

La figure IV.5 montre l'effet de la porosité sur l'évolution de la température du matériau de stockage au niveau de T₁ et T₄.

Durant toute la phase du stockage, les températures au niveau de T₁ augmentent avec la diminution de la porosité pour atteindre à 150 min les valeurs de 87.8, 69 et 63.1°C pour les porosités de 0.5131, 0.6561 et 0.7918, respectivement. En effet, la diminution de la porosité indique l'augmentation de la masse (quantité de la pierre) entraînant la diminution de l'espace fluide dans le

milieu poreux (lit thermique). Ce phénomène engendre l'augmentation des frottements, diminution de la vitesse d'air et l'augmentation de la surface d'échange.

D'autre part, il est observé que l'augmentation de la porosité (diminution de la masse) accélère le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique, donc l'énergie maximale stockée. Pour une porosité de 0.6561, on remarque que l'évolution de la température au niveau de T_1 et T_4 se stabilise après 50min autour de 70 et 60°C, respectivement.

Durant la phase de déstockage, l'augmentation de la porosité entraîne un déstockage rapide du stockeur. Pour une porosité élevée (0.7918), le déstockage s'arrête et l'énergie récupérée devient presque nulle après 175 min (un temps de fonctionnement de 25min).

La diminution de la porosité et donc l'augmentation de la masse de pierre permet d'augmenter la quantité de chaleur stockée et de prolonger le processus de stockage.

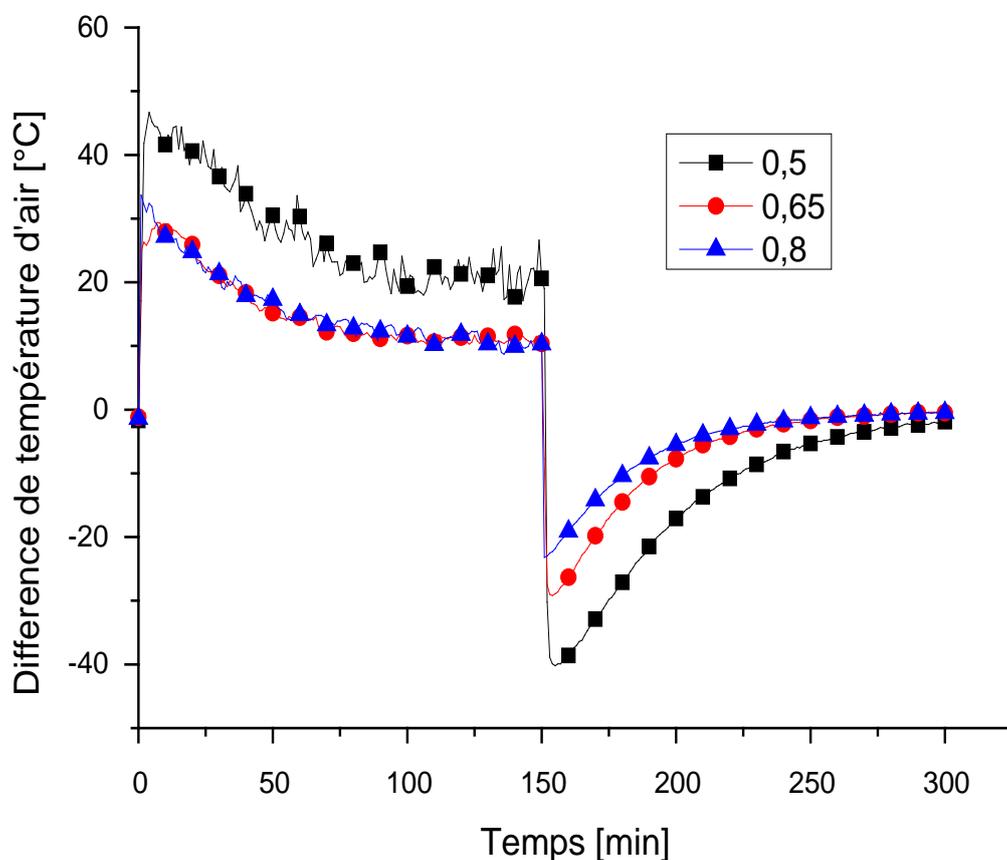


Fig. IV.6. Evolution temporelle de la différence de température d'air pour un débit de 0.0078kg/s et différentes porosités (0.5131, 0.6561, 0.7918).

La figure IV.6 montre l'effet de la porosité (0.5131, 0.665, 0.7918) sur l'écart de température entre l'entrée et la sortie d'air.

On remarque que l'augmentation de la porosité diminue l'écart de la température de l'air. En effet, au début du stockage, à $t= 4$ min, les valeurs maximales atteignent : 46.7, 29.4 et 32.4 °C pour les porosités : 0.5131, 0.6561 et 0.7918, respectivement. Après 150 min (fin du stockage), l'écart de température diminue et atteindre les valeurs suivantes 26.6, 11.2 et 9.6 °C pour 0.5131, 0.6561 et 0.7918, respectivement.

En déstockage, la diminution de la porosité conduit à l'augmentation de la chaleur récupérée. En effet, la diminution de la porosité indique l'augmentation de la masse et donc la quantité d'énergie thermique stockée, l'énergie récupérée augmente.

Cependant, le graphe révèle que l'énergie stockée pour une porosité supérieure à 0.6561 reste presque constante. La faible masse de la pierre n'influe pas considérablement sur le comportement thermique de l'air. Durant la phase de déstockage, l'énergie augmente toujours avec la diminution de la porosité.

IV.5. Effet de la nature du matériau sur le comportement thermique du stockeur

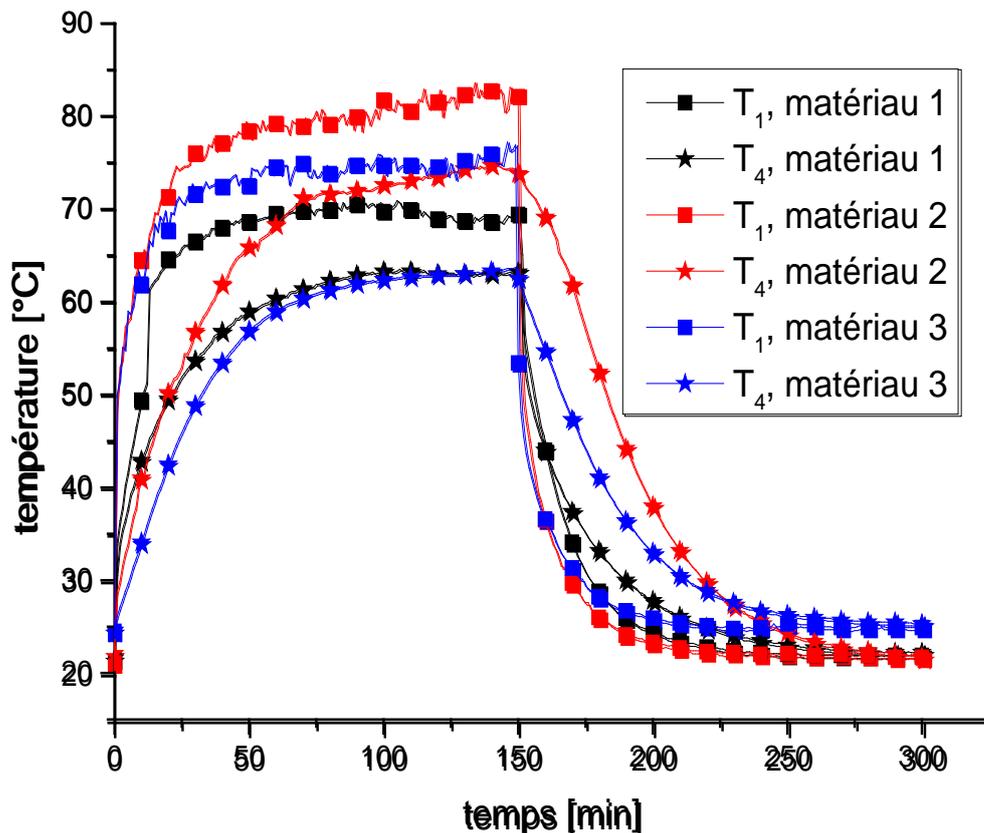


Fig. IV.7. Evolution temporelle de la température pour trois matériaux 1,2 et 3 (débit de 0.0078kg/s et une porosité de 0.6561)

La figure IV.7 montre l'évolution temporelle de la température pour les trois matériaux (1, 2 et 3) au niveau de T₁ et T₄ pour un débit de 0.0078kg/s et une porosité de 0.6561.

Pendant la phase du stockage, on remarque que l'évolution de température la plus importante est celle du matériau 2, ensuite le matériau 3 et enfin le matériau 1. Cela indique que le matériau 2 possède la meilleure capacité calorifique. Après 150 min, les températures au niveau T₁ augmentent pour atteindre les valeurs 69.4, 82.1

et 76.9°C pour les matériaux 1, 2 et 3, respectivement. Pour le matériau1, on observe que la température au niveau de T_1 se stabilise après 55 min autour de 69°C . Le stockeur devient plus homogène et atteint le régime permanent plus rapidement. Ainsi, la température d'équilibre la moins importante est celle du matériau1.

Durant la phase de déstockage, on remarque un déstockage rapide avec les deux matériaux 1 et 3 par rapport au matériau 2. En effet, ce dernier stocke une quantité d'énergie thermique plus importante entraînant un déstockage plus lent. Le stockeur devient hors service après 288 min, pour le matériau 1 un temps de fonctionnement de 138 min.

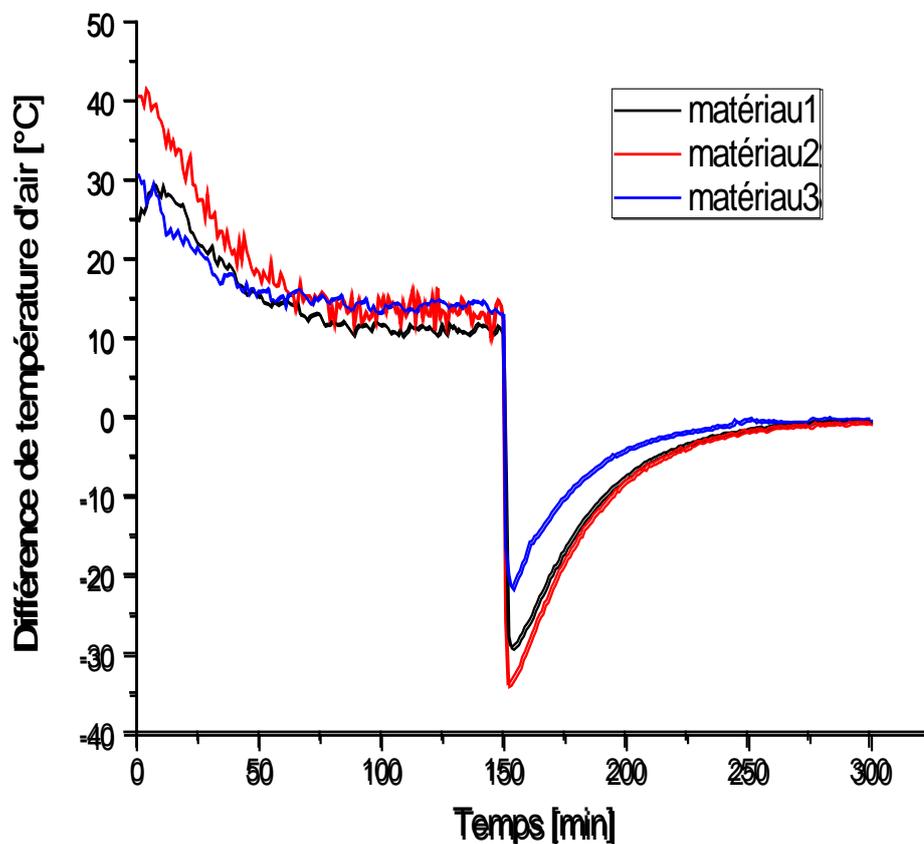


Fig. IV.8. Evolution temporelle de la différence de température d'air pour trois matériaux (1,2 et 3) (débit de 0.0078kg/s et porosité 0.6561).

La figure IV.8 montre l'effet du matériau sur l'écart de température entre l'entrée et la sortie d'air pour un débit de 0.0078kg/s et une porosité 0.65

Au début du stockage, les valeurs maximales de l'écart de température affichées sont 29.4, 41.5 et 30.6 °C pour les matériaux 1, 2 et 3, respectivement. Après, elles diminuent pour atteindre 11.2, 14.2 et 13°C pour les matériaux 1, 2 et 3, respectivement, à la fin de cette phase. L'écart de température le plus important est enregistré pour le matériau 2. Cela confirme les conclusions tirées de la figure IV.7. En déstockage, la chaleur récupérée est plus importante pour le matériau 2 par rapport aux autres. En absolue, les écarts de température atteignent ces valeurs maximales au début de la phase à 29.2, 33.9 et 21.7°C pour les matériaux 1, 2 et 3, respectivement. Puis elles diminuent pour atteindre les valeurs de 0.5, 0.8 et 0.3 pour les matériaux 1, 2 et 3, respectivement, à la fin de déstockage.



Conclusion

Conclusion générale

Notre travail porte sur la réalisation d'un banc d'essai d'un stockeur thermique à chaleur sensible utilisant les pierres de cailloux de mer comme milieu poreux de stockage. L'étude consiste à enregistrer l'évolution temporelle de la température du matériau de stockage et de l'écart de température d'air entre l'entrée et la sortie du stockeur durant le cycle complet stockage-déstockage. Le banc d'essai est sous forme d'un canal rectangulaire en bois. Afin d'analyser les performances thermique du stockeur, nous avons étudié l'influence des paramètres suivants : le débit d'air, la quantité (la masse) de pierres (porosité) et la nature du matériau. Les résultats expérimentaux obtenues permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Durant la phase de stockage, la température du matériau de stockage augmente exponentiellement en fonction du temps.
2. Au début de la phase de stockage, l'écart de température de l'air (fluide caloporteur) atteint son maximum et diminue ensuite jusqu'à la fin du stockage. Durant la phase de déstockage, la température de sortie devient plus importante que celle à l'entrée et l'écart de température évolue négativement.
3. La diminution du débit permet d'augmenter la quantité de chaleur stockée et prolonger le processus de stockage. Par contre, les débits élevés diminuent le gradient de température dans le milieu de stockage et le stockeur évolue de manière plus homogène. Pour un débit de 0.0087 Kg/s, le temps de fonctionnement est réduit à 100 min (1h 40) au lieu de 150 min (2h 30).
4. La diminution de la porosité et donc l'augmentation de la masse de pierre permet de prolonger le processus de stockage et d'augmenter la quantité de chaleur stockée. Donc, l'énergie récupérée augmente.
5. La faible masse de la pierre n'influe pas considérablement sur le comportement thermique de l'air. Pour une porosité de 0.8, le temps de fonctionnement est réduit à 75 min (1h 15) au lieu de 150 min (2h 30).
6. l'évolution de température la plus importante est celle du matériau 2, ensuite le matériau 3 et enfin le matériau 1. Cela indique que le matériau 2 possède la

meilleure capacité calorifique. Pour le matériau 1, faible capacité calorifique le temps de fonctionnement est réduit à 138 min.

En fin, plusieurs points peuvent être développés dans le futur en basant sur ce travail.

Parmi les plus importants en perspectives nous recommandons à :

- déterminer les caractéristiques des matériaux.
- Etudier l'influence de l'inclinaison de stockeur.
- Comparer avec un matériau de changement de phase MCP.
- Comparer avec une simulation numérique.

- [1] **G. Zanganeh, et al**, « Experimental and numerical investigation of combined sensible–latent heat for thermal energy storage at 575 _C and above », (2015).
- [2] **S. Vaivudh, W. Rakwichian et S. Chindaruksa**, « Heat transfer of high thermal energy storage with heat exchanger for solar trough power plant. Energy Conversion and Management », Energy Conversion and Management, (2008).
- [3] **L. El-Kaddadi, et al**, « Experimental study of sensible heat storage/retrieval in/from a Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor », Energy Procedia 139 73-78, (2017).
- [4] **R. Lugolole, et al**, « Thermal performance comparison of three sensible heat thermal energy storage systems during charging cycles », Sustainable Energy Technologies and Assessments, (2018).
- [5] **V. Becattini, et al**, « Expérimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage », Applied Energy 203 373–389, (2017).
- [6] **R. Tiskatine, et al**, « Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants », Solar Energy Materials and Solar Cells, Agadir Maroc, (2017).
- [7] **H. Grirate, N. et al**, « Stability testing of thermal oil in direct contact with rocks used as filler material for thermal energy storage in CSP power plants », Energy Procedia 69 860 – 867, (2015).
- [8] **H. Grirate, et al**, « Experimental and numerical investigation of potential filler materials for thermal oil thermocline storage », Solar Energy 131 260–274, (2016).

- [9] **A. J. Al Edhari, et al**, « EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL ENERGY STORAGE USING NATURAL POROUS MEDIA », Proceedings of the ASME (2017).
- [10] **B. Dhifaoui, et al**, « Experimental study of the dynamic behaviour of a porous medium submitted to wall heat flux in view of thermal energy storage by sensible heat », Science Direct, (2007).
- [11] **M. Abuşka et Seyfi Şevik**, « Experimental performance analysis of sensible heat storage in solar air collector with cherry pits/powder under the natural convection », Solar Energy.
- [12] **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, (2018).
- [13] **S. Kuravi, et al**, « Investigation of a high-temperature packed-bed sensible heat thermal energy storage system with large-sized elements », J. Sol. Energy Eng, Vol.135, N° 4, 041008 (9 pages), (2013).
- [14] **A.F. Mohamed, et al**, « Enhancement of a solar still performance by inclusion the basalt stones as a porous sensible absorber : Experimental study and thermo-economic analysis », Solar Energy Materials and Solar Cells, (2019).
- [15] **W. Braham Chaouch, et al**, « Experimental investigation of an active direct and indirect solar dryer with sensible heat storage for camel meat drying in Saharan environment », Solar Energy, (2018).
- [16] **S. Singh, et al**, « Investigation on transient performance of a large-scale packed-bed thermal energy storage, Applied Energy, (2019).

- [17] **I.O.salyer et a.k.sircar**, «phase change materials for heating and cooling of residential building, proceeding of the 28th intersociety energy conversion engineering conference», reno, nevada,(12-17 aout 1990).
- [18] « Le stockage stationnaire de l'énergie », *Technologies disponibles et recherches du CEA*,Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019, (2012).
- [19] **A. MAHA et AL**, « Thermal testing and numerical simulation of à prototype cellusing light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material », *Energy and building*, volume 38, issue6, (2005).
- [20] **Telkes et Al Telkes**, « Trombe wall with phase change storage material ». *Proceedings of the 2nd national passive solar conference*. Philadelphia, PA, USA, (1978).
- [21] **A. Akrouche**, « Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase », Soutenu le :(29 Octobre 2011).
- [22] **A. TYAGI, et al**, « Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materails and Applications ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:318-345, 2009.
- [23] **MAZMAN**, « Latent Heat Storage and Applications ». PhD Thesis, Ç.Ü. Institute ofNatural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish) 110, (2006).
- [24] **DONÇER ET D.ROSEN**, « Therma lEnergy Storage Systems and Applications », Wiley and Sons Publishing Company, New York,USA, (2002).
- [25] **K. Hollands et M. Lightstone**, « A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems », *Solar energy*, vol. 43, pp. 97-105, (1989).

- [26] **S. Kalaiselvam et R. Parameshwaran**, « Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability : Systems Design, Assessment and Applications », Elsevier, (2014).
- [27] **Thermal energy storage**, Technology Brief. [Online]. Available : <http://www.irena.org/Publications>, (10/03/2015).
- [28] **N. Siegel, M. Gross, C. Ho, T. Phan**, « Physical Properties of Solid Particle Thermal Energy Storage Media for Concentrating Solar Power Applications," Energy Procedia, vol. 49, pp. 1015-1023, (2014).
- [29] **M. Hadjieva, et al**, « Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage », Renewable Energy, vol. 19, pp. 111-115, (2000).
- [30] **S. Kalaiselvam et R. Parameshwaran**, « Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability : Systems Design, Assessment and Applications », Elsevier, (2014).
- [31] **N. MAHFOUDI**, « Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide », Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, (2016).
- [32] **H.Mehling et L.F. Cabeza**. « Heat and cold storage with PCM », Springer – Verlag Berlin Heidelberg ed, (2008).
- [33] **M. Medrano, et al**, « State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation ». Part 2-Case studies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 1, pp. 56-72, (2010).
- [34] **D. Laing, et al**, « Thermal energy storage for direct steam generation », Sol. Energy, vol. 85, no. 4, pp. 627-633, (2011).

- [35] **A. SOUPART-CARON**, « Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase », Thèse doctorat ; Université Grenoble ALPES, (2006).